



universidad
de león

Tesis Doctoral

Impacto de las estrategias de proceso y
postproceso en la calidad de piezas de
acero inoxidable 17-4PH fabricadas
mediante fusión selectiva por láser

Sara Giganto Fernández

Directores:

Susana Martínez Pellitero

Joaquín Barreiro García

Programa de doctorado en Ingeniería de producción y computación

León, junio de 2022



A mi familia

Agradecimientos

La realización de la presente tesis doctoral no habría sido posible sin las personas a las que quiero dedicar estas palabras de agradecimiento.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis directores de tesis, Susana Martínez y Joaquín Barreiro, por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo de investigación, por su dedicación, por dirigirme y aconsejarme durante todo este tiempo y, en especial, por confiar en mí. Susana te agradezco enormemente todo el tiempo que me has dedicado y los valiosos consejos que me has dado, gracias por enseñarme y ayudarme con tanta paciencia. También quiero darte las gracias por haberme brindado la oportunidad de realizar mi TFG contigo, puesto que ese fue el comienzo de todo, y desde ese mismo momento siempre has estado ahí para apoyarme. Joaquín, gracias por transmitirme tranquilidad en todo momento, por tu apoyo, por los valiosos consejos fruto de tu gran experiencia y por ayudarme siempre que lo he necesitado. Gracias, no solo por ser mis directores, sino también mis compañeros y amigos, gracias por pensar en mí y contar conmigo.

Además, quiero agradecer la grata acogida desde mis inicios a todos mis compañeros del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Joaquín, Susana, Anabel, Pablo R. G., Geles y Pablo R. M. Gracias por vuestros consejos, conocimiento, colaboración y apoyo, ya que de una u otra forma me habéis ayudado en el desarrollo de esta tesis. También agradecer, a mi compañero Javi, por su disposición para ayudarme y su apoyo en todo momento. Así como al resto de compañeros que forman parte del grupo de investigación TAFI y de la UFI3D. Soy muy afortunada de contar con todos vosotros, no solo en el ámbito universitario sino también en el personal.

También agradecer a los investigadores que hicieron posibles dos estancias de investigación enriquecedoras para el desarrollo de esta tesis. Gracias a Eduardo Cuesta, por transmitirme su conocimiento y experiencia en metrología durante mi estancia en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación en Gijón, y a Paola Leo, por proporcionarme su experiencia y conocimientos en el ámbito de la metalografía durante mi estancia en la Universidad del Salento en Lecce (Italia).

Mis más sinceros agradecimientos a todos los coautores de las publicaciones expuestas como divulgación de los resultados en este trabajo de investigación, gracias por vuestra colaboración y el esfuerzo dedicado.

Asimismo, quiero agradecer a las personas, que ajenas al desarrollo de este trabajo de investigación, me han ayudado indirectamente. Gracias a mis amig@s de toda la vida, a mi cuadrilla y a mis chicas de voley, por su comprensión y sus ánimos durante todo este tiempo. También a mis compis de triatlón, no solo por nuestro interés común en el deporte, sino también por compartir nuestras preocupaciones y alegrías del día a día.

Finalmente, dar las gracias de corazón a mi familia, a todos y cada uno de los miembros que la componen. Gracias por tantos momentos felices, por vuestro afecto y vuestro cariño infinito. Especialmente a mi hermana Marta y a mis padres, Fely y Basilio, por su apoyo incondicional, su gran confianza en mí, por su cariño y su comprensión, por ser mi fuente de energía y por estar siempre ahí. Sin ellos nada de esto sería posible, todas las palabras de agradecimiento se quedan cortas.

Gracias

Índice General

Índice General.....	I
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas	XVII
Acrónimos	XXI
Resumen.....	XXIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS	2
1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	4
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. FABRICACIÓN ADITIVA.....	10
2.1.1. Técnicas de Fabricación Aditiva.....	15
2.1.2. Fabricación Aditiva en metal.....	18
2.2. FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLM)	20
2.2.1. Polvo metálico	22
2.2.2. Parámetros del proceso SLM.....	28
2.2.3. Atmósfera de fabricación SLM	39
2.2.4. Diseño de piezas para la fabricación SLM	39
2.2.5. Postprocesos SLM.....	48
2.3. ÍNDICES DE CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM	56
2.4. INSPECCIÓN SLM.....	59
2.4.1. Inspección de piezas fabricadas por SLM.....	59
2.4.2. Inspección del proceso SLM	62
3. MATERIALES Y MÉTODOS	67
3.1. EQUIPOS PARA LA FABRICACIÓN SLM.....	69
3.1.1. Material de partida.....	69
3.1.2. Impresora SLM	69

3.1.3.	Tamizadora automática.....	73
3.2.	EQUIPOS PARA LOS POSTPROCESOS SLM	74
3.2.1.	Máquina de electroerosión por hilo	74
3.2.2.	Arenadora.....	75
3.2.3.	Hornos	76
3.3.	EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD	78
3.3.1.	Equipos para la caracterización del material.....	78
3.3.2.	Equipos para los ensayos mecánicos.....	84
3.3.3.	Equipo para el análisis de la textura superficial.....	86
3.3.4.	Equipos para el análisis geométrico y dimensional.....	87
3.3.5.	Softwares para el análisis geométrico y dimensional.....	93
4.	AJUSTE E INFLUENCIA DE PARÁMETROS SLM.....	95
4.1.	INTERÉS DEL ESTUDIO	96
4.2.	AJUSTE DE LA POTENCIA DEL LÁSER.....	97
4.2.1.	Conclusiones del ajuste de la potencia del láser	100
4.3.	AJUSTE DEL DESENFUQUE DEL LÁSER.....	101
4.3.1.	Microestructura	102
4.3.2.	Defectos	108
4.3.3.	Rugosidad	109
4.3.4.	Dureza.....	110
4.3.5.	Resistencia a la tracción	111
4.3.6.	Conclusiones del ajuste del desenfoque del láser	112
4.4.	EFEECTO DE LA ESTRATEGIA DE ESCANEEO	114
4.4.1.	Densidad/porosidad	116
4.4.2.	Microestructura	119
4.4.3.	Dureza.....	120
4.4.4.	Resistencia a la tracción	121
4.4.5.	Rugosidad	123
4.4.6.	Calidad geométrica y dimensional.....	124
4.4.7.	Conclusiones del efecto de la estrategia de escaneo	127

4.5.	DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	129
5.	INFLUENCIA DEL RECICLAJE DEL POLVO.....	131
5.1.	INTERÉS DEL ESTUDIO	132
5.2.	CARACTERIZACIÓN DEL POLVO	133
5.2.1.	Morfología.....	134
5.2.2.	Composición química	140
5.2.3.	Microestructura	146
5.2.4.	Conclusiones de la caracterización del polvo	147
5.3.	CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM	148
5.3.1.	Densidad/porosidad.....	149
5.3.2.	Rugosidad	151
5.3.3.	Microestructura y microdureza.....	152
5.3.4.	Resistencia a la tracción	155
5.3.5.	Dureza.....	157
5.3.6.	Conclusiones de la calidad de las piezas SLM.....	157
5.4.	DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	159
6.	INFLUENCIA DEL DISEÑO PARA FABRICACIÓN SLM.....	161
6.1.	INTERÉS DEL ESTUDIO.....	162
6.2.	POSICIÓN DE PIEZAS EN LA PLACA BASE	163
6.2.1.	Análisis geométrico.....	164
6.2.2.	Análisis dimensional.....	166
6.2.3.	Conclusiones de la posición de las piezas en la placa base	169
6.3.	DISEÑO DE GEOMETRÍAS INCLINADAS	171
6.3.1.	Comparación 3D	174
6.3.2.	Análisis geométrico.....	176
6.3.3.	Análisis dimensional.....	178
6.3.4.	Conclusiones del diseño de geometrías inclinadas.....	181
6.4.	DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	183
7.	INFLUENCIA DE LOS POSTPROCESOS SLM	185
7.1.	INTERÉS DEL ESTUDIO	186

7.2.	PROCESO MECÁNICO DE ARENADO.....	187
7.2.1.	Mejora de la rugosidad superficial.....	187
7.2.2.	Mejora de la porosidad externa.....	190
7.2.3.	Influencia en la calidad geométrica y dimensional.....	191
7.2.4.	Conclusiones de la aplicación del arenado.....	198
7.3.	TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	200
7.3.1.	Alivio de las tensiones residuales.....	200
7.3.2.	Mejora de las propiedades mecánicas.....	203
7.3.3.	Reducción de la porosidad.....	206
7.3.4.	Conclusiones de la aplicación de tratamientos térmicos.....	208
7.4.	DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	210
8.	OPTIMIZACIÓN DE LA INSPECCIÓN ÓPTICA DE PIEZAS SLM.....	211
8.1.	INTERÉS DEL ESTUDIO.....	212
8.2.	SISTEMAS DE DIGITALIZACIÓN 3D.....	213
8.2.1.	Influencia del software de metrología utilizado.....	220
8.2.2.	Comparación 3D.....	221
8.2.3.	Análisis geométrico.....	223
8.2.4.	Análisis dimensional.....	225
8.2.5.	Comparación del tiempo completo de inspección.....	227
8.2.6.	Conclusiones de la influencia de los sistemas ópticos.....	229
8.3.	INFLUENCIA DEL FILTRADO DE PUNTOS.....	230
8.3.1.	Equivalencia de filtros.....	231
8.3.2.	Análisis geométrico.....	232
8.3.3.	Análisis dimensional.....	234
8.3.4.	Conclusiones de la influencia del filtrado de puntos.....	235
8.4.	INFLUENCIA DE LOS POSTPROCESOS SLM.....	236
8.4.1.	Análisis geométrico.....	237
8.4.2.	Análisis dimensional.....	238
8.4.3.	Conclusiones de la influencia de los postprocesos SLM.....	239
8.5.	DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	241

9. CONCLUSIONES GENERALES	243
9.1. CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES.....	244
9.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	248
9.3. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS	250
Normas	253
Referencias	255

Índice de Figuras

Figura 1.1. Esquema cronológico de los principales estudios realizados en la presente tesis doctoral clasificados en función de los capítulos.....	7
Figura 2.1. Las ocho etapas de los procesos de AM.....	11
Figura 2.2. Procesos de AM de una sola o varias etapas (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017).	17
Figura 2.3. Diagrama esquemático del proceso de AM basado en metal SLM.....	20
Figura 2.4. Parámetros del proceso SLM. [Figura basada en (Yap <i>et al.</i> , 2015)]......	28
Figura 2.5. Piscina de fusión resultante de los dos modos típicos de transferencia de calor: penetración (izquierda) y conducción (derecha) (Metelkova <i>et al.</i> , 2018).....	30
Figura 2.6. Forma de la piscina de fusión en función de la naturaleza del haz láser: divergente (izquierda) y convergente (derecha) (Metelkova <i>et al.</i> , 2018).	32
Figura 2.7. Estrategia de escaneo láser normal	33
Figura 2.8. Estrategia de escaneo láser en islas: (a) hexagonal y (b) en forma de tablero de ajedrez. 36	
Figura 2.9. Estrategia de escaneo láser concéntrica.....	37
Figura 2.10. Agujeros horizontales autosoportados (Thomas, 2009).....	40
Figura 2.11. Diseño de chaflán (Thomas, 2009).....	40
Figura 2.12. Optimización topológica en fabricación SLM (Vaverka, Koutny y Palousek, 2019).	42
Figura 2.13. Estructuras de soportes en forma de: (a) celosía (G. Strano <i>et al.</i> , 2013), (b) «Y» normal e invertida (Gan y Wong, 2016).	44
Figura 2.14. Estructuras de soportes SLM implementadas en softwares comerciales (Leary <i>et al.</i> , 2019).	45
Figura 2.15. Relación entre la calidad y la orientación (ángulo) de las superficies fabricadas por SLM (Thomas, 2009).	46
Figura 2.16. Tensiones y deformaciones inducidas durante (a) el calentamiento del haz láser y (b) el enfriamiento de la zona irradiada (Kruth <i>et al.</i> , 2012).	52
Figura 2.17. Eliminación de las imperfecciones internas de las piezas tras la aplicación del tratamiento HIP (Tammam-Williams <i>et al.</i> , 2016).	54
Figura 2.18. Combinación de diferentes tratamientos térmicos en un único ciclo HIP (Quintus, 2018).	54
Figura 2.19. Marco de normas acordado por ASTM F42 e ISO TC 261 para el desarrollo futuro de normas de fabricación aditiva (ASTM y ISO, 2017).	57

Figura 2.20. Representación esquemática de la medición de una misma superficie con diferentes sistemas: (a) de contacto, (b) óptico y (c) de tomografía computarizada. Las líneas rojas representan los puntos extraídos de la superficie medida (Carmignato y Savio, 2011).	60
Figura 2.21. Precisión típica de diferentes técnicas de medición óptica activa en función de la distancia operativa (Liu <i>et al.</i> , 2020).	61
Figura 2.22. Valores típicos de tolerancias frente a las dimensiones de piezas con forma libre para diversas aplicación industriales (Savio, De Chiffre y Schmitt, 2007).	61
Figura 2.23. Generación de señales durante la formación de las piscinas de fusión en el proceso de fabricación SLM (Spears y Gold, 2016).	62
Figura 3.1. Impresora de metal ProX DMP 100 – disponible en la UFI3D (ULE).	71
Figura 3.2. Generador de nitrógeno Nitrocraft NCP 016 OF – disponible en la UFI3D (ULE).	72
Figura 3.3. Tamizadora automática PX-BOX (3DSystems, 2012) – disponible en la UFI3D (ULE).	73
Figura 3.4. Máquina de electroerosión por hilo Prima E 250 – disponible en la UFI3D (ULE).	74
Figura 3.5. Bobina de hilo de la máquina de electroerosión.	75
Figura 3.6. Arenadora Sablex S2 – disponible en la UFI3D (ULE).	75
Figura 3.7. Corindón blanco (ABShot, 2022).	75
Figura 3.8. Horno eléctrico de mufla 12PR/400 – disponible en la UFI3D (ULE).	76
Figura 3.9. Horno de mufla de atmósfera controlada 12PR400CCH – disponible en la UFI3D (ULE).	77
Figura 3.10. Horno HIP – disponible en la empresa Grupo Hedisa (León).	77
Figura 3.11. Cortadora metalográfica – disponible en la UFI3D (ULE).	78
Figura 3.12. Material para encapsular.	79
Figura 3.13. Pulidora metalográfica Teknipol – disponible en la UFI3D (ULE).	79
Figura 3.14. Material para atacar químicamente.	79
Figura 3.15. Balanza de precisión CB-Complet – disponible en la UFI3D (ULE) – durante el proceso de medición de una muestra SLM: (a) en aire y (b) sumergida en agua.	80
Figura 3.16. Macroscopio Leica Z16 APO – disponible en la UFI3D (ULE).	80
Figura 3.17. Microscopio óptico BHM-312 L – disponible en la UFI3D (ULE).	81
Figura 3.18. Microscopio metalúrgico invertido Epiphot 200 – disponible en el <i>Laboratorio di Metallurgia dell'Università del Salento</i>	81
Figura 3.19. SEM JSM-6480LV – disponible en el LTI (ULE).	82
Figura 3.20. Software JEOL Scanning Electron Microscope – disponible en el LTI (ULE).	82
Figura 3.21. Difractómetro Discover D8 (Bruker, 2022) – disponible en el LTI (UVA).	84

Figura 3.22. Microdurómetro HMV-2000 – disponible en la UFI3D (ULE).....	84
Figura 3.23. Durómetro automático Wiki 200 JS – disponible en el <i>Laboratorio di Metallurgia dell'Università del Salento</i>	84
Figura 3.24. Máquina universal de ensayos ME-402/5 – disponible en la UFI3D (ULE).	85
Figura 3.25. Extensómetro axial para ensayos de tracción (Servosis, 2018) – disponible en la UFI3D (ULE).....	85
Figura 3.26. Diseño de la probeta SLM para el ensayo de tracción.....	86
Figura 3.27. Rugosímetro SJ-500P – disponible en la UFI3D (ULE).	87
Figura 3.28. CMM DEA Global Image – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI)..	88
Figura 3.29. Proceso de calibración de la sonda táctil Renishaw SP25.	88
Figura 3.30. Proceso de calibración del sensor de escaneo láser HP-L-10.6 – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).....	89
Figura 3.31. Romer Absolute Arm 7525 SI (con RS3) (Hexagon, 2015) – disponible en la empresa DOGRAM (Asturias).....	90
Figura 3.32. Escáner láser HandySCAN 700 (Creaform, 2015) – disponible en la empresa TECVECO3D (Asturias).....	90
Figura 3.33. Patrón de franjas de luz azul.	91
Figura 3.34. Escáner de luz estructurada Breuckmann smartSCAN ^{3D} -HE – disponible en la UFI3D (ULE).....	91
Figura 3.35. Sensor de holografía conoscópica ConoScan 4000 (Optimet, 2012) – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).	92
Figura 3.36. Sensor ConoProbe con lente objetivo de 100 mm (Optimet, 2012) – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).	93
Figura 3.37. Softwares para el análisis de los datos de medición 3D.	94
Figura 4.1. Muestras impresas con una potencia del láser de: 43 W, 42 W, 41 W, 40 W, 39 W y 38 W (de izquierda a derecha respectivamente).	97
Figura 4.2. Mosaico de imágenes del SEM de la superficie superior de las muestras impresas con una potencia del láser de: (a) 38,5 W y (b) 39 W.	98
Figura 4.3. Ejemplos de los diferentes tipos de partículas: (a) tipo A, (b) tipo B y (c) tipo C.	98
Figura 4.4. Número y diámetro promedio de las partículas: (a) tipo A y (b) tipo B, de las muestras impresas con una potencia del láser de 38 W, 38,5 W y 39 W.	99
Figura 4.5. Huella en la superficie tras la realización del ensayo de dureza.	100
Figura 4.6. Resultados promedio de dureza de las muestras impresas con una potencia del láser de 38 W, 38,5 W y 39 W.	100
Figura 4.7. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM con diferentes valores de desenfoque del láser (ajuste del parámetro).	101

Figura 4.8. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de las secciones T, L ₁ y L ₂ de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} .	102
Figura 4.9. Imágenes del microscopio óptico con x500 aumentos de la microestructura de la sección T de las muestras: (a) D _{d1} , (b) D ₀ y (c) D _{c1} .	103
Figura 4.10. Resultado esquemático del análisis XRD realizado en la sección T de las muestras: (a) D _{d1} , (b) D ₀ y (c) D _{c1} .	104
Figura 4.11. Imágenes del TEM de la microestructura de la sección T de la muestra D ₀ , donde se observa: (a) la presencia de austenita en el borde y martensita en el centro de las piscinas de fusión, (b) la coexistencia de listones de martensita y granos de austenita, (c) los listones de martensita.	105
Figura 4.12. Distribución promedio del diámetro equivalente de grano de las secciones L ₁ y L ₂ de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} .	107
Figura 4.13. Imágenes del microscopio óptico de polvo sin fundir de la sección T de la muestra D _{d1} (a) antes y (b) después del ataque químico.	108
Figura 4.14. Distribución promedio del número de defectos según su tamaño en las secciones T, L ₁ y L ₂ de las muestras: (a) D _{d1} , (b) D ₀ y (c) D _{c1} .	109
Figura 4.15. Distribución promedio del número de defectos según su circularidad de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} en las secciones: (a) T, (b) L ₁ y (c) L ₂ .	109
Figura 4.16. Resultados de rugosidad (R _a y R _t) de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} .	110
Figura 4.17. Resultados promedio de dureza de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} .	110
Figura 4.18. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1} (curva tensión-deformación, R _m , R _p y Z).	111
Figura 4.19. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con aumentos de x200 ((a) D _{d1} , (c) D ₀ y (e) D _{c1}) y x1.000 ((b) D _{d1} , (d) D ₀ y (f) D _{c1}).	112
Figura 4.20. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM con diferentes estrategias de escaneo láser.	114
Figura 4.21. Estrategias de escaneo láser utilizadas en la fabricación SLM de las piezas del estudio: (a) normal, (b) concéntrica y (c) hexagonal.	115
Figura 4.22. Conjunto de piezas impresas en SLM con la estrategia de escaneo láser: (a) normal, (b) concéntrica y (c) hexagonal.	116
Figura 4.23. Resultados de porosidad de las muestras N, C y H (P _i : porosidad interna; P _e : porosidad externa).	116
Figura 4.24. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras N, C y H.	117
Figura 4.25. El poro de mayor tamaño (ubicado en la sección L ₂ de la muestra C).	117
Figura 4.26. Número promedio de poros en función de su tamaño en las muestras N, C y H.	118
Figura 4.27. Circularidad promedio de los poros en función de su tamaño en las muestras N, C y H.	119

Figura 4.28. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de las secciones transversal (T_1) y lateral (L_1) de las muestras N, C y H.....	119
Figura 4.29. Imágenes del microscopio óptico de la microestructura de la sección transversal (T_1) de la muestra C, tomadas con: (a) x50 y (b) x500 aumentos.	120
Figura 4.30. Resultados promedio de dureza de las muestras N, C y H.....	121
Figura 4.31. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras N, C y H (curva tensión-deformación, R_m , R_p y Z).	122
Figura 4.32. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con aumentos de x200 ((a) N, (c) H y (e) C) y x1.000 ((b) N, (d) H y (f) C).	123
Figura 4.33. Resultados de rugosidad (R_a y R_t) de las superficies (a) superior y (b) lateral de las muestras N, C y H.....	124
Figura 4.34. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las muestras N, C y H en la placa base.....	124
Figura 4.35. Resultados promedio del análisis geométrico de las muestras N, C y H.	125
Figura 4.36. Resultados promedio del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H.	126
Figura 5.1. Metodología de la caracterización del polvo en diferentes estados de reciclaje.....	133
Figura 5.2. Imágenes del SEM con x750 aumentos del polvo en los diferentes estados de reciclaje: (a) P_0 , (b) P_{10} , (c) P_{20} y (d) P_R	135
Figura 5.3. PSD de cada estado de polvo (P_0 , P_{10} , P_{20} y P_R).	136
Figura 5.4. Imágenes del SEM con x2.200 aumentos de las características morfológicas peculiares del polvo P_0 , partículas: (a) alargadas, (b) unidas, (c) fracturadas, (d) con textura rugosa.	137
Figura 5.5. Imágenes del SEM con x1.500 y x1.100 aumentos de las características morfológicas del polvo P_{10} : (a) partículas irregulares o alargadas, (b) partículas unidas, (c) acumulaciones de partículas, (d) partículas con textura cerebelosa.....	138
Figura 5.6. Imágenes del SEM con x1.200 y x900 aumentos de las características morfológicas del polvo P_{20} : (a) partículas irregulares o alargadas, (b) partículas unidas, (c) acumulaciones de partículas, (d) partículas con textura cerebelosa.....	138
Figura 5.7. Imágenes del SEM con diferentes aumentos (x250, x300, x330, x750 y x850) de las características morfológicas del polvo P_R : (a) partículas grandes con textura suave o cerebelosa; partículas con forma (b) enrollada o (c) irregular deformadas por la acción del rodillo; (d) partículas unidas; (e) y (f) acumulaciones de partículas de diferentes tamaños; (g) y (h) partículas con proyecciones fundidas adheridas; (i) partículas con satélites adheridos.	139
Figura 5.8. Imágenes del macroscopio con x80 aumentos del polvo en los diferentes estados de reciclaje: (a) P_0 , (b) P_{10} , (c) P_{20} y (d) P_R	140
Figura 5.9. PSD conjunta de los estados de polvo P_0 , P_{10} y P_{20}	141
Figura 5.10. Mapa de colores de la composición química de partículas de polvo P_{10} correspondientes a los subgrupos G3-A, G3-B y G3-C.	142

Figura 5.11. Mapa de colores de la composición química de partículas de polvo P ₁₀ y P ₂₀ correspondientes al subgrupo G3-C con concentraciones de oxígeno localizadas.	143
Figura 5.12. Imagen del SEM con x4.500 aumentos y análisis EDS de una partícula de polvo P ₁₀ correspondiente al subgrupo G3-C con concentración de óxidos localizada.....	144
Figura 5.13. Imágenes del SEM y análisis EDS de partículas de polvo: (a) P ₁₀ y (b) P ₂₀	145
Figura 5.14. Imágenes del SEM de la microestructura de partículas de polvo: (a) P ₀ , (b) P ₁₀ y (c) P ₂₀	146
Figura 5.15. Resultados esquemáticos del análisis XRD del polvo P ₀ y P ₂₀	146
Figura 5.16. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM a partir de polvo en diferentes estados de reciclaje.	148
Figura 5.17. Resultados de porosidad de las muestras P ₀ y P ₂₀ (P _i : porosidad interna; P _e : porosidad externa).	149
Figura 5.18. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras P ₀ y P ₂₀	150
Figura 5.19. Circularidad promedio de los poros en función de su tamaño en las muestras P ₀ y P ₂₀	150
Figura 5.20. Número promedio de poros en función de su tamaño en las muestras P ₀ y P ₂₀	151
Figura 5.21. Resultados de rugosidad (R _a y R _t) de las muestras P ₀ y P ₂₀	152
Figura 5.22. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de la sección transversal (T ₁) y lateral (L ₁) de las muestras P ₀ y P ₂₀	153
Figura 5.23. Resultado esquemático del análisis XRD realizado en la cara superior de las muestras: (a) P ₀ y (b) P ₂₀ ; y en la cara lateral de las muestras: (c) P ₀ y (d) P ₂₀	154
Figura 5.24. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras P ₀ y P ₂₀ (curva tensión-deformación, R _m , R _p y Z).	156
Figura 5.25. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con x200 ((a) P ₀ y (b) P ₂₀) y x1.000 ((c) P ₀ y (d) P ₂₀) aumentos. Estricción debida a la fractura por tracción de las muestras: (e) P ₀ y (f) P ₂₀	157
Figura 5.26. Resultados promedio de dureza de las muestras P ₀ y P ₂₀	157
Figura 6.1. Metodología de evaluación geométrica y dimensional del posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación SLM.	163
Figura 6.2. Distribución de los cubos de la pieza patrón según los ejes X e Y de la máquina SLM. .	164
Figura 6.3. Distribución de la planitud de los cubos de la pieza patrón según sus caras XZ, YZ y XY.	165
Figura 6.4. Distribución de paralelismo de la cara XY de los cubos respecto al plano base.	166
Figura 6.5. Distribución de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según los ejes X, Y y Z.	167

Figura 6.6. Metodología de la evaluación geométrica y dimensional de diferentes geometrías fabricadas por SLM en planos inclinados.....	171
Figura 6.7. Designación de los planos de la pieza patrón de superficies inclinadas y escalones (SS).	172
Figura 6.8. Diseño CAD de las piezas patrón de geometrías interiores y exteriores fabricadas sobre planos inclinados a: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° y (d) 45°.....	173
Figura 6.9. Designación de las geometrías de la pieza patrón de 15°.	173
Figura 6.10. Piezas patrón tras el proceso de fabricación SLM.....	173
Figura 6.11. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las piezas patrón: (a) SS, (b) 0°, (c) 15°, (d) 30° y (e) 45°.	175
Figura 6.12. Error de forma de los planos inclinados de la pieza patrón SS.	176
Figura 6.13. Error de forma de los planos de la pieza patrón SS: (a) 0° y (b) 90°.	176
Figura 6.14. Error de forma de las geometrías exteriores: (a) planos, (b) semiesfera y cilindro.	177
Figura 6.15. Error de forma de las geometrías interiores: (a) planos, (b) semiesfera y cilindro.	178
Figura 6.16. Superficies con pendiente negativa a 45° de las geometrías interiores y exteriores de la pieza patrón de 45°.....	178
Figura 6.17. (a) Dimensiones representadas sobre el CAD nominal y (b) desviaciones en la altura y el ancho de los escalones de la pieza patrón SS.	179
Figura 6.18. Desviaciones dimensionales de los cubos de las piezas patrón de geometrías inclinadas.	180
Figura 6.19. Desviaciones dimensionales de las semiesferas y cilindros de las piezas patrón de geometrías inclinadas.....	180
Figura 7.1. Metodología de optimización del postproceso de arenado (presión y tiempo) en función del acabado superficial.....	187
Figura 7.2. (a) Utillaje utilizado en el proceso de optimización del arenado. (b) Pieza encajada en el utillaje durante el proceso de medición de la rugosidad.....	188
Figura 7.3. Resultados promedio de rugosidad (R_a) de las muestras sometidas a los diferentes parámetros de arenado e impresas con la estrategia de escaneo: (a) hexagonal y (b) normal.	189
Figura 7.4. Resultados promedio de rugosidad (R_t) de las muestras sometidas a los diferentes parámetros de arenado e impresas con la estrategia de escaneo: (a) hexagonal y (b) normal.	189
Figura 7.5. Imágenes del macroscopio con x80 aumentos de la superficie superior y lateral de un cubo en los estados: (a) F y (b) A.	190
Figura 7.6. Diseño CAD pieza patrón esferas.	192
Figura 7.7. Metodología de evaluación de la calidad geométrica y dimensional de las piezas SLM sometidas al postproceso mecánico de arenado.	192

Figura 7.8. Distribución de la planitud de los cubos de la pieza patrón según sus caras XZ, YZ y XY en los estados: (a) F y (b) A.	193
Figura 7.9. Distribución de la tasa de mejora de la planitud tras la aplicación del postproceso de arenado.....	194
Figura 7.10. Resultados del error de forma de las esferas en los estados F y A.	195
Figura 7.11. Distribución de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según X, Y y Z en los estados: (a) F y (b) A.	196
Figura 7.12. Distribución de la variación dimensional de los cubos tras la aplicación del postproceso de arenado.....	197
Figura 7.13. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las muestras N, C y H en la placa base en los estados: (a) F y (b) TT _{RT}	201
Figura 7.14. Resultados promedio del análisis geométrico de las muestras N, C y H en los estados: (a) F y (b) TT _{RT}	202
Figura 7.15. Resultados promedio del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H en los estados: (a) F y (b) TT _{RT}	203
Figura 7.16. Imágenes del microscopio óptico con x500 aumentos de la microestructura de la sección T ₁ de las muestras: (a) F, (b) TT _{RT} y (c) TT.....	204
Figura 7.17. Resultados promedio de dureza de las muestras F, TT _{RT} y TT.....	205
Figura 7.18. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras F, TT _{RT} y TT (curva tensión-deformación, R _m , R _p y Z).	206
Figura 7.19. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras TT en horno convencional y HIP.	208
Figura 8.1. Metodología de evaluación de la idoneidad de diferentes sistemas de digitalización 3D para la inspección de piezas fabricadas por SLM.	213
Figura 8.2. CAD de la pieza patrón: designación de las esferas y características de diseño.	214
Figura 8.3. Imágenes del macroscopio con x92 aumentos de la superficie de la pieza patrón de esferas (a) antes y (b) después de la aplicación del arenado.	215
Figura 8.4. (a) Medición por contacto de la pieza patrón de esferas. (b) Esferas utilizadas para la alineación de la pieza patrón.	215
Figura 8.5. Medición óptica de la pieza patrón de esferas utilizando: (a) escáner láser instalado en CMM, (b) sensor de holografía conoscópica, (c) escáner láser integrado en CMA, (d) escáner láser portátil y (e) escáner de luz estructurada.	217
Figura 8.6. Nube de puntos obtenida de la digitalización láser (LS-CMM) de la pieza patrón de esferas: (a) sin procesar y (b) tras las operaciones de limpieza.	219
Figura 8.7. Nubes de puntos resultantes de la digitalización de la pieza patrón de esferas utilizando los sistemas ópticos: (a) LS-CMM, (b) CH, (c) LS-CMA, (d) HLS y (e) SL.....	219

Figura 8.8. Número de puntos utilizados en la creación de las esferas de control de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica.....	220
Figura 8.9. Creación de las esferas virtuales de mejor ajuste en el software: (a) PC-DMIS, (b) Geomagic Control X, (c) PolyWorks, (d) GOM Inspect y (e) 3DReshaper.	221
Figura 8.10. Comparación 3D entre el CAD cuasi real y las nubes de puntos obtenidas de la digitalización de la pieza patrón de esferas utilizando los sistemas ópticos: (a) LS-CMM, (b) CH, (c) LS-CMA, (d) HLS y (e) SL.	222
Figura 8.11. Error de forma de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición.	223
Figura 8.12. Imágenes del macroscopio con x100 aumentos de las zonas superior (izquierda) y lateral (derecha) la esfera ESF 1.1 de la pieza patrón después del postproceso de arenado.	224
Figura 8.13. Representación gráfica del significado de los parámetros de error de forma y desviación estándar de una nube de puntos.	224
Figura 8.14. Desviación estándar de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica.	225
Figura 8.15. Desviación dimensional de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM).	225
Figura 8.16. Tiempo aproximado dedicado a cada tarea de inspección en cada sistema de medición.	228
Figura 8.17. Resultados del error de forma de las esferas de la pieza patrón en los diferentes estados de filtrado de la nube de puntos del sistema: (a) LS-CMM y (b) SL.	233
Figura 8.18. Resultados de la desviación de los diámetros de las esferas de la pieza patrón en los diferentes estados de filtrado de la nube de puntos del sistema: (a) LS-CMM y (b) SL.	234
Figura 8.19. Metodología de evaluación de la influencia de diferentes postprocesos SLM en la inspección óptica de las piezas.	236
Figura 8.20. Resultados de la desviación de paralelismo de la cara superior de los cubos de la pieza patrón respecto del plano base en los tres estados de postproceso: (a) F, (b) A y (c) A-TT _{RT}	238

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Características principales de los procesos de AM (UNE-EN ISO 17296-2:2017).	15
Tabla 2.2. Diferencias principales entre las técnicas PBF-L y PBF-EB (Gibson, Rosen y Stucker, 2015).	19
Tabla 2.3. Descripción de los parámetros SLM.	28
Tabla 2.4. Reglas de diseño SLM propuestas por Adam y Zimmer (Adam y Zimmer, 2014).	41
Tabla 2.5. Recomendaciones de orientación, posicionamiento y disposición de las piezas fabricadas por SLM (UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020).	46
Tabla 2.6. Guía de criterios de selección de ensayos para las piezas metálicas fabricadas aditivamente (UNE-EN ISO 17296-3:2017).	57
Tabla 3.1. Composición química del polvo de acero inoxidable 17-4 PH (3DSystems, 2017b).	69
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de la impresora de metal ProX DMP 100 (3DSystems, 2017a).	70
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del generador de nitrógeno Nitrocrafter NCP 016 OF (Nitrocrafter, 2017).	72
Tabla 3.4. Parámetros de fabricación fijos del proceso SLM.	72
Tabla 3.5. Características principales de la tamizadora automática PX-BOX (3DSystems, 2012). ...	73
Tabla 3.6. Especificaciones técnicas de la máquina de electroerosión por hilo Prima E 250 (ONA, 1996).	74
Tabla 3.7. Especificaciones del hilo de la máquina de electroerosión (ONA, 1996).	75
Tabla 3.8. Especificaciones técnicas de la arenadora Sablex S2 (ABShot, 2015).	75
Tabla 3.9. Especificaciones del corindón blanco (ABShot, 2022).	75
Tabla 3.10. Tratamientos térmicos recomendados por 3DSystems para las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH.	76
Tabla 3.11. Especificaciones técnicas del horno eléctrico de mufla 12PR/400 (Hobersal, 2018b)...	76
Tabla 3.12. Especificaciones técnicas del horno de mufla de atmósfera controlada 12PR400CCH (Hobersal, 2018a).	77
Tabla 3.13. Especificaciones técnicas del horno HIP.	77
Tabla 3.14. Principales parámetros del SEM utilizados.	82
Tabla 3.15. Especificaciones técnicas del difractor Discover D8 (Bruker, 2022).	84
Tabla 3.16. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos ME-402/5 (Servosis, 2022).	85

Tabla 3.17. Parámetros del ensayo de tracción según la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020.	86
Tabla 3.18. Especificaciones técnicas del rugosímetro SJ-500P (Mitutoyo, 2009).	87
Tabla 3.19. Especificaciones técnicas del sensor de escaneo láser HP-L-10.6 (Hexagon, 2019).	89
Tabla 3.20. Especificaciones técnicas del escáner RS3 integrado en el Romer Absolute Arm 7525 SI (Hexagon, 2015).	90
Tabla 3.21. Especificaciones técnicas del escáner láser HandySCAN 700 (Creaform, 2015).	90
Tabla 3.22. Especificaciones técnicas del FOV de 125 del escáner de luz estructurada Breuckmann smartSCAN3D-HE (3DSystems, 2015).	92
Tabla 3.23. Especificaciones técnicas del sensor de holografía conoscópica ConoScan 4000 (Optimet, 2012).	92
Tabla 3.24. Especificaciones técnicas del sensor ConoProbe con lente objetivo de 100 mm (Optimet, 2012).	93
Tabla 3.25. Filtros disponibles en los softwares para el análisis de los datos de medición 3D.	94
Tabla 4.1. Porcentaje de fase austenita de las secciones T, L ₁ y L ₂ de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1}	106
Tabla 4.2. Profundidad y anchura de las piscinas de fusión de las secciones L ₁ y L ₂ de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1}	106
Tabla 4.3. Resultados de dureza de las secciones T, L ₁ y L ₂ de las muestras D _{d1} , D ₀ y D _{c1}	110
Tabla 4.4. Resultados de dureza de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras N, C y H.	121
Tabla 4.5. Resultados del análisis geométrico de las muestras N, C y H.	126
Tabla 4.6. Resultados del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H.	126
Tabla 5.1. Resultados del tamaño, la redondez y la relación de aspecto de las partículas de polvo de cada estado de reciclaje (P ₀ , P ₁₀ , P ₂₀ y P _R).	135
Tabla 5.2. Contenido de oxígeno de los estados de polvo P ₀ , P ₁₀ y P ₂₀	140
Tabla 5.3. Clasificación de grupos según la PSD conjunta de los estados de polvo P ₀ , P ₁₀ y P ₂₀	141
Tabla 5.4. Composición química promedio según el grupo de tamaño (G1, G2 y G3) para cada estado de polvo (P ₀ , P ₁₀ y P ₂₀).	141
Tabla 5.5. Clasificación de subgrupos del grupo G3 según la PSD conjunta de los estados de polvo P ₀ , P ₁₀ y P ₂₀	142
Tabla 5.6. Resultados de rugosidad (R _a y R _t) de las superficies superior y laterales de las muestras P ₀ y P ₂₀	152
Tabla 5.7. Relación de intensidad máxima de las superficies superior y lateral de las muestras P ₀ y P ₂₀	155
Tabla 5.8. Resultados de dureza de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras P ₀ y P ₂₀	157
Tabla 6.1. Resultados de planitud XZ de los cubos de la pieza patrón (Cara 1 / Cara 2).	165
Tabla 6.2. Resultados de planitud YZ de los cubos de la pieza patrón (Cara 1 / Cara 2).	165

Tabla 6.3. Resultados de planitud XY de los cubos de la pieza patrón.....	165
Tabla 6.4. Resultados de paralelismo XY de los cubos respecto al plano base.....	166
Tabla 6.5. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje X.	167
Tabla 6.6. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje Y.	167
Tabla 6.7. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje Z.	168
Tabla 6.8. Desviación en las distancias entre los cubos de la pieza patrón según el eje X.....	169
Tabla 6.9. Desviación en las distancias entre los cubos de la pieza patrón según el eje Y.	169
Tabla 6.10. Desviación estándar y RMS de la comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos de las piezas patrón.	175
Tabla 6.11. Redimensionamiento de geometrías en función del ángulo de inclinación del plano base.	182
Tabla 7.1. Resultados de la rugosidad superficial y la porosidad externa de los cubos en los estados F y A.	191
Tabla 7.2. Resultados de la planitud de las caras XZ, YZ y XY de los cubos de la pieza patrón en los estados F y A.....	193
Tabla 7.3. Resultados del paralelismo de las caras XY de los cubos de la pieza patrón respecto al plano base en los estados F y A.....	194
Tabla 7.4. Resultados del error de forma de las esferas según su diámetro en los estados F y A.....	195
Tabla 7.5. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según X, Y y Z en los estados F y A.....	196
Tabla 7.6. Efecto de la erosión del arenado en las dimensiones (X, Y, Z) de los cubos.	197
Tabla 7.7. Desviación en las distancias entre los cubos según el eje X en los estados F y A.	197
Tabla 7.8. Desviación en las distancias entre los cubos según el eje Y en los estados F y A.	197
Tabla 7.9. Resultados de la desviación dimensional de las esferas en los estados F y A.	198
Tabla 7.10. Resultados de dureza de las secciones T ₁ , T ₂ , L ₁ y L ₂ de las muestras F, TT _{RT} y TT.....	205
Tabla 8.1. Parámetros de medición por contacto en función del diámetro de la esfera.....	216
Tabla 8.2. Promedio, desviación estándar y RMS de la comparación 3D entre el CAD cuasi real y las nubes de puntos obtenidas con los diferentes sistemas ópticos.	221
Tabla 8.3. Desviación en valor absoluto de la posición del centro de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM) según el diámetro de las esferas.	226
Tabla 8.4. Desviación en valor absoluto de la posición del centro de las esferas de la pieza patrón según los ejes X, Y y Z para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM).....	227

Tabla 8.5. Porcentaje de puntos eliminados según el filtro $N \cdot \sigma$ y distancia equivalente a la que se eliminan los puntos para el sistema LS-CMM.....	231
Tabla 8.6. Resultados en valor absoluto de la desviación de planitud de las caras (XZ, YZ, XY) de los cubos de la pieza patrón en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT _{RT}).	237
Tabla 8.7. Resultados en valor absoluto de la desviación dimensional (según los ejes X, Y, Z) de los cubos de la pieza patrón en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT _{RT}).	238

Acrónimos

AM	<i>Additive Manufacturing</i>	Fabricación Aditiva
BCC	<i>Body Centered Cubic</i>	Cúbica Centrada en el Cuerpo
BEI	<i>Backscattered Electron Imaging</i>	Imágenes de Electrones Retrodispersados
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	Diseño Asistido por Ordenador
CMA	<i>Coordinate Measuring Arm</i>	Brazo de Medición por Coordenadas
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>	Máquina de Medición por Coordenadas
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>	Deposición de Energía Focalizada
DfAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i>	Diseño para Fabricación Aditiva
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>	Espectroscopia por Dispersión de Energía
FCC	<i>Face Centered Cubic</i>	Cúbica Centrada en las Caras
FOV	<i>Field Of View</i>	Campo De Visión
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>	Dimensionamiento Geométrico y Tolerancia
HIP	<i>Hot Isostatic Pressing</i>	Prensado Isostático en Caliente
Ms	<i>Martensite Start</i>	Inicio de transformación Martensítica
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>	Fusión de Lecho de Polvo
PSD	<i>Particle Size Distribution</i>	Distribución del Tamaño de Partícula
RMS	<i>Root Mean Square</i>	Media Cuadrática
SEI	<i>Secondary Electron Imaging</i>	Imágenes de Electrones Secundarios
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>	Microscopio Electrónico de Barrido
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>	Fusión Selectiva por Láser
STL	<i>Stereolithography</i>	Estereolitografía
TEM	<i>Transmission Electron Microscopy</i>	Microscopio Electrónico de Transmisión
VED	<i>Volumetric Energy Density</i>	Densidad de Energía Volumétrica
WEDM	<i>Wire Electrical Discharge Machining</i>	Electroerosión por Hilo
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>	Difracción de Rayos X

Resumen

Hoy en día la fabricación aditiva (AM, *Additive Manufacturing*), técnica emergente que consiste en construir componentes tridimensionales depositando material capa a capa, está cambiando la naturaleza de la producción y el aprovisionamiento entre otras actividades de la cadena de valor. El nuevo paradigma pone énfasis en la personalización, la optimización topológica, los productos más especializados y la producción de lotes pequeños. Entre las diferentes técnicas de AM cabe destacar la fusión de lecho de polvo de materiales metálicos. En especial, el proceso de fusión selectiva por láser (SLM, *Selective Laser Melting*) presenta una demanda creciente por la alta densidad y las buenas propiedades mecánicas de las piezas finales. El proceso de fabricación SLM es considerado una de las técnicas de AM más versátil, ya que puede procesar una amplia gama de metales, incluyendo aceros inoxidable endurecidos por precipitación, como el 17-4PH. La aleación de 17-4PH, por sus destacadas propiedades, es utilizada para la fabricación de prototipos de grado industrial, piezas de producción o repuestos para el sector aeroespacial, la industria química y petroquímica, el sector energético, así como para la producción de instrumentos quirúrgicos y componentes de alto desgaste. No obstante, cumplir con las demandas industriales y conseguir un rendimiento mecánico satisfactorio en los componentes fabricados por SLM es actualmente uno de los desafíos más importante para impulsar una amplia implementación de esta técnica de fabricación.

En este contexto se enmarca la presente tesis doctoral, cuyo objetivo principal es evaluar el impacto de los principales factores involucrados en el proceso de fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, la influencia de la aplicación de postprocesos recomendados, así como la optimización del proceso de inspección óptica de este tipo de piezas.

En primer lugar, se ajustaron los principales parámetros del láser (potencia y desenfoque) para la adecuada fabricación SLM. Una vez fijados estos parámetros, se evaluó la influencia de la estrategia de escaneo láser en la calidad de las piezas impresas. Además de los parámetros del proceso, otro factor que puede influir en las propiedades de las piezas es el reciclaje del polvo sobrante (no fundido) en cada ciclo de fabricación SLM. Para evaluar este aspecto, se analizó el polvo de acero inoxidable 17-4PH tanto en estado virgen como en diferentes grados de reutilización (hasta un máximo de 20 ciclos), así como las piezas fabricadas a partir de estos estados de la materia prima. Respecto a la etapa de preparación del archivo para su transferencia a la máquina, se estudió la influencia geométrica y dimensional de la posición de las piezas en la placa base, la cual podría estar relacionada con el efecto del rodillo durante las operaciones de deposición y compactación de las capas de polvo. Con relación a la etapa de diseño, se evaluó la influencia de fabricar distintos tipos de

geometrías sobre planos con diferente ángulo de inclinación, a fin de obtener piezas con buena precisión geométrica y dimensional.

Por otro lado, se evaluó la influencia de los postprocesos SLM en diferentes propiedades de las piezas impresas. El postproceso mecánico de arenado es de interés por su mejora en el acabado superficial. Y los tratamientos térmicos son comúnmente recomendados para aliviar las tensiones residuales, homogeneizar la microestructura, mejorar las propiedades mecánicas, e incluso, reducir notablemente la porosidad interna.

Finalmente, se evaluó la idoneidad de la inspección óptica de este tipo de piezas. Para ello, se llevó a cabo la comparación de las mediciones realizadas utilizando diferentes sistemas ópticos (basados en las técnicas de triangulación láser, holografía conoscópica y luz estructurada) con la finalidad de seleccionar el sistema más adecuado, en términos tanto de precisión geométrica y dimensional como de tiempo requerido en el proceso de inspección completo. La inspección con diferentes equipos ópticos influye directamente en la calidad de la nube de puntos resultante, por esta razón, se evaluó la influencia de la aplicación del filtrado de puntos espurios en la digitalización de este tipo de piezas. Por último, se analizó la influencia de los diferentes estados de postproceso de las piezas fabricadas por SLM (sin postproceso, tras la aplicación de arenado y tras la aplicación de tratamiento térmico) en la precisión geométrica y dimensional de la medición óptica.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el ámbito de aplicación, los objetivos y la estructura de la presente tesis doctoral. Asimismo, se proporciona el contexto general en el que se enmarca este trabajo de investigación.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS*
- 2. OBJETIVOS DE LA TESIS*
- 3. ESTRUCTURA DE LA TESIS*

1.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS

La fabricación aditiva (AM, *Additive Manufacturing*), basada en la creación de componentes capa a capa, es una herramienta clave para impulsar la Industria 4.0. La AM está reemplazando lentamente las técnicas de fabricación convencional, ya que ofrece mayor flexibilidad y sostenibilidad medioambiental y reduce el tiempo de producción y el desperdicio de material. Asimismo, las tecnologías de AM son la mejor solución para la fabricación de piezas personalizadas, optimizadas topológicamente, con alta complejidad geométrica, en lotes pequeños o con cambios frecuentes en su diseño. No obstante, los procesos de AM también presentan limitaciones, como los elevados costes de materiales y equipamiento, la repetibilidad del proceso, el tamaño de pieza limitado por el volumen de fabricación, las propiedades mecánicas anisotrópicas y el acabado superficial de las piezas.

A pesar de los avances que han surgido en los últimos años en las diversas técnicas de AM (materiales, métodos y equipos), la AM en metal destaca por su capacidad para fabricar componentes funcionales finales con buenas propiedades mecánicas. El proceso de fusión de lecho de polvo (PBF, *Powder Bed Fusion*) está recibiendo cada vez más atención como tecnología emergente de la AM de componentes metálicos. Esta técnica puede utilizar láser o haz de electrones como fuente de energía para la fusión del polvo metálico. En particular, el proceso de fusión por láser, también denominado comúnmente fusión selectiva por láser (SLM, *Selective Laser Melting*), presenta una demanda creciente debido a la alta densidad y las buenas propiedades mecánicas de las piezas finales.

La técnica SLM es considerada uno de los procesos de AM más versátil, ya que puede procesar una amplia gama de metales, incluyendo aleaciones de hierro, titanio, níquel, aluminio, cobalto y magnesio. Entre los diferentes materiales cabe destacar los aceros inoxidables endurecidos por precipitación, como el 17-4PH, por su alta resistencia a la tracción, resistencia al impacto, tenacidad a la fractura y resistencia a la corrosión a temperaturas de servicio típicas inferiores a 300 °C. Este tipo de materiales, debido a su alta resistencia y dureza, son difíciles de mecanizar mediante procesos convencionales, así pues, la AM ofrece una gran oportunidad para la fabricación de este tipo de piezas. El 17-4PH es un acero inoxidable martensítico con amplia variedad de uso industrial, incluyendo la industria aeroespacial, el sector energético, la industria química y petroquímica, los instrumentos médico-quirúrgicos, los componentes de alto desgaste y la industria marina, entre otros.

Cumplir con las demandas industriales y conseguir un rendimiento mecánico satisfactorio en los componentes fabricados mediante la tecnología SLM es uno de los desafíos más importante para impulsar una amplia implementación de este método de fabricación. En este sentido, existen diferentes factores que desempeñan un papel fundamental en el proceso de

fabricación SLM, incluyendo las características del material de partida (polvo metálico), los parámetros propios del proceso (potencia y desenfoque del láser, velocidad de escaneo, espesor de capa, distancia entre pasadas, estrategia de escaneo), el reciclaje del polvo metálico, el diseño de las piezas, la aplicación de postprocesos, así como la orientación, el posicionamiento y la distribución de las piezas en el volumen de trabajo de la máquina de fabricación. El control y la optimización de estos parámetros es esencial para garantizar la calidad de las piezas finales.

Respecto al material de partida, tanto la morfología (tamaño y forma) de las partículas como la composición química del polvo, son aspectos importantes que caracterizar y controlar para garantizar la calidad de las piezas fabricadas por SLM. Por otro lado, la modificación de los parámetros específicos del proceso SLM produce cambios en la entrada de energía en forma de calor sobre el lecho de polvo metálico, lo que puede afectar principalmente a la formación de las piscinas de fusión, al gradiente térmico y a la velocidad de enfriamiento. En consecuencia, estos factores influyen en la microestructura, el tamaño de grano, la transformación de fases, la formación de defectos y la generación de tensiones residuales en las piezas fabricadas, lo que afecta principalmente a la densidad, las propiedades mecánicas y la calidad superficial de las piezas finales.

Habitualmente, después de la fabricación SLM de piezas metálicas, se requiere la aplicación de postprocesos. En general caben destacar los tratamientos mecánicos y térmicos. Los postprocesos mecánicos se aplican con la finalidad de mejorar el acabado superficial (caracterizado por una textura superficial con alta rugosidad) de las piezas fabricadas. Mientras que los principales tratamientos térmicos recomendados por los fabricantes de las tecnologías se suelen aplicar con el objetivo de aliviar las tensiones generadas durante el proceso de fusión del lecho de polvo metálico (relajación de tensiones residuales), mejorar las propiedades mecánicas (puesta en solución y envejecimiento) y reducir la porosidad interna (aplicación simultánea de presión y temperatura).

Además de las propiedades del material (microestructura, porosidad), las propiedades mecánicas y el acabado superficial, los diferentes factores involucrados en el proceso SLM también afectan la calidad geométrica y dimensional de las piezas finales. El uso de sistemas de medición por contacto para la verificación geométrica y dimensional de piezas fabricadas por SLM se complica debido a la textura superficial y a las formas complejas, siendo más apropiados los sistemas ópticos. Además, la inspección sin contacto es especialmente relevante para la verificación rápida de este tipo de piezas. La precisión del proceso de inspección depende de diversos factores, algunos relacionados con el acabado superficial y la calidad de las piezas, y otros con los sistemas de medición (técnica de funcionamiento, metodología de digitalización, especificaciones técnicas, parámetros específicos de configuración) y el tratamiento de la nube de puntos resultante del escaneo 3D (filtrado de puntos espurios).

1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es evaluar el impacto de los principales factores involucrados en el proceso de fabricación mediante la tecnología SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, la influencia de la aplicación de postprocesos, así como la optimización del proceso de inspección óptica de este tipo de piezas.

Para alcanzar este objetivo general, se definen los siguientes objetivos particulares:

1. Ajustar la potencia y el desenfoque del láser para garantizar tanto la adecuada realización del proceso SLM, como la calidad de las piezas finales. En relación al parámetro de la estrategia de escaneo, establecer recomendaciones para la elección de la trayectoria láser más adecuada en función de la aplicación final de los componentes fabricados.
2. Caracterizar el polvo de acero inoxidable 17-4PH, tanto en el estado inicial (virgen) como en diferentes grados de reciclaje (sometido a varios ciclos de fabricación-reciclaje), así como evaluar la calidad de las piezas fabricadas por SLM a partir de polvo virgen y polvo reutilizado. Establecer recomendaciones sobre el procedimiento de reciclaje del polvo.
3. Evaluar la influencia geométrica y dimensional de la fabricación de piezas posicionadas en diferentes zonas de la placa base durante la etapa de preparación del archivo para su transferencia a la máquina. Respecto a la etapa de diseño, analizar la influencia de fabricar distintos tipos de geometrías (tanto interiores como exteriores) con diferente ángulo de inclinación, a fin de obtener piezas con buena precisión geométrica y dimensional.
4. Analizar la influencia de los principales postprocesos recomendados tras la fabricación SLM. Por un lado, el proceso mecánico de arenado, aplicado con el objetivo de mejorar la rugosidad superficial. Por otro lado, los tratamientos térmicos, con la finalidad de evaluar las deformaciones producidas tras el tratamiento de alivio de las tensiones residuales, mejorar las propiedades mecánicas y reducir la porosidad.
5. Optimizar la inspección óptica de piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas mediante la tecnología SLM. En primer lugar, comparar diferentes sistemas de medición óptica con el objetivo de seleccionar el equipo más adecuado para este tipo de piezas, tanto en precisión geométrica y dimensional como en tiempo requerido para el proceso completo de inspección. En segundo lugar, analizar la influencia del software de metrología utilizado, así como la aplicación del filtrado de puntos espurios en los resultados de la medición óptica. Y, en tercer lugar, evaluar la precisión geométrica y dimensional de la inspección óptica de este tipo de piezas en diferentes estados de postproceso SLM, incluyendo tres estados consecutivos: sin aplicación de postprocesos, con aplicación de arenado y con aplicación de tratamiento térmico.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente tesis doctoral se estructura del modo que se describe a continuación.

Este **Capítulo 1 (Introducción)** presenta la descripción general del ámbito de aplicación, los objetivos principales y la estructura de la presente tesis doctoral.

El **Capítulo 2 (Estado del arte)** contiene el estado actual del conocimiento de los temas objeto de esta tesis doctoral. El primer apartado presenta el contexto general de la AM destacando el interés de las técnicas de fabricación en metal. El segundo apartado, que constituye la parte fundamental de este capítulo, se centra en el proceso de fabricación SLM. Con la finalidad de comprender y conocer en detalle los factores principales que influyen en el rendimiento de este proceso y en la calidad de las piezas fabricadas, en este apartado se realiza una revisión de la literatura actual acerca del material de partida o polvo metálico, los parámetros propios del proceso, la atmósfera de fabricación, las recomendaciones de diseño para la fabricación, así como los postprocesos SLM. El tercer apartado expone de forma resumida las normas internacionales recomendadas para la evaluación de la calidad de las piezas metálicas fabricadas aditivamente. El cuarto apartado se centra en el proceso de inspección geométrica y dimensional mediante sistemas de medición óptica, tanto de las piezas finales como del proceso de fabricación SLM.

El **Capítulo 3 (Materiales y métodos)** presenta los materiales, equipos y métodos que se han utilizado en la presente tesis doctoral. Este capítulo se organiza en tres apartados principales que contienen el equipamiento utilizado para: la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, la aplicación de los postprocesos SLM y el análisis de la calidad de las piezas fabricadas.

El **Capítulo 4 (Ajuste e influencia de parámetros SLM)** incluye dos apartados iniciales dedicados al ajuste de los parámetros de la potencia y el desenfoque del láser, los cuales se mantendrán constantes en el resto de la tesis. Y un tercer apartado, que se centra en la evaluación de la influencia de la estrategia de escaneo láser utilizada en el proceso SLM con la finalidad de optimizar la fabricación de piezas de acero inoxidable 17-4PH en función de su aplicación final.

El **Capítulo 5 (Influencia del reciclaje del polvo)** contiene el estudio sobre la influencia del reciclaje del polvo de acero inoxidable 17-4PH en la fabricación SLM. Este estudio comprende dos apartados principales: la caracterización del polvo en diferentes estados de reciclaje y la evaluación de las propiedades de las piezas fabricadas a partir del polvo virgen y polvo reutilizado.

El **Capítulo 6 (Influencia del diseño para fabricación SLM)** se centra en dos factores relativos a la etapa de preparación de las piezas para su transferencia a la máquina y a la etapa de diseño. Dichos factores son el posicionamiento de las piezas en diferentes zonas del área de fabricación de la máquina y las recomendaciones de diseño para la fabricación SLM de geometrías primitivas, tanto interiores como exteriores, con diferente inclinación respecto al plano base.

El **Capítulo 7 (Influencia de los postprocesos SLM)** incluye dos apartados principales correspondientes a la evaluación de la influencia de la aplicación de postprocesos mecánicos y térmicos en la calidad de las piezas fabricadas por SLM. El apartado del postproceso mecánico se centra en el arenado y su influencia en diferentes propiedades de las piezas (rugosidad, porosidad externa, calidad geométrica y dimensional). Por otro lado, el apartado dedicado a los postprocesos térmicos engloba el análisis geométrico y dimensional de las piezas sometidas al tratamiento térmico de relajación de tensiones residuales (aplicado previamente a la separación de las piezas de la placa base), así como la evaluación de las propiedades mecánicas y la porosidad interna tras la aplicación de los tratamientos térmicos recomendados para este tipo de piezas.

El **Capítulo 8 (Optimización de la inspección óptica de piezas SLM)** se centra en la optimización de la inspección óptica de piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas mediante la tecnología SLM. Este capítulo contiene tres apartados principales que abordan: la selección del sistema de medición óptica más adecuado, el efecto de aplicar filtros disponibles en los softwares de metrología para la eliminación de puntos espurios y la influencia en la inspección óptica del acabado superficial de este tipo de piezas resultante de la aplicación de diferentes postprocesos (mecánicos y térmicos).

El **Capítulo 9 (Conclusiones generales)** presenta las conclusiones más destacadas de la presente tesis doctoral, así como las futuras líneas de trabajo derivadas de los estudios realizados. Por último, se incluye la diseminación de los resultados que se han ido publicando en revistas y congresos durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Como se puede observar, los capítulos del 4 al 8, organizados según los objetivos propuestos en el apartado anterior (1.2), recogen los estudios llevados a cabo en esta tesis doctoral. Sin embargo, algunos estudios se han realizado paralelamente. En consecuencia, la Figura 1.1 muestra un esquema cronológico de los principales estudios, destacando el capítulo en el que se han incluido al darle estructura a la tesis. En color rosa se muestran los capítulos relacionados con el propio proceso de fabricación SLM, en amarillo el capítulo relativo a los postprocesos SLM y en azul el capítulo relativo a la inspección óptica de las piezas fabricadas por SLM. Esta visión cronológica permite una mejor comprensión de la metodología seguida en los diferentes estudios realizados (Figura 1.1).

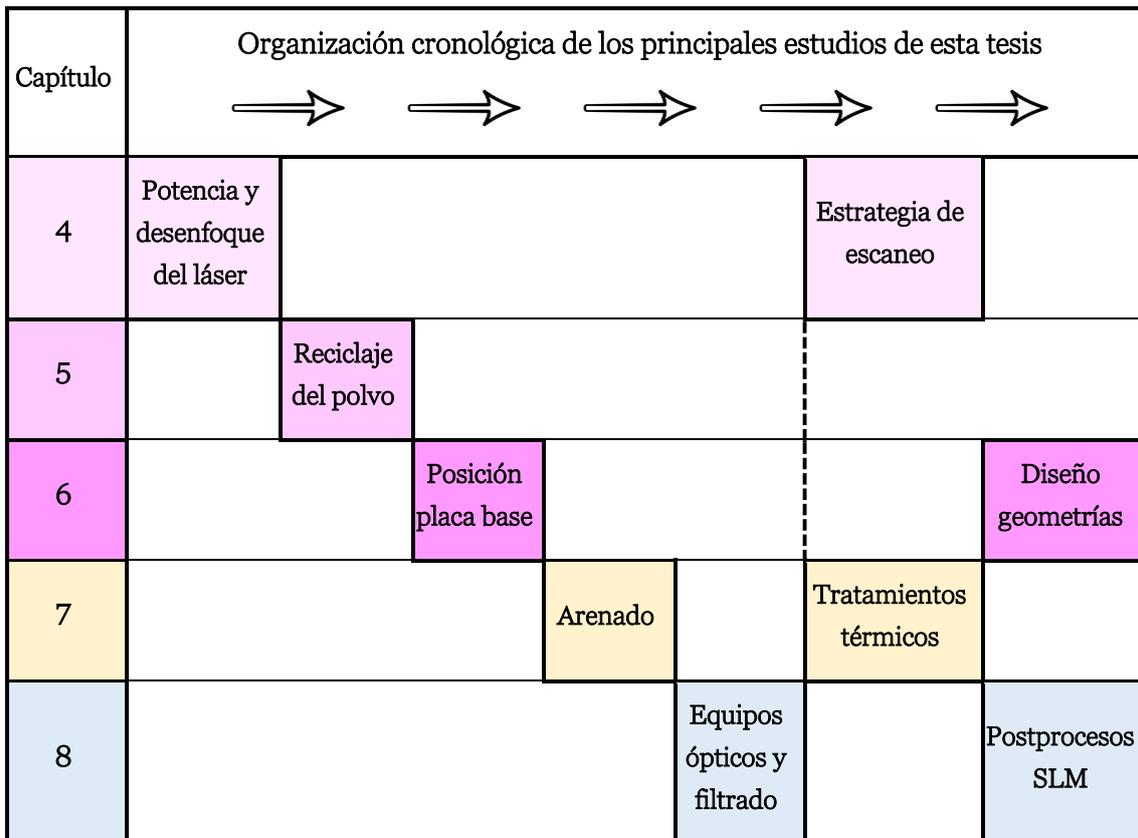


Figura 1.1. Esquema cronológico de los principales estudios realizados en la presente tesis doctoral clasificados en función de los capítulos.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se expone el estado actual del conocimiento sobre los principales temas objeto de la presente tesis doctoral: la fabricación aditiva de piezas metálicas mediante la técnica de fusión selectiva por láser (material de partida, parámetros del proceso, atmósfera de fabricación, diseño para la fabricación), la aplicación de postprocesos, los índices de calidad de las piezas fabricadas y la inspección mediante sistemas de medición óptica, tanto del proceso como de las piezas impresas.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. FABRICACIÓN ADITIVA*
- 2. FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLM)*
- 3. ÍNDICES DE CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM*
- 4. INSPECCIÓN SLM*

2.1. FABRICACIÓN ADITIVA

La Industria 4.0, también denominada la cuarta revolución industrial, es un tema de investigación actual. Puede verse como la convergencia de varios conceptos emergentes y nuevas tecnologías, incluyendo la identificación por radiofrecuencia, el *big data*, la computación en la nube, los sensores inteligentes, el aprendizaje automático, la robótica, la AM, la inteligencia artificial, la realidad aumentada y el Internet de las cosas. Las tecnologías avanzadas involucradas en la Industria 4.0 están reestructurando los sistemas de producción mediante la transformación de flujos de trabajo analógicos y centralizados en procesos de producción digitales y descentralizados. La AM se considera un ingrediente esencial en este nuevo movimiento que fomenta la integración de sistemas de producción inteligentes y tecnologías de información avanzadas (Dilberoglu *et al.*, 2017).

La AM está cambiando la naturaleza de la producción y el aprovisionamiento entre otras actividades de la cadena de valor, asimismo tiene el potencial de alterar sustancialmente la estructura y las operaciones de los negocios internacionales. Este cambio de enfoque en la fabricación de bienes a escala global probablemente vaya acompañado del surgimiento de una economía basada en el conocimiento, en la que los modelos y el software se vuelvan influyentes en la generación de los productos deseados por los consumidores. El nuevo paradigma pone énfasis en la personalización, los productos más especializados y la producción de lotes pequeños. En un sentido muy amplio, todos estos cambios representan una revolución en la producción y, en última instancia, en el consumo, probablemente tan importante a largo plazo como las transformaciones que siguieron a la revolución industrial (Hannibal y Knight, 2018).

La AM es una técnica emergente que consiste en construir componentes tridimensionales (3D) depositando material capa a capa (de forma aditiva) a diferencia de las técnicas de fabricación substractiva y de conformado. Las materias primas pueden ser polímeros, metales, cerámicos o compuestos (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017). El principio básico de este método de fabricación es que un modelo 3D de diseño asistido por ordenador (CAD, *Computer Aided Design*) puede fabricarse directamente sin la necesidad de planificar el proceso. Por el contrario, otros procesos de fabricación requieren de un análisis cuidadoso y detallado de la geometría de la pieza con la finalidad de determinar: ¿en qué orden se deben fabricar las diferentes características?, ¿qué herramientas y procesos se deben usar? y ¿qué accesorios adicionales se pueden requerir para la obtención del producto final?

En general, los procesos de AM involucran las ocho etapas (Gibson, Rosen y Stucker, 2015) que se muestran en la Figura 2.1:

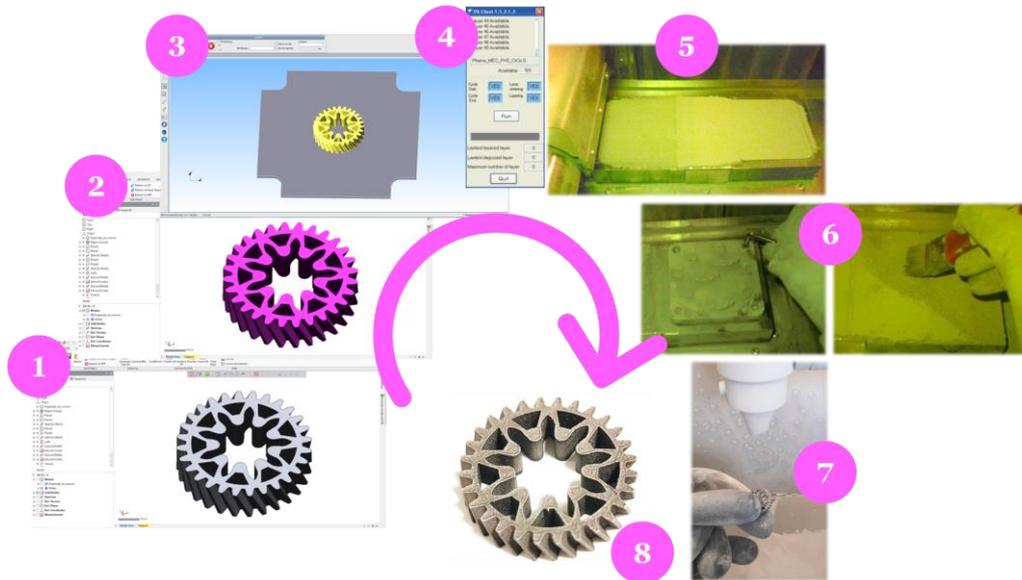


Figura 2.1. Las ocho etapas de los procesos de AM.

- 1) **Generación del modelo CAD.** Se trata de un modelo 3D sólido o de superficies que describe completamente la geometría externa de la pieza. Este modelo puede ser obtenido directamente de repositorios web, diseñado mediante un software de modelado CAD o generado a partir de la digitalización 3D del propio objeto utilizando equipos ópticos de ingeniería inversa.
- 2) **Conversión a STL.** El formato STL (*STL, Stereolithography*) se desarrolló originalmente como parte del paquete CAD para el primer sistema de estereolitografía creado por 3D Systems (3DSystems, 1988), pero con el tiempo se ha establecido como un formato de uso común para la transferencia de datos de los modelos 3D a las tecnologías de AM (UNE-EN ISO/ASTM 52950:2021). Se trata de un formato que describe tridimensionalmente la geometría de la superficie de la pieza como un mosaico de triángulos, sin generar información no relevante para la fabricación como la textura o el color. Actualmente, se ha adoptado un nuevo formato, *AMF (Additive Manufacturing File)*, que extiende el formato STL incluyendo información del material, el color, la textura y los metadatos (UNE-EN ISO/ASTM 52915:2020). Además, existen otros formatos que permiten incorporar información del color y la textura, como los formatos OBJ y PLY.
- 3) **Transferencia a la máquina y manipulación del archivo STL.** Mediante el software correspondiente, el archivo STL de la pieza debe prepararse (ajuste del tamaño, la posición y la orientación dentro del volumen de trabajo) para su transferencia a la máquina de AM.
- 4) **Configuración de la máquina.** Antes del proceso de fabricación, se han de configurar los parámetros de la máquina en función de las características de la pieza objeto (restricciones de material, fuente de energía, espesor de capa, etc.). Cada tecnología de AM tiene parámetros de configuración específicos de la máquina y el proceso.

- 5) **Fabricación.** La fabricación es un proceso automatizado, por lo que, generalmente la máquina no requiere de supervisión. Sin embargo, se suele realizar un monitoreo visual al comienzo del proceso de fabricación para garantizar que no se hayan producido errores como falta de material, fallos de suministro de energía, fallos en el software, etc.
- 6) **Extracción de la pieza.** Una vez completado el proceso de fabricación, se deben retirar las piezas de la máquina. Esto puede requerir el empleo de útiles, así como la interacción con la máquina (eliminación del exceso de material, retirada de elementos de agarre que impiden el movimiento de las piezas durante el proceso de AM, etc.).
- 7) **Postproceso.** Una vez retiradas de la máquina, las piezas pueden requerir de diferentes postprocesos (limpieza adicional, separación de la placa de fabricación, eliminación de estructuras de soporte, infiltración, recubrimientos, tratamientos térmicos, pulido, etc.) antes de estar listas para su aplicación final.
- 8) **Aplicación.** Finalmente, las piezas están listas para ser utilizadas. En algunos casos, pueden requerir de un ensamblaje junto con otros componentes para formar un producto final.

La contribución e importancia de la AM en la práctica de fabricación comercial ha cambiado enormemente en los últimos años. Inicialmente esta técnica se empleaba para la generación de prototipos de nuevos productos (Prototipado Rápido), pero a medida que las tecnologías han mejorado su aplicación se ha extendido a herramientas, y más recientemente, a la producción directa de piezas o productos finales. El objetivo principal de un sistema de fabricación es transformar la materia prima en productos, añadiendo así un mayor valor al proceso. Para lograr este objetivo, los sistemas de fabricación reúnen multitud de recursos diferentes, los cuales se organizan y controlan para lograr un rendimiento óptimo. Por lo tanto, un sistema de fabricación integra actividades, mecanismos y controles apropiados para la transformación de materias primas en productos terminados con la finalidad de satisfacer la demanda de los clientes. A menudo, la estrategia de fabricación se centra en el logro de prioridades competitivas en términos de coste, confiabilidad, flexibilidad, calidad y velocidad (Eyers y Potter, 2017). Precisamente en estos términos, la AM ha evolucionado a lo largo de los años proporcionando importantes ventajas frente a los métodos tradicionales de producción como la fabricación de geometrías complejas con alta precisión, el ahorro de material, la flexibilidad en el diseño, la personalización de los productos, así como la integración de nuevas aplicaciones gracias al continuo desarrollo de nuevos materiales, métodos y equipos (Ngo *et al.*, 2018). Los avances en AM están generando nuevas posibilidades de diseño, productos y paradigmas de producción (Thompson *et al.*, 2016). La introducción de nuevos modelos de negocio y la reducción general del tiempo de comercialización despiertan gran interés por las tecnologías de AM en sectores como:

- **Aeroespacial y automotriz.** Las técnicas de AM son ideales para la obtención de componentes aeroespaciales y automotrices por sus características peculiares como la posibilidad de obtener geometrías complejas (Fasel *et al.*, 2020) y su capacidad para fabricarlas en materiales difíciles de producir mediante otros métodos de fabricación convencionales (Nagesha *et al.*, 2020), la producción bajo demanda, la mejora de los tiempos de entrega y la reducción de los costes del producto final (Gisario *et al.*, 2019), así como la capacidad de fabricación deslocalizada y cerca del punto de uso. Además, a través de la optimización de la topología de los diseños, este tipo de fabricación permite mejorar la funcionalidad de los componentes finales mediante la reducción del peso (que es uno de los factores más importantes demandados por las industrias aeroespacial y automotriz (Schmitt, Mehta y Kim, 2020)), el aumento del rendimiento y/o la reducción de los subconjuntos (Busachi *et al.*, 2017). En el sector automotriz, la AM también ha influido positivamente en el rendimiento de la cadena de suministro y, en consecuencia, en el rendimiento de la empresa (Delic, Evers y Mikulic, 2019). Dicha mejora se ve afectada principalmente por la flexibilidad aportada por la integración de las tecnologías de AM (Delic y Evers, 2020). La implementación de esta tecnología reduce los costes de producción y aumenta la velocidad y flexibilidad de respuesta ante las necesidades del cliente (Patalas-Maliszewska, Topczak y Kłos, 2020).
- **Salud.** La AM presenta un gran potencial en el desarrollo de aplicaciones biomédicas al cubrir necesidades requeridas por este sector como son: alta complejidad (Culmone, Smit y Breedveld, 2019), personalización y necesidades específicas del paciente (Ahn *et al.*, 2020), biocompatibilidad (Grover *et al.*, 2020) y pequeñas cantidades de producción (Haleem y Javaid, 2020). Además, facilita la conversión de información médica 3D en objetos (fabricación de prótesis personalizadas). Dentro del sector de la salud, las tecnologías de AM se han implementado en diversas aplicaciones de especialidades como: odontología (Selvaraj *et al.*, 2022), maxilofacial (Khorsandi *et al.*, 2021), oftalmología (Tsui *et al.*, 2022), traumatología (Andrés-Cano *et al.*, 2021), ortopedia (Mallya y Juneja, 2021), etc.
- **Arquitectura y construcción.** El uso de tecnologías de AM en los sectores de la arquitectura y la construcción tiene el potencial de disminuir los costes de mano de obra, reducir el desperdicio de material, crear geometrías complejas que son difíciles de lograr usando técnicas de construcción convencionales, usar múltiples materiales (Pajonk *et al.*, 2022), realizar reparaciones in situ en lugares de difícil acceso o peligrosos para los humanos, fabricar elementos estructurales y no estructurales con topologías optimizadas y piezas personalizadas de alto valor (Delgado Camacho *et al.*, 2018).
- **Energético.** Precisamente la aplicación de la AM en el resto de los sectores lleva asociada su aplicación indirecta en el sector energético. La implementación de las

tecnologías de AM en sectores como el aeroespacial (Monteiro *et al.*, 2022) o de la construcción conduce a una notable disminución en la demanda energética (Verhoef *et al.*, 2018). Respecto a la fabricación de componentes en este sector (como dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica), caben destacar las ventajas que ofrece la AM frente a las técnicas convencionales en términos de rendimiento, factores ambientales, coste y escalabilidad (Zhang *et al.*, 2017).

- **Otros sectores.** Actualmente las aplicaciones de la AM también se extienden a otros sectores como la alimentación (Soni, Ponappa y Tandon, 2022), el textil (Terekhina *et al.*, 2022), el ferroviario (Toth *et al.*, 2022), la electrónica (Dhinesh *et al.*, 2022), el transporte (Akbari y Ha, 2020), la robótica (Stano y Percoco, 2021), etc.

Beneficios y limitaciones de la Fabricación Aditiva

Los principales beneficios de los productos obtenidos mediante los sistemas de AM son:

- ✓ Complejidad geométrica (productos con interiores huecos, canales internos, espesores variables, formas irregulares, etc.).
- ✓ Personalización (productos que se adaptan a las características y capacidades del usuario, como por ejemplo las prótesis).
- ✓ Productos ligeros (ahorro de peso, material, resistencia o costes).
- ✓ Multimateriales (varios materiales simultáneamente en el mismo sólido).
- ✓ Mecanismos integrados (mecanismos fabricados en una única pieza, sin la necesidad de ensamblaje y ajustes posteriores).

Respecto al proceso de AM de componentes se deben destacar los siguientes beneficios:

- ✓ Reducción del tiempo de lanzamiento del producto al mercado.
- ✓ Flexibilidad de respuesta a la cambiante demanda.
- ✓ Fabricación de pequeños lotes (sin apenas influir en los costes de producción).
- ✓ Reducción de errores de ensamblaje y sus costes asociados.
- ✓ Optimización del uso del material (reducción del desperdicio de material al mínimo).
- ✓ Fabricación más sostenible.

Sin embargo, las tecnologías de AM presentan una serie de inconvenientes que deben tenerse en cuenta a la hora de elegir la tecnología que mejor se adapta a los requisitos del producto a fabricar:

- ⊗ La fabricación mediante la adicción de capas produce lo que se conoce como «efecto escalera», efecto que dificulta la conformación de las curvas geométricas y deja un acabado superficial rugoso.
- ⊗ En algunas tecnologías, el proceso de fabricación en sí puede ser lento, lo que hace que dichas tecnologías sean particularmente adecuadas para la producción de pequeñas series y no tanto para series medias o grandes.
- ⊗ La fabricación mediante la adicción de capas produce materiales anisotrópicos.
- ⊗ Generalmente, la precisión obtenida utilizando los métodos de AM es peor que la obtenida utilizando otros métodos de fabricación, como los basados en la eliminación de material.
- ⊗ La falta de normativa específica para certificar o cualificar los diseños, materiales, procesos y ensayos de caracterización en el ámbito de la AM.

2.1.1. Técnicas de Fabricación Aditiva

Según la Norma UNE-EN ISO 17296-2:2017, los procesos de AM se clasifican en siete categorías básicas atendiendo al principio de funcionamiento de las tecnologías. En la Tabla 2.1 se resume de forma genérica las características principales (materia prima, mecanismo de unión, fuente de activación, procesado secundario o postproceso) de las técnicas de AM.

Tabla 2.1. Características principales de los procesos de AM (UNE-EN ISO 17296-2:2017).

Proceso de AM	Materia prima	Mecanismo de unión	Fuente de activación	Procesado secundario
Proyección de material	Fotopolímero líquido o cera fundida, con o sin relleno	Reacción química o adhesión por solidificación de material fundido	Fuente de radiación luminosa para la unión mediante reacción química	Limpieza, eliminación del material de soporte, postcurado mediante una mayor exposición a la radiación luminosa

Proyección de aglutinante	Polvo, mezclas de polvo o materiales en forma de partículas, y un agente líquido adhesivo/aglutinante	Reacción química y/o térmica	Dependiendo del agente aglutinante: reacción química	Eliminación del polvo suelto, impregnación o infiltración de material líquido adecuado en función del material en polvo y de la aplicación prevista
Fotopolimerización en tanque o cuba	Líquido o pasta: resina fotorreactiva con o sin relleno	Reacción química	Habitualmente radiación UV proveniente de láseres o lámparas	Limpieza, eliminación del material de soporte, postcurado mediante una mayor exposición UV
Fusión de lecho de polvo	Diversos tipos de polvo: polímeros termoplásticos, normalmente metales puros o aleaciones metálicas, cerámicas estructurales o industriales (con o sin rellenos dependiendo del proceso específico)	Reacción química	Energía térmica, generalmente transferida por láser, haz de electrones y/o lámparas de infrarrojos	Eliminación de polvo suelto y, si procede, del material de soporte, y diversas operaciones para mejorar el acabado superficial, la precisión dimensional y las propiedades del material (por ejemplo: acabado mediante fresado, chorreado de arena, granallado, pulido y tratamientos térmicos)
Deposición de energía focalizada	Polvo o filamento, generalmente metálico; para ciertas aplicaciones se pueden añadir partículas cerámicas al material base	Reacción química: fusión y solidificación	Láser, haz de electrones o arco de plasma	Mejora del acabado superficial (por ejemplo: mecanizado, chorreado de arena, refundición láser, rectificado o pulido) y mejora de las propiedades del material (por ejemplo: tratamientos térmicos)

Extrusión de material	Filamento o pasta, generalmente termoplásticos y cerámicas estructurales	Reacción química o térmica	Calor, ultrasonidos o reacción química entre componentes	Eliminación de la estructura soporte
Laminado de hojas	Material en láminas: generalmente papel, lámina metálica, polímeros o láminas compuestas predominantemente formadas por material metálico o de polvo cerámico unidas entre sí por un aglutinante	Reacción térmica o química, ultrasonidos	Calentamiento localizado o a gran escala, reacción química y transductores ultrasónicos	Eliminación de residuos y, opcionalmente, sinterizado, infiltrado, tratamiento térmico, arenado o mecanizado, para mejorar el acabado superficial

La AM se caracteriza por la obtención directa de piezas, sin embargo, la mayoría de estos procesos no se pueden completar en una única etapa, requieren de operaciones de postproceso para la obtención de la pieza final con la forma geométrica y las propiedades requeridas para cada aplicación. La Figura 2.2 muestra la clasificación de las técnicas de AM según el número de etapas necesarias para la obtención del producto final: una sola etapa o varias etapas (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017).

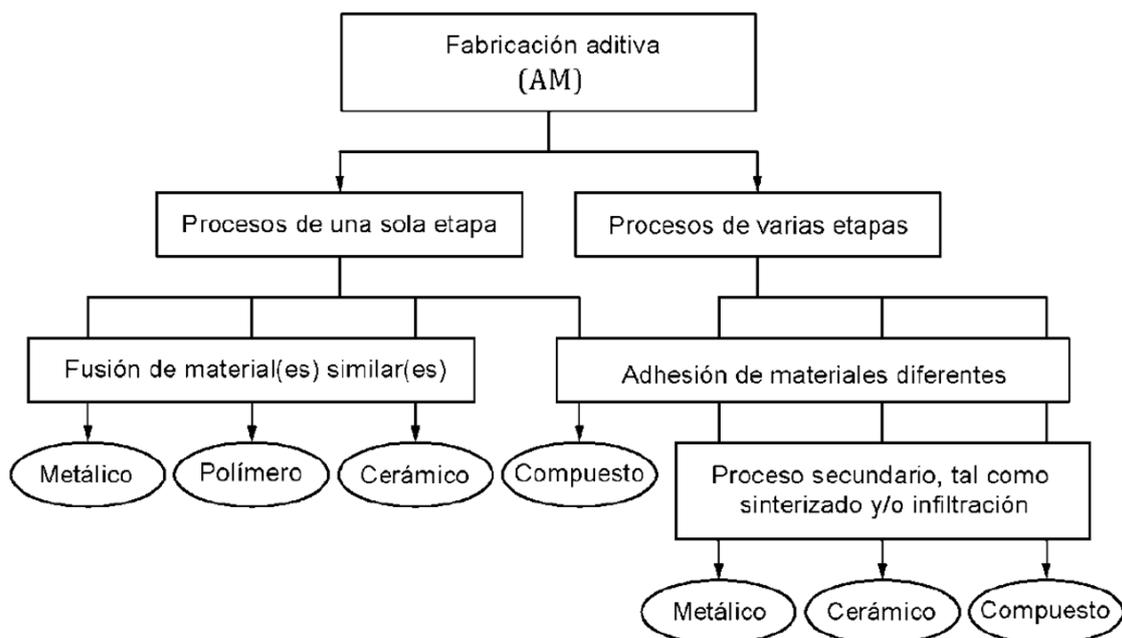


Figura 2.2. Procesos de AM de una sola o varias etapas (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017).

2.1.2. Fabricación Aditiva en metal

A pesar de los avances que en los últimos años han surgido en las diversas técnicas de AM (materiales, métodos y equipos), las técnicas que se centran en la fabricación de piezas metálicas han sido siempre de las más demandadas. Esto se debe a su capacidad para fabricar piezas funcionales finales con buenas propiedades mecánicas, de aplicación en máquinas, herramientas y útiles de fabricación entre otras. Los avances significativos que han tenido lugar en los últimos veinte años (láseres industriales confiables de menor coste, hardware y software de cómputo de alto rendimiento, tecnologías de materia prima de polvo metálico) han permitido que estas técnicas se conviertan en un método de fabricación de vanguardia con un papel vital en la industria (DebRoy *et al.*, 2018). Y es por ello que ahora es más importante que nunca comprender y caracterizar completamente estos procesos de fabricación.

Entre las siete categorías de métodos de procesamiento de AM descritos en el apartado 2.1.1, la proyección de aglutinante, la fusión de lecho de polvo, la deposición de energía focalizada y el laminado de hojas son las técnicas que permiten la obtención de piezas metálicas. El proceso PBF y la deposición de energía focalizada (DED, *Directed Energy Deposition*) son las técnicas más conocidas y ampliamente utilizadas entre los diversos métodos de procesamiento de AM de metales. Estas dos técnicas comparten fundamentos similares de fuentes de calor de alta densidad de energía, fusión localizada y evolución microestructural basada en la solidificación de una masa fundida. La nomenclatura empleada en función de la fuente de energía de estos procesos es: láser (L, *Laser*), haz de electrones (EB, *Electron Beam*), arco de plasma (PA, *Plasma Arc*) y arco de gas metal (GMA, *Gas Metal Arc*).

La técnica de DED se basa en la deposición de material fundido sobre una plataforma de fabricación (para la obtención de piezas nuevas) o sobre componentes (para la reparación o adición de material a piezas existentes). La fusión se produce simultáneamente a la deposición a través de una boquilla del material metálico (polvo o alambre). Atendiendo a la fuente de calor empleada, la técnica de DED se clasifica en cuatro procesos: DED-L, DED-EB, DED-PA y DED-GMA.

La técnica de PBF utiliza una fuente de energía (L o EB) para fundir selectivamente y unir capa a capa polvo metálico en un lecho de polvo dentro de una cámara de fabricación. Un rodillo o cuchilla extiende una fina capa de polvo, y seguidamente se produce el movimiento del láser (PBF-L) o haz de electrones (PBF-EB) dando como resultado la fusión y solidificación de la porción de la capa de polvo escaneada. Una vez completado el procesado de la capa, la plataforma de fabricación desciende y el proceso se repite hasta completar la pieza final. Las principales diferencias existentes entre las dos técnicas principales de PBF se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Diferencias principales entre las técnicas PBF-L y PBF-EB (Gibson, Rosen y Stucker, 2015).

Característica	PBF-L	PBF-EB
Fuente de energía	Láser	Haz de electrones
Atmósfera de la cámara de fabricación	Gas inerte	Vacío
Enfoque de la fuente de energía	Galvanómetros	Bobinas de desviación
Absorción de energía	Absorción limitada	Conductividad limitada
Pre calentamiento del polvo	Uso de calentadores infrarrojos o resistivos	Uso de haz de electrones
Velocidad de escaneo	Limitada por la inercia del galvanómetro	Muy rápida, impulsada magnéticamente
Costes de energía	Altos	Moderados
Acabado superficial	Entre excelente y moderado	Entre moderado y malo
Resolución de las características fabricadas	Excelente	Moderada
Materiales	Metales	Metales conductores
Tamaño de las partículas de polvo	Fino	Medio

2.2. FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLM)

El proceso de fabricación mediante la tecnología SLM (PBF-L) se basa en la fusión de una fina capa de polvo metálico a través de un haz láser focalizado en la superficie. Tras la fusión, se produce la solidificación del material, así como la distribución y compactación mediante un rodillo de una nueva capa de polvo metálico. En la Figura 2.3 se muestra el principio de funcionamiento y los elementos principales que componen la tecnología de fabricación SLM. Este sistema consta de dos plataformas móviles, una que sirve como depósito para almacenar el polvo metálico de partida y asciende cada vez que el rodillo deposita y compacta una nueva capa sobre la otra plataforma, también denominada placa base o placa de fabricación. El movimiento de esta segunda plataforma es descendente a medida que la pieza se va fabricando capa a capa sobre el lecho de polvo metálico. Según la Figura 2.3, el rodillo distribuye el polvo en su movimiento hacia la derecha y lo compacta en su movimiento hacia la izquierda. Todo el proceso tiene lugar dentro de una cámara cerrada, generalmente llena de un gas inerte (nitrógeno o argón) y sujeta a condiciones de sobrepresión. La presencia de un gas inerte y las condiciones de sobrepresión en la cámara minimiza la contaminación de oxígeno durante el proceso SLM.

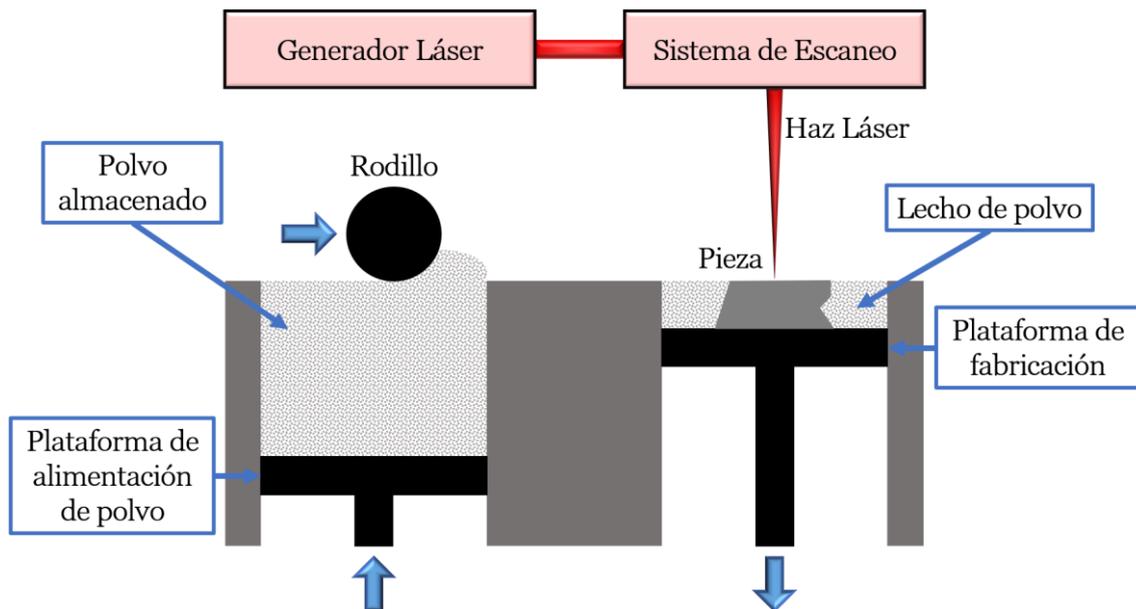


Figura 2.3. Diagrama esquemático del proceso de AM basado en metal SLM.

Como la mayoría de los sistemas de AM basados en metales, la tecnología SLM hace uso de una placa base sobre la que se fabrican las piezas. Una vez completado el proceso, las piezas deben retirarse de la placa mediante un postproceso mecánico. La necesidad de unir las piezas a una placa se debe principalmente a los altos gradientes de temperatura producidos durante el proceso de fabricación que causan una gran tensión residual. Si el material no se uniera rígidamente a una placa sólida, la pieza se deformaría a medida que se enfría, lo que impediría

la extensión uniforme de la siguiente capa de polvo, así como la correcta fabricación de las capas sucesivas. Por lo tanto, aunque estos procesos pueden desarrollarse dentro de un lecho de polvo, todavía existe la necesidad de fabricar estructuras soporte para disipar el calor y fijar la pieza (especialmente para soportar las superficies en voladizo y orientadas horizontalmente).

En la fabricación SLM no todo el polvo metálico inicialmente distribuido en la placa base se usa para la obtención de la pieza, hay una parte de polvo no fundido que puede reciclarse ayudando a garantizar la viabilidad económica y ambiental del proceso. Aunque este polvo no está fundido, está afectado térmicamente debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso SLM. Este hecho puede afectar a las propiedades del polvo y, en consecuencia, a las propiedades de las piezas fabricadas. Por lo tanto, el análisis de los efectos del reciclaje del polvo metálico es un tema importante para establecer buenos procedimientos de reciclaje y optimizar el rendimiento del proceso de fabricación SLM.

Además del reciclaje del polvo, hay otros factores relevantes que afectan a las propiedades mecánicas y a la calidad de las piezas obtenidas, como las características del polvo metálico de partida, los parámetros del proceso SLM, el diseño y la orientación de las piezas. Por lo general, tras este tipo de proceso PBF en metal se requieren operaciones de postproceso y tratamientos térmicos. Por un lado, los procesos mecánicos posteriores a la fabricación SLM no solo implican la separación de las piezas de la placa base, sino también la mejora del acabado superficial de las piezas o de la precisión dimensional de regiones específicas para garantizar su montaje e intercambiabilidad. Por otro lado, los postprocesos térmicos se aplican con la finalidad de aliviar las tensiones residuales generadas durante el proceso de fabricación y eliminar la porosidad interna de las piezas.

Otro factor que influye en la calidad de las piezas impresas es la propia máquina SLM. En función de la máquina empleada en la fabricación, los parámetros de impresión específicos también afectan a las propiedades de las piezas (densidad, resistencia a la tracción, microestructura, etc.). Es por ello que existe la necesidad de optimizar los parámetros del proceso SLM según la máquina de impresión y el gas inerte empleados (Ahmed Obeidi *et al.*, 2021).

En consecuencia, en los últimos años muchos investigadores han centrado sus estudios en la mejora de la calidad general de las piezas SLM analizando la influencia de los parámetros específicos del proceso, las características de la materia prima y los postprocesos. La caracterización de la materia prima, así como el control y la optimización tanto del proceso SLM como de los postprocesos requeridos, podrían mejorar significativamente la repetibilidad/reproducibilidad en este tipo de fabricación, lo que actualmente constituye una de las principales limitaciones de estas técnicas de PBF de metal (Dowling *et al.*, 2020).

2.2.1. Polvo metálico

Este apartado engloba los aspectos relacionados con el polvo metálico o materia prima del proceso de fabricación SLM, incluyendo los diferentes materiales y procesos de producción, los métodos de caracterización y el reciclaje del polvo.

Materiales y procesos de producción del polvo metálico

La técnica de fabricación SLM es considerada uno de los procesos de AM más versátil, ya que puede procesar un amplio espectro de materiales, incluyendo aleaciones basadas en hierro (Fe) (Nguyen *et al.*, 2019), titanio (Ti) (Zhao *et al.*, 2020), níquel (Ni) (Borisov *et al.*, 2020), aluminio (Al) (J. Zhang *et al.*, 2019), cobalto (Co) (Zhou *et al.*, 2019) y magnesio (Mg) (W. Zhang *et al.*, 2020). La mayoría de las investigaciones giran alrededor de tres tipos de metales: hierro, titanio y níquel. Estos metales son elegidos por su aplicación general y su coste. Los materiales más estudiados son el acero (aceros inoxidable 316L, 304L, 904L, 314S, C-X, 15-5PH, 17-4PH; y aceros 300M, M2, H13, H20, Maraging) y las aleaciones de hierro (Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Ni-Cu-P, Fe-Ni-Cr, Fe-Al, Fe-Cr-Al), seguidos del titanio y sus aleaciones (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-5Al, Ti-5Al-2.5Sn, Ti-22Al-25Nb, Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-13Zr-Nb, Ti-13Nb-13Zr), y a continuación de las aleaciones de níquel (Inconel 625, 718, 738, 939; Cromel; Hastelloy X; Nimonic 263, MAR-M247) (Yap *et al.*, 2015).

Las tecnologías para la producción de polvo metálico convencionalmente se clasifican en base a los métodos físico-químicos (procesos químicos, electrolisis y esferoidización por plasma) y mecánicos (molienda y atomización (por gas, por agua, por plasma y centrífuga)) (Popovich y Sufiarov, 2016). La atomización es el método más extendido de producción de polvo metálico para la AM, y en particular, el proceso de atomización por gas. La atomización por plasma proporciona polvo con forma altamente esférica, sin embargo, se considera un proceso costoso, mientras que la atomización por gas produce polvo esférico con un coste óptimo y una forma adecuada (Kassym y Perveen, 2020).

Caracterización del polvo metálico

La calidad del polvo metálico utilizado en la AM desempeña un papel fundamental para garantizar la alta calidad de las piezas finales. La caracterización de materiales se convierte en un requisito absoluto en aplicaciones críticas de los sectores más exigentes, como el aeroespacial (Gisario *et al.*, 2019) y biomédico (Huang *et al.*, 2020). Si la calidad de las materias primas no está suficientemente caracterizada, es difícil garantizar que los resultados obtenidos puedan ser reproducibles. Por ello, varios investigadores han analizado el efecto de la calidad del polvo de partida en la calidad de las piezas fabricadas [(Tan, Wong y Dalgarno, 2017), (Pleass y Jothi, 2018)], e incluso desarrollado métodos específicos de preparación de

materia prima en forma de polvo metálico para su uso en el proceso de fabricación SLM [(M. Li *et al.*, 2019), (Zhuang *et al.*, 2020), (Zhai *et al.*, 2020), (Chen *et al.*, 2020)]. En sus estudios han caracterizado la morfología (forma y calidad superficial), el tamaño, la composición química y la microestructura del polvo inicial, observando como estas características de la materia prima influyen tanto en las propiedades mecánicas como en la rugosidad superficial de las piezas fabricadas (Heiden *et al.*, 2019). Para obtener piezas con alta densidad es importante alcanzar un nivel adecuado de fluidez del polvo. La morfología esférica de las partículas de polvo afecta positivamente en la obtención de mejores resultados de fluidez, mientras que la humedad del material resulta contraproducente (Cordova, Bor, de Smit, Campos, *et al.*, 2020). Cuando el polvo presenta buenas características de adhesión se favorece la difusión y la compactación del lecho del polvo mediante el rodillo (L. Wang *et al.*, 2020). Por otro lado, se ha demostrado que el polvo de diferentes proveedores presenta diferentes características, por lo que puede requerir diferentes parámetros de procesamiento para garantizar una densidad óptima de las piezas fabricadas (Boisselier y Sankaré, 2012).

La norma UNE-EN ISO/ASTM 52907:2020 fue desarrollada con la finalidad de proporcionar una lista de normas ya existentes en relación a los métodos de caracterización del polvo metálico para la AM. Este documento proporciona especificaciones técnicas para la utilización de polvo metálico en AM abarcando los siguientes aspectos:

- **Distribución granulométrica.** La distribución del tamaño de partícula (PSD, *Particle Size Distribution*) es una de las propiedades más importantes del polvo metálico para la aplicación en AM. Los fabricantes de las tecnologías de AM dan recomendaciones para la PSD del polvo aplicable a sus sistemas, recomendando principalmente el uso de su propio polvo. Según indica la norma UNE-EN ISO/ASTM 52907:2020, el tamaño y la distribución granulométrica de las partículas de polvo debe definirse de acuerdo a uno o varios de los siguientes métodos: difracción láser, dispersión de luz, análisis de la imagen estática, análisis de la imagen dinámica o tamizado. Los resultados se pueden obtener mediante la aplicación de diferentes métodos, por ejemplo, las partículas más grandes pueden ser cuantificadas por tamizado y las más finas por difracción láser.
- **Composición química.** La composición química generalmente se determina mediante el método químico por vía húmeda, la espectroscopía de emisión de llama, el análisis de fluorescencia de rayos X por fusión, el análisis de fluorescencia de rayos X por solución o la espectrometría de absorción atómica de llama. La norma UNE-EN ISO/ASTM 52907:2020 muestra una tabla con ejemplos de diferentes normas ISO y ASTM para el tratamiento mediante diversas técnicas de combustión y fusión de elementos como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el azufre.

- **Densidades características.** La densidad aparente y de compactación son propiedades útiles del polvo metálico que permiten, a lo largo del tiempo, el control de diferentes lotes de polvo a partir tanto de polvo virgen como de polvo ya utilizado. Las principales características que influyen en el parámetro de la densidad aparente son la PSD y la forma de las partículas.
- **Morfología.** La morfología de las partículas juega un papel importante en la fabricación PBF y, por lo tanto, también es necesario caracterizar y describir esta característica. La forma de las partículas depende, entre otros factores, de la técnica de producción del polvo: la atomización da lugar a partículas con forma esférica y esferoidal; la forma angular es típica de los procesos de molienda; la electrolisis y los procesos químicos se caracterizan por la obtención de partículas con formas dendríticas, de agujas y con huecos internos.
- **Fluidez.** La fluidez del polvo tiene efectos sobre la distribución equitativa de las capas de polvo en los sistemas de fabricación PBF. Los principales parámetros que influyen en la fluidez son la distribución granulométrica, la presencia de fuerzas de aglomeración y la fricción entre partículas (afectada principalmente por la rugosidad y la morfología superficial de las partículas). Generalmente, el polvo muy fino tiene una fluidez baja o nula, mientras que las composiciones de polvo que contienen partículas pequeñas y grandes presentan buena fluidez. Respecto a la morfología del polvo, cabe destacar que las partículas esféricas fluyen mejor que las partículas con forma irregular (que se adhieren entre sí). La humedad influye negativamente en la fluidez, produciendo que las partículas se peguen entre sí, por lo que se recomienda secar el polvo antes de usarlo.

Reciclaje del polvo metálico

Además de la caracterización, el reciclaje de polvo es otro factor destacado a analizar (Asgari *et al.*, 2017). En la técnica SLM, como ya se mencionó anteriormente, no todo el polvo de la placa base se usa en el proceso de fabricación. Hay una porción importante de este polvo que no se funde y puede ser reciclado y reutilizado. Una vez finalizado el proceso de fabricación, el polvo sobrante debe ser tamizado para su posterior uso. Reutilizar el polvo es una estrategia viable para mejorar la economía de la AM. El uso del polvo sobrante de fabricaciones anteriores da como resultado ahorros en los costes directos, lo que hace que la AM sea más competitiva (Schiltz *et al.*, 2020). Recientemente, varios investigadores han evaluado los cambios producidos en el polvo en relación con el número de ciclos de reciclaje. Se han observado cambios en la morfología y la composición química, en el comportamiento del polvo durante el proceso de fabricación, así como en las propiedades de las piezas finales. Por otro lado, estos estudios también han demostrado una mejora en la repetibilidad de las piezas impresas a medida que aumenta el número de reusos del polvo (Dowling *et al.*, 2020).

El reciclaje del polvo produce efectos en diversas propiedades de las piezas finales. Los cambios morfológicos en el polvo afectan a la porosidad, la rugosidad superficial y las propiedades mecánicas (como la fatiga o el comportamiento a la tracción) de las piezas fabricadas. El efecto de las características morfológicas del polvo en el proceso SLM aún no se conoce bien, pero está relacionado con la combinación de varios parámetros de la materia prima, incluyendo la densidad de empaquetamiento, la fluidez, el área superficial y la capacidad de absorción térmica (Tan, Wong y Dalgarno, 2017). De acuerdo con esto, es importante que el diámetro de las partículas de polvo sea menor que el espesor de capa. Cuanto mayor es la esfericidad y la densidad aparente, mayor es la densidad de las piezas finales; y cuanto menor es la concentración de contaminantes intersticiales, mejor es la adhesión de la capa y las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas.

Además, los diferentes materiales no envejecen de la misma manera, incluso el mismo material envejece de manera diferente cuando está sujeto a diferentes parámetros del proceso SLM (Powell *et al.*, 2020). El Inconel 718 parece ser químicamente estable después de ser utilizado varias veces (Ardila *et al.*, 2014), sin embargo, su fluidez se ve reducida con el reciclaje (Nandwana *et al.*, 2016). En el caso de la aleación de titanio Ti-6Al-4V, además de aumentar el tamaño medio de las partículas (O'Leary *et al.*, 2015), el cambio de la composición química del polvo tras su reutilización (aumenta el nivel de oxígeno) reduce las propiedades mecánicas de las piezas finales (Strondl *et al.*, 2015). El reciclaje del polvo de las aleaciones de Co-Cr y los aceros inoxidable 17-4PH (Slotwinski *et al.*, 2014), 316L (Heiden *et al.*, 2019) y 304L (Sutton *et al.*, 2018) producen el aumento tanto del tamaño de partícula como de la concentración de oxígeno, dando lugar a cambios morfológicos y químicos en el material. Por otro lado, otros investigadores, como Gorji *et al.* (Gorji *et al.*, 2019) o Terrassa *et al.* (Terrassa *et al.*, 2018), concluyen que sus resultados no sugieren cambios significativos en las propiedades mecánicas de las piezas de acero inoxidable 316L impresas en base a un cierto número de ciclos de reutilización del polvo (0-9 veces). Asimismo, la reutilización del polvo de acero 4340 no dio lugar a cambios significativos en sus propiedades de tracción (Jelis *et al.*, 2015). A pesar de los cambios sustanciales en las propiedades del polvo con la reutilización (la densidad disminuye ligeramente y la ductilidad aumenta ligeramente), parece que el polvo de acero inoxidable 316L se puede usar para múltiples ciclos con cambios limitados en las propiedades mecánicas de las piezas impresas (Heiden *et al.*, 2019). En su estudio, Yi *et al.* (Yi *et al.*, 2021) concluyeron que la reutilización del polvo de Inconel 718 entre 1-14 veces no tiene ningún efecto negativo sobre las propiedades mecánicas de las piezas impresas. En el caso de las piezas de Ti-6Al-4V, Alamos *et al.* (Alamos *et al.*, 2020) demostraron que el polvo de titanio se puede reciclar hasta 8 veces sin comprometer las propiedades de la pieza (resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, coeficiente de estricción y densidad).

Uno de los aspectos comúnmente estudiados es la influencia de la reutilización del polvo metálico en su oxidación. Los resultados del estudio de Montelione *et al.* (Montelione *et al.*, 2020) demuestran la importancia de mitigar la oxidación de la materia prima (en este caso polvo metálico de Ti-6Al-4V) para mejorar su reutilización y aumentar su vida útil. Sutton *et al.* (Sutton *et al.*, 2020) relacionaron el aumento del contenido de oxígeno del polvo de acero inoxidable 304L después de su reutilización en el proceso SLM con la disminución de la dureza al impacto. Sin embargo, en ese mismo estudio, las propiedades de tracción no cambiaron con la reutilización, lo que reveló las diferencias entre las propiedades estáticas y dinámicas de estas piezas. A pesar de la progresiva deformación de las partículas y el aumento de la oxidación, Ghods *et al.* (Ghods *et al.*, 2021) concluyeron que no hubo cambios perceptibles en la porosidad del polvo metálico de Ti-6Al-4V después de su reutilización. Respecto al comportamiento de fatiga de las piezas impresas, Schiltz *et al.* (Schiltz *et al.*, 2020) tampoco encontraron cambios significativos con la reutilización del polvo metálico de diferentes materiales (Ti-6AlV-4V, aceros inoxidables 316L y 17-4PH). Por otro lado, también se han obtenido mejoras de ciertas propiedades mecánicas relacionadas con el aumento de la oxidación del polvo reutilizado. Por ejemplo, Tang *et al.* (Tang *et al.*, 2015) obtuvieron un aumento de la resistencia a la tracción y el límite elástico de las piezas fabricadas en Ti-6Al-4V al aumentar los tiempos de reutilización del polvo de 6 a 21 ciclos.

La concentración de oxígeno del polvo no solo aumenta con el proceso de reciclaje, sino también con el tiempo de almacenamiento (Leung *et al.*, 2019). Las materias primas tienen una vida útil limitada, para mantener una calidad constante del material deben almacenarse el mínimo tiempo posible manteniendo unas condiciones que eviten su reacción química o degradación (evitar la exposición a la humedad).

Otro factor que afecta las propiedades de las piezas impresas por SLM es la presencia de partículas de salpicaduras, proyecciones fundidas formadas durante el proceso de fusión del material (Sutton *et al.*, 2020). Según D. Wang *et al.* (D. Wang *et al.*, 2020), la presencia de partículas de salpicadura en el polvo de Co-Cr-W reutilizado favorece la formación de poros y afecta severamente las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas. Esto reduce significativamente la resistencia a la tracción, el límite elástico y los valores de alargamiento después de seis ciclos de reutilización del polvo. Asimismo, Ahmed *et al.* (Ahmed *et al.*, 2020) observaron que las partículas de salpicaduras son potencialmente responsables de la disminución de la calidad de las piezas impresas en acero inoxidable 17-4PH. Su estudio concluyó con el aumento del tamaño de los poros y la rugosidad de la superficie, así como la disminución de la deformación por falla con la reutilización del polvo. Sin embargo, esta reutilización no afectó ni a las propiedades de tracción ni a la microestructura de las piezas.

Tras analizar el efecto de la reutilización del polvo metálico y con el fin de minimizar el riesgo de formación de defectos y extender la reutilización del polvo a un mayor número de ciclos de fabricación SLM, varios investigadores proponen metodologías de reciclaje. Pinto *et al.*

(Pinto *et al.*, 2020) recomiendan establecer un proceso de separación magnética después del tamizado o proporcionar una evaluación cuantitativa de la relación de cantidad de polvo virgen/reutilizado para garantizar la homogeneidad del lecho de polvo en términos de empaquetado de las partículas y distribución de las capas de polvo durante la fabricación SLM. Ardila *et al.* (Ardila *et al.*, 2014) proponen una metodología de reciclaje del polvo de Inconel 718 que permite su reutilización hasta 14 ciclos manteniendo las propiedades de las piezas tanto metalúrgicamente (en términos de microestructura y porosidad equivalentes) como mecánicamente (en términos de dureza similar). En base a los resultados obtenidos en su investigación, Cordova *et al.* (Cordova, Bor, de Smit, Carmignato, *et al.*, 2020) concluyen que es factible reutilizar el polvo de Al-Mg-Sc-Zr en 4 ciclos posteriores de fabricación SLM tras un tamizado adecuado del polvo y una etapa de rejuvenecimiento donde se mezcla con un 40 % de polvo virgen. Por otro lado, Powell *et al.* (Powell *et al.*, 2020) proponen la esferoidización de plasma como un método prometedor para evitar la eliminación del polvo al final de su vida útil, creando partículas similares al polvo virgen. Lo que supone una propuesta económicamente viable para reducir el desperdicio dentro de la industria.

Como conclusión, cabe destacar la importancia de caracterizar tanto el polvo virgen como el polvo resultante de diferentes ciclos de fabricación-reciclaje, así como evaluar la influencia de la reutilización del polvo metálico en las propiedades de las piezas finales. Estos estudios son específicos para cada material y para cada configuración de parámetros del proceso de fabricación, ya que cada material (incluso el mismo material de diferentes proveedores) tiene diferentes características y, por consiguiente, los parámetros del proceso SLM requeridos para la adecuada fabricación también serán diferentes.

En particular, el polvo de acero inoxidable 17-4PH del fabricante 3DSystems utilizado para la fabricación SLM mediante la máquina ProX DMP 100 (entre otras), no ha sido caracterizado ni en estado virgen ni en diferentes grados de reciclaje. De igual modo, las piezas fabricadas a partir de estos estados del polvo (virgen y reutilizado) tampoco han sido evaluadas. Respecto al acero inoxidable 17-4PH, únicamente ha sido estudiado el polvo de EOS, utilizado en la fabricación SLM en atmósfera inerte de argón y sometido a un máximo de 10 ciclos de reciclaje. Por esta razón, en el capítulo 5 de la presente tesis doctoral se abordan estos estudios de caracterización del polvo de partida y evaluación de la calidad de las piezas impresas, ya que son fundamentales para analizar la influencia del estado del material de partida en el proceso SLM (en atmósfera inerte de nitrógeno y extendiendo el número de ciclos al máximo posible).

2.2.2. Parámetros del proceso SLM

Además del material de partida (polvo metálico), los parámetros específicos del proceso SLM afectan en gran medida las propiedades de las piezas fabricadas. Este apartado se centra en la descripción y caracterización de los parámetros del proceso SLM que son configurados directamente en la máquina, así como en la influencia de su variación sobre la calidad de las piezas fabricadas. Dichos parámetros son definidos y representados gráficamente en la Figura 2.4 y la Tabla 2.3.

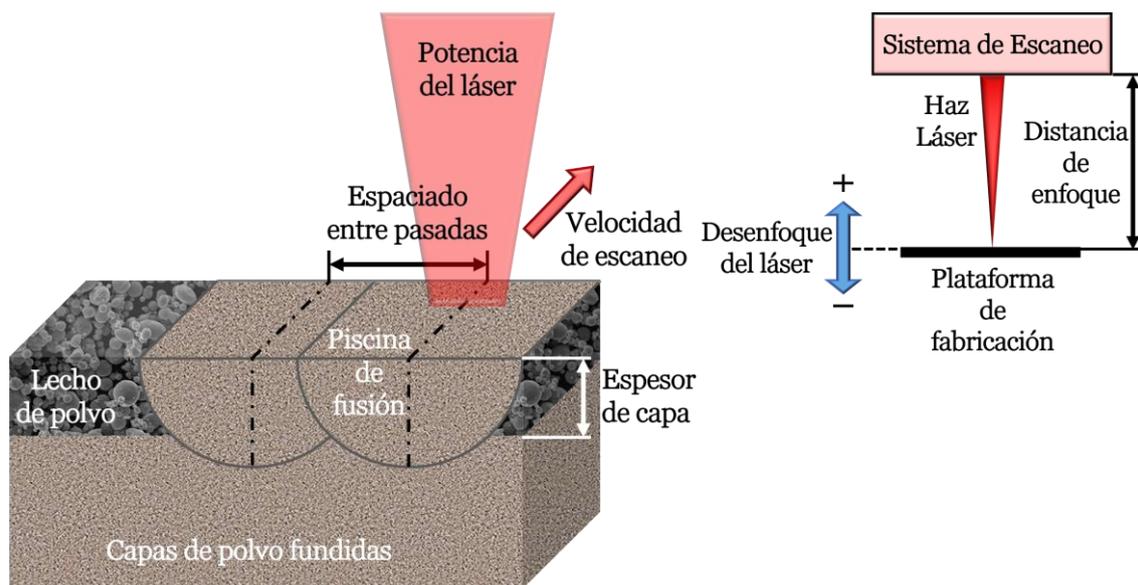


Figura 2.4. Parámetros del proceso SLM. [Figura basada en (Yap *et al.*, 2015)].

Tabla 2.3. Descripción de los parámetros SLM.

Parámetro SLM	Descripción	Unidades
Potencia del láser	Cantidad de calor que libera la fuente de energía láser por unidad de tiempo	W
Desenfocado del láser (<i>defocusing</i>)	Incremento de distancia de la superficie del lecho de polvo (plataforma de fabricación) respecto a la posición de enfoque del haz láser, puede ser positivo o negativo	mm
Velocidad de escaneo	Velocidad del movimiento del haz láser durante el proceso de escaneo	mm/s
Espesor de capa	Espesor de la capa de polvo depositada y compactada por el rodillo sobre el lecho de polvo de la plataforma de fabricación	μm

Espaciado o distancia entre pasadas (<i>hatch spacing</i>)	Distancia de separación entre pasadas consecutivas de escaneo láser medida de centro a centro	μm
Estrategia de escaneo	Trayectoria de escaneo recorrida por el haz láser durante el proceso de fabricación	-

La optimización de estos parámetros es fundamental para garantizar la calidad de las piezas fabricadas. La combinación de la potencia del láser (P), la velocidad de escaneo (v), el espaciado o distancia entre pasadas (d) y el espesor de capa (e) según la ecuación (1) proporcionan el cálculo de la densidad de energía volumétrica (VED, *Volumetric Energy Density*), es decir, la cantidad de energía entregada por unidad de volumen de lecho de polvo. El cálculo de la VED sirve como guía para la adecuada selección de estos parámetros SLM.

$$\text{VED [J/mm}^3\text{]} = \frac{P \text{ [W]}}{v \text{ [mm/s]} \cdot d \text{ [mm]} \cdot e \text{ [mm]}} \quad (1)$$

Han sido varios los investigadores que han evaluado los efectos de estos parámetros en el rendimiento de las piezas. Algunos establecieron modelos de elementos finitos (X. Zhang *et al.*, 2020), mientras que la mayoría optaron por los estudios experimentales en diferentes materiales como 24Cr-Ni-Mo (Cui *et al.*, 2021), Co-Cr-Fe-Mn-Ni (Niu *et al.*, 2020), Ti-6Al-4V (Javidrad, Ghanbari y Javidrad, 2021), Al-5Fe-1Mg-0.8Sc-0.7Zr (Y. Wang *et al.*, 2021), tungsteno (Guo *et al.*, 2019), acero inoxidable 304L (Ghayoor *et al.*, 2020), acero maraging 18Ni(300) (Bai *et al.*, 2022), acero H13 (Katancik *et al.*, 2020) o Inconel 718 (H. Zhang *et al.*, 2021). Según Tonelli *et al.* (Tonelli, Fortunato y Ceschini, 2020) la VED se puede clasificar en: baja (hasta 100 J/mm³), media (entre 100 y 150 J/mm³) y alta (entre 150 y 270 J/mm³). Una baja VED no es suficiente para fundir completamente el polvo metálico, por lo que el material fundido es altamente inestable. En este caso, debido a las grandes carencias de fusión, las piezas SLM presentan alta porosidad, alta rugosidad de la superficie superior y gran variabilidad en los resultados de dureza. La VED media y alta consiguen la fusión completa del polvo, dando lugar a piezas con muy baja porosidad y baja rugosidad de la superficie superior, así como valores de dureza con muy baja variabilidad.

Otros investigadores han considerado diferentes ecuaciones para el cálculo de la VED. Según Prashanth *et al.* (Prashanth *et al.*, 2017) la ecuación (1) no se puede utilizar como una cantidad absoluta para la optimización de los parámetros SLM, sino que se trata de una estimación aproximada, ya que para evaluar correctamente la VED se deberían considerar algunos parámetros del proceso adicionales (estrategia de escaneo, tamaño del *spot* del láser y compensaciones del láser) y las propiedades del material (incluida la conductividad térmica y la reflectividad). Gunenthiram *et al.* (Gunenthiram *et al.*, 2018) propusieron una ecuación

alternativa considerando solo los parámetros relacionados con la irradiación del láser (potencia, velocidad de escaneo y diámetro del *spot*) para definir la VED (J/mm^3). De manera similar, Scipioni Bertoli *et al.* (Scipioni Bertoli *et al.*, 2017) calcularon la VED (J/mm^3) en función de la potencia del láser, la velocidad de escaneo, el diámetro del *spot* del láser y el espesor de capa. Hu *et al.* (Hu *et al.*, 2020) tuvieron en cuenta el tiempo de exposición además de los parámetros de la potencia del láser, el diámetro del *spot* del láser, el espaciado entre pasadas y el espesor de capa. Por otro lado, Riquelme *et al.* (Riquelme *et al.*, 2019) estudiaron la correlación entre la masa fundida y la densidad de energía superficial (J/mm^2), definida como la relación entre la potencia del láser y el producto de la velocidad de escaneo por el diámetro del *spot* del láser. Yadroitsev *et al.* (Yadroitsev *et al.*, 2012) analizaron el grado de influencia de la densidad de potencia (MW/cm^2), la velocidad de escaneo y el espesor de capa en las características geométricas de las pasadas individuales de escaneo láser, obteniendo como parámetro más influyente la potencia del láser. Rashid *et al.* (Rashid *et al.*, 2018) emplearon la energía por capa como parámetro de entrada del proceso para el control de la densidad de las piezas fabricadas por SLM.

La entrada de energía neta influye en el tipo de flujo de calor producido durante el proceso de fabricación SLM. En función de la densidad de potencia del láser, la fusión del metal (similar al proceso de soldadura) presenta dos modos típicos de transferencia de calor: el modo de conducción y el modo de penetración (también conocido como modo de «ojo de cerradura», en inglés «*keyhole*») (Figura 2.5). En el primer modo, el calentamiento se produce por conducción del calor desde la superficie hacia el interior, dando lugar a una piscina de fusión ancha y poco profunda con forma semicircular. En el modo de «ojo de cerradura», se produce una piscina de fusión estrecha y profunda debido a la evaporación del metal que favorece la absorción y transferencia de la energía del láser a través del metal fundido (Wang y Zou, 2019).

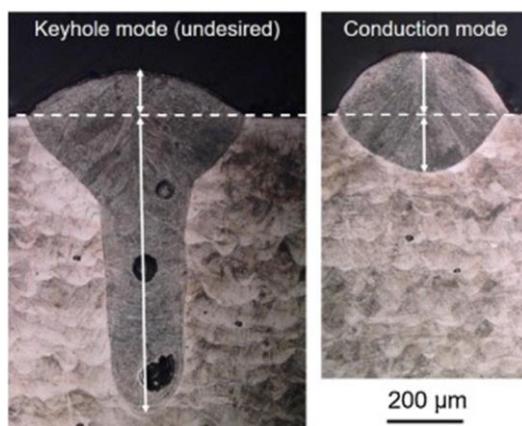


Figura 2.5. Piscina de fusión resultante de los dos modos típicos de transferencia de calor: penetración (izquierda) y conducción (derecha) (Metelkova *et al.*, 2018).

A continuación, se exponen los principales efectos de los parámetros SLM (descritos en la Tabla 2.3) sobre las propiedades de las piezas fabricadas.

Potencia del láser y velocidad de escaneo

La energía insuficiente, producida por lo general por una combinación de baja potencia del láser, alta velocidad de escaneo y gran espesor de capa, a menudo da como resultado la formación de «balling» (fenómeno de formación de bolas producido durante la fusión del polvo metálico en el proceso SLM que perjudica la calidad de las piezas impresas (Li *et al.*, 2012)) debido a la falta de fusión del polvo con la capa anterior. Por el contrario, una potencia del láser alta junto con una velocidad de escaneo baja pueden provocar una excesiva evaporación de material dando lugar al efecto conocido como «ojo de cerradura» (Yap *et al.*, 2015).

El aumento de la potencia del láser permite el aumento de la velocidad de escaneo y del espaciado entre pasadas sin perjudicar la VED, de esta forma se reduce el tiempo de fabricación. Sin embargo, el parámetro de la velocidad de escaneo es un factor dominante sobre la densidad de las piezas fabricadas, siendo inversamente proporcionales (Enneti, Morgan y Atre, 2018). Además, el aumento de la velocidad da lugar al aumento de los defectos internos (poros debidos a la falta de fusión del polvo) lo que resulta en un aumento de la rugosidad relativamente alto (Jiang *et al.*, 2021). Asimismo, al aumentar la potencia del láser se produce la disminución de las propiedades de tracción debido a la formación de microporos en el interior de la pieza. Una potencia baja da lugar a una microestructura dendrítica con granos finos, mientras que una potencia alta produce granos columnares más finos que favorecen el alargamiento en detrimento de la resistencia a la tracción (Yang *et al.*, 2020). La potencia del láser y la velocidad de escaneo ayudan a regular el tiempo de solidificación y enfriamiento y, por lo tanto, tienen una gran influencia en la formación de diferentes tipos de propiedades microestructurales (Pal *et al.*, 2020).

En relación a las propiedades mecánicas, el aumento de la potencia del láser produce el aumento de la dureza y la resistencia de las piezas, lo que se atribuye principalmente al aumento de la concentración de oxígeno y nitrógeno (Na *et al.*, 2018). Por otro lado, el aumento de la velocidad de escaneo da lugar a la presencia de defectos internos que juegan un papel dominante en la determinación del comportamiento a la corrosión, produciendo, en este caso, la disminución de la resistencia a la corrosión (Jiang *et al.*, 2021). En general, la configuración de los valores tanto insuficientes como excesivos de los parámetros de potencia del láser y velocidad de escaneo afectan negativamente a la microestructura (defectos) y las propiedades mecánicas (disminución de los valores de resistencia a la tracción, límite elástico y elongación) de las piezas (Ansari y Salamci, 2021).

Desenfoco del láser (*defocusing*)

Cuando se transfiere energía del láser a la pieza produciendo la piscina de fusión, la transferencia no es perfecta, puede haber pérdidas debido al cambio de la distancia del haz

láser respecto a la cama de polvo. El papel del desenfoque del láser en la optimización del proceso SLM es significativo, la variación de este parámetro da lugar a cambios en la microestructura de las piezas debido a la variación del tamaño del *spot* del láser y, en consecuencia, de la densidad de energía. Particularmente, cuando se mantiene constante la potencia del láser y la velocidad de escaneo, el desenfoque del láser (sentido positivo y negativo) puede afectar a la microestructura y a la presencia de defectos en las piezas fabricadas (Metelkova *et al.*, 2018).

El signo de desenfoque del láser considera la naturaleza convergente o divergente del haz láser. El desenfoque positivo conduce a la formación de una piscina de fusión más profunda debido a su naturaleza convergente en comparación con el desenfoque negativo (Figura 2.6). Las diferencias significativas en el tamaño de la piscina de fusión junto con otros aspectos pueden conducir a diferentes microestructuras, debido principalmente a las diferentes velocidades de enfriamiento. Cuando el desenfoque es negativo, la estabilidad del proceso mejora, aunque esto ocurre a expensas de perder energía de entrada debido a la divergencia del haz láser (Metelkova *et al.*, 2018).

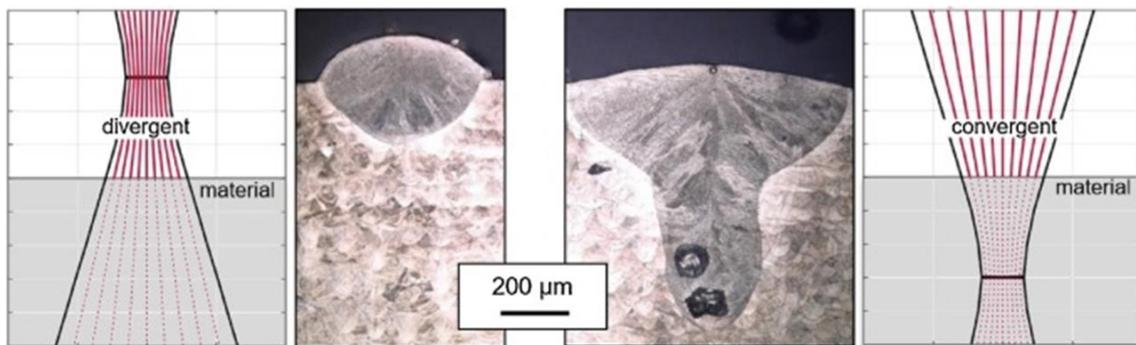


Figura 2.6. Forma de la piscina de fusión en función de la naturaleza del haz láser: divergente (izquierda) y convergente (derecha) (Metelkova *et al.*, 2018).

Para evitar la fusión en modo de penetración, Francis (Francis, 2017) determinó un tamaño normalizado del *spot* del láser (el tamaño del *spot* entre el ancho de la piscina de fusión producido por una fuente de calor puntual) de 1,0 para el Ti-6Al-4V y 0,9 para el Inconel 718 y los aceros inoxidables 304, 316L y 17-4PH. En relación al tamaño del *spot* del láser, Shi *et al.* (Shi *et al.*, 2018) concluyeron que el aumento del diámetro del haz láser redujo la formación de defectos y mejoró tanto la densidad como las propiedades de resistencia mecánica de las piezas resultantes de la fabricación SLM procesadas con alta potencia.

Espesor de capa

El aumento del espesor de capa en el proceso SLM perjudica tanto la calidad superficial como la calidad interior de las piezas resultantes. Aumentar el espesor de capa es probable que genere salpicaduras y defectos que aumenten la rugosidad superficial, perjudicando el

acabado de las piezas (Shi *et al.*, 2020). Asimismo, al aumentar el grosor de capa disminuye la VED (como se muestra en la ecuación (1)) y, por consiguiente, no hay suficiente energía para que el polvo metálico se funda y adhiera fuertemente a la capa anterior (Bai *et al.*, 2022). Para conseguir una fusión completa del polvo metálico, la superposición o solape entre las piscinas de fusión lateralmente adyacentes debe ser mayor que el espesor de capa utilizado en la fabricación de las piezas (Tang, Pistorius y Beuth, 2017). Por otro lado, la disminución del espesor de capa da como resultado una mayor densidad relativa (Nghia Luu, Zhou y Mui Ling Nai, 2022), dureza y resistencia a la tracción (Ma *et al.*, 2015) de las piezas impresas.

Espaciado entre pasadas (*hatch spacing*)

El gradiente de temperatura se reduce a medida que aumenta la distancia entre pasadas debido a la disminución de la acumulación térmica. La tensión superficial, que provoca la transferencia de calor y masa, tiende a arrastrar el líquido fundido hacia el borde de la piscina de fusión. La configuración óptima del espaciado entre pasadas produce una tensión residual razonable que extiende el líquido a una velocidad constante dando lugar a una superficie con baja rugosidad (Xia *et al.*, 2016). Por otro lado, la densidad de las piezas fabricadas por SLM es inversamente proporcional al espaciado entre pasadas. A menor distancia entre pasadas del láser mayor densidad y menor porosidad (Rashid *et al.*, 2017). Este efecto del espaciado es más pronunciado cuando aumenta la velocidad de escaneo (Hu *et al.*, 2017).

Estrategia de escaneo

Entre otros parámetros del proceso SLM, la trayectoria de escaneo del láser afecta al comportamiento termomecánico de las piezas y, por lo tanto, modificar el patrón de escaneo láser puede ser una posible estrategia para reducir las tensiones residuales y las deformaciones al influir en la distribución de entrada de la intensidad del calor. Asimismo, la variación de la estrategia de escaneo láser influye directamente en la calidad de las piezas, afectando a diversas propiedades como la densidad, las características microestructurales, la calidad superficial, las propiedades mecánicas, etc.

Entre las diferentes estrategias, una de las más estudiadas es la conocida como **estrategia de escaneo normal**. En esta estrategia la trayectoria del láser recorre la capa de polvo correspondiente trazando un recorrido de líneas paralelas entre sí (Figura 2.7). A continuación, se exponen los estudios llevados a cabo por diversos investigadores con la finalidad de optimizar los parámetros específicos de esta estrategia en el proceso de fabricación SLM.

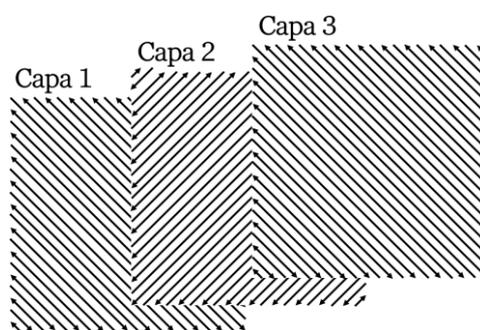


Figura 2.7. Estrategia de escaneo láser normal.

Gu y Chen (Gu y Chen, 2018) diseñaron un estilo de estrategia normal en el que las pistas de las capas adyacentes se escalonan la mitad de la distancia entre pasadas y se rotan 90° cada dos capas. El resultado de esta estrategia de escaneo láser fue la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 316L totalmente densas y con alta homogeneidad microestructural. AlMangour *et al.* (AlMangour, Grzesiak y Yang, 2017) demostraron que la estrategia de escaneo láser tiene una influencia significativa en la densificación de las piezas, obteniendo como resultado de su estudio el valor más alto de densidad en las piezas de acero inoxidable 316L (reforzado con 15 % en volumen de nanopartículas de Ti-C) fabricadas con una estrategia de escaneo cruzada (pasadas horizontales y verticales cruzadas en la misma capa de escaneo láser). Por otro lado, concluyeron que las texturas cristalográficas relativamente fuertes a lo largo de las direcciones de escaneo y de fabricación pueden transformarse en débiles y las propiedades mecánicas de las piezas impresas pueden volverse casi isotrópicas al girar el vector de escaneo 90° entre o dentro de las capas fabricadas. Asimismo, Larimian *et al.* (Larimian *et al.*, 2020) obtuvieron la densificación más alta, la microestructura más refinada y las mejores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento y microdureza) en las muestras de acero inoxidable 316L fabricadas con la estrategia de escaneo cruzada. En este mismo material, Salman *et al.* (Salman *et al.*, 2019) demostraron que la estrategia de escaneo normal con contorno dio lugar a piezas con una microestructura más fina y una mejor combinación de propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y límite elástico) que las piezas que carecen de este contorno en la trayectoria del láser. Rashid *et al.* (Rashid *et al.*, 2017) concluyeron que las muestras de acero inoxidable 17-4PH impresas con la estrategia de escaneo normal y con doble pasada del láser presentaron una mejora en la densidad relativa y en la dureza en comparación con las impresas con escaneo simple. En cuanto a la precisión geométrica de las piezas fabricadas mediante SLM, Zhang *et al.* (Zhang, Zhang y Zhu, 2021) concluyeron que la estrategia de escaneo normal con contorno da como resultado piezas circulares con mejor precisión que las estrategias que carecen de este contorno.

Uno de los parámetros específicos de la estrategia de escaneo normal más investigado es el ángulo de rotación de las pasadas del láser entre capas sucesivas. El ángulo de escaneo láser aplicado puede influir en la textura cristalográfica de las piezas y, por lo tanto, en la anisotropía de sus propiedades elásticas (Geiger, Kunze y Etter, 2016), así como en el tamaño de grano y en la morfología de la microestructura y, por consiguiente, en sus propiedades mecánicas (Liu *et al.*, 2019). Dai *et al.* (Dai *et al.*, 2018) evaluaron la influencia de la estrategia de escaneo con rotación de 90° en la formación de los límites de la piscina de fusión, la microestructura, la precisión dimensional, las propiedades de tracción, el comportamiento de deslizamiento microscópico y el mecanismo de fractura de las piezas de Al-Si12. Wan *et al.* (Wan *et al.*, 2019) también se centraron en el análisis de la influencia del ángulo de 90° entre capas sucesivas, obteniendo resultados con mejores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y a la fatiga) para las piezas de Inconel 718 fabricadas sin rotación entre capas.

Sun *et al.* (Sun, Hagihara y Nakano, 2018) analizaron la microestructura de las piezas de Ni-25at.%Mo obteniendo una textura monocristalina con un orden de corto rango de átomos de Mo para las piezas fabricadas sin y con una rotación de 90° entre capas, mientras que en el caso de las piezas fabricadas con una rotación de 67° obtuvieron una textura de fibra. Marattukalam *et al.* (Marattukalam *et al.*, 2020) obtuvieron resultados similares a los anteriores, pero en este caso para piezas de acero inoxidable 316L, concluyendo como resultado de su estudio una textura cristalina única fuerte [100] en la dirección de capa y [110] en la dirección de fabricación para las muestras impresas con una estrategia de escaneo bidireccional y sin rotación. Según el estudio de Song *et al.* (Song *et al.*, 2018) la estrategia de escaneo con rotación de 15° genera mayores tensiones en las piezas de Ti-6Al-4V que la estrategia sin y con rotación de 90°. En cuanto al estudio de la caracterización y mecanismo de formación de grietas, C. Zhang *et al.* (C. Zhang *et al.*, 2020) concluyeron que las estrategias de escaneo pueden regular eficazmente la morfología del grano, la textura y la distribución de la tensión residual para controlar la densidad y la morfología de las grietas. En el caso de las piezas fabricadas por SLM en la aleación de Fe-Co-Cr-Ni-Mn de alta entropía, se obtuvieron densidades de fisura más bajas con la estrategia de escaneo normal utilizando un ángulo de rotación de 67° [(C. Zhang *et al.*, 2020), (L. Guo *et al.*, 2021)].

Por otro lado, algunos investigadores se han centrado en el estudio del efecto de la estrategia normal mediante simulaciones. Cao (Cao, 2021) concluyó que el escaneo doble da como resultado piezas con mejores propiedades en términos de orientación del grano, defecto de poros y rugosidad superficial. En base a los hallazgos de su estudio, Parry *et al.* (Parry, Ashcroft y Wildman, 2016) recomiendan un diseño de estrategia de escaneo láser que evite longitudes de vector de escaneo largas y oriente la dirección de estos vectores de manera uniforme para producir un campo de tensión isotrópico en la pieza. Asimismo, recomiendan que el tamaño de las regiones de eclosión debe variarse adecuadamente para mantener la temperatura más alta sin causar inestabilidad en el proceso, de esta manera la optimización de la estrategia de escaneo láser podría mitigar aún más los efectos producidos por la tensión residual y reducir los requisitos de las estructuras de soporte sin requerir cambios ni en la máquina SLM ni en el diseño de la pieza impresa. En relación con lo anterior, Ramos *et al.* (Ramos, Belblidia y Sienz, 2019) proponen una nueva estrategia de escaneo (unidireccional en una secuencia de vectores pares e impares) destinada a reducir el nivel de tensiones residuales generadas durante el proceso de fabricación SLM. Por otro lado, Liang *et al.* (Liang *et al.*, 2021) incorporan los efectos de la fabricación con diferentes estrategias de escaneo láser en el marco del modelado de deformaciones inherentes modificadas para permitir una simulación precisa de la deformación residual de las piezas metálicas fabricadas por SLM.

La **estrategia de escaneo en islas** es una de las más utilizadas. La trayectoria que recorre el láser es similar a la de la estrategia normal, pero en este caso el haz láser va fundiendo el polvo según pequeñas zonas denominadas islas (cuyos vectores de escaneo son cortos) hasta

completar la fusión de la capa entera. En función de la forma de las islas esta estrategia también es conocida como estrategia hexagonal (Figura 2.8a) o estrategia en forma de tablero de ajedrez (Figura 2.8b).



Figura 2.8. Estrategia de escaneo láser en islas: (a) hexagonal y (b) en forma de tablero de ajedrez.

La evolución microestructural de las muestras fabricadas mediante el proceso SLM se ve afectada directamente por la concentración de calor y la velocidad de enfriamiento. Una mayor concentración de calor conduce a una menor velocidad de enfriamiento y, por consiguiente, favorece la formación de granos más largos y gruesos (Javidrad, Ghanbari y Javidrad, 2021). La estrategia de escaneo en islas con vectores cortos y con rotación de la dirección de escaneo entre capas, rompe los granos columnares largos dando lugar a estructuras de grano más cortas y finas (Nong y Zhou, 2021), lo que produce una mejora en la resistencia a la tracción y una buena ductilidad de las piezas fabricadas (Song *et al.*, 2020). Esta estrategia de escaneo también tiene un impacto significativo en las tensiones residuales, la reducción de la longitud de los vectores de escaneo permite reducir la distorsión de las piezas impresas (Salem *et al.*, 2020). Asimismo, la rotación entre capas del vector de escaneo disminuye la formación de tensiones residuales en las piezas (Ali, Ghadbeigi y Mumtaz, 2018). Y. C. Wang *et al.* (Y. C. Wang *et al.*, 2020) concluyeron que las muestras de GH4169 fabricadas con la estrategia de escaneo de tablero de ajedrez tienen mayor resistencia a la tracción y una anisotropía de tensión más evidente que las muestras fabricadas con la estrategia de escaneo normal. Según los resultados obtenidos por Hongmei Zhang *et al.* (Hongmei Zhang *et al.*, 2020), las piezas de Inconel 718 (reforzado con 2 % en peso de partículas de W) fabricadas con la estrategia de escaneo en islas tienen baja porosidad, alta microdureza y baja tasa de desgaste.

Algunos investigadores han estudiado la influencia del tamaño de la isla en la calidad de la superficie, las características microestructurales, la tensión residual, las propiedades de tracción o la resistencia a la corrosión con la finalidad de optimizar el proceso SLM en función de la aplicación deseada y para diferentes materiales como Al-Mg-Sc-Zr (Han Zhang *et al.*, 2020) o Inconel 718 (Lu *et al.*, 2015). Con la finalidad de lograr piezas de alta calidad, Javidrad *et al.* (Javidrad, Ghanbari y Javidrad, 2021) concluyeron que para celdas de tablero de ajedrez pequeñas (o longitudes del vector de escaneo pequeñas) se debe configurar un valor de VED más bajo.

Además de las ventajas ya mencionadas sobre la estrategia de escaneo en islas, Zou *et al.* (Zou *et al.*, 2020) demostraron que la aplicación simultánea de cuatro láseres de escaneo reduce significativamente las tensiones residuales producidas durante el proceso SLM, evaluado en este caso para la fabricación de piezas de Ti-6Al-4V. Por otro lado, Catchpole-Smith *et al.* (Catchpole-Smith *et al.*, 2017), después de analizar la estrategia de escaneo en islas, desarrollaron y probaron experimentalmente nuevas estrategias de escaneo fractal basadas en las curvas de Hilbert y Peano-Gosper para la fabricación SLM de piezas en la superaleación CM247LC.

Otra de las trayectorias láser utilizada en el proceso SLM es la **estrategia de escaneo concéntrica**. En este caso el haz láser describe una trayectoria que recorre el contorno de la geometría de la pieza desde el exterior hacia el interior o viceversa, en función de la configuración seleccionada (Figura 2.9).

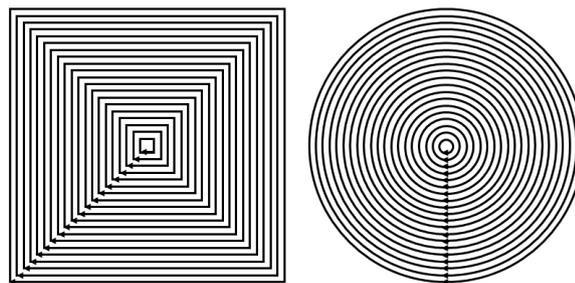


Figura 2.9. Estrategia de escaneo láser concéntrica.

En la mayoría de las estrategias de escaneo, el láser se mueve de un extremo a otro de la pieza, sin embargo, en la estrategia de escaneo concéntrica la dirección del movimiento del láser y la longitud de los vectores de escaneo cambian constantemente dentro de la misma pieza. Estos cambios conducen a grandes variaciones en el gradiente térmico que provocan la formación de defectos a lo largo del borde de la piscina de fusión. Además, esta estrategia de escaneo tiene una superposición casi completa en el centro de la pieza, es decir, se produce una doble fusión, lo que fomenta la porosidad en este área a lo largo de la altura de fabricación de la pieza. Este efecto de la porosidad, causado por el cambio de dirección del láser de paralelo a perpendicular, afecta a la dureza de la pieza, siendo menor en el centro de la misma (Kudzal *et al.*, 2017). Por otro lado, a medida que varía la dirección de escaneo del láser, la velocidad de escaneo disminuye y la VED aumenta instantáneamente, lo que conduce a la inestabilidad de la piscina de fusión influyendo negativamente en la densificación de las piezas impresas. Como resultado de la variación del gradiente térmico que sufren las piezas impresas con la estrategia de escaneo concéntrica, el área central presenta tensión de compresión residual, mientras que en el área del borde aparece tensión de tracción residual (Tang *et al.*, 2020).

Por lo general, las piezas impresas con estrategias como la hexagonal presentan mejores propiedades (dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, etc.) que las fabricadas empleando la estrategia de escaneo concéntrica (Lashgari *et al.*, 2020). Sin embargo, respecto a la calidad geométrica de las piezas, requisito de gran importancia para aplicaciones (como por ejemplo, la producción de *stents* cardiovasculares en el sector médico), la estrategia de escaneo concéntrica resulta de gran fidelidad geométrica (Demir y Previtali, 2017).

La revisión realizada en este apartado revela la influencia de los parámetros del proceso SLM en las propiedades de las piezas fabricadas, en consecuencia, la optimización de estos parámetros es fundamental para garantizar piezas finales de calidad.

Entre los diferentes parámetros SLM, la influencia del espesor de capa y el espaciado entre pasadas es muy conocida y, por lo tanto, son parámetros comúnmente recomendados por los fabricantes de las tecnologías SLM para la adecuada fabricación de las piezas. En términos de productividad, interesaría aumentar el valor de ambos parámetros para reducir el tiempo de fabricación, sin embargo, esto afectaría negativamente a las propiedades de las piezas, por lo que se ha decidido utilizar los valores preestablecidos en la máquina SLM. Otro parámetro de influencia bien conocida es la velocidad de escaneo láser. Un aumento de la misma supondría la disminución del tiempo de fabricación, pero también el incremento de la porosidad, los defectos internos y la rugosidad superficial de las piezas finales. Por esta razón, también se ha decidido mantener el valor estándar recomendado por el fabricante.

Con la finalidad de ajustar la VED (ecuación (1)) y teniendo en cuenta que los parámetros de velocidad de escaneo, espaciado entre pasadas y espesor de capa se van a mantener constantes, es necesario ajustar la potencia del láser. El ajuste de la potencia del láser es fundamental para garantizar la adecuada realización del proceso SLM, así como la calidad de las piezas finales. De igual forma, el ajuste óptimo del parámetro del desenfoque del láser es esencial para optimizar la forma de las piscinas de fusión y, en consecuencia, las propiedades de las piezas impresas. En particular, ambos parámetros deben ser ajustados en función del material y la máquina SLM (según el rango de valores definido en las especificaciones técnicas) utilizados, razón por la cual, se aborda el estudio de estos parámetros de interés en el capítulo 4 de la presente tesis doctoral.

Otro de los parámetros que influye directamente en la calidad de las piezas impresas es la estrategia de escaneo, ya que la trayectoria recorrida por el haz láser afecta directamente al comportamiento termomecánico de las piezas en función del material. Las estrategias de escaneo del láser han sido ampliamente analizadas, sin embargo, no existen estudios completos sobre la influencia de este parámetro en la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH. Por este motivo, en el capítulo 4 de esta tesis doctoral se realiza la comparación de las tres estrategias de escaneo láser principales (normal, en isla y concéntrica) mediante la evaluación de la calidad de las piezas (propiedades del material, propiedades mecánicas, acabado superficial, calidad geométrica y dimensional). Esto permitirá recomendar la utilización de la estrategia de escaneo más adecuada en función de la aplicación final de las piezas fabricadas en este material.

2.2.3. Atmósfera de fabricación SLM

Durante la fusión del polvo metálico en el proceso de fabricación SLM, se sabe que la presencia de oxígeno fomenta la fragilización y perjudica las propiedades humectantes tanto del sustrato como del material solidificado. El oxígeno residual conduce a la contaminación del material por absorción en la masa fundida, así como a la formación de capas de óxido. De ese modo, se deteriora la humectabilidad de la superficie y se favorece la formación de defectos. Además, una gran cantidad de oxígeno disuelto en el material a granel conduce a una mayor dureza y fragilidad de las piezas impresas, especialmente para materiales con alta afinidad por el oxígeno como las aleaciones de titanio o magnesio (Emminghaus *et al.*, 2021). Convencionalmente, los gases inertes como el argón y el nitrógeno se utilizan para reducir el contenido de oxígeno residual dentro de la atmósfera de fabricación SLM.

Algunos investigadores han centrado sus estudios en la influencia del gas inerte empleado en la cámara de fabricación SLM sobre las propiedades de las piezas impresas. Rakesh Ch *et al.* (Rakesh Ch *et al.*, 2019) concluyeron que es deseable fabricar piezas de Al-Si-10Mg en una atmósfera de nitrógeno ya que aumenta la resistencia a la tracción, además de ser más abundante y barato que el argón. Asimismo, Gu *et al.* (Gu *et al.*, 2021) demostraron que las piezas de Co-2.5Cr-Fe-2Ni-Ti-0.5W impresas en atmósfera de nitrógeno presentan mayor microdureza, resistencia al desgaste, resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento que las fabricadas en atmósfera de argón.

Por otro lado, se ha investigado el uso de mezclas de gases en lugar de gases protectores puros en la atmósfera de fabricación SLM. Puzon *et al.* (Puzon *et al.*, 2020) investigaron una mezcla de argón y helio mediante la cual consiguieron reducir la porosidad de las piezas impresas en Ti-6Al-4V. Según los autores, esto podría atribuirse a la relación de la densidad y las propiedades térmicas equilibradas de los gases. Otra posibilidad, además del uso de mezclas de gases inertes, consiste en mezclar pequeñas cantidades de un gas activo con el gas inerte usado, lo que se conoce como dopaje y con lo que se puede lograr una reacción del oxígeno restante dando lugar a una reducción adicional del contenido de oxígeno residual (Emminghaus *et al.*, 2021).

2.2.4. Diseño de piezas para la fabricación SLM

El diseño para fabricación aditiva (DfAM, *Design for Additive Manufacturing*) es un método relativamente reciente de proporcionar a los diseñadores herramientas, pautas y reglas empíricas capaces de guiarlos a través del campo inexplorado del diseño cuando se utiliza la AM como medio de fabricación (Boschetto *et al.*, 2019). Con aplicación en el proceso SLM,

se han propuesto métodos DfAM para la fabricación de piezas para ensamblaje (Sossou *et al.*, 2018) o piezas específicas como las matrices de estampado en caliente (Chantzis *et al.*, 2021) entre otras aplicaciones. Entre los diferentes factores del DfAM aplicados al proceso SLM caben destacar las reglas de diseño, la optimización topológica, las estructuras de soporte, la orientación y el posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación.

Reglas de diseño

Las reglas de diseño juegan un papel importante en la mejora de la eficiencia y la optimización de la calidad de las piezas fabricadas por SLM. Se han propuesto reglas de diseño tanto para aplicaciones específicas (Finazzi *et al.*, 2019) como para la fabricación SLM en general.

Thomas (Thomas, 2009) propuso las siguientes reglas de diseño SLM relativas a la separación y el espesor mínimo entre características, los tamaños máximos y mínimos de orificios tanto verticales como horizontales, así como el diseño de agujeros autosoportados y la modificación de las características en voladizo para evitar el uso de estructuras de soporte:

- Separación mínima entre características de 0,3 mm y espesor mínimo de pared de 0,4 mm (tolerancia de $\pm 0,02$ mm).
- Orificio vertical mínimo de 0,7 mm de diámetro. Orificio horizontal mínimo y máximo de 1 y 7 mm de diámetro, respectivamente.
- Se pueden diseñar agujeros autosoportados (sin necesidad de estructuras de soporte), que constan de una sección circular acabada en punta (Figura 2.10). Con tolerancias de $\pm 0,3$ mm (1-2 mm), $\pm 0,2$ mm (3-4 mm) y $\pm 0,1$ mm (5-15 mm).
- Para evitar los voladizos horizontales y, por consiguiente, la necesidad de usar estructuras de soporte, se recomienda el diseño de chaflán (Figura 2.11). Se puede diseñar chaflán con radio convexo (máximo de 2 mm de radio sin soporte) o cóncavo (máximo de 3 mm de radio sin soporte) para mejorar el acabado superficial.

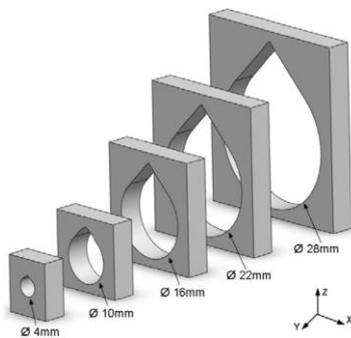


Figura 2.10. Agujeros horizontales autosoportados (Thomas, 2009).

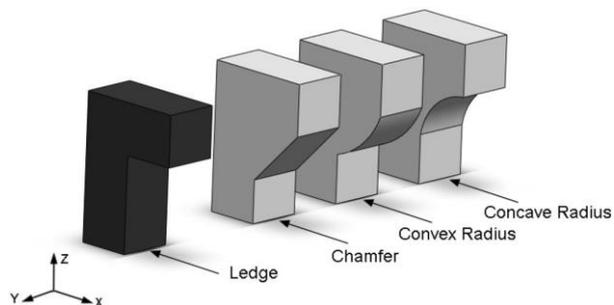
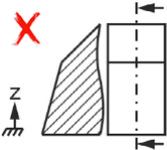
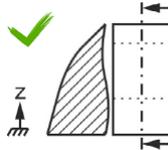
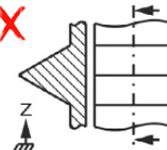
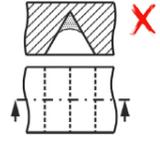
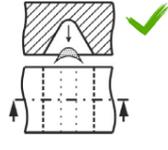
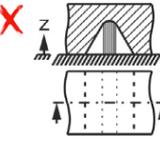
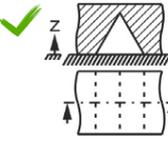
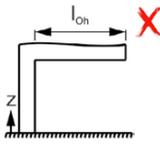
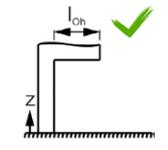
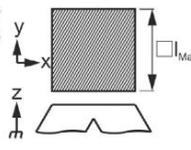
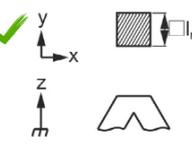


Figura 2.11. Diseño de chaflán (Thomas, 2009).

Adam y Zimmer (Adam y Zimmer, 2014) propusieron reglas de diseño relativas al espesor y la forma del borde de las características, las dimensiones mínimas del espacio o *gap* entre características, la longitud máxima de elementos en voladizo, así como las dimensiones máximas de elementos macizos (Tabla 2.4). Dichas reglas de diseño fueron obtenidas a partir de la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 316L.

Tabla 2.4. Reglas de diseño SLM propuestas por Adam y Zimmer (Adam y Zimmer, 2014).

Regla de diseño para la fabricación SLM	Diseño	
	Inadecuado	Adecuado
<p>Deben evitarse los bordes afilados (exteriores e interiores) y redondearse para obtener mejor precisión geométrica.</p> <p>Los radios de redondeo se correlacionan con los radios exteriores de los elementos curvos simples.</p>		
<p>Los bordes que forman puntos extremos verticales deben ser romos paralelos al plano de construcción.</p> <p>Las dimensiones de las áreas romas deben ser mayores que los espesores de los elementos no curvos.</p>		
<p>Los bordes que forman puntos extremos horizontales deben ser romos ortogonales al plano de construcción.</p> <p>Las dimensiones de las áreas romas deben ser mayores que los espesores de los elementos no curvos.</p>		
<p>Los bordes interiores deben ser redondeados para simplificar la eliminación de estructuras de soporte dispersas (por ejemplo, polvo).</p>		
<p>Los bordes interiores deben estar afilados para evitar superficies que requieran estructuras de soporte sólidas.</p>		
<p>Las longitudes de los voladizos deben ser lo suficientemente cortas (≤ 2 mm) para garantizar una capacidad de fabricación robusta.</p>		
<p>Deben evitarse las acumulaciones de material y mantenerse las dimensiones máximas de (20×20) mm para proporcionar una capacidad de fabricación adecuada.</p>		

Optimización topológica

La optimización topológica es un método avanzado de diseño estructural que permite obtener la configuración de estructura óptima mediante la distribución del material dentro de un espacio de diseño, satisfaciendo al mismo tiempo las condiciones de carga, el rendimiento y las limitaciones especificadas (Figura 2.12). Esta técnica da como resultado piezas de alto rendimiento, pero con geometrías complejas, lo que supone una limitación para los métodos de fabricación convencionales, pero no para la AM. La reducción del volumen de las piezas mediante la optimización topológica del diseño es la forma más eficiente de economizar las emisiones de CO₂, el tiempo de fabricación, el consumo de energía, la pérdida de polvo metálico y, por tanto, los costes (Pfaff *et al.*, 2020).

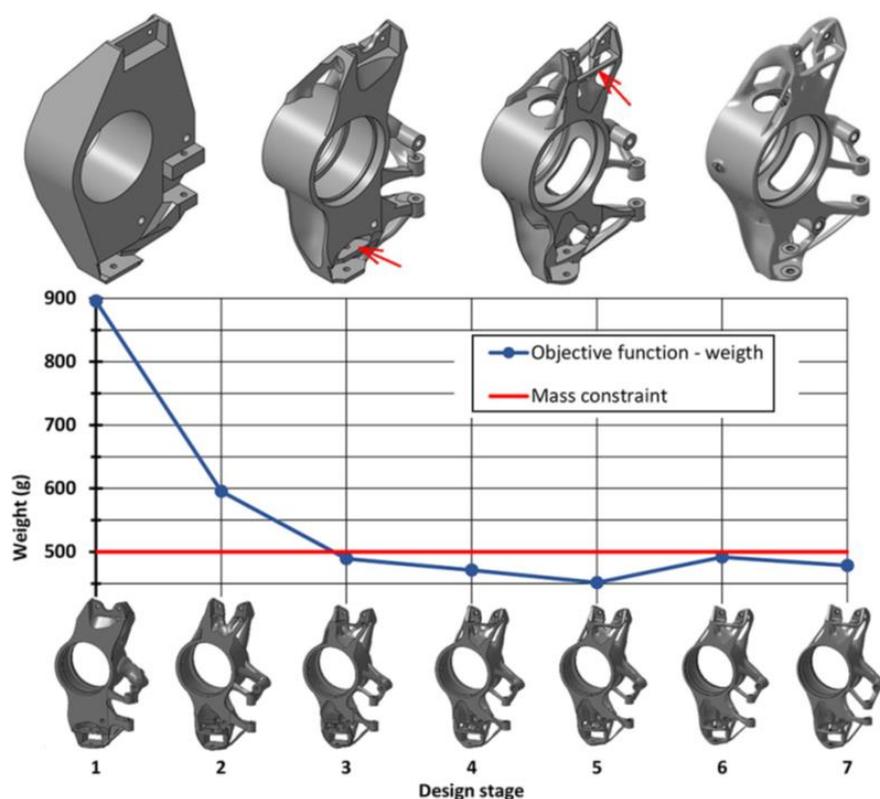


Figura 2.12. Optimización topológica en fabricación SLM (Vaverka, Koutny y Palousek, 2019).

La optimización topológica se ha desarrollado como una técnica de diseño estructural convencional en la fabricación SLM de componentes de alto rendimiento, ligeros y multifuncionales de gran aplicación en industrias como la biomédica, aeroespacial, automotriz, construcción, etc. En el sector médico la sinergia entre la optimización topológica y la fabricación SLM ha dado lugar al desarrollo de diversas aplicaciones como los implantes tibiales (Guoqing *et al.*, 2021), vertebrales (Kang *et al.*, 2021) y cervicales (Schnitzer *et al.*, 2020), así como la fabricación con éxito de placas de fijación utilizada para el tratamiento de fracturas de huesos largos (Murat, Kaymaz y Korkmaz, 2021). En el sector aeroespacial ha permitido la fabricación SLM de piezas críticas en términos de fatiga ahorrando un 45 % de

masa del material y cumpliendo los requisitos mecánicos (Dagkolu, Gokdag y Yilmaz, 2021). En este mismo sector, los resultados del estudio de Nasrullah *et al.* (Nasrullah, Santosa y Dirgantara, 2020) mostraron la aplicación potencial de las estructuras de celosía optimizadas topológicamente para la fabricación de componentes a prueba de choques en las aeronaves. En el sector automotriz, la optimización topológica para la fabricación SLM de plantillas de soldadura utilizadas en talleres de carrocería de automóviles muestra un alto potencial en cuanto a eficiencia de material, reducción de peso e integración de funciones adicionales en los elementos de las plantillas (Schuh *et al.*, 2020). La optimización topológica junto con la fabricación SLM también tiene aplicación en otros sectores como el de la energía, con la fabricación por ejemplo de disipadores de calor de microcanal (Ozguc, Pan y Weibel, 2021), o en el sector de la construcción, con aplicaciones como la impresión de nodos de múltiples ramas (Hassani *et al.*, 2020). Asimismo, la optimización topológica unida a la fabricación SLM ha permitido el desarrollo de las estructuras de celosías usadas en diversos sectores para diferentes aplicaciones (Xiao *et al.*, 2018) o la fabricación de metamateriales mecánicos, como por ejemplo: los de arquitectura auxética, ligeros y de alta resistencia que proporcionan buena capacidad de absorción de energía (Seetoh *et al.*, 2021), o los pentamodo, diseñados para proporcionar propiedades elásticas inusuales (imitando el comportamiento de los fluidos pero siendo sólidos) difíciles de comprimir pero fáciles de deformar (Wu *et al.*, 2021).

Estructuras de soporte

El diseño de las estructuras de soporte debe tenerse en cuenta desde el diseño inicial del componente, ya que afecta mucho a la economía del proceso de desarrollo de un componente producido por SLM. También afecta al tiempo de producción, a la aplicación de postprocesos adicionales y al desperdicio de material (sólido y en polvo). Los soportes normalmente representan un porcentaje significativo de todo el componente impreso y, por ello, su correcto diseño es fundamental para garantizar la competitividad de las máquinas SLM como tecnologías de fabricación (Ceccanti, Giorgetti y Citti, 2019).

Las estructuras de soporte en el proceso SLM llevan a cabo múltiples funciones: fijar la pieza a la plataforma de fabricación, anclar los elementos de la pieza en voladizo (Jhabvala *et al.*, 2012), disipar el calor de la piscina de fusión (Salmi *et al.*, 2018) y prevenir la deformación térmica generada por las tensiones residuales (Calignano, 2014). El escaneo láser de áreas en voladizo, donde la capa anterior es polvo, da como resultado el hundimiento de la masa fundida. El calor desprendido por la masa fundida provoca la sinterización involuntaria de partículas de polvo, dando lugar a acabados superficiales con alta rugosidad (Chivel y Smurov, 2011). Por lo tanto, a menudo se requieren estructuras de soporte para ayudar a la disipación de calor, especialmente en las geometrías en voladizo. Por otro lado, de acuerdo a las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020 relativas a la utilización de estructuras de soporte en el proceso de fabricación SLM, las superficies que

tienen un ángulo de contrasalida menor del ángulo límite (entre 30° y 45° dependiendo del material, la estrategia de escaneo láser, las características de la pieza, etc.) requieren estructuras de soporte.

Varios investigadores han centrado sus estudios en el diseño de estructuras de soporte para la optimización del proceso SLM. G. Strano *et al.* (G. Strano *et al.*, 2013) desarrollaron un algoritmo en Matlab que realiza la optimización tanto de la orientación de la pieza (mínimo apoyo entre todas las orientaciones posibles) como de la generación de las estructuras de soporte en forma de celosía (orientación óptima) (Figura 2.13a), a través de funciones implícitas tridimensionales puramente matemáticas. Por otro lado, Gan y Wong (Gan y Wong, 2016) demostraron que una estructura soporte no necesita mantener un área transversal uniforme (convencional) ni estar formada por patrones regulares (celosía) y recomendaron diseñar estructuras de soporte lo suficientemente débiles en ciertas áreas para poder ser separadas de la pieza sin esfuerzo y sin perjudicar la zona de anclaje. También demostraron que las estructuras de soporte con forma de «Y» invertida (Figura 2.13b) facilitan la extracción de las piezas y el uso mínimo de material. Lindecke *et al.* (Lindecke *et al.*, 2018) propusieron unas directrices para el diseño de estructuras de soporte óptimas. Z. Wang *et al.* (Z. Wang *et al.*, 2021) desarrollaron un método de optimización de puntos de soporte que permite detectar las áreas en voladizo relevantes y generar los puntos de soporte óptimos incluso para componentes complejos (típicos en AM).

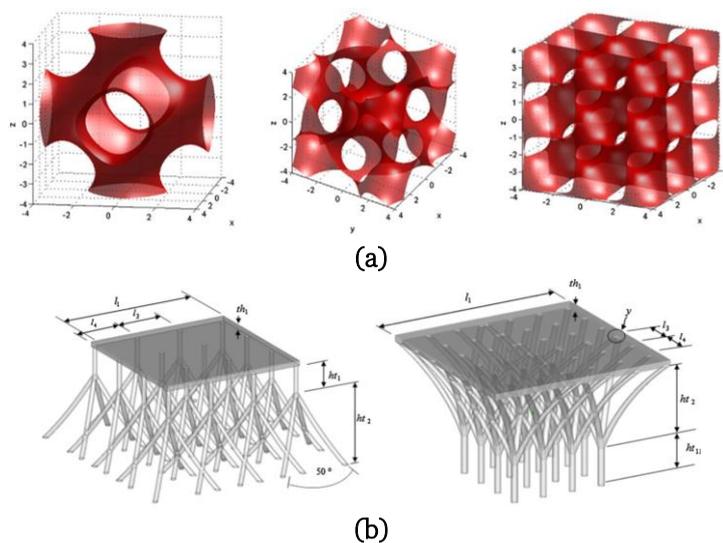


Figura 2.13. Estructuras de soportes en forma de: (a) celosía (G. Strano *et al.*, 2013), (b) «Y» normal e invertida (Gan y Wong, 2016).

Actualmente, los softwares de preparación del archivo para la fabricación SLM suelen implementar la herramienta de selección de estructuras soportes. Simplemente seleccionando el tipo de soporte y la zona deseada, el software incluye automáticamente la estructura de soporte en la pieza. La Figura 2.14 muestra varios diseños de estructuras de soporte implementadas en softwares comerciales.

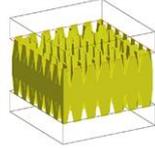
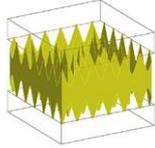
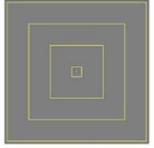
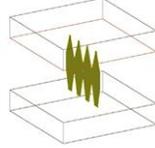
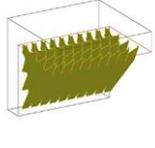
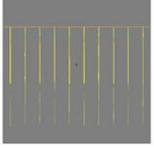
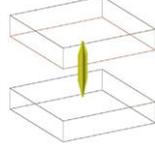
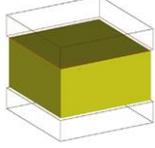
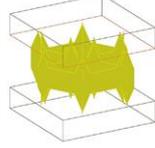
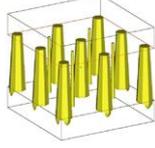
Type	3D view	Plan view	Type	3D view	Plan view
Block			Contour		
Line			Gusset		
Point			Volume		
Web			Cones		

Figura 2.14. Estructuras de soportes SLM implementadas en softwares comerciales (Leary *et al.*, 2019).

Orientación y posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación

El tiempo de fabricación de las piezas metálicas puede variar ampliamente según su orientación en el volumen de fabricación de la máquina SLM. El factor principal que afecta al tiempo de impresión es la altura vertical de la pieza (desde la placa de fabricación hasta el extremo superior de la pieza). La orientación adecuada se establece normalmente en base a un equilibrio de varios factores, incluyendo el tiempo de impresión, las estructuras de soporte, así como la minimización de las tensiones térmicas y los problemas de inclinación que pueden provocar defectos en las piezas. La naturaleza capa por capa de cualquier proceso de AM aporta una direccionalidad intrínseca que conduce a la anisotropía en las propiedades del material. Por lo tanto, las propiedades mecánicas constituyen otro factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar la orientación adecuada de las piezas sobre la placa base (Boschetto *et al.*, 2019).

La orientación de las piezas también tiene influencia sobre la rugosidad superficial y la porosidad (Rakesh Ch *et al.*, 2019). Yan *et al.* (Yan *et al.*, 2021) obtuvieron mejores resultados de rugosidad superficial, microestructura y propiedades tribológicas de las piezas fabricadas en dirección vertical. Thomas (Thomas, 2009) demostró que las superficies fabricadas a 90° obtienen la mejor calidad superficial, mientras que las superficies orientadas con una inclinación positiva de 45° o menos pierden calidad y mejoran repentinamente a 0° (Figura 2.15). Con lo que se puede concluir que las geometrías críticas deben estar ubicadas y orientadas para ser fabricadas dentro de las zonas de mejor calidad superficial (zonas de color gris claro de la Figura 2.15).

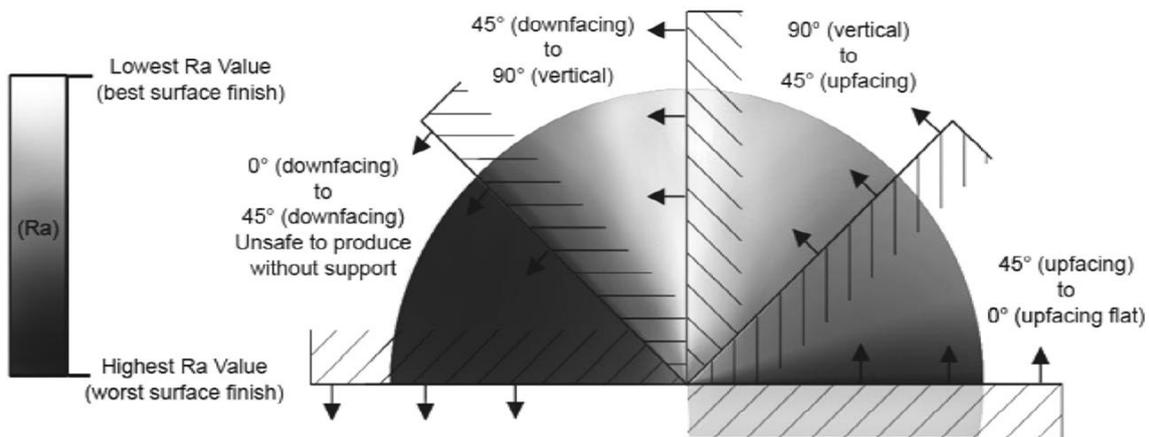


Figura 2.15. Relación entre la calidad y la orientación (ángulo) de las superficies fabricadas por SLM (Thomas, 2009).

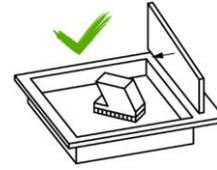
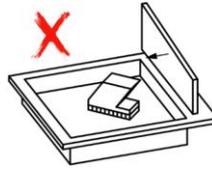
Respecto a la precisión dimensional, Hwang *et al.* (Hwang *et al.*, 2021) también obtuvieron mejores resultados en las piezas impresas en orientación vertical, debido a una mejor disipación térmica. Asimismo, Riikonen y Piili (Riikonen y Piili, 2020) concluyeron que las piezas orientadas horizontalmente son más vulnerables a tener deformaciones en comparación con las piezas orientadas verticalmente. En cuanto a las propiedades mecánicas, por lo general, se obtuvieron mejores resultados de dureza (Ponnusamy *et al.*, 2021) y resistencia a la tracción (S. Zhang *et al.*, 2019) en las piezas fabricadas en orientación vertical. Sin embargo, según Tridello *et al.* (Tridello *et al.*, 2020) las piezas fabricadas en dirección horizontal presentaron mayor resistencia a fatiga.

Además de la literatura, también existe normativa que aborda recomendaciones en relación a la orientación y posicionamiento de las piezas para la fabricación SLM. La Tabla 2.5 muestra las recomendaciones según la norma UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020 sobre la orientación, el posicionamiento y la disposición de las piezas durante el proceso SLM en función de la acción del rodillo, las estructuras de soporte y el efecto de ondulación de la geometría de las piezas impresas.

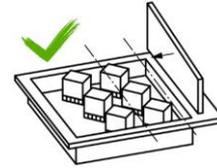
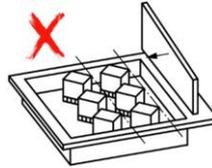
Tabla 2.5. Recomendaciones de orientación, posicionamiento y disposición de las piezas fabricadas por SLM (UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020).

ACCIÓN DEL RODILLO O SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL POLVO		
Descripción	Inadecuado	Adecuado
Las geometrías longitudinales deberían colocarse de manera que se reduzca la longitud de contacto con el rodillo.		

Las geometrías críticas deberían colocarse de manera que se evite el doblado de la pieza en caso de contacto con el rodillo. Siendo apropiado un ángulo de 10°.



Las piezas múltiples deberían colocarse de manera que se reduzca la longitud de contacto con el rodillo (para prevenir un desplazamiento).



ESTRUCTURAS DE SOPORTE

Descripción	Inadecuado	Adecuado
La pieza se debe colocar de manera que se reduzca la necesidad de estructuras de soporte.		
Se deben diseñar estructuras de soporte que tengan en cuenta el postproceso.		

EFEECTO DE ONDULACIÓN

Descripción	Inadecuado	Adecuado
Se debe evitar la fusión de superficies grandes de una sola pasada mediante el uso de estructuras de soporte diseñadas adecuadamente.		

Como conclusión, es importante destacar que ninguno de los estudios relativos a las reglas de diseño o a la orientación y el posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación trabaja con acero inoxidable 17-4PH, los materiales utilizados hasta el momento han sido principalmente acero inoxidable 316L y la aleación de aluminio Al-Si-10Mg.

En cuanto a la orientación y el posicionamiento de las piezas en la plataforma de fabricación, los autores han evaluado principalmente la influencia de orientar las piezas según la dirección vertical y horizontal. En relación, la norma UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020 propone ciertas reglas de carácter general para orientar diferentes tipos de piezas. Sin embargo, no hay estudios que evalúen la influencia de ubicar las piezas en diferentes posiciones de la placa base, lo que podría verse afectado por factores como la acción del rodillo en las operaciones de distribución y compactación de las capas, o la deformación debida a las tensiones residuales generadas durante la fusión del polvo metálico. Razón por la cual, en el capítulo 6 de la presente tesis doctoral se abordan este estudio de interés.

Por otro lado, algunos autores han centrado sus estudios en la realización de reglas de diseño relativas a la separación y el espesor mínimos entre características, el tamaño máximo y mínimo de orificios verticales y horizontales, la longitud máxima de voladizos o la forma del borde de las características, entre otras. Sin embargo, no existen recomendaciones para la fabricación SLM de diferentes tipos de geometrías fabricadas con diferente inclinación sin necesidad de estructuras de soporte, lo que podría influir directamente en su calidad geométrica y dimensional. En consecuencia, la evaluación de la precisión lograda en la fabricación SLM de diferentes geometrías sobre planos con diferente inclinación podría generar recomendaciones de diseño de gran utilidad para componentes con altos requisitos geométricos y/o dimensionales. Precisamente en este aspecto se centra uno de los estudios del capítulo 6 de la presente tesis doctoral.

2.2.5. Postprocesos SLM

Además de la eliminación del polvo sin fundir que rodea la pieza (mediante aspiración, brochas, aire comprimido, etc.), debido a las características de la técnica SLM y al estado de fabricación de las piezas, se requieren operaciones de postproceso. Uno de los principales postprocesos, que es de carácter obligatorio tras la fabricación SLM, es la separación de las piezas de la placa de fabricación. Para realizar esta operación se pueden aplicar varios procesos mecánicos, entre los que destaca el mecanizado por descarga eléctrica o electroerosión por hilo (WEDM, *Wire Electrical Discharge Machining*). Por otro lado, para la adecuada fabricación SLM de diversas piezas es necesaria la fabricación de estructuras de soporte. Estas estructuras de soporte de metal a menudo son demasiado fuertes para ser retiradas a mano, por lo que suelen emplearse postprocesos mecánicos como WEDM o fresado (Cao *et al.*, 2020). Además, para el correcto ensamblaje de piezas que han sido impresas mediante SLM a veces se utilizan postprocesos mecánicos como el mecanizado o el rectificado (Guo *et al.*, 2018), asegurando de esta forma el principio de intercambiabilidad.

Postprocesos mecánicos, químicos y electroquímicos

En general, estos postprocesos se aplican con el objetivo de mejorar su acabado superficial. A continuación, se describen los principales postprocesos mecánicos, químicos y electroquímicos aplicados a las piezas impresas mediante SLM:

- **Arenado o chorreo de arena**

Se trata de un método de limpieza mecánica por abrasión comúnmente utilizado y muy útil para mejorar la topología de la superficie de las piezas impresas mediante SLM (Singla *et al.*, 2021). La aplicación de este tratamiento permite mejorar la resistencia a la fatiga y eliminar los defectos e irregularidades típicos de la AM, lo que conlleva la disminución de la rugosidad superficial de las piezas (Avanzini *et al.*, 2019). Se utilizan partículas finas de abrasivos como la alúmina o la sílice o una mezcla de ellas.

En algunos estudios, se ha demostrado que el chorreo con partículas de vidrio mejora la integridad de la superficie al imponer tensiones residuales y reducir la rugosidad, lo que ofrece un impacto positivo en el rendimiento frente a la corrosión y la fatiga (Bouzakis *et al.*, 2020).

Este proceso de chorreo abrasivo se ha utilizado con éxito para proporcionar un buen acabado a las superficies de los canales internos fabricados mediante el proceso SLM (Han *et al.*, 2020). Estos postprocesos no necesitan accesorios de sujeción, ni requieren una planificación compleja de la trayectoria de la herramienta, siendo adecuados para pequeños lotes de producción (Khorasani *et al.*, 2020).

- **Granallado**

Es uno de los tratamientos de superficie ampliamente utilizado en la industria para mejorar las propiedades superficiales de las piezas metálicas al inducir endurecimiento y tensión residual de compresión. Durante la aplicación de este postproceso, una multitud de disparos de alta dureza impactan contra la superficie del material, formando una capa de deformación plástica y elástica en la misma. Al mismo tiempo que se inducen las tensiones residuales de compresión y la microdeformación en la capa superficial, los granos superficiales se refinan (Wen *et al.*, 2021).

Se ha demostrado como el uso de ultrasonidos sobre la superficie a tratar, permite mejorar la tensión residual de compresión, la microdureza y la resistencia a la corrosión de las piezas fabricadas por SLM (Q. Zhang *et al.*, 2021). Por otro lado, el granallado por láser se ha incluido recientemente como método de postratamiento de materiales fabricados por SLM (Aguado-Montero *et al.*, 2022). Además de reducir la rugosidad superficial, se trata de una herramienta prometedora para introducir tensiones de

compresión más profundas en materiales metálicos, mejorando la resistencia a la fatiga (Slawik *et al.*, 2021). Se ha demostrado que el postproceso de granallado por láser mejora las propiedades de la superficie de una amplia variedad de metales y aleaciones, mitigando la falla relacionada con el agrietamiento por corrosión bajo tensión, el agrietamiento por fatiga y el daño por objetos extraños (Munther *et al.*, 2020).

- **Pulido**

El **pulido químico** permite eliminar una fina capa de material mediante la inmersión completa de la pieza en un agente químico, dando como resultado una superficie lisa y libre de cualquier partícula, contaminación o daño estructural contenido en la superficie. Se trata de un postproceso eficaz para la eliminación de partículas de polvo parcialmente fundidas durante la fabricación SLM (Wysocki *et al.*, 2019).

El **pulido electroquímico** se trata de un proceso de tratamiento de superficies basado en la disolución anódica localizada de cualquier material conductor. Este postproceso puede generar un acabado superficial uniforme independientemente de la complejidad geométrica de las piezas. Algunos investigadores han estudiado su aplicación para mejorar el acabado superficial de las piezas impresas mediante SLM (Baicheng *et al.*, 2017) por su capacidad de pulido uniforme en todo el volumen de la pieza, lo que favorece la principal ventaja de la AM, que es la posibilidad de crear piezas con formas libres y geometrías complejas.

El **pulido mecánico-electroquímico** se trata de una nueva técnica que combina las ventajas del proceso de pulido mecánico y el pulido electroquímico. En este caso no se requiere electrolito líquido para el proceso de pulido, simplemente un poco de agua destilada para humedecer las partículas de pulido. Estas partículas de pulido están hechas de polímero esférico y se utilizan para pulir las superficies y conducir la corriente eléctrica. Existen dos modos en este proceso de pulido: (1) modo de pulido híbrido, que requiere un cierto voltaje y humedad para lograr una mayor tasa de eliminación de material; (2) modo de pulido mecánico, que funciona sin voltaje ni humedad para eliminar los defectos superficiales como los óxidos, mejorando aún más el acabado de la superficie de las piezas (Bai *et al.*, 2020). El pulido mecánico-electroquímico también ha sido aplicado para la eliminación del polvo parcialmente fundido en las superficies internas (tanto en orificios rectos como curvos) de las piezas impresas mediante SLM (Zhao, Qu y Tang, 2021).

El **pulido láser** se trata de un proceso basado en el principio de fusión y solidificación rápida de una fina capa de la superficie de la pieza. La intensidad del láser se controla de manera que solo derrite los picos de la superficie y el metal fundido resultante se distribuye en los valles debido a la tensión superficial multidireccional y a la gravedad.

Este postproceso no solo reduce la rugosidad superficial de las piezas, sino que también aumenta significativamente la densidad de la superficie hasta varios micrómetros de profundidad dando como resultado la formación de una microestructura fina y uniforme; mejora la humectabilidad de la superficie, la resistencia al desgaste y las propiedades tribológicas; y reduce el coeficiente de fricción. Asimismo, debido a la fusión y la rápida resolidificación de la piscina de fusión SLM, aumenta la dureza de la superficie del componente. Por otro lado, el uso del proceso de pulido láser después de cada capa durante el proceso de fabricación SLM puede mejorar la densidad aparente de las piezas impresas (cerca del 100 %) (Basha *et al.*, 2020).

Tratamientos térmicos

Los postprocesos térmicos se aplican normalmente con la finalidad de aliviar las tensiones térmicas generadas durante la fabricación SLM y, dependiendo del material utilizado y el tratamiento aplicado, mejorar las propiedades mecánicas y reducir la porosidad interna de las piezas. Los parámetros de temperatura y tiempo de aplicación de estos tratamientos térmicos varían en función del material. Se han aplicado diferentes tratamientos térmicos y se han evaluado las propiedades de las piezas impresas mediante SLM en diversos materiales tales como aleaciones de titanio (Ti-Ni (Lu *et al.*, 2022), Ti-6Al-4V (Y. Guo *et al.*, 2021), Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0.5Fe (Zafari *et al.*, 2022), Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V (Huang, Sun y Guo, 2021), Ti-2Al-Nb (Y. H. Zhou *et al.*, 2021)), aleaciones de aluminio (Al-Mn-Mg-Sc-Zr (Schliephake *et al.*, 2022), Al-Si-10Mg (Butler *et al.*, 2021), Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si (Wang *et al.*, 2018), Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr (Li *et al.*, 2021)), aleaciones de cromo-cobalto (Co-Cr-Mo (Kajima *et al.*, 2021), Co-Cr-Fe-Mn-Ni (Park *et al.*, 2021)), superaleación Hastelloy X (Yin *et al.*, 2021), Inconel 625 (Soni *et al.*, 2021) y 718 (Karabulut, Tascioglu y Kaynak, 2021), acero 18Ni-300 maraging (Bae *et al.*, 2021) o aceros inoxidable (316L (Y. Zhou *et al.*, 2021), 15-5PH (Sarkar *et al.*, 2020), 17-4PH (Sabooni *et al.*, 2021), CX (J. Zhang *et al.*, 2021), Fe-Cr-Ni-Co-Mo maraging (Gao *et al.*, 2021)). Entre los diversos tratamientos térmicos caben destacar:

- **Relajación de tensiones**

Durante el proceso de fabricación SLM, el láser, al calentar y derretir el polvo metálico, provoca un gradiente de temperatura en el material sólido que se irradia generando tensiones residuales después del enfriamiento. Estas tensiones residuales pueden causar deformaciones y grietas, así como limitar el rendimiento de los componentes impresos. Para explicar el mecanismo de las tensiones térmicas producida durante el proceso SLM se puede utilizar el modelo de mecanismo de gradiente de temperatura. Este modelo establece que el haz láser calienta el material sólido que, como resultado, tiende a expandirse (Figura 2.16a). La expansión térmica (ϵ_{th}) es parcialmente inhibida por el material más frío circundante, produciendo una condición de tensión-

deformación compresiva en la zona irradiada. Si la tensión de compresión excede la tensión de fluencia por compresión (σ_{yield}) del material, la tensión de compresión será parcialmente elástica (ϵ_{el}) y parcialmente plástica (ϵ_{pl}) como se muestra en la Figura 2.16a. Una vez que el haz láser abandona este área, la zona irradiada se enfría y tiende a encogerse (Figura 2.16b). La contracción se inhibe parcialmente como consecuencia de la deformación plástica desarrollada durante el calentamiento, produciendo una condición de tensión de tracción residual (σ_{tens}). Según los equilibrios de fuerza y momento de la pieza, la zona irradiada quedará rodeada por una zona de esfuerzo compresivo (σ_{comp}) como se muestra en la Figura 2.16b (Kruth *et al.*, 2012).

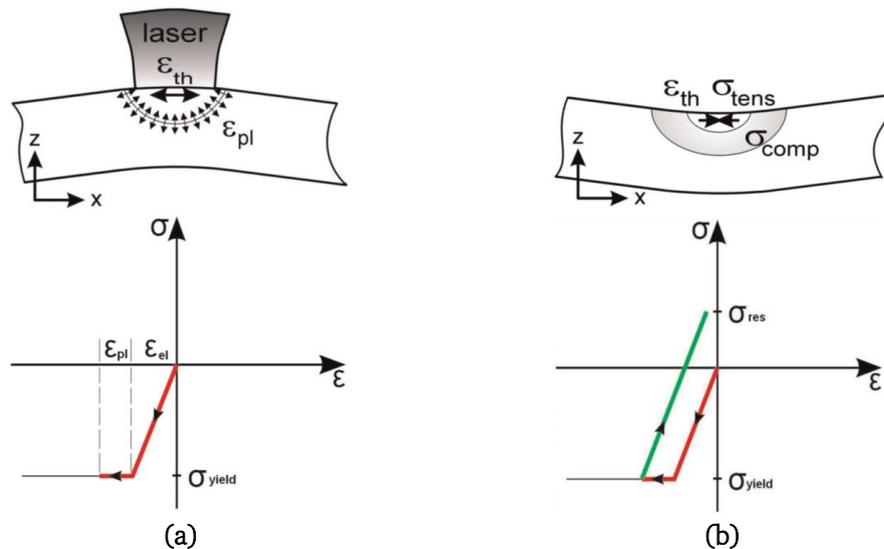


Figura 2.16. Tensiones y deformaciones inducidas durante (a) el calentamiento del haz láser y (b) el enfriamiento de la zona irradiada (Kruth *et al.*, 2012).

Las tensiones residuales generadas durante el proceso SLM en las piezas varían en función de diversos factores, como los parámetros del proceso SLM, las propiedades del material, la geometría de las piezas o las estructuras de soporte (Yadroitsev y Yadroitsava, 2015). Además de la aplicación de ciertos postprocesos mecánicos (Q. Zhang *et al.*, 2021), del rescaneo de las capas (Xiao *et al.*, 2020), de la optimización de ciertos parámetros SLM (Jiang, Ye y Zhu, 2020), del precalentamiento del polvo metálico o de la placa base (Malý *et al.*, 2019), el principal proceso empleado para aliviar las tensiones residuales generadas durante el proceso SLM es el tratamiento térmico de relajación de tensiones (Z. Zhou *et al.*, 2021). Este tratamiento térmico consiste en calentar uniformemente a una temperatura adecuada (por debajo del rango de transformación) y mantener a esta temperatura durante el tiempo necesario, seguido de un enfriamiento uniforme. Se debe tener cuidado de asegurar un enfriamiento uniforme, particularmente cuando el componente está formado por secciones de tamaño variable. Si la velocidad de enfriamiento no es constante y uniforme, pueden generarse nuevas tensiones residuales iguales o mayores que las que

se pretendía aliviar con este tratamiento térmico. Además de aliviar las tensiones residuales se ha encontrado que este postproceso puede mejorar el rendimiento ante el crecimiento de grietas por fatiga (Syed *et al.*, 2019), homogeneizar la microestructura, mejorar las propiedades mecánicas y aumentar la ductilidad al reducir la resistencia a la tracción (Anant Pidge y Kumar, 2020). Por otro lado, se recomienda la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones antes de separar las piezas de la placa de fabricación (Sun, Hebert y Aindow, 2018), para evitar la distorsión de mismas (Li *et al.*, 2018).

- **Endurecimiento por precipitación: puesta en solución, temple y envejecimiento**

El tratamiento térmico de puesta en solución consiste en calentar a una temperatura adecuada una aleación y mantenerla a esta temperatura el tiempo necesario para que uno o varios constituyentes entren en solución sólida, acto seguido el material debe enfriarse lo suficientemente rápido (temple) para impedir el precipitado habitual de los compuestos y mantener los constituyentes en una solución supersaturada. Este tratamiento suele aplicarse en las piezas fabricadas mediante SLM con la finalidad de homogeneizar su microestructura (Qi *et al.*, 2021).

La aplicación del envejecimiento tras el tratamiento térmico de puesta en solución permite la liberación controlada de los constituyentes (puestos en solución previamente), ya sea de forma natural (a temperatura ambiente) o artificialmente (a temperaturas más elevadas). En condiciones de envejecimiento óptimas aumenta la dureza y mejoran las propiedades de tracción (resistencia a la tracción y límite elástico) de las piezas impresas en SLM. Por el contrario, si la temperatura y el tiempo de envejecimiento son excesivamente altos (sobreenvejecimiento) la dureza disminuye (R. Li *et al.*, 2019).

- **Prensado isostático en caliente (HIP)**

El prensado isostático en caliente, comúnmente conocido como HIP (*Hot Isostatic Pressing*), se ha usado frecuentemente y con éxito para reducir o incluso eliminar imperfecciones internas de las piezas. Los poros y las zonas de polvo sin fundir generados durante la fabricación SLM actúan como puntos de concentración de tensiones y, por lo tanto, de inicio de grietas, influyendo negativamente en las propiedades mecánicas de las piezas. El postproceso térmico HIP consiste en aplicar una alta presión isostática junto con altas temperaturas en una atmósfera inerte provocando la deformación plástica del material, lo que permite cerrar las imperfecciones internas (Poulin, Kreitchberg y Brailovski, 2021), además de densificar y homogeneizar la microestructura del material (Shi *et al.*, 2021). Asimismo, la aplicación del HIP puede aumentar la ductilidad y mejorar la resistencia a la fatiga de

las piezas (Yan *et al.*, 2018). La adecuación de los parámetros del tratamiento HIP (presión, temperatura y tiempo) en función del metal impreso en el proceso SLM permite mejorar las propiedades de las piezas finales, añadiéndoles gran valor para diversas industrias e impulsando la implementación de este método de fabricación.

Como se muestra en la Figura 2.17, el tratamiento HIP permite eliminar solo las imperfecciones internas, si la pieza tiene grietas o porosidad abierta, estos defectos permanecerán en la pieza tras el HIP.

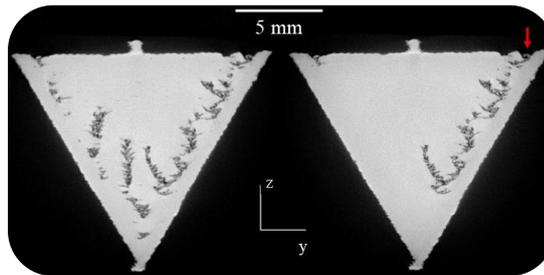


Figura 2.17. Eliminación de las imperfecciones internas de las piezas tras la aplicación del tratamiento HIP (Tammam-Williams *et al.*, 2016).

Los sistemas HIP modernos permiten alcanzar altas tasas de enfriamiento, lo que posibilita la combinación del postproceso HIP con otros tratamientos térmicos convencionales en un único ciclo (Figura 2.18), permitiendo reducir el número de etapas del postratamiento térmico, el tiempo total del tratamiento, el tiempo de inactividad, el tiempo de entrega de las piezas, así como el consumo de energía (Quintus, 2018).

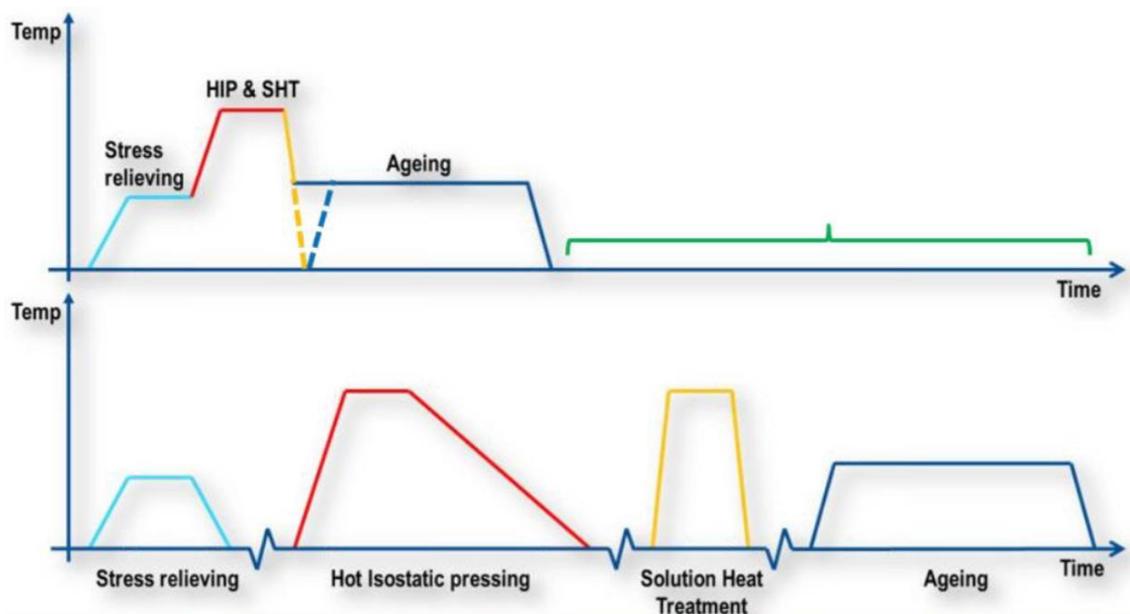


Figura 2.18. Combinación de diferentes tratamientos térmicos en un único ciclo HIP (Quintus, 2018).

La revisión realizada en este apartado revela la influencia de los postprocesos SLM en las propiedades de las piezas impresas. En consecuencia, se recomienda la aplicación de postprocesos mecánicos, como el arenado, con la finalidad de eliminar los defectos e imperfecciones superficiales y, por consiguiente, mejorar el acabado superficial de las piezas fabricadas, así como la aplicación de tratamientos térmicos para aliviar las tensiones residuales generadas durante la fusión del polvo metálico, mejorar las propiedades mecánicas o reducir la porosidad interna de las piezas.

En particular, el postproceso de arenado es un método muy recomendado para la mejora superficial de las piezas fabricadas por SLM, la eliminación de los defectos e irregularidades típicos de este tipo de piezas permite la disminución de la rugosidad superficial y, probablemente, la mejora de la calidad geométrica de los componentes. Sin embargo, este postproceso mecánico aún no ha sido estudiado en las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH, razón por la cual, se aborda el estudio de la influencia del arenado en la calidad de este tipo de piezas en el capítulo 7 de la presente tesis doctoral.

Respecto a los tratamientos térmicos, los parámetros de temperatura y tiempo de aplicación varían en función del material. Particularmente, en acero inoxidable 17-4PH se ha evaluado la influencia, tanto en la microestructura como en las propiedades mecánicas, de la aplicación de diferentes tratamientos térmicos a piezas fabricadas utilizando parámetros SLM con valores elevados (potencia láser superiores a 200 W). La configuración de diferentes parámetros del proceso de fabricación SLM dan lugar a piezas con diferentes propiedades y, en consecuencia, la aplicación posterior de tratamientos térmicos influirá de forma diferente en sus propiedades, además dichas piezas probablemente requieran parámetros de tratamiento térmico (temperatura y tiempo) diferentes. En consecuencia, en el capítulo 7 de esta tesis doctoral se evalúa la aplicación de los diferentes tratamientos térmicos descritos en este apartado de revisión (relajación de tensiones, puesta en solución, envejecimiento, HIP) en la calidad de las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM utilizando parámetros de potencia inferiores a 50 W.

2.3. ÍNDICES DE CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM

La norma UNE-EN ISO 9000:2015 define la calidad como el “grado en el que un conjunto de características (rasgos diferenciadores) inherentes de un objeto cumple con los requisitos (necesidades o expectativas establecidas, generalmente implícitas u obligatorias)”. Implícito en esta definición está el hecho de que la calidad de un producto está relacionada con la idoneidad de su propósito. Las aplicaciones de fabricación SLM directa, especialmente para componentes con funciones críticas, crean la necesidad de una comunicación clara entre el diseñador, el fabricante y el usuario sobre: la intención del diseño, las especificaciones de los materiales, los requisitos de inspección y ensayo de los componentes, y las cuestiones de calificación y certificación de los procesos y componentes. A lo largo de los años, la necesidad de nuevos estándares para la AM ha sido ampliamente reconocida como una necesidad en la academia, las industrias y las organizaciones de investigación.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, *American Society for Testing and Materials*) es la primera organización de desarrollo de normas que reconoce la necesidad y el potencial de las normas de AM. El Comité F42 de la ASTM sobre las tecnologías de AM se estableció en 2009 marcando como alcance: la promoción del conocimiento, el estímulo de la investigación y la implementación de la tecnología a través del desarrollo de estándares para las tecnologías de AM. La Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Standards Organization*) también cuenta con un comité técnico para la AM (TC 261) con un alcance sobre la estandarización en el campo de la AM en sus procesos, términos y definiciones, cadenas de procesos (hardware y software), procedimientos de prueba, parámetros de calidad, acuerdos de suministro y todo tipo de fundamentos. En 2011, ASTM e ISO firmaron un acuerdo de Organización de Desarrollo de Estándares Socios para desarrollar conjuntamente estándares relacionados con la tecnología de AM evitando el desarrollo de múltiples estándares competidores y potencialmente inconsistentes. ASTM F42 e ISO TC 261 crearon un nuevo marco para el desarrollo de estándares de AM (Figura 2.19). Según este marco, los estándares se desarrollan en tres niveles: estándares generales (conceptos generales y requisitos comunes de aplicación general); estándares para categorías de materiales, procesos/equipos y piezas acabadas; y estándares especializados para materiales, procesos y/o aplicaciones específicos (ASTM y ISO, 2017). Varias normas de este marco han sido referenciadas en apartados anteriores, como los estándares generales relativos a la terminología de la AM, el formato AMF o el intercambio de datos citados en el apartado 2.1, así como los estándares específicos para la caracterización del polvo metálico (apartado 2.2.1) y para el diseño de piezas fabricadas mediante SLM (2.2.4).

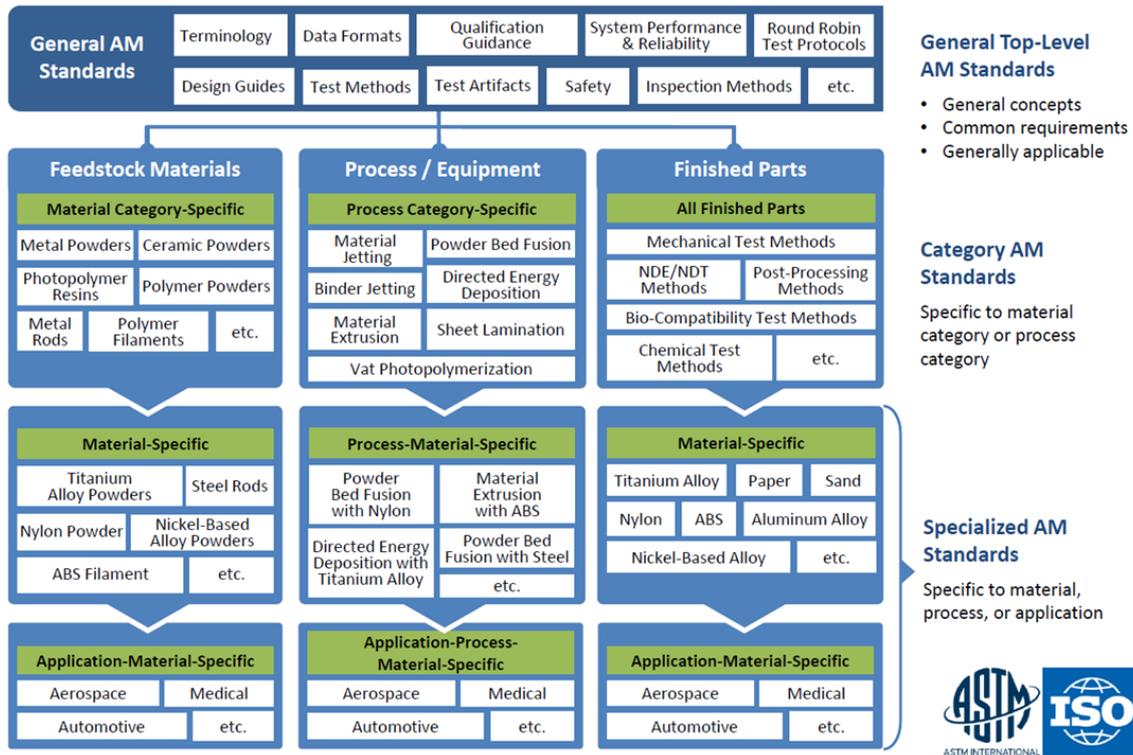


Figura 2.19. Marco de normas acordado por ASTM F42 e ISO TC 261 para el desarrollo futuro de normas de fabricación aditiva (ASTM y ISO, 2017).

Para evaluar la calidad de las piezas impresas, uno de los aspectos más importantes es la comparación con los requisitos específicos de partida. Sin embargo, no es rentable, ni tecnológicamente viable realizar ensayos de todas las propiedades de las piezas (UNE-EN ISO 17296-3:2017). En relación a las piezas metálicas obtenidas mediante AM, la norma UNE-EN ISO 17296-3:2017 establece los criterios de selección de ensayos mostrados en la Tabla 2.6. Dichos criterios están clasificados en relación al nivel de restricción de las piezas como: piezas de altas prestaciones (de seguridad crítica) (H), piezas funcionales que no son de seguridad crítica (M), y diseño de piezas o prototipos (L). Para cada categoría de ensayos de la Tabla 2.6, las características marcadas con el símbolo «+» deben cumplirse, las marcadas con una «o» son de recomendable cumplimiento, y las marcadas con el símbolo «-» no son aplicables.

Tabla 2.6. Guía de criterios de selección de ensayos para las piezas metálicas fabricadas aditivamente (UNE-EN ISO 17296-3:2017).

Nivel de restricción de las piezas		H	M	L
Requisitos superficiales	Aspecto	o	o	o
	Textura superficial	+	o	o
	Color	-	-	-

Requisitos geométricos	Tamaño, longitud y dimensión de los ángulos, tolerancias dimensionales	+	+	+
	Tolerancias geométricas (desviaciones de forma y posición)	+	+	+
Requisitos mecánicos	Dureza	+	+	+
	Resistencia a la tracción	+	+	+
	Resistencia al impacto	+	+	0
	Resistencia a la compresión	+	+	0
	Resistencia a la flexión	+	0	0
	Resistencia a la fatiga	+	0	-
	Fluencia	+	0	-
	Envejecimiento	-	-	-
	Coefficiente de fricción	+	0	-
	Resistencia a la cizalla	+	0	0
Requisitos del material de fabricación	Propagación de fisuras	+	0	-
	Densidad	+	+	+
	Propiedades físicas y físico-químicas	+	0	-

La inspección es el examen científico de las piezas para garantizar el cumplimiento de los requisitos, es decir, es una parte integral del mecanismo de control de calidad que garantiza el estricto cumplimiento de la intención de diseño declarada. La inspección conlleva la medición, que consiste en asignar un valor exacto y preciso a una variable física. Los métodos comunes de medición se basan en el desarrollo de estándares de especificación internacionales. Debido al carácter de las tecnologías de AM, actualmente se está trabajando en el desarrollo de estándares para definir y describir sus propias características específicas, pero mientras, se recomienda la utilización de las normas internacionales de ensayos existentes, enumeradas en la norma UNE-EN ISO 17296-3:2017.

2.4. INSPECCIÓN SLM

En el ámbito de la fabricación SLM, existe una necesidad real de optimizar la calidad de las piezas metálicas mediante el desarrollo de metodologías de diseño y directrices para el diseño geométrico (Chahal y Taylor, 2020). La medición geométrica y dimensional implica una limitación importante para acelerar la adopción industrial de la AM debido a las dificultades para adaptar las técnicas y los sistemas de medición actuales. Asimismo, la falta de una tecnología de detección de defectos durante el propio proceso de fabricación SLM (monitorización en línea) también limita el desarrollo futuro de la AM de metales. La detección temprana de defectos, tanto de su magnitud como de su ubicación, es importante para la retroalimentación, la optimización y el control de calidad de este proceso de fabricación (Feng *et al.*, 2022).

2.4.1. Inspección de piezas fabricadas por SLM

La inspección es el proceso clave del control de calidad de un producto que permite comparar el producto real con las especificaciones definidas en la etapa de diseño, es decir, verificar su calidad. Con el desarrollo de la tecnología de AM, también sigue creciendo la necesidad de una evaluación de calidad para reducir la tasa de defectos y garantizar la calidad de las piezas. Desde el punto de vista metrológico, las características de las piezas fabricadas aditivamente son desafiantes. La libertad de diseño que ofrece la AM con respecto a las tecnologías de fabricación sustractivas requiere técnicas de medición más complejas y mayor capacidad de procesamiento de datos. Así como se han desarrollado métodos específicos de DfAM, también se han propuesto metodologías de diseño para metrología (DfM, *Design for Metrology*) de piezas fabricadas aditivamente, cuyo objetivo es facilitar mediciones rápidas y precisas, y optimizar los procesos de medición y control de calidad sin comprometer la funcionalidad del componente (Rivas Santos *et al.*, 2020).

En este contexto, los sistemas de inspección comerciales han mejorado su precisión en los últimos años. Los sistemas de medición por contacto pueden medir piezas prismáticas y superficies de forma libre de piezas impresas en SLM con alta precisión, sin embargo, son relativamente lentos y solo permiten adquirir un número limitado de puntos en la superficie. El uso de una máquina de medición por coordenadas (CMM, *Coordinate Measuring Machine*) para medir dimensiones y formas de piezas de metal fabricadas aditivamente se complica debido a la textura superficial y las formas complejas, siendo más apropiados los sistemas ópticos (Rivas Santos *et al.*, 2020). La inspección sin contacto es especialmente relevante para la verificación rápida de este tipo de piezas. Por ello, cada vez se utilizan más

los sistemas ópticos integrados en brazo de medición por coordenadas (CMA, *Coordinate Measuring Arms*) o en CMM para la verificación dimensional y geométrica en diferentes sectores dentro del contexto de la Industria 4.0 (Imkamp *et al.*, 2016). En el caso de la fabricación SLM, donde se producen piezas funcionales en lotes pequeños o incluso únicos, el uso de las técnicas de inspección sin contacto es aún más interesante, ya que permiten captar nubes de puntos de alta densidad en poco tiempo, lo que reduce los ciclos de inspección. Sin embargo, las piezas producidas mediante AM presentan desafíos específicos que incluyen: formas libres con geometrías complejas, textura superficial con alta rugosidad, múltiples oclusiones y características de difícil acceso, así como una amplia gama de materiales con diferentes propiedades ópticas y superficiales. Todas estas características desafiantes pueden contribuir a errores de medición y desviaciones entre diferentes sensores que miden la misma superficie de AM como se representa en la Figura 2.20 (Leach *et al.*, 2019). Algunos ejemplos habituales de errores en la identificación de la posición de la superficie derivados del sistema de medición utilizado son: la interacción de la sonda de contacto con la topología de la superficie (Figura 2.20a), la penetración de la luz láser al medir un material translúcido usando una sonda láser (Figura 2.20b) y la influencia de los métodos de determinación del umbral aplicados a los datos de tomografía computarizada (Figura 2.20c).

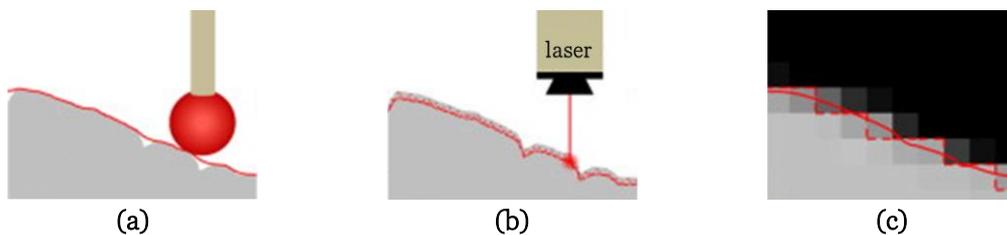


Figura 2.20. Representación esquemática de la medición de una misma superficie con diferentes sistemas: (a) de contacto, (b) óptico y (c) de tomografía computarizada. Las líneas rojas representan los puntos extraídos de la superficie medida (Carmignato y Savio, 2011).

Por otro lado, la determinación de las tolerancias geométricas por parte de los diseñadores y su transmisión a los fabricantes es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de los productos. Los estándares de especificación de dimensionamiento geométrico y tolerancia (GD&T, *Geometric Dimensioning and Tolerancing*) permiten transmitir la intención del diseño, lo que es fundamental para la planificación tanto del proceso de fabricación como de la inspección de la pieza final. Los métodos de GD&T están bien establecidos para los procesos de fabricación tradicionales, sin embargo, el alto grado de influencia de los parámetros de los procesos de AM en las características de la pieza final y las nuevas capacidades introducidas por estos procesos (características interiores y exteriores con forma libre, estructuras de celosía, textura superficial, etc.) crean desafíos para transmitir la intención del diseño utilizando los estándares existentes (Ameta *et al.*, 2015).

La metrología es fundamental para el control de calidad de las piezas metálicas producidas mediante SLM, así como para proporcionar retroalimentación para la optimización del proceso de fabricación. Sin una metrología rápida y precisa, no es posible establecer procedimientos de producción y mantener las tolerancias de producción para minimizar las piezas de desecho. A la hora de seleccionar el sistema de medición más apropiado para este tipo de productos, debe compararse el rendimiento del sensor con los requisitos de la aplicación específica. Como ejemplo en la Figura 2.21 se muestra la precisión típica de diferentes sistemas de medición óptica activa en función de la distancia operativa. Por otro lado, la selección del sistema de inspección óptica más apropiado depende, entre otros factores, de las especificaciones de diseño de la pieza, la geometría, el tamaño y/o la accesibilidad. A modo de ejemplo, la Figura 2.22 muestra los requisitos en términos de tolerancia de perfil para diferentes aplicaciones industriales de piezas con forma libre.

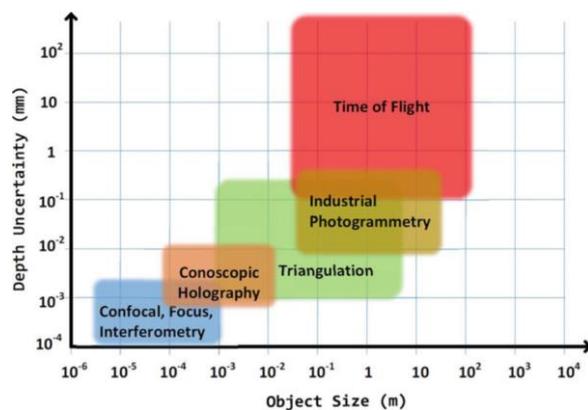


Figura 2.21. Precisión típica de diferentes técnicas de medición óptica activa en función de la distancia operativa (Liu *et al.*, 2020).

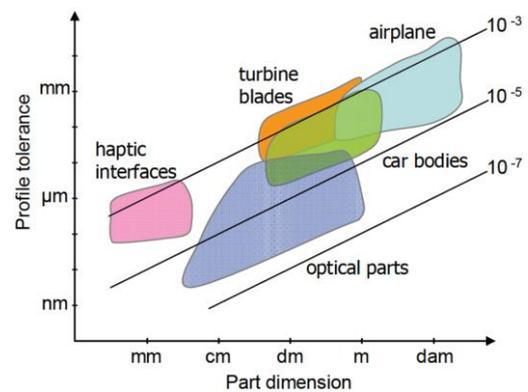


Figura 2.22. Valores típicos de tolerancias frente a las dimensiones de piezas con forma libre para diversas aplicación industriales (Savio, De Chiffre y Schmitt, 2007).

La precisión del proceso de inspección depende de diversos factores. Algunos están directamente relacionados con la estrategia de escaneo 3D, como la orientación y/o posición del sensor con respecto a la superficie a digitalizar (Gerbino *et al.*, 2016), el número de escaneos necesarios para lograr la digitalización completa de una pieza o superficie (Martínez-Pellitero *et al.*, 2018), así como los parámetros de configuración específicos del propio sensor óptico. Otros factores están relacionados con las características de la pieza a digitalizar, como su geometría, textura, color o acabado superficial (Yue *et al.*, 2019). La textura superficial de las piezas metálicas fabricadas mediante el proceso SLM, caracterizada por una alta rugosidad, desafía las técnicas de medición y caracterización existentes (Townsend *et al.*, 2016). Asimismo, los equipos de medición óptica muestran especial sensibilidad a las superficies especulares (Dury *et al.*, 2015).

2.4.2. Inspección del proceso SLM

En metrología de fabricación, se utilizan dos metodologías principales para evaluar el rendimiento de una máquina y/o un proceso: (1) mediante una serie de mediciones directas de las características de la máquina y/o el proceso, y (2) mediante mediciones de artefactos de calibración/referencia fabricados. El primer método requiere posicionamiento y/o control de los componentes individuales de la máquina y de los instrumentos de medición montados alrededor del volumen de trabajo para medir la posición relativa, la orientación y las velocidades de los componentes de la máquina. Esto suele ser difícil o imposible en las máquinas de AM, ya sea porque los componentes móviles no son accesibles para el usuario final o debido a que los controles de seguridad de riesgos potenciales (como los láseres de alta potencia) impiden que el usuario opere la impresora 3D con los instrumentos de medición. Por ello, los artefactos de referencia juegan un papel importante en el diagnóstico y caracterización de las máquinas y los procesos de AM (Moylean *et al.*, 2014).

Monitorización

Durante la fabricación SLM tienen lugar procesos físicos y metalúrgicos complejos que incluyen calentamiento, fusión, convección, evaporación y solidificación (Bidare *et al.*, 2018).

Las interacciones de estos fenómenos producen emisión de radiación, reflexión del láser, dispersión y flujo de calor por conducción (Figura 2.23), cuyas características proporcionan información sobre la calidad del proceso (Spears y Gold, 2016). Esta emisión térmica de banda ancha resultante del proceso SLM se puede ver en diferentes rangos espectrales según el sistema óptico empleado. Un buen sistema de monitoreo de procesos puede mejorar la estabilidad y consistencia del proceso de fabricación y, como resultado, controlar la calidad del producto final.

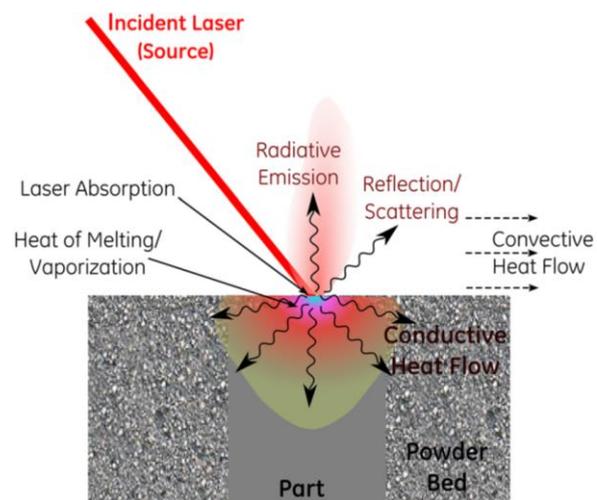


Figura 2.23. Generación de señales durante la formación de las piscinas de fusión en el proceso de fabricación SLM (Spears y Gold, 2016).

La integración de la inspección en las máquinas y procesos SLM actuales tiene como objetivo principal detectar problemas tempranos durante la fabricación y facilitar el mercado de los productos resultantes en menos tiempo. Sistemas ópticos como los sensores de imagen de contacto permiten la inspección en línea rápida y con alta resolución espacial de los defectos

del lecho de polvo metálico (Tan Phuc y Seitá, 2019). En relación, para mejorar la calidad de las piezas y el rendimiento del proceso SLM también es importante controlar el proceso de dispersión del polvo metálico capa a capa (Lin *et al.*, 2021). Respecto a la calidad de las piezas fabricadas, la integración en la impresora de metal de sistemas ópticos basados en tomografía de coherencia óptica (DePond *et al.*, 2018), espectroscopia de emisión acústica (Shevchik *et al.*, 2018), el uso síncrono de cámaras de termografía infrarroja y tomografía óptica (Mohr *et al.*, 2020), imágenes ultrasónicas láser (Xu *et al.*, 2022), termografía infrarroja (Rezaeifar y Elbestawi, 2022) o pirómetro (Cordero *et al.*, 2017) permiten la evaluación in situ de diferentes propiedades como la porosidad o la rugosidad superficial. La inspección en la máquina de fabricación SLM, puede ayudar a conocer y reducir los errores dimensionales causados por las deformaciones generadas durante el proceso de impresión mediante la integración de sistemas ópticos como los sensores de luz estructurada (Kalms *et al.*, 2019).

Verificación con artefactos de referencia

El diseño inteligente de los artefactos de referencia puede permitir la evaluación del rendimiento de los componentes de la máquina de forma individual. En su estudio, Carmignato *et al.* (Carmignato *et al.*, 2020) proporcionaron pautas para la selección, uso y desarrollo de artefactos dimensionales. Según Mahesh (Mahesh, 2004), los artefactos de referencia para evaluar los procesos de AM se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo con su propósito principal:

- **"Artefactos de referencia geométricos"**: utilizados para verificar el rendimiento geométrico (Rebaioli y Fassi, 2017) y/o dimensional (UNE-EN ISO/ASTM 52902:2020), la precisión (dimensional (Pessard *et al.*, 2008) y/o geométrica (Cooke y Soons, 2010)), las tolerancias (Hanumaiah y Ravi, 2007), la repetibilidad (Delgado *et al.*, 2009) y el acabado superficial (Giovanni Strano *et al.*, 2013)).
- **"Artefactos de referencia mecánicos"**: utilizados para caracterizar las propiedades mecánicas (contracción (Ning *et al.*, 2006), deformación, resistencia a tracción y a compresión, y características de fluencia).
- **"Artefactos de referencia de proceso"**: utilizados para definir los parámetros óptimos del proceso (Calignano *et al.*, 2017) (potencia del láser, velocidad de escaneo, espesor de capa, orientación de la pieza (Grimm, Wiora y Witt, 2015), estructuras de soporte, etc.).

También hay artefactos que combinan varios propósitos, como el diseñado por Taylor *et al.* (Taylor, Garibay y Wicker, 2021) para evaluar la precisión dimensional, la distorsión, la tensión residual, la microestructura de geometría específica, la química, la integridad de la superficie, la eliminación de polvo y las propiedades mecánicas. Artefactos diseñados para

evaluar la capacidad de detalle y las limitaciones geométricas de los sistemas de AM de metal (Teeter *et al.*, 2015). Así como artefactos para evaluar el proceso completo de fabricación, como por ejemplo: el artefacto propuesto por Campanelli *et al.* (Campanelli *et al.*, 2010) para evaluar la capacidad del proceso SLM en términos de precisión dimensional y tamaño mínimo factible de característica; los tres artefactos diseñados por Vandenbroucke y Kruth (Vandenbroucke y Kruth, 2007) para evaluar el proceso SLM mediante el análisis de la influencia del ángulo de inclinación, la diferencia entre las superficies superior e inferior, la viabilidad para lograr pequeños detalles y la precisión del proceso; el artefacto diseñado por Subbaian Kaliamoorthy *et al.* (Subbaian Kaliamoorthy *et al.*, 2020) para probar la capacidad de fabricar mediante la tecnología SLM canales de enfriamiento para respaldar la fabricación de moldes; o los tres artefactos diseñados por Townsend *et al.* (Townsend, Racasan y Blunt, 2018) para proporcionar información completa relacionada con las superficies de AM.

Otros investigadores se han centrado en el estudio de artefactos para comparar diferentes procesos de AM de metales. Kudzal *et al.* (Kudzal *et al.*, 2005) evaluaron la precisión, el material, las propiedades mecánicas, la velocidad y la confiabilidad de los procesos de fusión y sinterización selectiva por láser. Castillo (Castillo, 2005) analizó la precisión, la capacidad, las limitaciones geométricas y la capacidad de fabricar planos salientes con diferentes ángulos mediante cuatro tecnologías diferentes. Ghany y Moustafa (Ghany y Moustafa, 2006) utilizaron una pieza del "mundo real" para comparar la apariencia, la microestructura, la composición química, las propiedades mecánicas y los costes de fabricación de cinco tecnologías diferentes. Minetola *et al.* (Minetola *et al.*, 2020) diseñaron un artefacto para evaluar y comparar la precisión dimensional de dos sistemas de PBF metálico utilizando grados de tolerancia internacional ISO. Por otro lado, Yasa *et al.* (Yasa *et al.*, 2014) diseñaron un artefacto de referencia para comparar cuatro proveedores diferentes de máquinas de SLM a través del análisis de la calidad de la superficie, la precisión dimensional, la resolución geométrica, la densidad, la dureza, la necesidad de estructuras de soporte y los límites del proceso. Moshiri *et al.* (Moshiri *et al.*, 2019) presentaron la metodología y los resultados de una evaluación comparativa exhaustiva de cinco máquinas SLM diferentes para comprender la influencia de cada máquina en la calidad final del artefacto diseñado.

Según Scaravetti *et al.* (Scaravetti, Dubois y Duchamp, 2008), los artefactos de referencia no solo deben evaluar las limitaciones del proceso, sino que también deben incluir características que permitan una optimización iterativa del mismo. Además, el procedimiento de calificación debe permitir la identificación y la cuantificación de los defectos, así como la determinación de su origen. Para lograr esto, los artefactos deben tener formas geométricas simples (que permitan un control fácil y una definición perfecta de la geometría), no requerir la aplicación de postprocesos ni la intervención manual (por ejemplo, no debe haber estructuras de soporte) y permitir la repetibilidad de la medición (Moylan *et al.*, 2012). Al respecto, Rupal *et al.* (Rupal, Ahmad y Qureshi, 2018) proporcionaron una metodología sistemática para el

diseño de artefactos de referencia geométrica para evaluar el comportamiento geométrico de los procesos de AM.

Como conclusión, cabe destacar la relevancia de los sistemas de medición óptica principalmente por su capacidad de captar densas nubes de puntos (incluso de geometrías complejas) en tiempos muy cortos.

Diferentes autores han evaluado el rendimiento del proceso SLM, ya sea mediante la monitorización en máquina como a través de artefactos de referencia. Sin embargo, en relación a los artefactos, no existen estudios que evalúen la precisión lograda en la fabricación SLM de diferentes entidades geométricas materializadas sobre planos con diferente inclinación respecto a los ejes de impresión de la máquina. Los estudios existentes sobre artefactos con entidades geométricas se centran principalmente en su fabricación sobre planos verticales y horizontales. Por esta razón, en el capítulo 6 de la presente tesis doctoral, las piezas patrón diseñadas incluyen estas características.

Por otro lado, la idoneidad de la inspección óptica para la verificación geométrica y dimensional de piezas fabricadas mediante la tecnología SLM es un tema poco estudiado. La textura superficial característica de este tipo de piezas puede influir en el rendimiento del proceso de inspección óptica, asimismo la aplicación de postprocesos SLM que modifiquen el acabado superficial de las piezas (como el arenado) también pueden influir en el error de medición óptica. En relación al propio proceso de inspección, es importante seleccionar el sistema de medición más apropiado para este tipo de componentes, así como la metodología de inspección óptima (software de metrología utilizado, filtrado de puntos espurios, etc.). Por ello, el capítulo 8 de la presente tesis doctoral se centra en la inspección de las piezas fabricadas por SLM, abordando la idoneidad de los sistemas ópticos, la influencia de utilizar diferentes softwares de metrología y diferentes sistemas de medición óptica, así como la influencia de aplicar filtros en el proceso de inspección y diferentes postprocesos tras la fabricación SLM.

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se recopilan y exponen los materiales, equipos y métodos que se han utilizado para la fabricación y la aplicación de postprocesos SLM, así como para la caracterización y evaluación de la calidad tanto del polvo de acero inoxidable 17-4PH como de las piezas impresas mediante la tecnología SLM.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. EQUIPOS PARA LA FABRICACIÓN SLM*
- 2. EQUIPOS PARA LOS POSTPROCESOS SLM*
- 3. EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD*

La mayor parte de los equipos utilizados están disponibles en la Unidad de Fabricación e Impresión 3D (UFI3D) de la Universidad de León (ULE).

Otros equipos están disponibles en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales (LTI) de la ULE y de la Universidad de Valladolid (UVA), en el Laboratorio di Metallurgia dell'Università del Salento (Italia), así como en los Laboratorios de Metrología de la Universidad de Oviedo (UNIOVI).

Además, agradecer a las empresas Grupo Hedisa, DOGRAM y TECVECO3D su colaboración en el uso de equipos.

3.1. EQUIPOS PARA LA FABRICACIÓN SLM

El proceso completo de fabricación SLM, además de la propia etapa de impresión, engloba las operaciones de tamizado y reciclaje del polvo. En los siguientes apartados se describen tanto los materiales como los equipos y métodos empleados en estas etapas.

3.1.1. Material de partida

El material utilizado para la fabricación SLM es polvo de acero inoxidable 17-4PH suministrado por 3DSystems y producido mediante atomización por gas (Murr *et al.*, 2012). Su composición química se muestra en la Tabla 3.1, su punto de fusión está comprendido en el rango entre 1.400-1.440 °C, su densidad es de 7,8 g/cm³ y el tamaño de sus partículas es inferior a 1 mm.

Tabla 3.1. Composición química del polvo de acero inoxidable 17-4 PH (3DSystems, 2017b).

Elemento	Fe	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	Nb
% en peso	Balance	15-17,5	3-5	3-5	<1	<1	0,15-0,45



Esta aleación presenta una excelente combinación de alta resistencia y buena resistencia a la corrosión, gran dureza, buenas propiedades térmicas, así como excelentes propiedades mecánicas a temperaturas elevadas (hasta 300 °C). Por sus destacadas propiedades, este acero inoxidable endurecido por precipitación es utilizado para la fabricación de prototipos de grado industrial, piezas de producción o repuestos para el sector aeroespacial, la industria química y petroquímica, el sector energético, instrumentos quirúrgicos, componentes de alto desgaste y la metalurgia general (3DSystems, 2017b).

3.1.2. Impresora SLM

La fabricación SLM se lleva a cabo mediante la máquina ProX DMP 100 del fabricante 3DSystems (3DSystems, 2017a). Sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de la impresora de metal ProX DMP 100 (3DSystems, 2017a).

Tipo de potencia láser	Láser de fibra
Máxima potencia láser	50 W
Longitud de onda láser	1.070 nm
Mínimo espesor de capa	10 μm
Espesor de capa preestablecido	30 μm
Volumen de trabajo (X x Y x Z)	(100 x 100 x 80) mm
Sistema para la deposición de material	Rodillo
Repetibilidad	X = 20 μm ; Y = 20 μm ; Z = 20 μm
Mínimo tamaño de características	X = 100 μm ; Y = 100 μm ; Z = 20 μm
Exactitud típica	\pm (0,1-0,2) % con \pm 50 μm mínimo

La Figura 3.1 muestra la impresora ProX DMP 100 y sus partes principales (3DSystems, 2017c). La **pantalla de control** consta de una pantalla táctil LCD y un panel de controles externos ubicado en la zona superior derecha de la máquina. El **ensamblaje láser** consta de una fuente de láser de fibra, un colimador, un expansor de haz, un cabezal de escaneo y un objetivo F-Theta de campo plano. La **esclusa** de aire (ubicada detrás de las puertas delanteras) permite cargar/descargar las placas de fabricación y los botes de polvo sin tener contacto con el interior de la cámara, impidiendo la contaminación del polvo y manteniendo la inertización de la cámara. El **área de fabricación** contiene la puerta de la cámara, un elemento calefactor (máxima temperatura interna de la cámara de 70 °C, precisión de control de \pm 10 °C y potencia nominal de 1.200 W), una manguera de aspiración integrada (ubicada en la parte superior izquierda), un sensor de oxígeno (que monitorea el nivel de oxígeno de forma continua, expresando el valor en porcentaje hasta el 1 % y en partes por millón (ppm) a continuación) y un módulo de capas o conjunto de elementos encargados de la realización de las capas de polvo. Dicho módulo de capas (Figura 3.1) está compuesto por:

- (1) Un **rodillo** que puede moverse en línea recta utilizando el carro a una velocidad máxima de 200 mm/s (con una precisión <1 mm) y rotar a una velocidad máxima de 5 vueltas por segundo. La combinación de los diferentes movimientos del rodillo y el carro permiten realizar las operaciones de deposición y compactación de las capas de polvo.
- (2) Una **cuchilla** cuya geometría permite desplazar el polvo desde el pistón de alimentación hasta el pistón de fabricación.

- (3) Un **pistón o plataforma de alimentación** que contiene el volumen de polvo necesario para la fabricación y cuyas características son:
- Dimensiones: 100 mm x 100 mm.
 - Carrera: 200 mm.
 - Volumen de polvo: 2 l.
 - Velocidad máxima: 20 mm/s.
 - Precisión de posicionamiento: $\pm 5 \mu\text{m}$.
- (4) Un **pistón o plataforma de fabricación** que contiene la placa de fabricación sobre la que se fabrican las piezas y cuyas características son:
- Dimensiones de la placa de fabricación: 100 mm x 100 mm.
 - Carrera útil: 80 mm (con placa de fabricación de 10 mm de espesor).
 - Velocidad máxima: 20 mm/s.
 - Precisión de posicionamiento: $\pm 3 \mu\text{m}$.
- (5) Una **unidad de compactación** cuya función es compactar el polvo almacenado. Para la realización de esta operación dicha unidad se sitúa encima del pistón de alimentación (obstruyéndolo en su totalidad) y, a continuación, este pistón es elevado hasta conseguir la compactación del polvo.
- (6) Un **tanque recolector** que contiene dos botes para la recuperación del polvo no fundido y los residuos de fabricación, los cuales han de ser tratados posteriormente en el sistema de reciclaje externo (tamizadora).



Figura 3.1. Impresora de metal ProX DMP 100 – disponible en la UFI3D (ULE).

El proceso SLM se lleva a cabo en una atmósfera de nitrógeno gracias a la conexión directa de un tanque y un generador de nitrógeno (Figura 3.2 y Tabla 3.3) a la máquina SLM. Antes de la producción se inertiza el área de fabricación desplazando el oxígeno, y durante el proceso SLM se mantiene el área de fabricación con un nivel de oxígeno inferior a 800 ppm.



Figura 3.2. Generador de nitrógeno Nitrocrafft NCP 016 OF – disponible en la UFI3D (ULE).

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del generador de nitrógeno Nitrocrafft NCP 016 OF (Nitrocrafft, 2017).

Máxima presión de trabajo	10 bares
Presión operativa	6,5 bares
Flujo de nitrógeno	9,5 l/min
Pureza del gas	99,99 % <100 ppm de O ₂

El software DMP ProX Manufacturing se utiliza para la preparación de las piezas que se van a fabricar mediante la impresora ProX DMP 100. Las piezas se importan como archivos STL y se les asignan los parámetros de fabricación, que definen los parámetros de láser, escaneo (compensación y retardo), estrategia de escaneo (normal, hexagonal, concéntrica, malla continua y contorno) y geometría (ángulo de la trayectoria láser). La Tabla 3.4 muestra los parámetros del proceso SLM recomendados por el fabricante que se mantendrán fijos durante todo el desarrollo de la presente tesis doctoral. Los parámetros de la potencia y el desenfoque del láser, así como las estrategias de escaneo láser, se modificarán con la finalidad de optimizar el proceso de fabricación SLM.

Tabla 3.4. Parámetros de fabricación fijos del proceso SLM.

LÁSER		RETARDO	
Velocidad de escaneo	140 mm/s	Encendido del láser	750 μs
Velocidad de salto entre pasadas	5.000 mm/s	Apagado del láser	250 μs
Espaciado entre pasadas	70 μm	Retardo de escaneo y salto entre pasadas	400 μs
GEOMETRÍA		COMPENSACIÓN	
Comienzo	85 μm	Ángulo de capas impares	-45°
Parada	45 μm	Ángulo de capas pares	45°

3.1.3. Tamizadora automática

Tras la fabricación SLM, el polvo metálico sobrante, es decir, el polvo contenido sobre la plataforma de fabricación pero no fundido, es aspirado (mediante la manguera de aspiración ubicada en el área de fabricación de la máquina ProX DMP 100 (Figura 3.1)) y conducido automáticamente al equipo PX-BOX para su reprocesamiento. El sistema PX-BOX de 3DSystems (Figura 3.3) está diseñado para almacenar, secar, tamizar y reciclar el polvo metálico permitiendo cargar/descargar botes de polvo vacíos/lLENOS sin alterar la atmósfera de la cámara. La Tabla 3.5 muestra sus características principales.

Tabla 3.5. Características principales de la tamizadora automática PX-BOX (3DSystems, 2012).

Máxima temperatura del depósito de polvo	50 °C
Tamaño de la malla del tamiz	75 μm
Capacidad del plato giratorio	6 botes
Velocidad del plato giratorio	10 r/min
Caudal de gas de inertización de la cámara	5 l/min
Caudal de gas de purga de la cámara	25 l/min



Figura 3.3. Tamizadora automática PX-BOX (3DSystems, 2012) – disponible en la UFI3D (ULE).

3.2. EQUIPOS PARA LOS POSTPROCESOS SLM

En este apartado se describen los equipos empleados para la aplicación de diferentes postprocesos SLM, tanto mecánicos como térmicos.

3.2.1. Máquina de electroerosión por hilo

La operación de separación de las piezas de la placa de fabricación se realiza mediante la máquina de electroerosión por hilo Prima E 250 del fabricante ONA (Figura 3.4). El principio de funcionamiento del corte mediante electroerosión por hilo consiste en una serie de descargas de corriente continua que producen chispas entre el hilo y la pieza, al estar ambos en contacto con el fluido dieléctrico. Las especificaciones tanto de la máquina como del hilo (Figura 3.5) se muestran en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7, respectivamente.

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas de la máquina de electroerosión por hilo Prima E 250 (ONA, 1996).

Recorrido de mesa (X x Y)	(350 x 250) mm
Recorrido eje Z	200 mm
Recorrido de mesa auxiliar (U x V)	(80 x 80) mm
Máximo tamaño de pieza (X x Y x Z)	(910 x 680 x 200) mm
Máximo peso de pieza	500 kg
Tipo de guía	Cerrada de diamante
Resolución de posición (X, Y, U, V)	1 μ m
Mínimo incremento programable	1 μ m

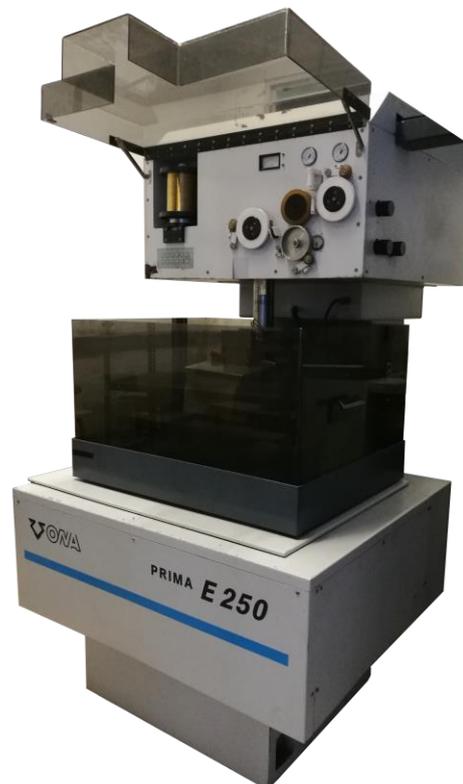


Figura 3.4. Máquina de electroerosión por hilo Prima E 250 – disponible en la UFI3D (ULE).



Figura 3.5.
Bobina de hilo de
la máquina de
electroerosión.

Tabla 3.7. Especificaciones del hilo de la máquina de electroerosión (ONA, 1996).

Diámetro	0,25 mm
Características (latón desnudo)	Cu 63 % / Zn 37 %
Resistencia a tracción	900 N/mm ²
Tipo de bobina	DIN160

3.2.2. Arenadora

La arenadora Sablex S2 del fabricante ABSHOT (Figura 3.6) es la máquina empleada para el esmerilado y opacado de las piezas metálicas resultantes del proceso SLM, sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.8. El principio de funcionamiento consiste en la proyección a presión de arena sobre la superficie de las piezas. El material abrasivo utilizado es corindón blanco (óxido de aluminio blanco) suministrado por ABSHOT (Figura 3.7 y Tabla 3.9), tiene forma angular y su composición química es: 99,7 % Al₂O₃, 0,03 % SiO₂, 0,01 % Fe₂O₃, 0,01 % TiO₂, 0,2 % Na₂O y 0,04 % CaO + MgO (ABSHOT, 2022).

Tabla 3.8. Especificaciones técnicas de la arenadora Sablex S2 (ABSHOT, 2015).

Potencia	150 W
Caudal de aire	300 l/min a 6 atm
Diámetro de la tobera	4 mm
Presión de trabajo	7 bar
Proceso	Manual

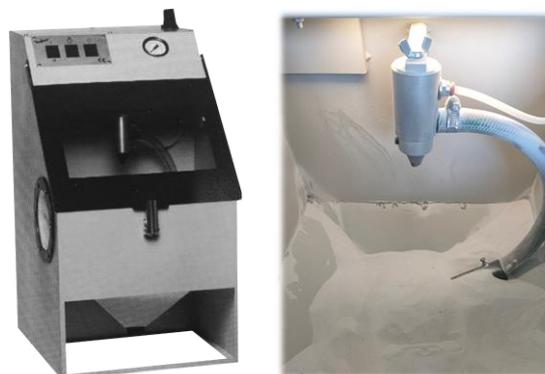


Figura 3.6. Arenadora Sablex S2 – disponible en la UFI3D (ULE).



Figura 3.7. Corindón blanco
(ABSHOT, 2022).

Tabla 3.9. Especificaciones del corindón blanco (ABSHOT, 2022).

Granulometría	(106-150) μm (FEPA 100)
Dureza	9 Mohs
Densidad	3,9 g/cm ³

3.2.3. Hornos

Para la aplicación de diferentes tratamientos térmicos se han utilizado los hornos descritos a continuación. Principalmente se han aplicado los tratamientos térmicos recomendados por el fabricante para el material de partida utilizado (acero inoxidable 17-4PH) (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Tratamientos térmicos recomendados por 3DSystems para las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH.

Tratamiento térmico	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Enfriamiento
Relajación de tensiones	650	2	Al aire
Puesta en solución	1.100	1	Al aire
Envejecimiento	480	1	Al aire

Hornos de mufla

Las especificaciones técnicas del horno eléctrico de mufla 12PR/400 de Hobernal (Figura 3.8) se muestran en la Tabla 3.11. Horno de 4 zonas calefactadas.

Tabla 3.11. Especificaciones técnicas del horno eléctrico de mufla 12PR/400 (Hobernal, 2018b).

Volumen interior (altura x ancho x profundidad)	22 l (200 x 280 x 390) mm
Potencia	8 kW
Máxima temperatura de clasificación	1.200 °C
Máxima temperatura de trabajo limitado	1.150 °C
Máxima temperatura de trabajo continuo	1.100 °C
Termopar	K
Elementos calefactores	Hilo Kanthal



Figura 3.8. Horno eléctrico de mufla 12PR/400 – disponible en la UFI3D (ULE).

Las especificaciones técnicas del horno de mufla de atmósfera controlada con cierre hermético 12PR400CCH de Hobersal (Figura 3.9) se muestran en la Tabla 3.12. Este horno trabaja con atmósfera inerte por barrido de gas nitrógeno. Horno de 4 zonas calefactadas.



Figura 3.9. Horno de mufla de atmósfera controlada 12PR400CCH – disponible en la UFI3D (ULE).

Tabla 3.12. Especificaciones técnicas del horno de mufla de atmósfera controlada 12PR400CCH (Hobersal, 2018a).

Volumen interior (altura x ancho x profundidad)	11 l (150 x 200 x 350) mm
Potencia	8 kW
Máxima temperatura de clasificación	1.150 °C
Máxima temperatura de trabajo limitado	1.100 °C
Máxima temperatura de trabajo continuo	1.000 °C
Termopar	K
Elementos calefactores	Hilo Kanthal

Horno HIP

Las especificaciones técnicas del horno HIP (Figura 3.10) se muestran en la Tabla 3.13. Se trata de un horno de grafito con sistema de enfriamiento rápido uniforme.

Tabla 3.13. Especificaciones técnicas del horno HIP.

Dimensiones de la zona de trabajo	252 mm (diámetro) 760 mm (altura)
Dimensiones del contenedor de carga	220 mm (diámetro) 690 mm (altura)
Máxima temperatura	2.000 °C
Máxima presión	2.069 bares



Figura 3.10. Horno HIP – disponible en la empresa Grupo Hedisa (León).

3.3. EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD

En este apartado se describen los equipos y métodos empleados para caracterizar y evaluar la calidad tanto del polvo metálico de partida como de las piezas resultantes del proceso de fabricación SLM. Se han utilizado equipos para la caracterización del material (preparación de muestras, análisis de porosidad/densidad, análisis macroscópico y microscópico, análisis microestructural), la evaluación de las propiedades mecánicas (dureza, microdureza, resistencia a la tracción), el análisis de la textura superficial (rugosidad) y la evaluación de la calidad geométrica y dimensional (CMM, escáner láser, escáner de luz estructurada, sensor de holografía conoscópica).

3.3.1. Equipos para la caracterización del material

Equipos para la preparación de muestras

Ciertos ensayos de caracterización del material (porosidad o microestructura) o ensayos mecánicos (microdureza) realizados en el interior de las piezas, requieren de la preparación previa de las muestras. A continuación, se describen las etapas para la preparación de las muestras (no todas estas etapas son necesarias, dependen del análisis a realizar):



Figura 3.11. Cortadora metalográfica – disponible en la UFI3D (ULE).

- 1) **Corte:** Se realiza un corte transversal o longitudinal en función de la sección a evaluar. Esta etapa se lleva a cabo mediante el método de corte con abrasivo húmedo, utilizando una cortadora metalográfica de Tecnimetal (Figura 3.11) equipada con un disco de corindón (Al_2O_3). Durante el proceso el disco gira a 3.000 r/min y la zona de corte está constantemente refrigerada mediante aceite lubricante concentrado para evitar deformaciones en la estructura del material por acción de la temperatura.

2) **Encapsulado:** Tras el corte, las muestras se encapsulan mediante la técnica de montaje en frío, utilizando moldes de polietileno y resina de encapsulado (resultante de la mezcla de resina en polvo acrílica tipo KM y resina líquida a base de metacrilato de metilo) (Figura 3.12). Esta etapa dota a las muestras de un tamaño adecuado para su manejo en las etapas posteriores.



Figura 3.12. Material para encapsular.



Figura 3.13. Pulidora metalográfica Teknipol – disponible en la UFI3D (ULE).

3) **Preparación mecánica:** Consiste en la eliminación de material con la finalidad de obtener una superficie plana (**esmerilado**) con brillo espejo (**pulido**). Este proceso se realiza con una pulidora metalográfica Teknipol del fabricante Tecnimetal (Figura 3.13) equipada con discos abrasivos de papel de carburo de silicio con distinta granulometría ((250-4) μm) para la etapa de esmerilado (agua como lubricante), y discos de nylon y terciopelo junto con pasta de diamante (1 μm y 3 μm) para la etapa de pulido (aceite como lubricante).

4) **Ataque químico:** Esta etapa permite el análisis microestructural. Las muestras se sumergen unos 5 segundos en el atacante químico Vilella (100 ml de alcohol etílico + 5 ml de ácido clorhídrico + 2 g de ácido pícrico) e inmediatamente después se sumergen en agua destilada para cortar la reacción (Figura 3.14). Este proceso se repite iterativamente hasta conseguir el revelado adecuado de la microestructura. Finalmente, las muestras se secan y se analizan al microscopio.



Figura 3.14. Material para atacar químicamente.

Equipos para el análisis de la porosidad/densidad

La porosidad/densidad de las piezas se calcula mediante el principio de Arquímedes, utilizando agua desmineralizada como fluido según las recomendaciones del estudio de Terris *et al.* (de Terris *et al.*, 2019) para las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM. Para la medición de la masa de la muestra en aire (Figura 3.15a) y la masa de la muestra sumergida en agua (Figura 3.15b) se utiliza la balanza electrónica de precisión CB-Compleat del fabricante Cobos (Figura 3.15). Este equipo tiene una capacidad de medición mínima de 0,02 g y máxima de 320 g, y una precisión de 0,001 g.



Figura 3.15. Balanza de precisión CB-Compleat – disponible en la UFI3D (ULE) – durante el proceso de medición de una muestra SLM: (a) en aire y (b) sumergida en agua.

Macroscopio y microscopios (óptico, SEM y TEM)

A continuación, se describen los equipos utilizados para el análisis a nivel macroscópico y microscópico de diferentes propiedades y características tanto del polvo metálico como de las piezas impresas.

Macroscopio

Para el análisis macroscópico de las muestras se utiliza el macroscopio Leica Z16 APO equipado con la fuente de luz Leica KL 1500 Plus (Figura 3.16) y controlado mediante el software Leica Application Suite.

Este equipo dispone de un zoom de 16:1 con una amplitud de zoom desde x0,57 hasta x9,2, aumentos desde x7,1 hasta x115 y objetivo apocromático plano.



Figura 3.16. Macroscopio Leica Z16 APO – disponible en la UFI3D (ULE).

Microscopio óptico

Para el análisis microscópico tanto de la porosidad y los defectos internos de las piezas, como de la microestructura, se utiliza el microscopio óptico BHM-312 L de Olympus (Figura 3.17) controlado mediante el software Leica Application Suite y el microscopio metalúrgico invertido Epiphot 200 de Nikon (Figura 3.18) controlado por el software NIS-Elements. El microscopio BHM-312 L dispone de aumentos de x50, x100, x200, x500 y x800, y el microscopio Epiphot 200 dispone de x50, x100, x200, x500 y x1.000 aumentos.



Figura 3.17. Microscopio óptico BHM-312 L – disponible en la UFI3D (ULE).



Figura 3.18. Microscopio metalúrgico invertido Epiphot 200 – disponible en el Laboratorio di Metallurgia dell'Università del Salento.

Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Para el análisis microscópico de mayor resolución se utiliza el microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*) JSM-6480LV del fabricante JEOL (Figura 3.19) controlado mediante el software JEOL Scanning Electron Microscope (Figura 3.20). Este equipo dispone de aumentos desde x33 hasta x2.200 y puede trabajar con señales de: imágenes de electrones secundarios (SEI, *Secondary Electron Imaging*) e imágenes de electrones retrodispersados (BEI, *Backscattered Electron Imaging*). Los parámetros empleados para obtener una resolución óptima de las muestras analizadas se presentan en la Tabla 3.14.

Para el análisis de espectroscopia por dispersión de energía (EDS, *Energy Dispersive Spectroscopy*) se utiliza el SEM en modo de señal BEI junto con el software AZtec. Dicho software permite la recopilación de datos precisos a micro y nano escala de elementos y composiciones químicas de las muestras evaluadas.



Figura 3.19. SEM JSM-6480LV – disponible en el LTI (ULE).

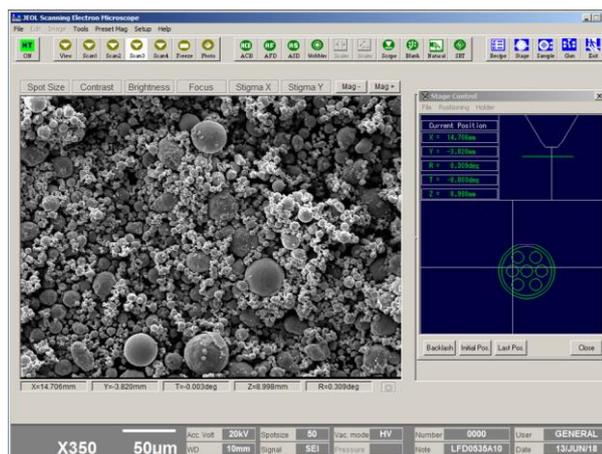


Figura 3.20. Software JEOL Scanning Electron Microscope – disponible en el LTI (ULE).

Tabla 3.14. Principales parámetros del SEM utilizados.

Voltaje de aceleración	20 kV
Distancia de trabajo	10 mm
Tamaño del <i>spot</i>	50
Señal	SEI (e ⁻ secundarios) BEI (e ⁻ retrodispersados)
Modo de vacío	HV (alto vacío)

Microscopio electrónico de transmisión (TEM)

Para el análisis mediante el microscopio electrónico de transmisión (TEM, *Transmission Electron Microscopy*) se utiliza el microscopio CM-200 de Philips equipado con un porta-muestras de doble inclinación (equipo disponible en *l'Università del Salento*). La preparación de las láminas delgadas para el análisis en el TEM se realiza mediante el esmerilado y el pulido mecánico hasta conseguir un espesor central entre 25 µm y 30 µm, seguido del proceso de pulido de iones de precisión de doble inclinación con ángulos de incidencia de 8°, 6° y 4° para el primer y segundo cuarto y para la última mitad del proceso, respectivamente. Para determinar los parámetros de red de las fases existentes se utiliza la difracción de electrones de haz convergente (CBED, *Converged Beam Electron Diffraction*) con un haz de electrones nominal entre 5 nm y 6 nm.

Software ImageJ

ImageJ es un programa de procesamiento de imágenes utilizado para la medición del tamaño de partículas de polvo, así como de poros y defectos (como las proyecciones de partículas fundidas) de las piezas impresas mediante SLM. Dicho proceso de análisis se realiza utilizando las imágenes obtenidas tanto del microscopio óptico como del SEM. Las principales herramientas de este software utilizadas son:

- La calibración de las medidas a partir de la definición de la escala.
- La creación de mosaicos mediante la utilización del complemento «MosaicJ».
- La binarización mediante la configuración del filtro «*threshold*».
- La medición de diferentes parámetros entre los que cabe destacar el área, el ajuste a una elipse (eje mayor o primario y eje menor o secundario) y los descriptores de forma tales como la circularidad (ecuación (2)), la relación de aspecto (ecuación (3)) y la redondez (ecuación (4)). Los valores de circularidad se encuentran en el rango 0-1, el valor 1 indica la correspondencia con un círculo perfecto y a medida que el valor se acerca a 0 la forma es cada vez más alargada, clasificándose como forma: laminar ($0 < \text{circularidad} \leq 0,5$), aleatoria ($0,5 < \text{circularidad} \leq 0,75$) y esférica ($0,75 < \text{circularidad} \leq 1$).

$$\text{Circularidad} = 4\pi \times \frac{\text{Área} [\mu\text{m}^2]}{\text{Perímetro}[\mu\text{m}]^2} \quad (2)$$

$$\text{Relación de aspecto} = \frac{\text{Eje Mayor} [\mu\text{m}]}{\text{Eje Menor} [\mu\text{m}]} \quad (3)$$

$$\text{Redondez} = 4 \times \frac{\text{Área} [\mu\text{m}^2]}{\pi \times [\text{Eje Mayor}[\mu\text{m}]^2]} \quad (4)$$

Difractómetro

Para el análisis de difracción de rayos X (XRD, *X-Ray Diffraction*) se utiliza el difractómetro Discover D8 del fabricante Bruker (Figura 3.21). Sus especificaciones técnicas y los principales parámetros utilizados para el ensayo se muestran en la Tabla 3.15.



Figura 3.21. Difractómetro Discover D8 (Bruker, 2022) – disponible en el LTI (UVA).

Tabla 3.15. Especificaciones técnicas del difractómetro Discover D8 (Bruker, 2022).

Fuente de rayos X	Tubo
Material del ánodo	Cobre
Longitud de onda del ánodo	1,5418 Å
Rango 2θ del ensayo	40°-100°
Temperatura del ensayo	Ambiente

3.3.2. Equipos para los ensayos mecánicos

Durómetro y microdurómetro

En general, para evaluar la dureza de las piezas se utiliza el microdurómetro HMV-2000 del fabricante Shimadzu (Figura 3.22) equipado con un penetrador de diamante piramidal de base cuadrada con ángulos a 136° y que dispone de una capacidad de carga desde 5 g hasta 2 kg. Ciertos ensayos se realizan con el durómetro automático Wiki 200 JS de Affri (Figura 3.23) controlado por el software AFFRI Vickers Hardness Testing, que dispone de una capacidad de carga desde 1 g hasta 100 kg. Todos los ensayos de dureza se realizan según el método de ensayo Vickers (UNE-EN ISO 6507-1:2018), recomendado por la norma UNE-EN ISO 17296-3:2017.



Figura 3.22. Microdurómetro HMV-2000 – disponible en la UFI3D (ULE).



Figura 3.23. Durómetro automático Wiki 200 JS – disponible en el *Laboratorio di Metallurgia dell'Università del Salento*.

Máquina universal de ensayos

El ensayo mecánico de tracción se lleva a cabo con la máquina universal de ensayos ME-402/5 de Servosis (Figura 3.24 y Tabla 3.16), equipada con unas mordazas de amarre de accionamiento mecánico y un extensómetro tipo *clip-on* de pinza manual (Figura 3.25) y controlada mediante el software PCD2K. Dicho ensayo mecánico se realiza según la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020. Las principales características mecánicas evaluadas tras el ensayo son: Z (coeficiente de estricción), R_m (resistencia a la tracción) y R_p (límite elástico convencional).



Figura 3.24. Máquina universal de ensayos ME-402/5 – disponible en la UFI3D (ULE).

Tabla 3.16. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos ME-402/5 (Servosis, 2022).

Capacidad de carga	5 t
Máxima velocidad de trabajo	200 mm/min
Exactitud de la medida	Fuerza: $\pm 1 \%$
	Posición: $\pm 1 \%$
Máxima luz axial libre	1.000 mm
Recorrido útil del husillo	400 mm
Luz lateral libre entre columnas	610 mm
Dimensiones marco de ensayos (ancho / profundidad / altura)	(900 / 500 / 2.050) mm



Figura 3.25. Extensómetro axial para ensayos de tracción (Servosis, 2018) – disponible en la UFI3D (ULE).

Siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020 sobre el ensayo de tracción, los parámetros de ensayo utilizados se muestran en la Tabla 3.17 (donde R_t es el límite de alargamiento) y el diseño de las probetas fabricadas mediante SLM (forma y medidas) se muestran en la Figura 3.26. A partir del valor del área de la sección transversal

inicial calibrada «S_o» (24 mm²) se calcula la longitud inicial entre puntos «L_o» (27,68 mm) y longitud calibrada «L_c» (35,03 mm), según las ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

$$L_o [mm] = 5,65\sqrt{S_o} \quad (5)$$

$$L_c [mm] = L_o + 1,5\sqrt{S_o} \quad (6)$$

Tabla 3.17. Parámetros del ensayo de tracción según la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020.

Método	Fuerza
Velocidad	6 MPa/s
Velocidad cedencia	250 μD/s
Velocidad elástica	70 μD/s
Velocidad plástica	2.000 μD/s
Tiempo aceleración	1 s
Porcentaje R _p	0,2 %
Porcentaje R _t	0,5 %

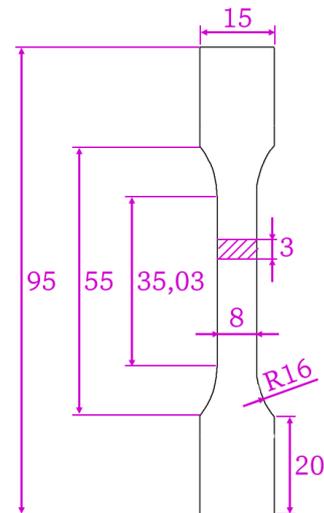


Figura 3.26. Diseño de la probeta SLM para el ensayo de tracción.

3.3.3. Equipo para el análisis de la textura superficial

La caracterización de la textura superficial de las piezas SLM se realiza utilizando el rugosímetro SJ-500P de Mitutoyo (Figura 3.27 y Tabla 3.18) y según la norma UNE-EN ISO 4288:1998. Los parámetros del perfil de rugosidad evaluados para la caracterización de la calidad superficial de las piezas son R_a (desviación media aritmética del perfil evaluado) y R_t (altura total del perfil). Para las mediciones se utiliza una palpador o sonda estándar de 5 μm de radio con un ángulo de 90° (Figura 3.27) y se configuran los parámetros de longitud de muestreo (2,5 mm), longitud de evaluación (12,5 mm) y recorrido del palpador (15 mm) según las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 4288:1998.

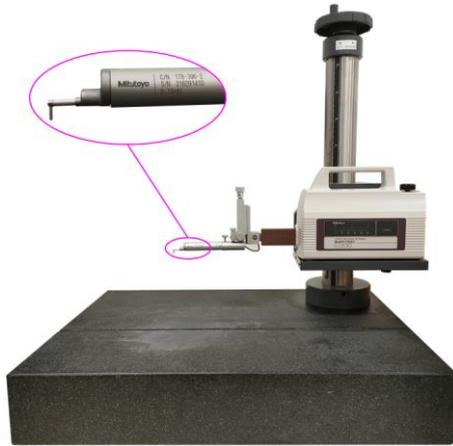


Figura 3.27. Rugosímetro SJ-500P – disponible en la UFI3D (ULE).

Tabla 3.18. Especificaciones técnicas del rugosímetro SJ-500P (Mitutoyo, 2009).

Rango de medición eje X	50 mm
Rango de medición eje Z	800 μm / 80 μm / 8 μm
Resolución eje X	0,05 μm
Resolución eje Z	0,01 μm (rango de 800 μm)
	0,001 μm (rango de 80 μm)
	0,0001 μm (rango de 8 μm)
Velocidad de transmisión	(0-20) mm/s
Velocidad de medición	(0,02-5) mm/s

3.3.4. Equipos para el análisis geométrico y dimensional

Máquina de medición por coordenadas (CMM)

Para las mediciones por contacto se utiliza la CMM DEA Global Image del fabricante Hexagon (Figura 3.28) junto con el software de metrología PC-DMIS. Esta máquina está equipada con un cabezal indexado Renishaw PH10MQ que permite incorporar diferentes tipos de sensores, como sondas de activación por contacto (punto a punto), sondas de contacto continuo (escaneo) y sensores de triangulación láser. En particular, para la medición por contacto se utiliza una sonda de escaneo táctil Renishaw SP25 y una punta de rubí de 1 mm de diámetro. Este tamaño de punta se eligió con la finalidad de minimizar el error de medición causado por la textura superficial (rugosidad típicamente alta) que caracteriza las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM, facilitando de esta forma el contacto entre la punta y la superficie real de las piezas. Previamente a la medición por contacto, se realiza la calibración de la sonda mediante la medición de una esfera de calibración (Figura 3.29).



Figura 3.28. CMM DEA Global Image – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).



Figura 3.29. Proceso de calibración de la sonda táctil Renishaw SP25.

Según la norma UNE-EN ISO 10360-2:2010, su máximo error permitido (MPE, *Maximum Permissible Error*) viene dado por la ecuación (7). Con el objetivo de obtener resultados de medición confiables, se llevan a cabo varios procedimientos de medición CMM recomendados, como métodos de inversión, mediciones multiposición y varias repeticiones de medición.

$$\text{MPE} [\mu\text{m}] = 2,2 + 0,003 \cdot L[\text{mm}] \quad (7)$$

Escáner láser instalado en CMM

La CMM DEA Global Image (descrita en el apartado 3.3.4) también se utiliza para mediciones ópticas mediante la instalación del sensor de escaneo láser HP-L-10.6 de Hexagon (Figura 3.30). Esta sonda de triangulación láser permite adaptar el ancho de escaneo según la complejidad de la superficie y controlar la potencia del láser automáticamente y en tiempo real (optimizando la intensidad del láser hasta 10 veces durante la medición de cada punto). Las especificaciones técnicas del sensor, que cumple con la norma UNE-EN ISO 10360-8:2017, se muestran en la Tabla 3.19. Para la calibración del equipo (Figura 3.30) se utiliza una esfera calibrada de cerámica blanca mate (características ópticas adecuadas).

Tabla 3.19. Especificaciones técnicas del sensor de escaneo láser HP-L-10.6 (Hexagon, 2019).

Longitud de onda láser	690 nm
Standoff y profundidad (Z)	(170 ± 30) mm
Ancho de línea láser	24 mm (mínimo)
	60 mm (medio)
	123 mm (máximo)
Densidad de línea láser	8,4 ptos/mm (mínima)
	33,5 ptos/mm (máxima)
Máxima velocidad de línea	53 Hz
Máxima velocidad de escaneo	30.000 ptos/s
Valor de dispersión de palpado traslacional ($P_{Form.Sph.D95\%:Tr:ODS}$)	34 μ m
Error de forma de palpado traslacional ($P_{Form.Sph.1x25:Tr:ODS}$)	22 μ m



Figura 3.30. Proceso de calibración del sensor de escaneo láser HP-L-10.6 – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).

Escáner láser integrado en CMA

El Romer Absolute Arm 7525 SI de Hexagon (Figura 3.31) es un CMA con un escáner láser RS3 totalmente integrado y certificado, cuyo control de potencia láser por línea es completamente automático. Las especificaciones del sensor de escaneo, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 10360-8:2017, se muestran en la Tabla 3.20. Durante las mediciones ópticas este sistema se controla mediante el software PolyWorks.



Figura 3.31. Romer Absolute Arm 7525 SI (con RS3) (Hexagon, 2015) – disponible en la empresa DOGRAM (Asturias).

Tabla 3.20. Especificaciones técnicas del escáner RS3 integrado en el Romer Absolute Arm 7525 SI (Hexagon, 2015).

Máxima velocidad de escaneo	460.000 pts/s
Puntos por Línea	4.600
Velocidad de línea	100 Hz
Ancho de línea láser	46 mm (mínimo)
	65 mm (medio)
	85 mm (máximo)
Standoff (rango medio)	(150 ± 50) mm
Mínimo espaciado entre puntos (rango medio)	14 μm
Precisión	2 sigma / 30 μm

Escáner láser portátil

El HandySCAN 700 de Creaform (Figura 3.32) es un escáner de triangulación láser manual y portátil diseñado para aplicaciones de ingeniería inversa y metrología. Este sensor trabaja con siete láseres transversales (+1 línea adicional) y es controlado por el software VXelements. Sus principales especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.21.



Figura 3.32. Escáner láser HandySCAN 700 (Creaform, 2015) – disponible en la empresa TECVECO3D (Asturias).

Tabla 3.21. Especificaciones técnicas del escáner láser HandySCAN 700 (Creaform, 2015).

Velocidad de medición	480.000 pts/s
Área de escaneado	(275 x 250) mm
Resolución	50 μm
Precisión volumétrica	20 μm ± 60 μm/m
Distancia de trabajo	300 mm
Profundidad de campo	250 mm

Escáner de luz estructurada

El escáner de luz estructurada Breuckmann smartSCAN^{3D}-HE (actualmente conocido como AICON SmartScan) se trata de un equipo móvil montado sobre un trípode cuyo funcionamiento se basa en la técnica de proyección miniaturizada. Este escáner (Figura 3.34) consta de una unidad de proyección y un sistema de adquisición con dos cámaras (una a cada lado del proyector). La unidad de proyección proporciona una secuencia adecuada de patrones de franjas de luz azul (Figura 3.33) sobre la pieza con una resolución de 28 Mpx y 550 lúmenes ANSI. El sistema de cámaras tiene una resolución de 4 Mpx (por cámara) y captura el patrón de franjas proyectadas en un ángulo de visión predefinido según el campo de visión (FOV, *Field Of View*) seleccionado. La digitalización 3D mediante este sistema óptico se puede realizar en modo manual, es decir, moviendo el escáner a las posiciones deseadas, o en modo automático, utilizando una mesa giratorio y programado el ángulo de giro entre cada escaneo. La adquisición tridimensional de datos se lleva a cabo utilizando el software OPTOCAT. Dicho software comprende todo el espectro de tareas de un proceso de digitalización 3D, desde la calibración hasta el postprocesamiento y la evaluación de los datos 3D generados. El procedimiento de calibración del escáner se realiza siguiendo las recomendaciones del fabricante (modo de calibración estéreo) y consiste en la medición de una placa de calibración (formada por marcadores circulares) en varias posiciones distribuidas por todo el volumen de trabajo del FOV utilizado (posiciones definidas en una carta de calibración).



Figura 3.33. Patrón de franjas de luz azul.



Figura 3.34. Escáner de luz estructurada Breuckmann smartSCAN^{3D}-HE – disponible en la UFI3D (ULE).

Teniendo en cuenta el tamaño de las piezas impresas por SLM en la máquina ProX DMP 100, se ha utilizado el FOV de 125 (el tamaño del FOV está determinado por la longitud de la diagonal del volumen de medición), cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Especificaciones técnicas del FOV de 125 del escáner de luz estructurada Breuckmann smartSCAN3D-HE (3DSystems, 2015).

FOV	125
Volumen de medición (altura x ancho x profundidad)	(95 x 95 x 60) mm
Resolución (X, Y)	50 μm
Límite de resolución (Z)	5 μm
Precisión de características	9 μm
Ángulo de triangulación	32,5°
Distancia entre cámaras	240 mm
Distancia de trabajo	370 mm

Sensor de holografía conoscópica

El ConoScan 4000 del fabricante Optimet (Figura 3.35 y Tabla 3.23) es un sistema de holografía conoscópica que utiliza sensores con lentes de objetivo intercambiables y es controlado por el software ConoScan 4000. A diferencia del resto de sistemas descritos anteriormente, en los que se puede configurar la orientación del cabezal de escaneo, el ConoScan 4000 solo puede realizar movimientos perpendiculares al plano XY (plataforma móvil donde se posiciona la pieza a escanear).



Figura 3.35. Sensor de holografía conoscópica ConoScan 4000 (Optimet, 2012) – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).

Tabla 3.23. Especificaciones técnicas del sensor de holografía conoscópica ConoScan 4000 (Optimet, 2012).

Área de escaneo (X x Y)	(160 x 150) mm
Máxima altura del objeto	130 mm
Mínima distancia de paso XY	3 μm
Máxima velocidad de desplazamiento	50 mm/s

Para la realización de mediciones ópticas se emplea el sensor ConoProbe con una lente de objetivo de 100 mm (Tabla 3.24 y Figura 3.36) configurada con unos parámetros de escaneo de 1.400 W de potencia láser, 1.500 Hz de frecuencia, 59 μm de paso XY a lo largo de las líneas y 60 μm de paso XY entre líneas.

Tabla 3.24. Especificaciones técnicas del sensor ConoProbe con lente objetivo de 100 mm (Optimet, 2012).

Precisión en Z	15 μm
Tamaño del <i>spot</i> láser	35 μm
Rango de trabajo	40 mm
<i>Standoff</i>	95 mm
Cobertura angular	170°



Figura 3.36. Sensor ConoProbe con lente objetivo de 100 mm (Optimet, 2012) – disponible en los Laboratorios de Metrología (UNIOVI).

3.3.5. Softwares para el análisis geométrico y dimensional

Generalmente el software utilizado para el tratamiento y la medición de las nubes de puntos resultantes de la digitalización óptica es el Geomagic Control X. El procedimiento habitual consiste en: la importación de las nubes de puntos; la alineación de las nubes de puntos y el CAD (nominal o cuasi real) mediante la opción de mejor ajuste (utilizando todos los datos adquiridos excepto los polivértices ruidosos y con un número máximo de 30 iteraciones de registro); la reconstrucción de las entidades geométricas como características de mejor ajuste (algoritmo de mínimos cuadrados); la comparación 3D entre el CAD y la nube de puntos; y finalmente, la medición de los valores de GD&T de las geometrías virtuales reconstruidas.

Puntualmente, con la finalidad de analizar la influencia de los diferentes softwares de ingeniería inversa y metrología en la inspección óptica de las piezas fabricadas por SLM, se evalúan y comparan los softwares mostrado en la Figura 3.37 (PC-DMIS, Geomagic Control X, PolyWorks, GOM Inspect y 3DReshaper). Estos softwares incluyen módulos y herramientas específicos para el tratamiento y filtrado de nubes de puntos, la creación de mallas de triangulación, la reconstrucción de características virtuales y el análisis de superficies mediante las mediciones GD&T y las representaciones de mapas de colores (comparaciones 3D).



Figura 3.37. Softwares para el análisis de los datos de medición 3D.

Estos softwares disponen de diferentes tipos de filtros (Tabla 3.25) para la eliminación de los puntos espurios (puntos más alejados del valor promedio) generados durante la medición óptica. A continuación, se describen los tipos de filtro comúnmente utilizados:

- **N*sigma:** Eliminación de los puntos que se encuentran a una distancia, de la característica geométrica virtual creada, superior a la desviación estándar (sigma) multiplicada por el valor asignado (N).
- **Porcentaje:** Eliminación del valor porcentual asignado de los puntos que se encuentran más alejados de la característica geométrica virtual creada.
- **Distancia:** Eliminación de los puntos que se encuentran a una distancia, de la característica geométrica virtual creada, superior al valor asignado.

Tabla 3.25. Filtros disponibles en los softwares para el análisis de los datos de medición 3D.

Tipo de filtro	Software			
	Geomagic Control X	PolyWorks	GOM Inspect	3DReshaper
N*sigma	X	X	X	-
Porcentaje	X	X	-	X
Distancia	X	-	-	-

Capítulo 4

AJUSTE E INFLUENCIA DE PARÁMETROS SLM

En este capítulo se ajustan inicialmente los parámetros de potencia y desenfoque del láser y, posteriormente, se estudia la influencia de la estrategia de escaneo para optimizar el proceso de fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH en función de su aplicación final.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. INTERÉS DEL ESTUDIO*
- 2. AJUSTE DE LA POTENCIA DEL LÁSER*
- 3. AJUSTE DEL DESENFQUE DEL LÁSER*
- 4. EFECTO DE LA ESTRATEGIA DE ESCANEO*
- 5. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS*

4.1. INTERÉS DEL ESTUDIO

Con la finalidad de ajustar la potencia del láser para la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, y teniendo en cuenta que las partículas de salpicaduras son un factor potencialmente responsable de la disminución de la calidad de este tipo de piezas, el primer estudio de este capítulo evalúa este tipo de defectos y su relación con la variación de potencia.

Cuando se transfiere energía del láser a la pieza produciendo las piscinas de fusión, la transferencia no es perfecta, puede haber pérdidas debido a la variación en la distancia del láser respecto a la cama de polvo, lo que da lugar a cambios en la velocidad de enfriamiento y, en consecuencia, en la microestructura de las piezas. Cuando se mantiene constante la potencia y la velocidad, el desenfoque del láser puede afectar a la microestructura y a la presencia de defectos y, por consiguiente, a las propiedades mecánicas de las piezas impresas. Por esta razón, el segundo estudio de este capítulo se centra en el ajuste del desenfoque del haz láser en términos de microestructura, defectos internos y propiedades mecánicas.

El ajuste de la potencia y el desenfoque del láser es fundamental para la adecuada fabricación SLM. Aunque ya han sido ampliamente analizados por otros autores, no existen estudios que optimicen estos parámetros láser para la fabricación de piezas de acero 17-4PH utilizando máquinas de baja potencia (como la ProX DMP 100), lo que hace interesante el ajuste de ambos parámetros (específicos para cada material y relacionados con el resto de parámetros). El estudio que se presenta en este capítulo es un análisis previo de ajuste de ambas variables para fijarlas como constantes junto con el resto de parámetros acotados inicialmente en esta tesis, así pues, los valores seleccionados se mantendrán constantes en el resto de los capítulos.

Por otro lado, se ha demostrado una correlación significativa entre las estrategias de escaneo y la calidad de las piezas impresas por SLM. La trayectoria del láser afecta al comportamiento termomecánico de las piezas. En consecuencia, modificar este patrón puede ser un método efectivo para reducir las tensiones y deformaciones residuales, al influir en la distribución de entrada de la intensidad de calor. La variación de la estrategia afecta también a diversas propiedades de las piezas como la densidad, la microestructura, las propiedades mecánicas o la calidad superficial. En consecuencia, estudiar la influencia de este parámetro es de gran valor para el proceso de fabricación con el fin de promover la tecnología SLM en aplicaciones con altos requisitos. En particular, no existen estudios completos sobre la influencia de la estrategia en la calidad de las piezas fabricadas por SLM en acero 17-4PH. En relación, otros investigadores solo han concluido que la estrategia hexagonal proporciona mayor dureza y mejor resistencia al desgaste y a la corrosión que la estrategia concéntrica. Por lo tanto, el tercer estudio de este capítulo se centra en la evaluación detallada de este tipo de piezas utilizando las tres estrategias más habituales (normal, concéntrica y hexagonal) a fin de optimizar el proceso SLM en función de la aplicación final de las piezas.

4.2. AJUSTE DE LA POTENCIA DEL LÁSER

En primer lugar, se realizó un estudio previo variando el parámetro de la potencia del láser con la finalidad de establecer un rango de valores adecuado para la correcta fabricación SLM. Para acotar el estudio, se fabricaron seis muestras cúbicas de 10 mm de lado variando el valor de la potencia del láser entre 38-43 W, con incremento de 1W entre muestras. Estos valores fueron seleccionados según las recomendaciones del fabricante para poder mantener fijos el resto de los parámetros SLM (definidos en el apartado 3.1.2), ya que en este estudio únicamente se busca el ajuste de la potencia del láser. El análisis de la calidad superficial de las muestras impresas (Figura 4.1) permitió observar cómo al aumentar la potencia por encima de 40 W la calidad superficial empieza a empeorar. Las marcas del escaneado hexagonal, utilizado para este ensayo previo, se pueden ver sin necesidad de evaluación microscópica, lo que afectaría negativamente a la calidad superficial final de las piezas y aumentaría el tiempo de postproceso necesario. Lo que se interpreta como que, en este grado de potencias bajas, una variación de 1 W puede provocar cambios significativos en la superficie de las piezas impresas. En consecuencia, se establecen los valores de ensayo para la potencia del láser en 38 W, 38,5 W y 39 W, definiendo, de esta forma, un rango más reducido de valores a evaluar.



Figura 4.1. Muestras impresas con una potencia del láser de: 43 W, 42 W, 41 W, 40 W, 39 W y 38 W (de izquierda a derecha respectivamente).

Las muestras impresas con los tres valores de potencia del láser seleccionados se evaluaron mediante el análisis de los defectos superficiales (captados mediante el SEM) y el análisis de la dureza. Los defectos de la superficie superior se analizaron mediante el procesamiento en el software ImageJ de las imágenes obtenidas con el SEM en dos niveles de aumentos. Los resultados del análisis de dureza (HV1) son el promedio de nueve mediciones de la superficie distribuidas en una matriz de puntos equidistantes a 2,5 mm.

Defectos superficiales

El análisis de la superficie de las piezas utilizando el menor aumento disponible en el SEM (x33 aumentos) permitió obtener una visión general de la superficie superior de las muestras (Figura 4.2), cuyos resultados revelaron porosidad abierta cerca del borde, especialmente en las muestras impresas con 38,5 W (Figura 4.2a) y 39 W (Figura 4.2b).

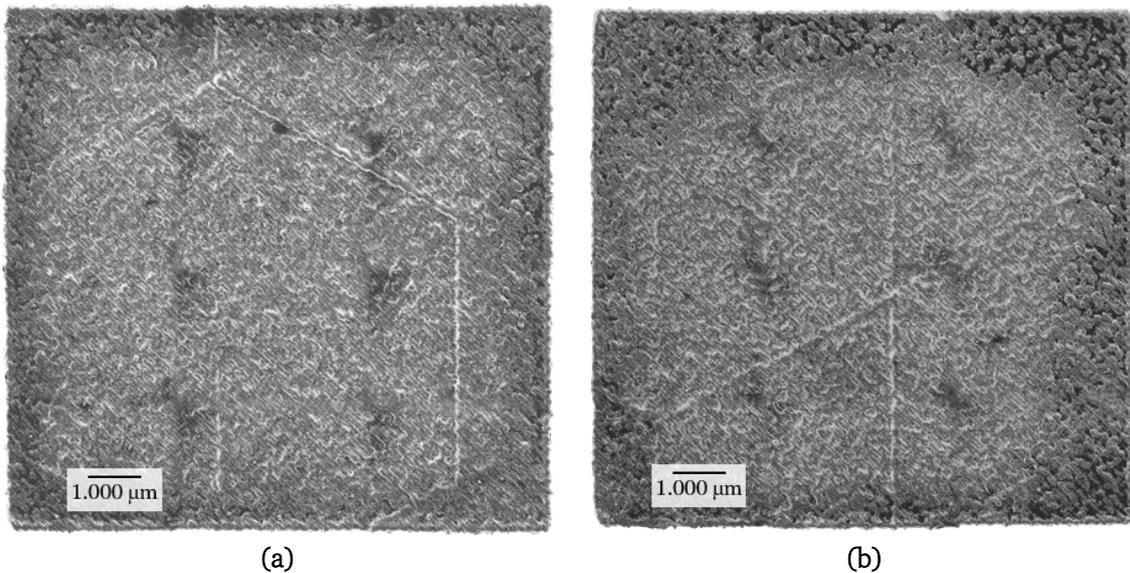


Figura 4.2. Mosaico de imágenes del SEM de la superficie superior de las muestras impresas con una potencia del láser de: (a) 38,5 W y (b) 39 W.

Las imágenes tomadas en el SEM utilizando una mayor ampliación (x150 aumentos) permitieron realizar un análisis exhaustivo de la calidad superficial, evaluando la influencia de la potencia del láser en el fenómeno de proyección de partículas de polvo fundido o partículas de salpicaduras. Para el análisis más detallado de este efecto, las partículas se clasificaron en tres tipos diferentes (A, B y C) según su tamaño:

- **Tipo A:** partículas de diámetro superior a 20 μm (Figura 4.3a).
- **Tipo B:** partículas de diámetro comprendido entre 10 μm y 20 μm (Figura 4.3b).
- **Tipo C:** partículas de diámetro inferior a 10 μm (Figura 4.3c). Estas partículas generalmente aparecen agrupadas en diferentes posiciones de la superficie.

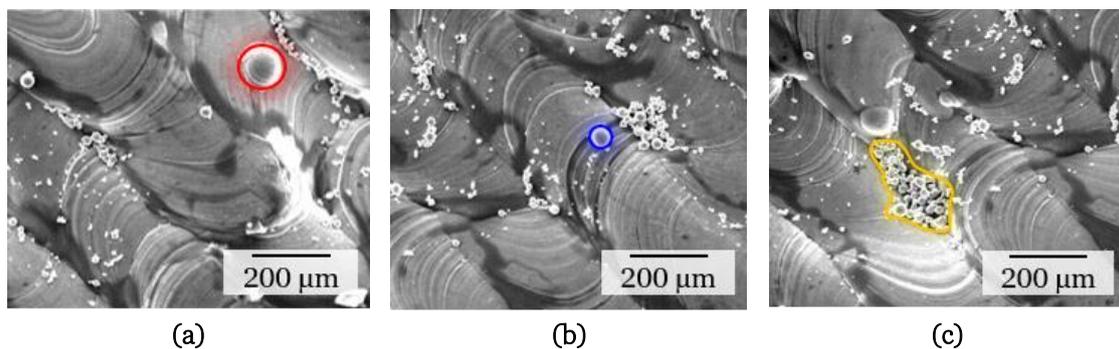


Figura 4.3. Ejemplos de los diferentes tipos de partículas: (a) tipo A, (b) tipo B y (c) tipo C.

Se analizaron y clasificaron todas las partículas localizadas en cinco imágenes de cada muestra, capturadas en posiciones aleatorias. Las partículas tipo A (Figura 4.3a) y tipo B (Figura 4.3b) se evaluaron tanto en diámetro como en número de partículas. Mientras que las partículas tipo C, debido a su pequeño diámetro y al hecho de que este tipo de partículas

generalmente aparecen agrupadas (Figura 4.3c), se evaluaron según el área ocupada por estas concentraciones de partículas.

Los resultados obtenidos de este análisis muestran que las partículas de mayor tamaño (tipo A) aparecen con igual frecuencia en las piezas impresas con las tres configuraciones de potencia, incrementando ligeramente el tamaño promedio con el aumento de la potencia (Figura 4.4a). Por el contrario, en el caso de las partículas tipo B, el diámetro promedio se mantiene constante para las diferentes configuraciones de potencia, sin embargo, la cantidad de partículas encontradas en las muestras aumenta con el aumento del parámetro de la potencia del láser (Figura 4.4b). Respecto las partículas tipo C, el porcentaje del área ocupada por estas agrupaciones de partículas aumenta con el aumento de la potencia del láser, resultando un valor de 14 %, 15 % y 16 % para las muestras impresas con 38 W, 38,5 W y 39 W, respectivamente. Este tipo de partículas, realmente podrían ser polvo metálico sin fundir, que ha quedado adherido a la superficie de las piezas, a pesar de la limpieza de las mismas con aire comprimido antes de su análisis al microscopio. En general, los resultados obtenidos indican que la calidad superficial empeora ligeramente con el aumento del parámetro de la potencia del láser.

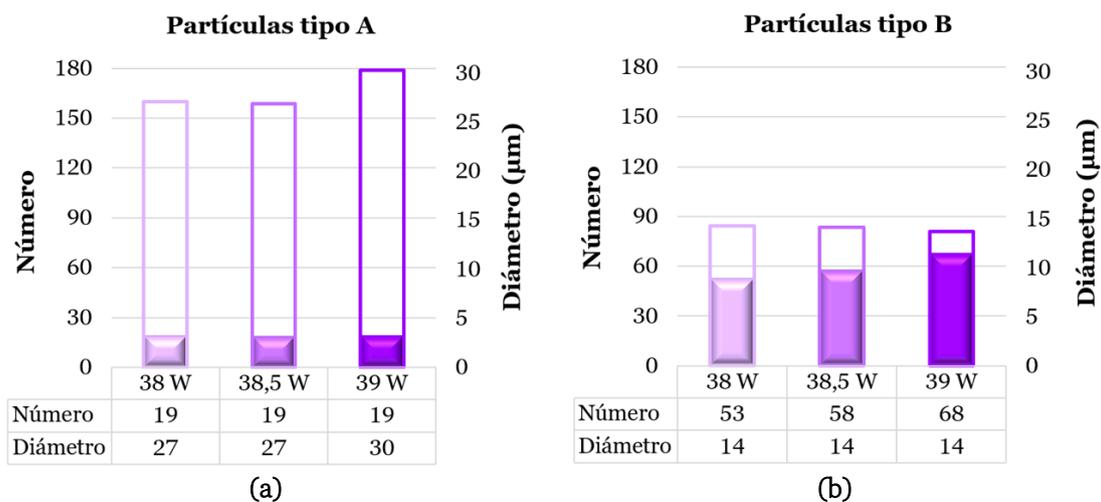


Figura 4.4. Número y diámetro promedio de las partículas: (a) tipo A y (b) tipo B, de las muestras impresas con una potencia del láser de 38 W, 38,5 W y 39 W.

Dureza

Los resultados del ensayo de dureza (Figura 4.5) varían ligeramente, alcanzando valores promedio de 283, 280 y 274 HV1 en las muestras impresas con una potencia del láser de 38 W, 38,5 W y 39 W, respectivamente (Figura 4.6). Estos resultados revelan que la dureza disminuye ligeramente con el aumento de la potencia del láser en el rango de valores analizado (38-39 W).

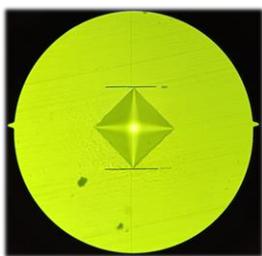


Figura 4.5. Huella en la superficie tras la realización del ensayo de dureza.

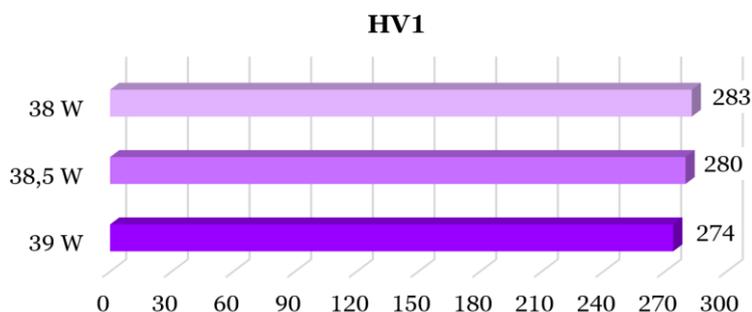


Figura 4.6. Resultados promedio de dureza de las muestras impresas con una potencia del láser de 38 W, 38,5 W y 39 W.

4.2.1. Conclusiones del ajuste de la potencia del láser

En este apartado, se analiza la influencia de la potencia del láser principalmente en la calidad superficial de las piezas impresas por SLM en acero inoxidable 17-4PH. Tras la realización de una prueba preliminar que permitió determinar los valores de 38 W, 38,5 W y 39 W como rango adecuado de potencia del láser para el proceso SLM, se fabricaron las muestras y se evaluaron en términos de defectos superficiales y dureza. Las partículas de salpicadura tienen una importante influencia a la hora de ajustar este parámetro SLM, motivo por el cual parte de este estudio se centra en este análisis.

Las principales conclusiones de este estudio previo se describen a continuación:

- ❖ La calidad superficial empeora ligeramente con el aumento del parámetro de la potencia del láser. Los resultados mostraron un ligero aumento: del diámetro de las partículas de mayor tamaño (tipo A), del número de partículas de tamaño medio (tipo B), y del porcentaje de área ocupada por las partículas de menor tamaño (tipo C).
- ❖ En cuanto a las propiedades mecánicas, los resultados de dureza mostraron una tendencia decreciente de la dureza con el aumento de la potencia del láser.

Este estudio se realizó principalmente con la finalidad de ajustar la potencia del láser en un valor adecuado para la fabricación SLM manteniendo el resto de los parámetros fijos. En base a los resultados obtenidos se configuró una potencia láser de 38 W.

Para el resto de los estudios de la presente tesis doctoral, el parámetro de potencia del láser se fija en el valor de 38 W.

4.3. AJUSTE DEL DESENFOQUE DEL LÁSER

Tras el ajuste de la potencia del láser, se procede con el ajuste del parámetro del desenfoque del láser para la adecuada fabricación SLM de piezas impresas en acero inoxidable 17-4PH. Este estudio se centra en la evaluación de las piezas fabricadas con tres niveles de desenfoque: 1 mm negativo/divergente (D_{d1}), 0 mm o distancia de enfoque (D_0) y 1 mm positivo/convergente (D_{c1}). De igual manera que con la potencia del láser, estos valores de desenfoque del haz láser se acotaron por los efectos tan grandes que provocaban en la rugosidad superficial de las piezas impresas. Valores de desenfoque superiores a 1 mm (tanto en distancia positiva como negativa) presentan una elevada rugosidad superficial (apreciable a simple vista), por lo que no se justifica su utilización. Como se muestra en la Figura 4.7, en este apartado se analiza la influencia del desenfoque del láser tanto en la microestructura y los defectos internos, como en la rugosidad superficial y las propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción) de las piezas impresas.

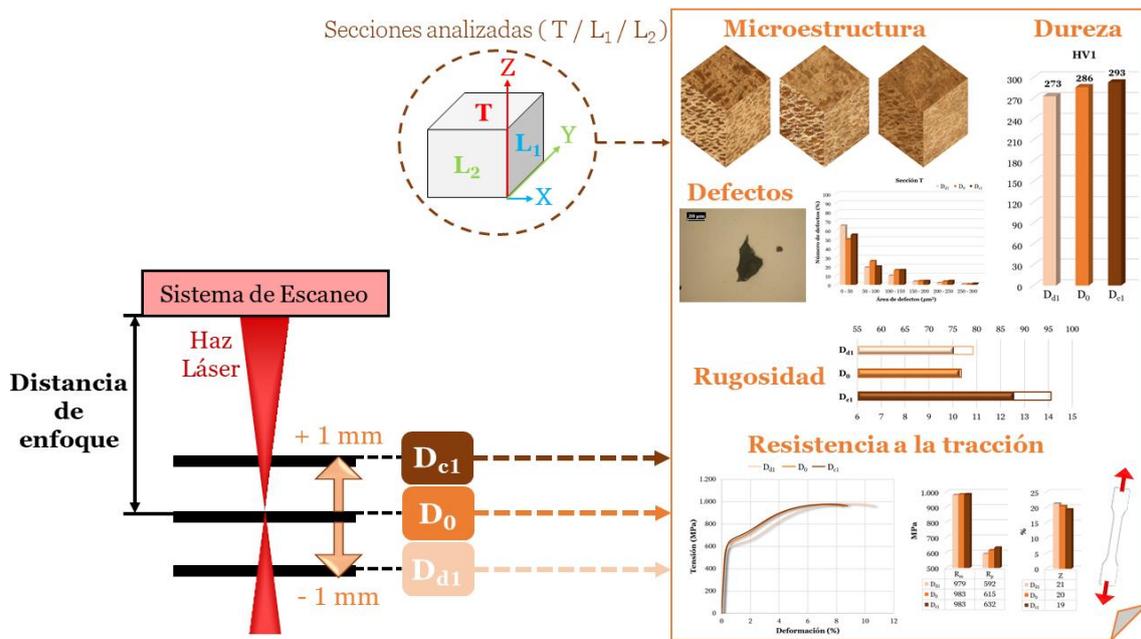


Figura 4.7. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM con diferentes valores de desenfoque del láser (ajuste del parámetro).

Con cada configuración de desenfoque del haz láser se fabricaron dos probetas para el ensayo de tracción y dos piezas cúbicas de 10 mm de lado para el resto de los análisis. La microestructura, los defectos y la dureza se evaluaron en tres secciones internas (a 2 mm de la superficie): una sección transversal (T), perpendicular al haz láser o a la dirección de fabricación (eje Z); y dos secciones longitudinales (L₁ y L₂), paralelas a la dirección del haz láser y perpendiculares a los ejes X e Y de la máquina SLM, respectivamente (Figura 4.7).

La rugosidad superficial se midió en la cara superior de las probetas de tracción (previamente al ensayo mecánico) y sus resultados se calcularon como el promedio de 10 mediciones

realizadas en diferentes direcciones. El análisis microestructural se realizó mediante la técnica de XRD, así como a través del análisis en el microscopio óptico, el SEM y el TEM tras atacar químicamente la superficie con Vilella. Las secciones T, L₁ y L₂ se reconstruyeron como mosaicos de imágenes tomadas con el microscopio óptico y se convirtieron en binarias (blanco y negro) para calcular la fracción de área de las fases reveladas (el área de la fase dividida entre el área de la sección) y la fracción del área de defectos (el área de defectos dividida entre el área de la sección). Además, se analizó la distribución de los defectos en función de su tamaño y forma (circularidad). Y finalmente, se realizaron los ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas. Los resultados de dureza se calcularon como el promedio de 10 mediciones de cada sección, mientras que los de tracción fueron el promedio de los resultados de las dos probetas sometidas al ensayo.

4.3.1. Microestructura

La Figura 4.8 muestra la microestructura de las secciones transversal (T) y longitudinales (L₁ y L₂) de las muestras impresas con diferentes valores de desenfoque tras el ataque químico.

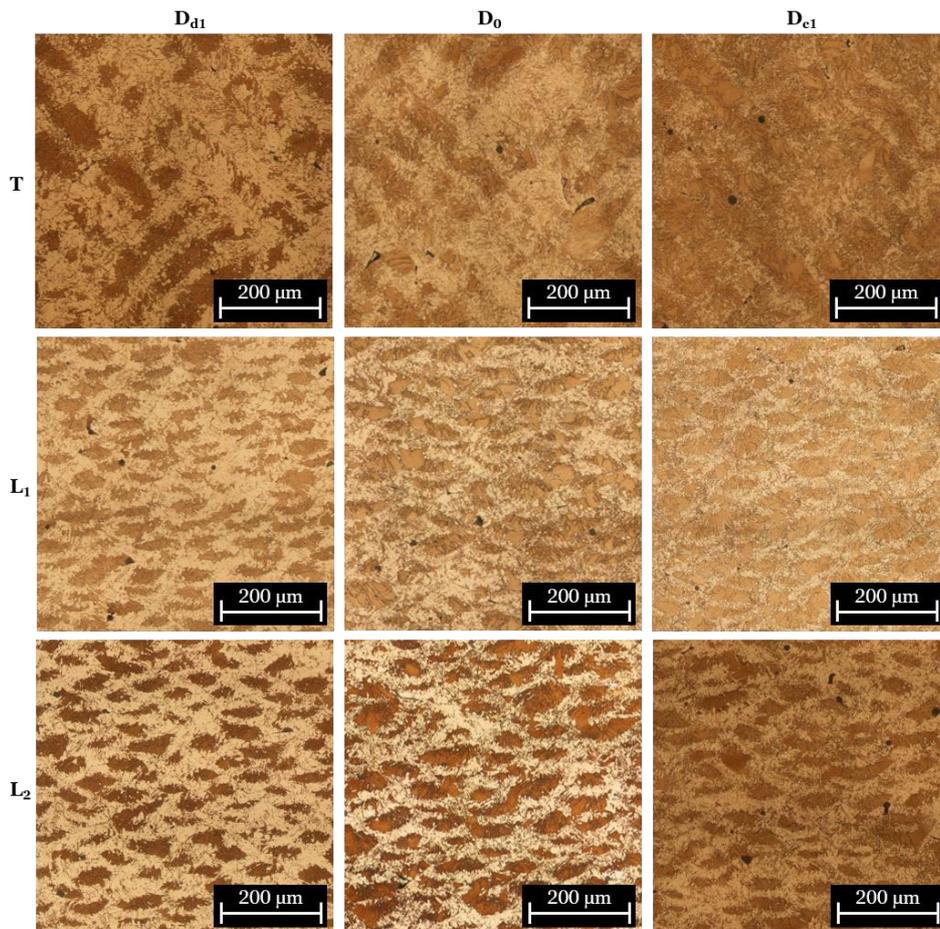


Figura 4.8. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de las secciones T, L₁ y L₂ de las muestras D_{d1}, D₀ y D_{e1}.

Las secciones transversales se caracterizan por las marcas de la trayectoria del láser visibles como líneas paralelas, mientras que en las secciones longitudinales la microestructura revela las piscinas de fusión resultantes del proceso de fabricación SLM. En general, en todas las muestras se observa el centro de las piscinas de fusión de un color oscuro y el borde de un color más claro (Figura 4.8). En las imágenes del microscopio óptico tomadas con mayores aumentos (Figura 4.9) se pueden observar los granos alargados que caracterizan la zona interior (zona oscura) de las piscinas de fusión, así como ciertas zonas donde también aparece la fase clara entremezclada con la oscura.

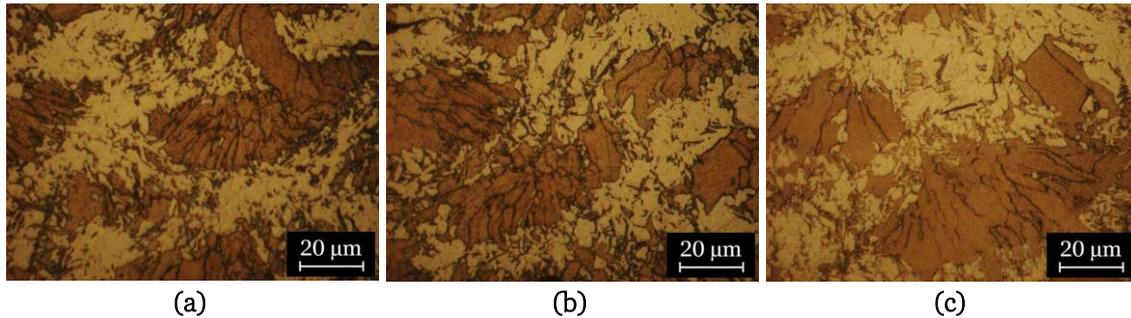
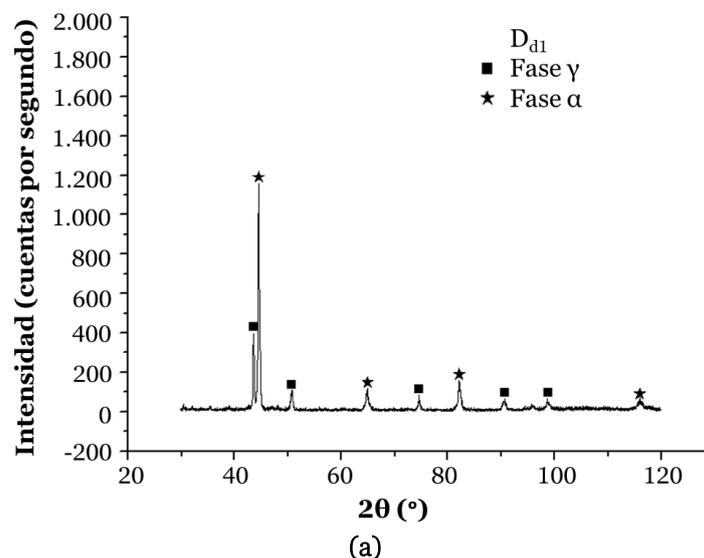


Figura 4.9. Imágenes del microscopio óptico con x500 aumentos de la microestructura de la sección T de las muestras: (a) D_{d1} , (b) D_0 y (c) D_{c1} .

El patrón de XRD de la sección transversal de las muestras D_{d1} (Figura 4.10a), D_0 (Figura 4.10b) y D_{c1} (Figura 4.10c) revela la presencia de picos relacionados tanto con la martensita o ferrita (fase α) como con la austenita (fase γ , con estructuras cúbica centrada en las caras (FCC, *Face Centered Cubic*)). Debido a la muy baja concentración de carbono de la aleación de 17-4PH utilizada (<0,04 % en peso), la magnitud de la distorsión de la red de martensita con estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT, *Body Centered Tetragonal*) es muy pequeña y no es posible distinguirla de la ferrita con estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC, *Body Centered Cubic*). Respecto a los diferentes valores del parámetro de desenfoque, no se observan diferencias significativas en los resultados del patrón de XRD.



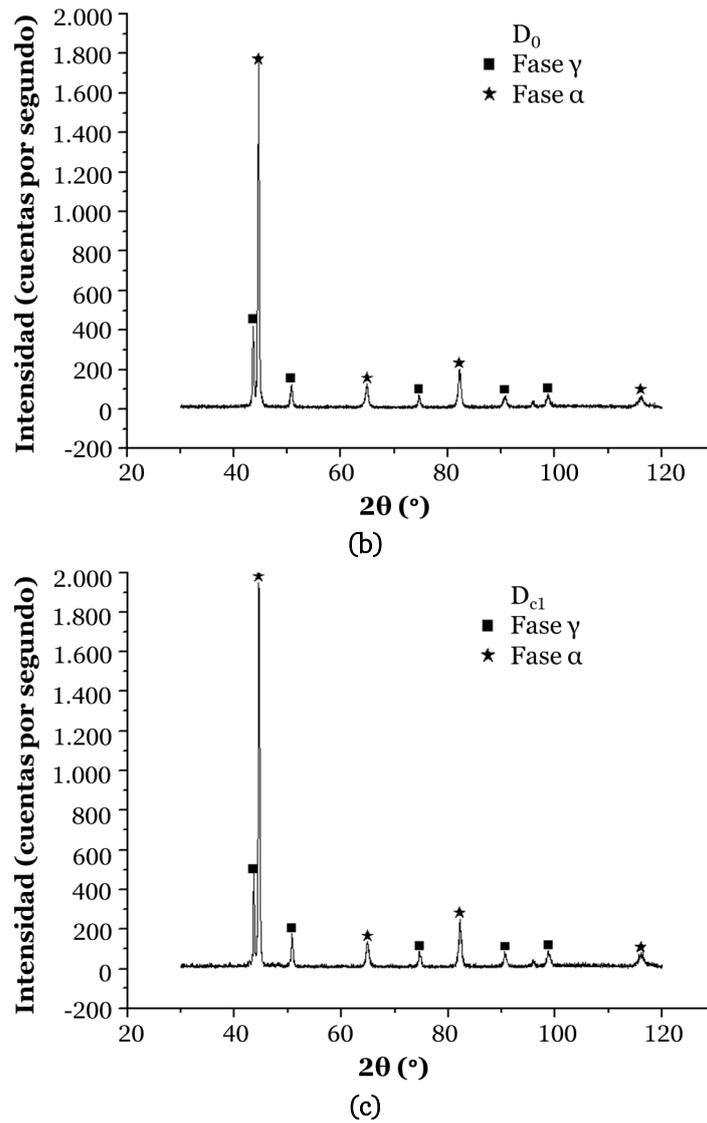


Figura 4.10. Resultado esquemático del análisis XRD realizado en la sección T de las muestras: (a) D_{d1} , (b) D_0 y (c) D_{c1} .

Con la finalidad de aclarar los resultados obtenidos en el análisis XRD y definir la naturaleza de las fases reveladas por el atacante químico, se realizó el análisis microestructural utilizando el TEM. Este análisis revela la presencia de austenita (Figura 4.11a), distribuida principalmente en el borde de las piscinas de fusión (zona clara en la Figura 4.8 y la Figura 4.9), y martensita, localizada en el centro de las piscinas de fusión (zona oscura en la Figura 4.8 y la Figura 4.9), así como la ausencia de ferrita. Por otro lado, en ciertas zonas, la microestructura revela la coexistencia de listones de martensita y granos de austenita (Figura 4.11b y Figura 4.11c). A modo de ejemplo, en la Figura 4.11b se marca con un círculo la presencia difusa de un hermanamiento entre listones de martensita y granos de austenita.

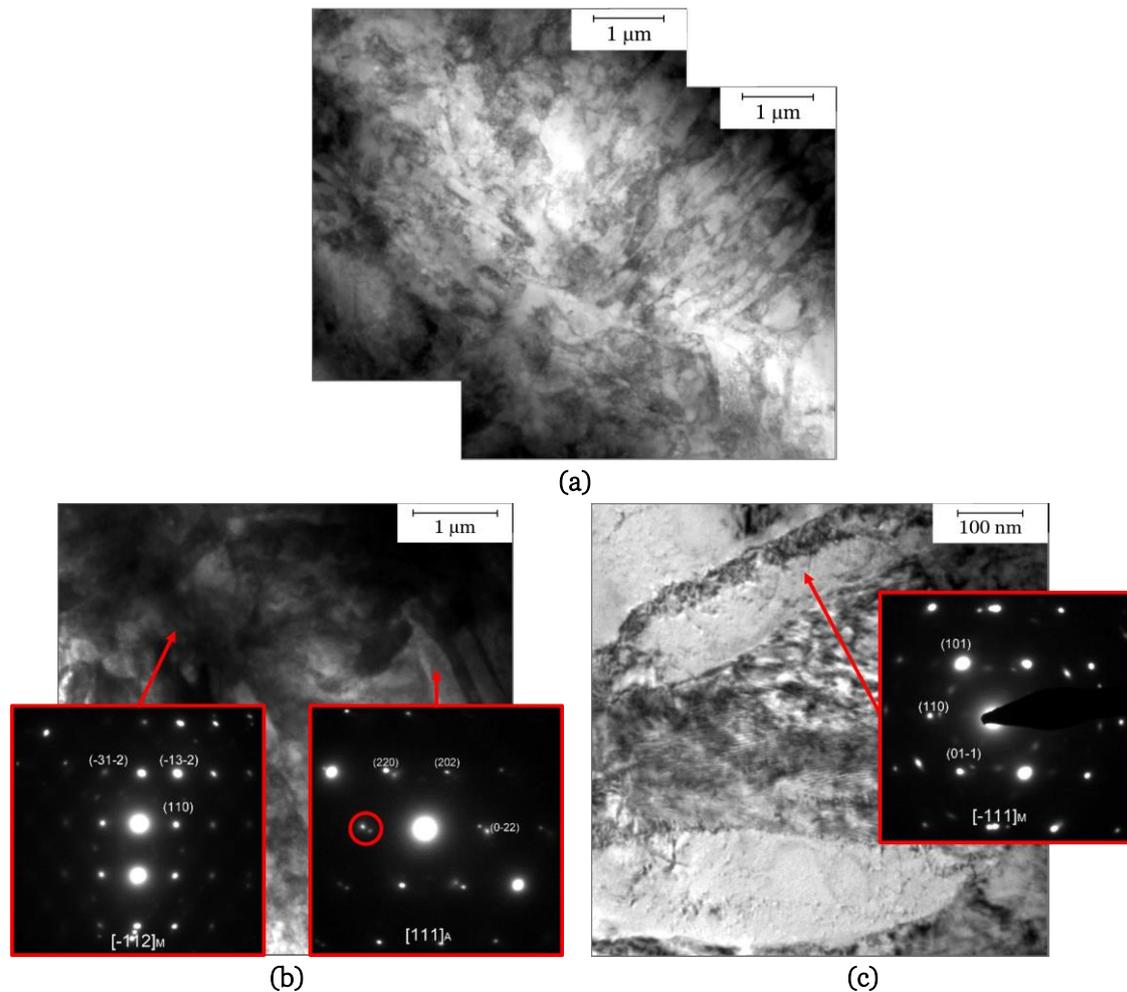
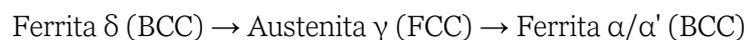


Figura 4.11. Imágenes del TEM de la microestructura de la sección T de la muestra D₀, donde se observa: (a) la presencia de austenita en el borde y martensita en el centro de las piscinas de fusión, (b) la coexistencia de listones de martensita y granos de austenita, (c) los listones de martensita.

El tipo de gas utilizado, tanto en el proceso de producción del polvo metálico como en el proceso de fabricación SLM, afecta la microestructura de las piezas impresas. Se obtiene una mayor cantidad de austenita retenida en las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM en atmósfera inerte de nitrógeno (Rafi *et al.*, 2014) y/o a partir de polvo producido mediante atomización por gas nitrógeno (Meredith *et al.*, 2018) debido principalmente a que la absorción de nitrógeno estabiliza la fase austenita y reduce la temperatura de inicio de transformación martensítica (M_s , *Martensite Start*) a una alta tasa de solidificación. Cuando la aleación de 17-4PH se solidifica durante el proceso SLM, tiene lugar la transformación de fase:



En particular, el borde de las piscinas de fusión está sometido a un alto subenfriamiento debido al contacto con el polvo circundante más frío y/o con la capa previa ya solidificada. Estas altas velocidades de enfriamiento resultan en una disminución del tiempo dedicado a la formación de la fase δ (BCC), dando lugar a una fase austenita primaria uniforme

(Cheruvathur, Lass y Campbell, 2016). En conclusión, la rápida disminución de la temperatura en el borde de las piscinas de fusión conduce al desarrollo de una microestructura austenítica de grano muy fino que se desarrolla sin difusión. Asimismo, el refinamiento del grano de austenita disminuye e, incluso, inhibe la tendencia a la formación de martensita (Liu *et al.*, 2015). Por todo ello, la presencia de austenita retenida se detecta principalmente en el borde de las piscinas de fusión.

La abundancia de la fase austenita en las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} se analizó mediante el software ImageJ tanto en sus secciones transversal (T) como longitudinales (L_1 y L_2). Los resultados revelan una mayor cantidad de austenita en las muestras D_{d1} (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Porcentaje de fase austenita de las secciones T, L_1 y L_2 de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

Muestra	Cantidad de austenita (%)		
	Sección T	Sección L_1	Sección L_2
D_{d1}	49	54	50
D_0	33	30	40
D_{c1}	30	25	40

En las secciones longitudinales de las muestras se midieron las dimensiones de las piscinas de fusión, obteniéndose una profundidad de aproximadamente la mitad de la anchura (Tabla 4.2), lo que indica el predominio de la fusión mediante el modo de transferencia de calor por conducción (Metelkova *et al.*, 2018). De acuerdo con los resultados obtenidos por otros investigadores (Metelkova *et al.*, 2018), las muestras D_{d1} presentan la menor profundidad de las piscinas de fusión, debido a las mayores pérdidas de energía derivadas de la divergencia del haz láser. Asimismo, esta entrada de calor reducida también da lugar a piscinas de fusión con menor anchura en las muestras D_{d1} (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Profundidad y anchura de las piscinas de fusión de las secciones L_1 y L_2 de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

Muestra	Profundidad piscinas de fusión (μm)		Anchura piscinas de fusión (μm)	
	Sección L_1	Sección L_2	Sección L_1	Sección L_2
D_{d1}	38 ± 5	37 ± 4	60 ± 11	63 ± 10
D_0	46 ± 6	41 ± 6	77 ± 13	77 ± 11
D_{c1}	45 ± 6	49 ± 7	72 ± 12	72 ± 12

Con la finalidad de verificar el papel del parámetro del desenfoque en la escala de la microestructura, se midió el tamaño de grano de la martensita (zona oscura) de las piscinas de fusión de las secciones longitudinales (Figura 4.12). Los resultados de esta medición muestran la mayor cantidad de granos de menor tamaño ($<10 \mu\text{m}$) en las muestras D_{d1} , seguidas de las muestras D_{c1} y D_0 (Figura 4.12).

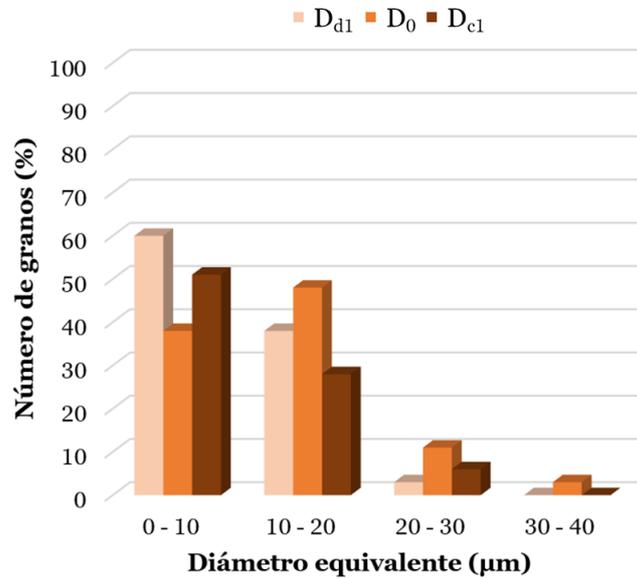


Figura 4.12. Distribución promedio del diámetro equivalente de grano de las secciones L_1 y L_2 de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

El producto del gradiente de temperatura (G) y la velocidad de solidificación (R) determinan el tamaño de grano o la escala de la microestructura. El análisis de Rosenthal predijo que el gradiente de temperatura o la temperatura media de la región fundida se reduce a medida que aumenta la entrada de calor debido al aumento del tamaño de la piscina de fusión. Si se reduce la temperatura media de la piscina de fusión, la velocidad de solidificación también disminuye y, por consiguiente, la velocidad de enfriamiento ($G \times R$), lo que conduce a la formación de una microestructura gruesa. Por el contrario, una piscina de fusión más pequeña conduce a una mayor velocidad de solidificación y a una microestructura refinada (Promoppatum *et al.*, 2017). En este estudio, las muestras fabricadas con un haz láser desenfocado divergente (D_{d1}) presentan el menor tamaño de las piscinas de fusión y de grano. De acuerdo con el análisis de Rosenthal, el tamaño de grano más pequeño de las muestras D_{d1} reduce la temperatura M_s con respecto a las otras muestras y, como consecuencia, se desarrolla una microestructura con mayor cantidad de austenita (Tabla 4.1). De hecho, en el borde de las piscinas de fusión se da la mayor eficiencia de la transferencia de calor hacia el sustrato frío y, por lo tanto, se produce el tamaño de grano más fino, inhibiéndose la transformación martensítica y permaneciendo la fase austenita en la microestructura tras el enfriamiento.

4.3.2. Defectos

Independientemente de la sección (T, L₁ y L₂) y la muestra (D_{d1}, D₀ y D_{c1}) analizadas, se observaron defectos principalmente producidos por polvo sin fundir. La Figura 4.13 muestra ejemplos de este tipo de defectos en la sección T de la muestra D_{d1} tanto antes (Figura 4.13a) como después (Figura 4.13b) de la aplicación del atacante químico. La fracción del área de defectos presenta valores promedios de (0,25 ± 0,09) % en las muestras D₀ y (0,24 ± 0,02) % en las muestras con desenfoques tanto positivo como negativo.

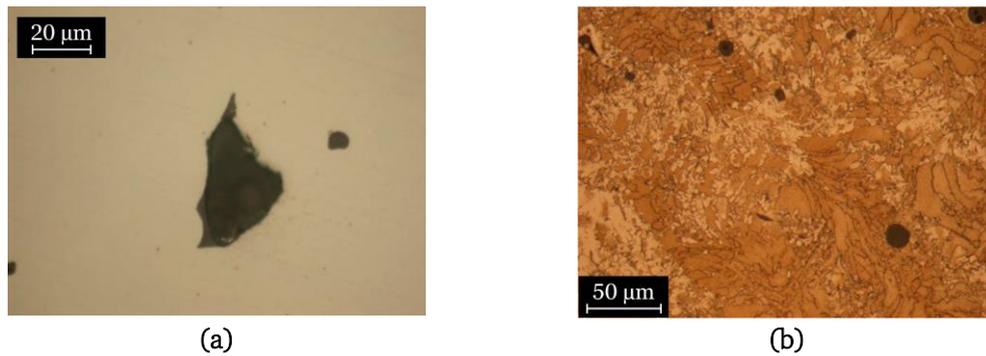
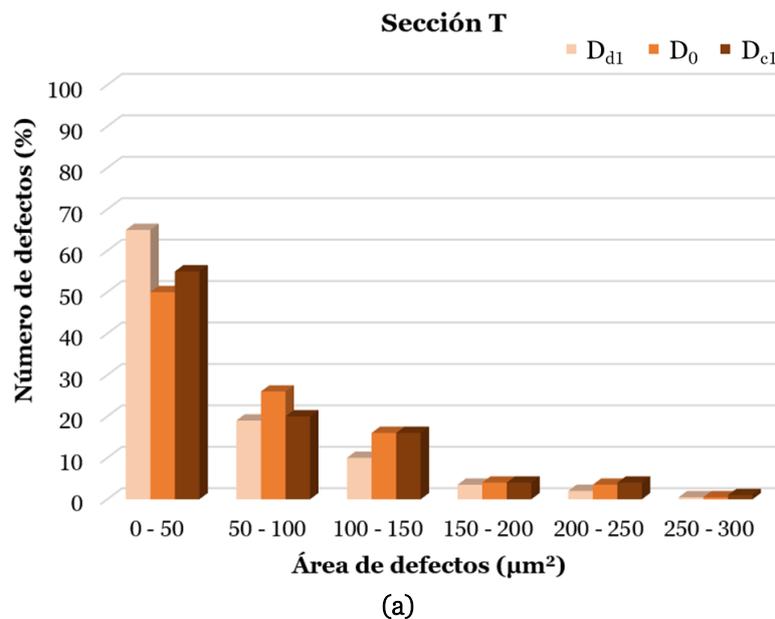


Figura 4.13. Imágenes del microscopio óptico de polvo sin fundir de la sección T de la muestra D_{d1} (a) antes y (b) después del ataque químico.

La Figura 4.14 revela la tendencia decreciente del número de defectos en función de su tamaño. Aproximadamente un 60 % de los defectos tienen un área inferior a 50 μm². Los defectos con un área entre 50 μm² y 150 μm² representan el 30 %. Mientras que la aparición de defectos con un área superior a 150 μm² no es significativa.



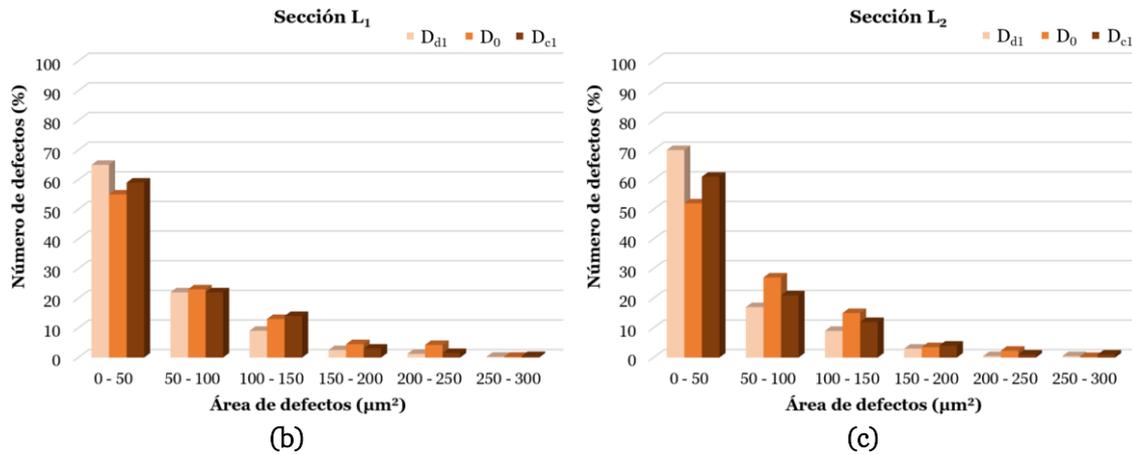


Figura 4.14. Distribución promedio del número de defectos según su tamaño en las secciones T, L₁ y L₂ de las muestras: (a) D_{d1}, (b) D₀ y (c) D_{c1}.

Independientemente de la sección (T (Figura 4.15a), L₁ (Figura 4.15b) y L₂ (Figura 4.15c)) y la muestra (D₀, D_{d1} y D_{c1}) analizadas, más del 80 % de los defectos se caracterizaron por tener una forma esférica.

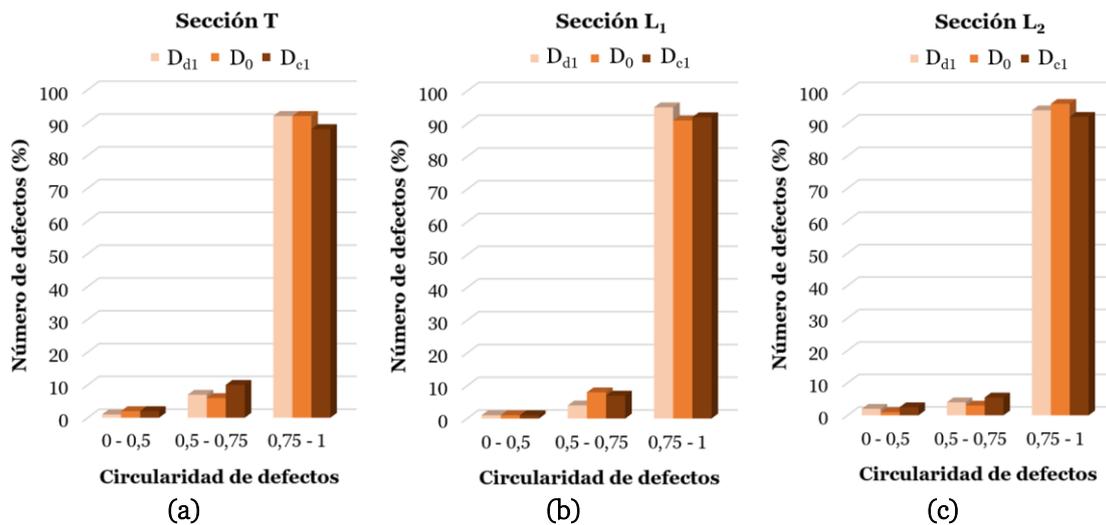


Figura 4.15. Distribución promedio del número de defectos según su circularidad de las muestras D_{d1}, D₀ y D_{c1} en las secciones: (a) T, (b) L₁ y (c) L₂.

4.3.3. Rugosidad

Los resultados del análisis de la rugosidad superficial de las muestras D_{d1} y D₀ presentan valores similares, tanto de R_a como de R_t (Figura 4.16). En la Figura 4.16 se muestra como los valores de rugosidad aumentan notablemente en el caso del desenfoque convergente (D_{c1}), con valores promedio de 12,55 µm (R_a) y 95,55 µm (R_t). En general, la configuración del parámetro de desenfoque D₀ puede considerarse la de mejor acabado superficial.

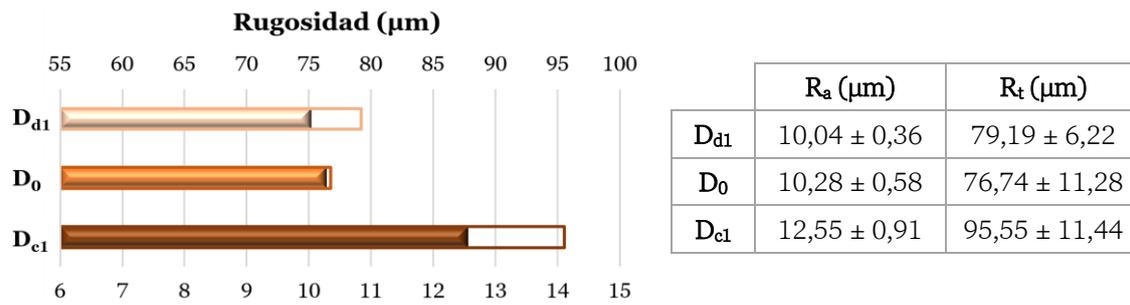


Figura 4.16. Resultados de rugosidad (R_a y R_t) de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

4.3.4. Dureza

Los resultados de dureza varían ligeramente, alcanzando valores promedio de 273, 286 y 293 HV1 en las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} , respectivamente (Figura 4.17). Como se muestra tanto en la Figura 4.17 como en la Tabla 4.3, los menores valores de dureza se obtuvieron para las muestras D_{d1} (a pesar del menor tamaño de grano de las piscinas de fusión) debido principalmente al aumento de la cantidad de austenita retenida.

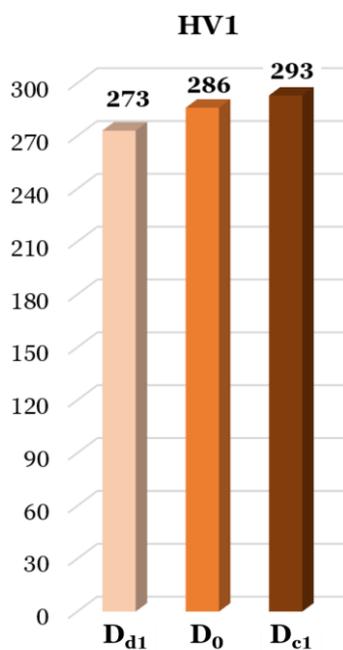


Figura 4.17. Resultados promedio de dureza de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

Tabla 4.3. Resultados de dureza de las secciones T, L_1 y L_2 de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} .

Muestra	Sección	HV1
D_{d1}	T	262 ± 5
	L_1	283 ± 7
	L_2	275 ± 9
D_0	T	274 ± 5
	L_1	295 ± 7
	L_2	290 ± 8
D_{c1}	T	277 ± 9
	L_1	306 ± 7
	L_2	297 ± 7

4.3.5. Resistencia a la tracción

La Figura 4.18 muestra los valores promedio resultantes del ensayo de resistencia a la tracción realizado en las muestras fabricadas con diferentes valores de desenfoco del láser. En el caso de los resultados de los parámetros Z y R_m , todas las muestras presentan valores muy similares. Mientras que en el caso del parámetro R_p , las muestras D_{c1} presentaron el valor más alto (632 MPa), con una diferencia de 17 MPa respecto a las muestras D_0 y 40 MPa respecto a las muestras D_{d1} . En cuanto a la curva tensión-deformación se observa una ligera diferencia entre las muestras D_0 y D_{c1} y la muestra de desenfoco divergente (D_{d1}), la cual presenta un comportamiento ligeramente más dúctil (Figura 4.18).

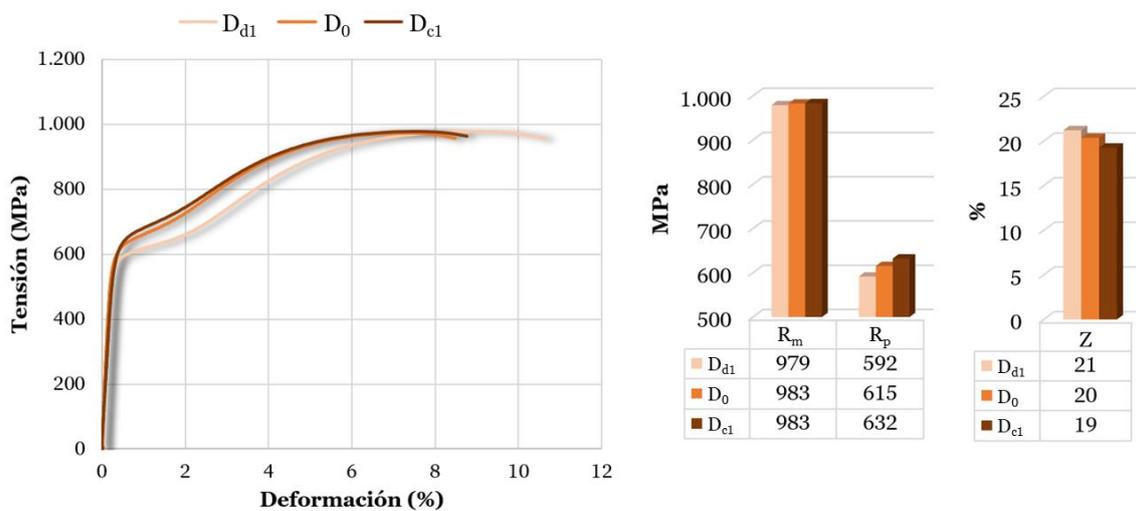


Figura 4.18. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} (curva tensión-deformación, R_m , R_p y Z).

La Figura 4.19 muestra imágenes tomadas mediante el SEM (con $\times 200$ y $\times 1.000$ aumentos) de la superficie de fractura producida por el ensayo de tracción en las muestras D_{d1} , D_0 y D_{c1} . En estas imágenes se pueden observar las microcavidades que, durante el ensayo, al juntarse y coalescer, dieron lugar a la propagación de grietas y, finalmente, a la fractura de las piezas. Como se muestra en la Figura 4.19, algunas microcavidades contienen inclusiones (polvo sin fundir o partículas de salpicaduras), mientras que otras están huecas (poros internos producidos por el atrapamiento de gas durante el proceso de fabricación SLM). El análisis de la superficie de fractura no reveló diferencias notables entre las piezas fabricadas con diferente configuración del parámetro de desenfoco del láser.

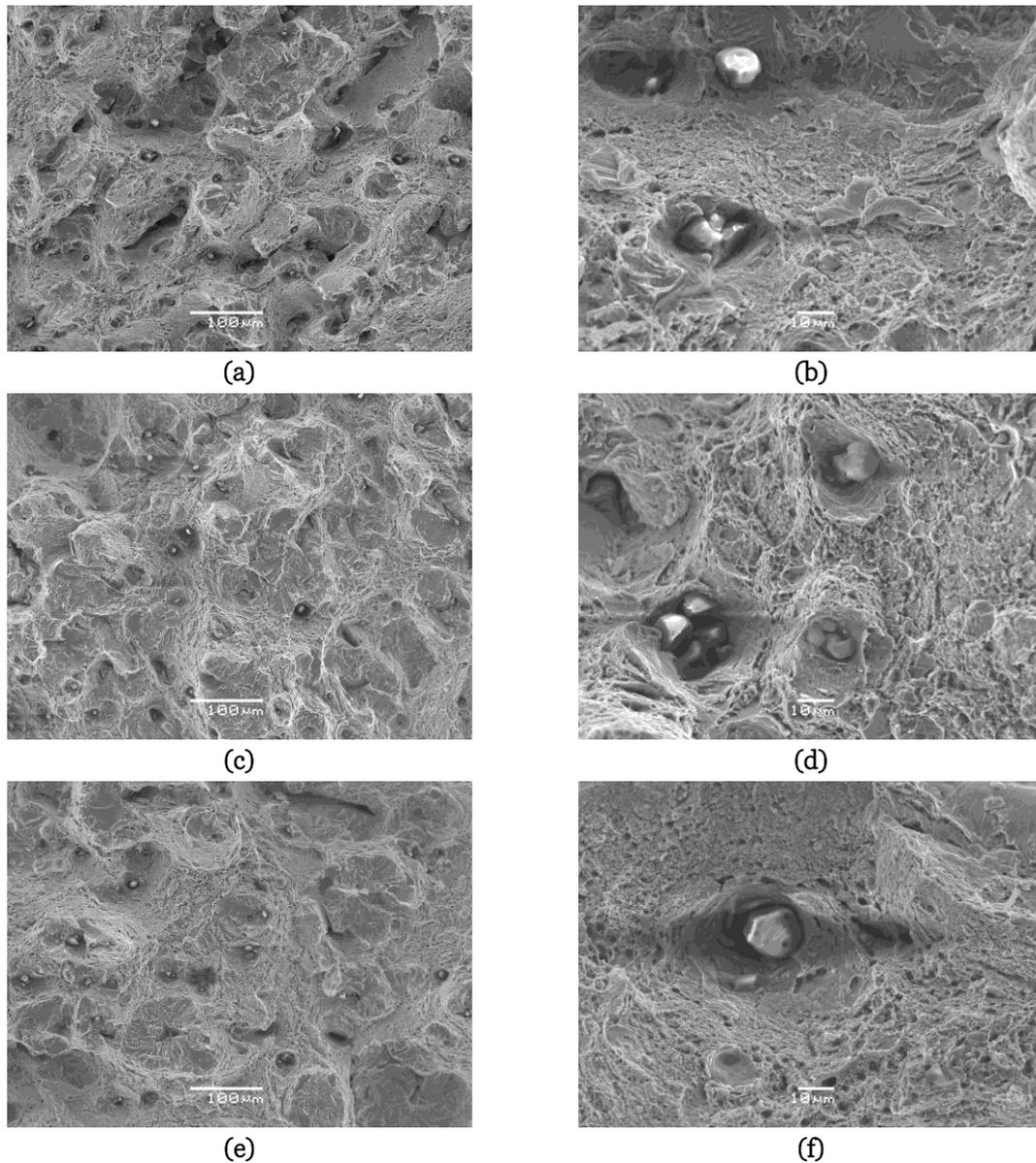


Figura 4.19. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con aumentos de x200 ((a) D_{d1}, (c) D₀ y (e) D_{c1}) y x1.000 ((b) D_{d1}, (d) D₀ y (f) D_{c1}).

4.3.6. Conclusiones del ajuste del desenfoque del láser

Con la finalidad de analizar la influencia del parámetro SLM de desenfoque del láser en la calidad de las piezas impresas en acero inoxidable 17-4PH para su ajuste, este apartado se centra en la evaluación de la microestructura, los defectos internos, la rugosidad superficial y las propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción) de las piezas fabricadas por SLM utilizando tres niveles de desenfoque láser: 1 mm negativo/divergente (D_{d1}), 0 mm o distancia de enfoque (D₀) y 1 mm positivo/convergente (D_{c1}).

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ Las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM tienen una microestructura mixta de austenita y martensita. La austenita se localiza principalmente en el borde de las piscinas de fusión y la martensítica en el centro de las piscinas de fusión.
- ❖ La profundidad de las piscinas de fusión es aproximadamente la mitad de su anchura, lo que indica el predominio de la fusión mediante el modo de transferencia de calor por conducción.
- ❖ Las muestras fabricadas con un desenfoque de naturaleza divergente (D_{d1}) presentan el menor tamaño (profundidad y anchura) de las piscinas de fusión, lo que conduce a una mayor velocidad de solidificación y, por consiguiente, a una microestructura más fina (menor tamaño de grano). Asimismo, la disminución del tamaño de grano con la divergencia del haz láser produce la disminución de la temperatura M_s y, como consecuencia, el desarrollo de una microestructura con mayor cantidad de austenita.
- ❖ Independientemente del valor de desenfoque (-1 mm, 0 mm, +1 mm) del proceso SLM, el área de defectos de las muestras impresas es menor del 0,25 %, siendo los defectos prácticamente circulares (más del 80 %) y de un tamaño inferior a $50 \mu\text{m}^2$ (aproximadamente un 60 %).
- ❖ La rugosidad superficial (tanto el parámetro R_a como R_t) aumenta notablemente en el caso del desenfoque convergente (D_{c1}). En términos generales de rugosidad, la distancia de enfoque (D_0) puede considerarse la configuración más adecuada.
- ❖ Respecto a las propiedades mecánicas, las muestras D_{d1} exhiben la menor dureza y la mayor ductilidad debido a que contienen mayor cantidad de austenita retenida.

En resumen, el ajuste adecuado de la distancia de enfoque del haz láser es importante para obtener piezas SLM de alta calidad. En particular, para la máquina de fabricación ProX DMP 100, pequeñas variaciones en el valor del parámetro de desenfoque producen cambios en las propiedades de las piezas impresas.

Este estudio se realizó principalmente con la finalidad de ajustar el desenfoque del láser en un valor adecuado para la fabricación SLM manteniendo el resto de los parámetros fijos. En base a los resultados obtenidos se concluye como parámetro de desenfoque del láser más adecuado el valor de 0 mm o posición de enfoque. Tanto las muestras D_0 como D_{c1} presentan buenas propiedades mecánicas, sin embargo, en términos de acabado superficial, las muestras D_{c1} presentan la mayor rugosidad superficial, y en cuanto a los defectos, las muestras D_0 tienen ligeramente menor número y son de mayor circularidad.

Para el resto de los estudios de la presente tesis doctoral, el parámetro de desenfoque del láser se fija en el valor de 0 mm o distancia de enfoque (D_0).

4.4. EFECTO DE LA ESTRATEGIA DE ESCANEO

Con la finalidad de analizar la influencia del patrón de escaneo láser utilizado en la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, este apartado se centra en la evaluación de las piezas impresas utilizando las tres estrategias de escaneo láser más habituales: normal (N), concéntrica (C) y hexagonal (H). La Figura 4.20 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio. Como se mencionó en el estado del arte (apartado 2.2.2), la estrategia de escaneo láser tiene un efecto directo sobre la porosidad, la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas SLM, por lo que se incluye un análisis de porosidad, microestructura y propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción). De igual forma, tanto la porosidad externa como la trayectoria recorrida por el láser en las últimas capas influyen directamente en la calidad superficial de las piezas impresas, razón por la cual se evalúa la rugosidad superficial. Además, también se incluye la evaluación de la calidad geométrica y dimensional de las piezas para analizar la influencia de este parámetro.

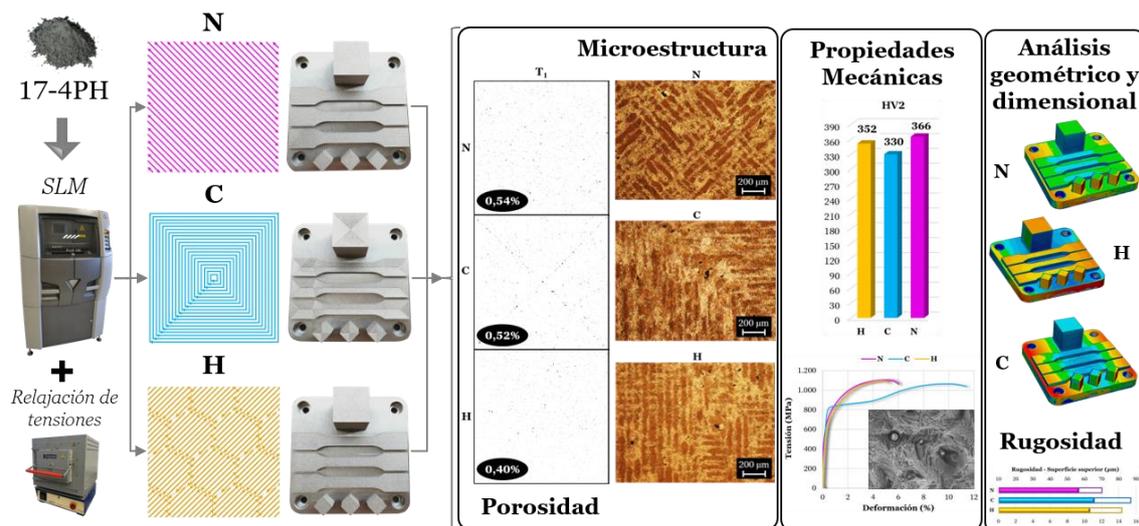


Figura 4.20. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM con diferentes estrategias de escaneo láser.

La Figura 4.21 muestra de forma detallada la trayectoria recorrida por el haz láser durante la fabricación SLM para las tres estrategias de escaneo láser utilizadas:

- **Normal (N):** el haz láser traza un patrón lineal con una inclinación que cambia de 45° a -45° en cada capa (Figura 4.21a).
- **Concéntrica (C):** el haz láser describe una trayectoria que bordea la geometría de la pieza desde el exterior hacia el interior (Figura 4.21b).
- **Hexagonal (H):** es un tipo de estrategia en isla, cuyo nombre viene dado por la forma hexagonal de los patrones de escaneo. Como se muestra en la Figura 4.21c, la estrategia hexagonal es similar a la estrategia normal (la dirección lineal de la trayectoria del láser

cambia de 45° a -45° en cada capa), pero en este caso el haz láser funde el polvo metálico según las geometrías hexagonales hasta completar la capa. La posición de los hexágonos se repite cada tres capas, el tamaño del lado del hexágono es de $5.000 \mu\text{m}$ y la superposición entre ellos de $50 \mu\text{m}$ (valores estándar).

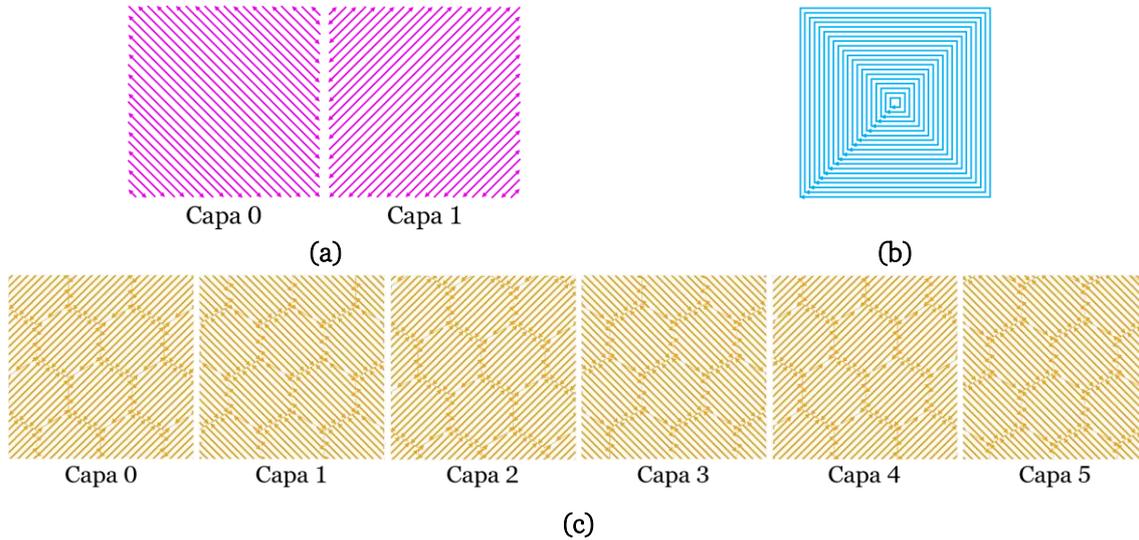


Figura 4.21. Estrategias de escaneo láser utilizadas en la fabricación SLM de las piezas del estudio: (a) normal, (b) concéntrica y (c) hexagonal.

Con cada estrategia de escaneo láser se fabricó un conjunto de piezas (Figura 4.22), que seguidamente fue sometido al tratamiento térmico de relajación de tensiones y digitalizado con el escáner de luz estructurada para la evaluación geométrica (planitud, paralelismo y perpendicularidad) y dimensional. A continuación, las piezas fueron separadas de la placa base para la evaluación del resto de las propiedades. Como se muestra en la Figura 4.22, este conjunto de piezas está compuesto por:

- Un cubo de 25 mm de lado destinado al análisis de la densidad/porosidad (mediante el principio de Arquímedes), así como de la rugosidad superficial (realizada tanto en las caras laterales como en la superficie superior).
- Tres probetas diseñadas para la evaluación de la resistencia a la tracción.
- Tres cubos de 10 mm de lado destinados al análisis de la dureza, la porosidad interna y la microestructura. Dos de ellos fueron divididos por la mitad utilizando una cortadora metalográfica: uno según la dirección de fabricación o dirección longitudinal, resultando las muestras L_1 y L_2 ; y el otro según la dirección de las capas fabricadas o dirección transversal, resultando las muestras T_1 y T_2 . De esta forma, además de analizar las diferentes propiedades, también se evaluó su variación en función de la dirección (transversal y longitudinal). Las cuatro muestras se encapsularon y pulieron para el análisis de la porosidad interna. Dicho análisis se llevó a cabo mediante la creación de los mosaicos de las imágenes de las superficies completas (superficie

interna pulida de las muestras) capturadas mediante el microscopio óptico con x50 aumentos y procesadas utilizando el software ImageJ. A continuación, las superficies de las muestras se atacaron químicamente con Vilella para el análisis de la microestructura. Finalmente, en las secciones pulidas se realizaron los ensayos de dureza (HV2), cuyos resultados son el promedio de nueve mediciones distribuidas en una matriz de puntos equidistantes a 2,5 mm. Todo ello se realizó para cada una de las estrategias de escaneo láser evaluadas (N, C y H).

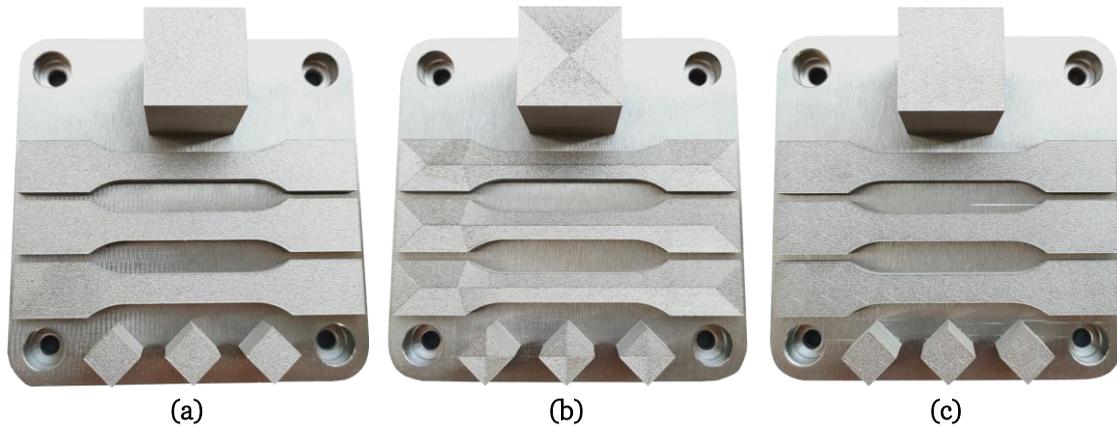


Figura 4.22. Conjunto de piezas impresas en SLM con la estrategia de escaneo láser: (a) normal, (b) concéntrica y (c) hexagonal.

4.4.1. Densidad/porosidad

La Figura 4.23 muestra los resultados de la porosidad tanto cerrada/interna (P_i) como abierta/externa (P_e) de las muestras fabricadas con las diferentes estrategias de escaneo láser. Las muestras C presentan el nivel más bajo de porosidad externa, alrededor del 0,5 %, mientras que las muestras impresas con las estrategias N y H alcanzan un valor superior al 1 %. En las muestras C, los valores de ambos tipos de porosidad son muy similares. Por otro lado, las muestras fabricadas con la estrategia N, presentan mayor porosidad, tanto interna como externa, que las muestras H. En cuanto a la porosidad total, el resultado óptimo se obtiene con la estrategia C (1 %), en consecuencia, las muestras C tienen la mayor densidad.

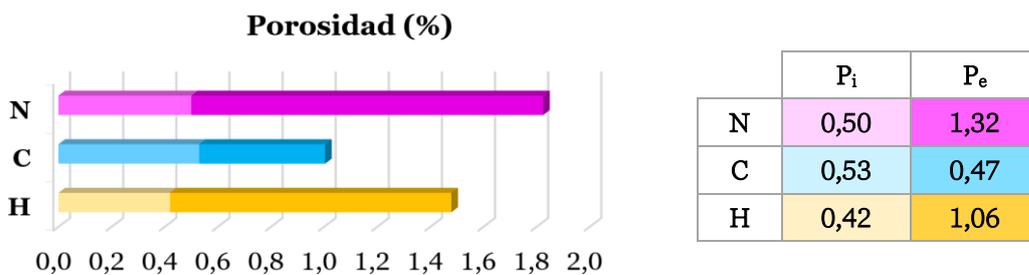


Figura 4.23. Resultados de porosidad de las muestras N, C y H (P_i : porosidad interna; P_e : porosidad externa).

El análisis de la porosidad interna, llevado a cabo a través de las imágenes obtenidas con el microscopio óptico y procesadas con el software ImageJ (Figura 4.24), permitió caracterizar los poros en función de aspectos morfológicos, como su tamaño y forma. Los valores de porosidad interna fueron similares tanto para las secciones transversales (T_1 y T_2) como longitudinales (L_1 y L_2) de las muestras (Figura 4.24), lo que significa que el porcentaje de porosidad interna no está influenciado ni por la dirección de fabricación (observada en las secciones longitudinales) ni por la dirección de las capas (observada en las secciones transversales). En relación al tamaño de poro, el rango de valores varía desde los $0,5 \mu\text{m}^2$ hasta los $3.331 \mu\text{m}^2$, $4.460 \mu\text{m}^2$ y $9.800 \mu\text{m}^2$ para las estrategias H, N y C, respectivamente.

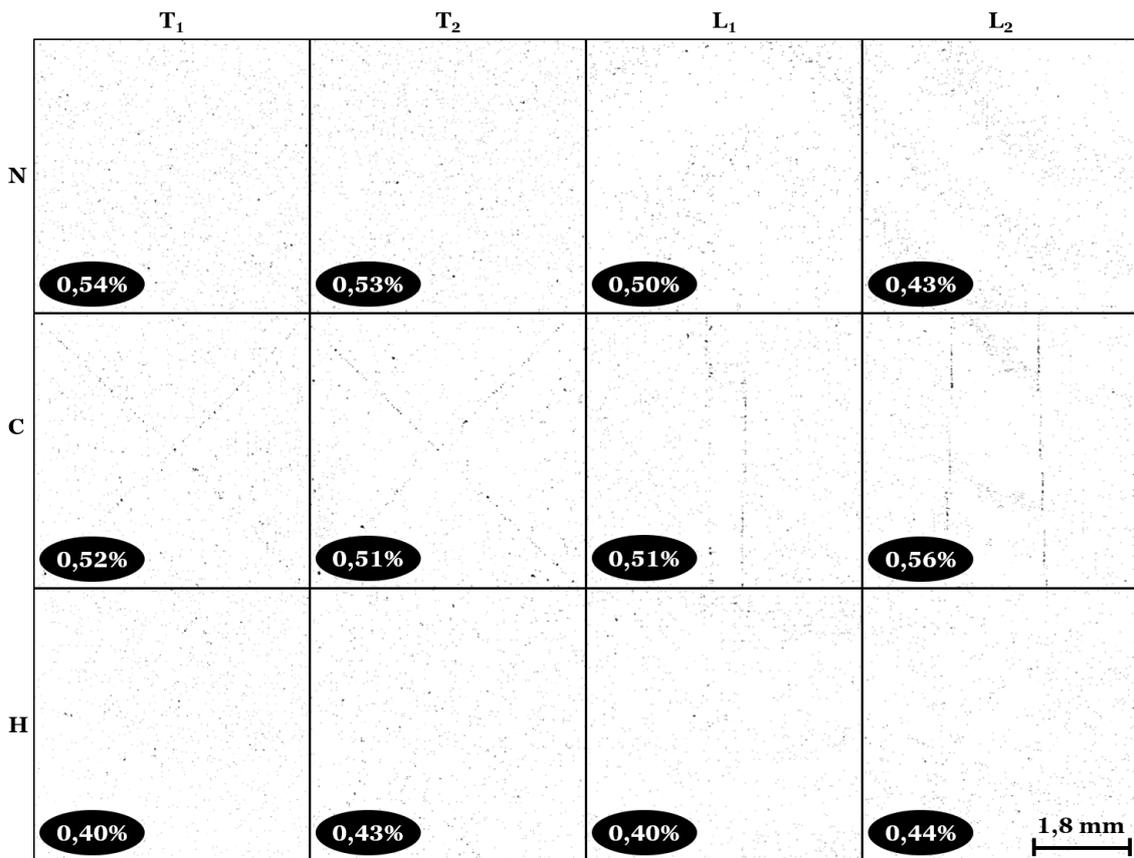


Figura 4.24. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T_1 , T_2 , L_1 y L_2 de las muestras N, C y H.

Cabe destacar que las muestras C contienen los poros más grandes, lo que puede estar asociado al cambio de dirección de la trayectoria del láser. Durante la fabricación de las muestras cúbicas, el láser cambia constantemente de dirección según un ángulo de 90° (como se puede observar en la superficie superior de las muestras C en la Figura 4.22) dando lugar, precisamente en estas zonas, a grandes poros con forma irregular (Figura 4.25).

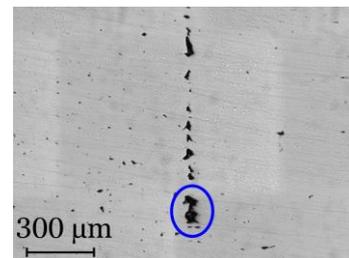


Figura 4.25. El poro de mayor tamaño (ubicado en la sección L_2 de la muestra C).

Según Tang *et al.* (Tang *et al.*, 2020) la formación de este tipo de poros es el resultado de la fusión inadecuada del polvo metálico y podría deberse a una disminución instantánea de la velocidad de escaneo del láser en el momento del cambio de dirección. Esta disminución de la velocidad conduciría a un aumento instantáneo de la densidad de energía láser, generando inestabilidad en las piscinas de fusión.

Independientemente de la estrategia de escaneo utilizada en la fabricación SLM, el número de poros disminuye a medida que aumenta su tamaño (Figura 4.26). Como se muestra en la Figura 4.26, la distribución del número de poros en función de su tamaño encaja perfectamente con una función potencial. Las muestras H contienen la mayor cantidad de poros de menor tamaño (<25 μm^2), aproximadamente un 66 %, frente 61 % y el 53 % de las muestras C y N, respectivamente. De acuerdo con estos resultados, la estrategia H tiene el menor tamaño promedio de poro con un valor de 42 μm^2 , mientras que en las estrategias N y C asciende a 64 μm^2 .

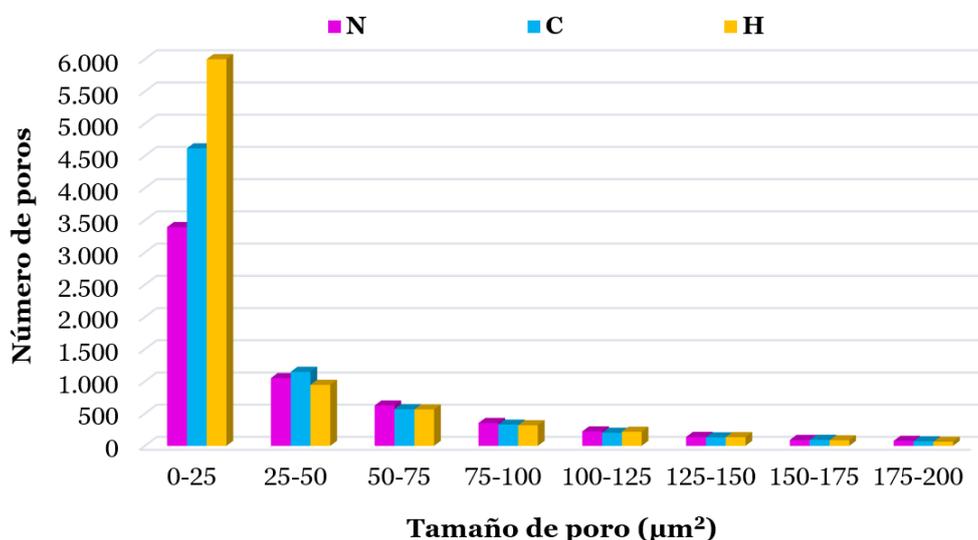


Figura 4.26. Número promedio de poros en función de su tamaño en las muestras N, C y H.

Respecto a la circularidad de los poros, las tres estrategias tienen valores promedio similares: 0,82 (N), 0,79 (C) y 0,80 (H). Como se muestra en la Figura 4.27, la circularidad de los poros aumenta a medida que disminuye su tamaño, ajustándose a una función logarítmica (disminuye rápidamente y luego se nivela). Los poros de menor tamaño (<25 μm^2) presentan la máxima circularidad, con valores promedio de 0,88 (N), 0,85 (C) y 0,84 (H). Estos defectos tienen forma esférica y generalmente son el resultado de gases atrapados en las piscinas de fusión debido al aporte excesivo de energía y a las altas velocidades de enfriamiento producidas durante el proceso de solidificación. Por otro lado, los poros con un tamaño superior a 500 μm^2 presentan mayor irregularidad, con valores de circularidad promedio de 0,54 (N), 0,51 (C) y 0,50 (H) (Figura 4.27).

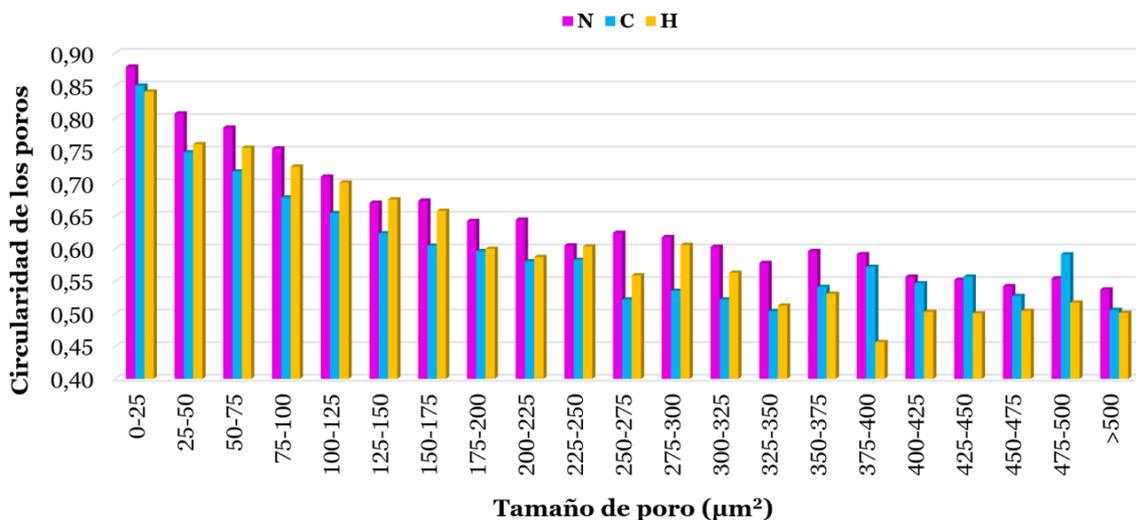


Figura 4.27. Circularidad promedio de los poros en función de su tamaño en las muestras N, C y H.

Analizando más en detalle los poros perfectamente esféricos, es decir, aquellos cuyo valor de circularidad es 1, se obtiene un resultado del 22 % para la estrategia N, 23 % para la estrategia C y 27 % para la estrategia H, con valores de tamaño promedio de $6 \mu\text{m}^2$, $5 \mu\text{m}^2$ y $3 \mu\text{m}^2$, respectivamente.

4.4.2. Microestructura

La Figura 4.28 muestra la microestructura de las secciones transversal (T_1) y longitudinal (L_1) de las muestras fabricadas con las diferentes estrategias de escaneo láser (N, C y H) tras la acción del atacante químico Vilella.

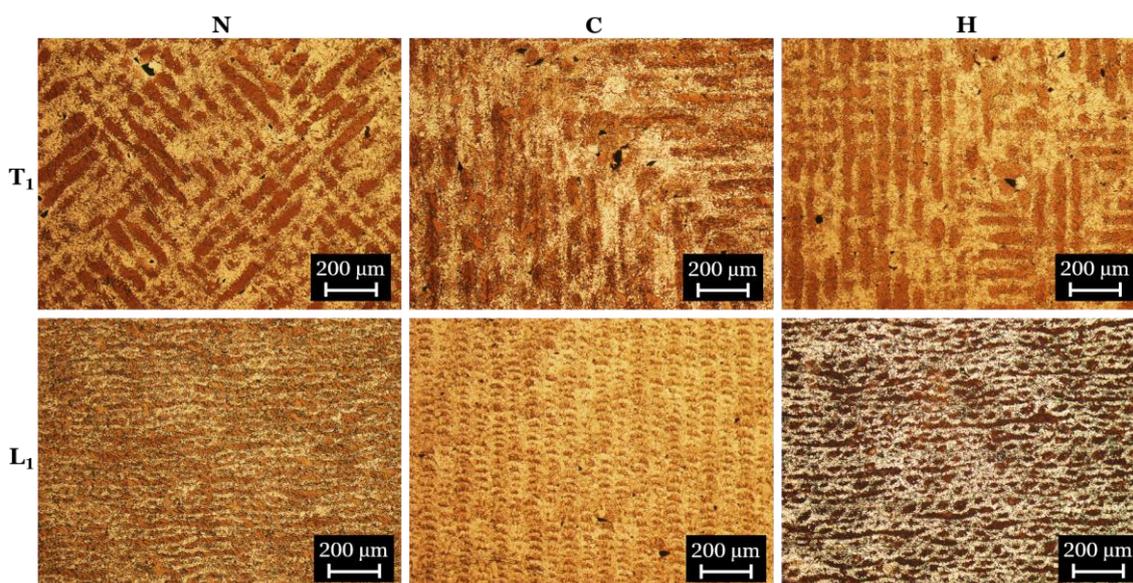


Figura 4.28. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de las secciones transversal (T_1) y lateral (L_1) de las muestras N, C y H.

Las secciones transversales se caracterizan por las marcas de la trayectoria recorrida por el láser, visibles como líneas paralelas con un cambio de dirección de 90° (de 45° a -45°) entre capas en las estrategias de escaneo N y H, mientras que en el caso de la estrategia C, las líneas sufren cambios de dirección de 90° en la propia capa. Las secciones longitudinales revelan las piscinas de fusión resultantes del proceso de fabricación SLM, cuyo interior está compuesto por martensita (color oscuro) y el borde por austenita (color claro) (Figura 4.28).

Cabe destacar nuevamente los poros de gran tamaño contenidos en las muestras fabricadas con la estrategia de escaneo C, ubicados principalmente en los puntos donde el láser cambia de dirección bruscamente según un ángulo de 90° (Figura 4.29a). Como se puede observar en la Figura 4.29b, este defecto de falta de fusión del polvo con el cambio de dirección del láser se acentúa en el centro de la muestra, donde se produce un poro con un diámetro equivalente de unos $50\ \mu\text{m}$.

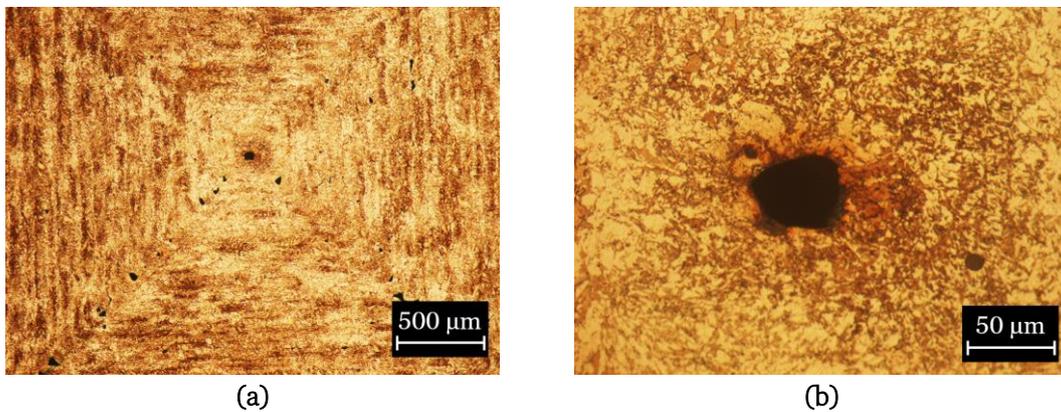


Figura 4.29. Imágenes del microscopio óptico de la microestructura de la sección transversal (T_1) de la muestra C, tomadas con: (a) x50 y (b) x500 aumentos.

4.4.3. Dureza

Los resultados de dureza varían ligeramente en función de la estrategia de escaneo láser, alcanzando valores promedio de (366 ± 8) HV2, (352 ± 14) HV2 y (330 ± 16) HV2 para las muestras N, H y C, respectivamente (Figura 4.30). Como se puede observar en la Tabla 4.4, no existe una correlación significativa entre la dureza y la sección analizada. En las muestras N y C los valores promedio son ligeramente inferiores en las secciones transversales (T_1 y T_2) que en las longitudinales (L_1 y L_2), mientras que en las muestras H se observa la tendencia inversa.

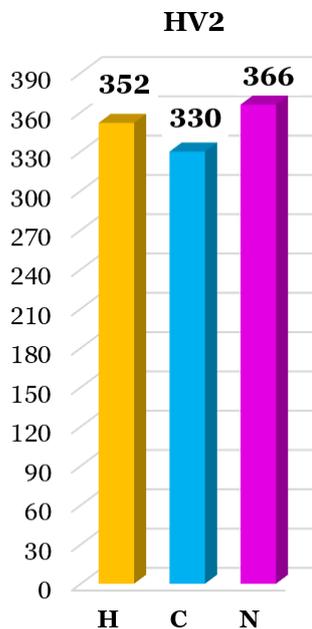
Tabla 4.4. Resultados de dureza de las secciones T₁, T₂, L₁ y L₂ de las muestras N, C y H.

Figura 4.30. Resultados promedio de dureza de las muestras N, C y H.

Estrategia	Sección	HV2
N	Transversal	T ₁ 366 ± 9
		T ₂ 359 ± 6
	Longitudinal	L ₁ 367 ± 9
		L ₂ 372 ± 6
C	Transversal	T ₁ 320 ± 19
		T ₂ 322 ± 15
	Longitudinal	L ₁ 339 ± 10
		L ₂ 339 ± 11
H	Transversal	T ₁ 354 ± 12
		T ₂ 357 ± 20
	Longitudinal	L ₁ 346 ± 7
		L ₂ 352 ± 15

4.4.4. Resistencia a la tracción

Como se muestra en la Figura 4.31, los resultados del ensayo de tracción son muy similares para las muestras fabricadas con las estrategias de escaneo láser N y H. El valor de R_m es prácticamente el mismo, aproximadamente 1.100 MPa, mientras que el valor de R_p es muy cercano, 723 MPa (N) y 702 MPa (H). Asimismo, la curva tensión-deformación sigue la misma tendencia en ambas estrategias y el porcentaje de reducción de área (Z) presenta valores muy similares, 29 % (N) y 30 % (H). Por otro lado, la estrategia C muestra resultados ligeramente diferentes de R_m (1.067 MPa), R_p (813 MPa) y Z (33 %), así como una curva tensión-deformación muy diferente a la obtenida para las estrategias N y H (Figura 4.31). Los resultados del ensayo de tracción concuerdan con los valores de dureza obtenidos en el apartado anterior (Figura 4.30). Las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo láser C son menos duras y más dúctiles que las piezas fabricadas con las otras dos estrategias (N y H).

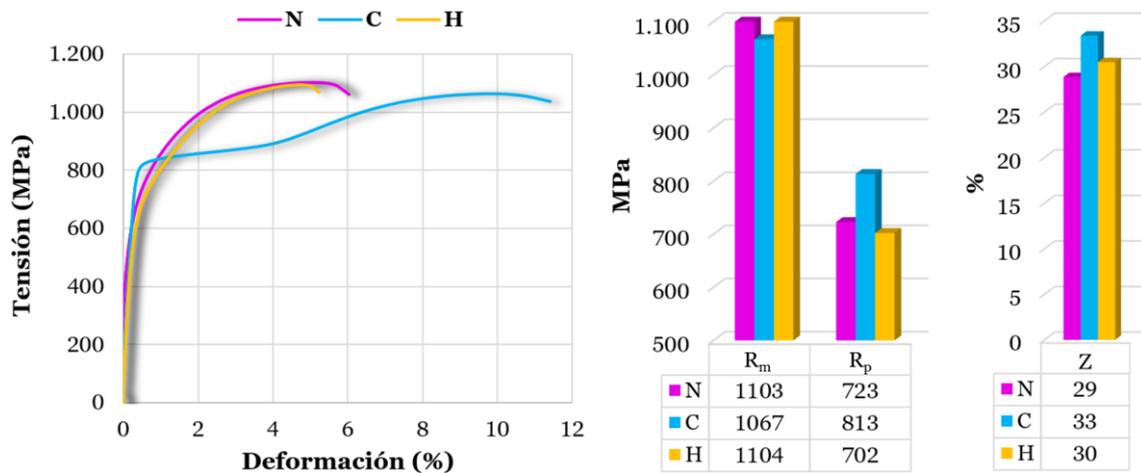
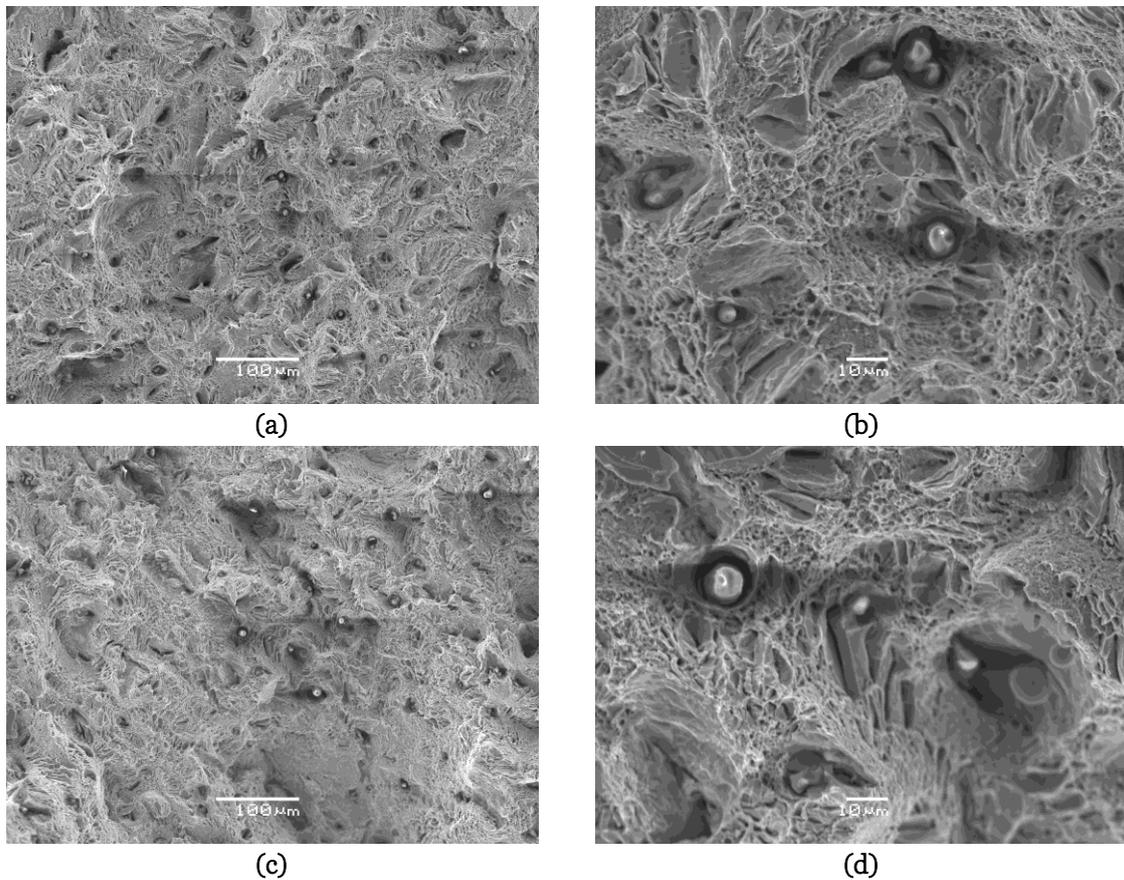


Figura 4.31. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras N, C y H (curva tensión-deformación, R_m, R_p y Z).

En las imágenes tomadas mediante el SEM de la superficie de fractura producida por el ensayo de tracción en las muestras N (Figura 4.32a y Figura 4.32b), H (Figura 4.32c y Figura 4.32d) y C (Figura 4.32e y Figura 4.32f) se pueden observar los poros, inclusiones y partículas de salpicaduras, causantes directos de la nucleación de los huecos hasta producir su unión y, finalmente, la rotura. El análisis de estas superficies de fractura no reveló diferencias notables entre las piezas fabricadas con diferentes estrategias de escaneo láser.



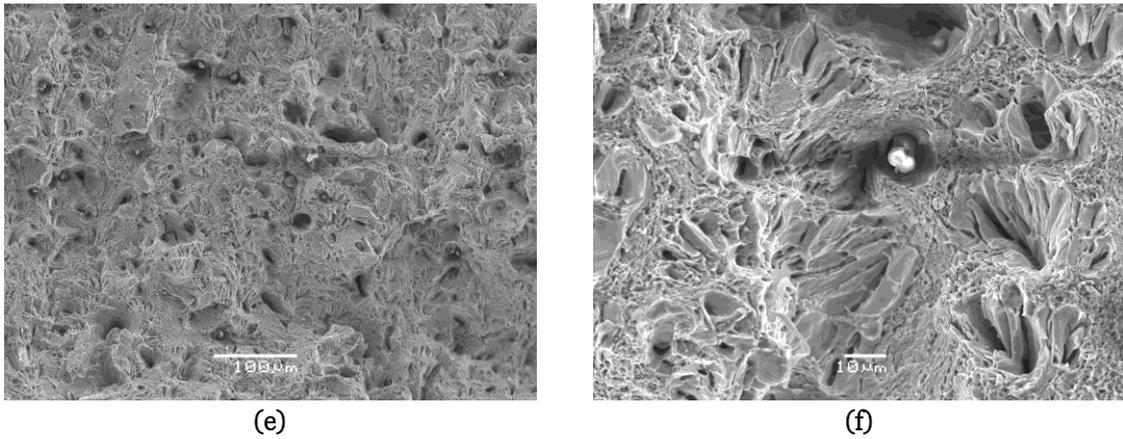
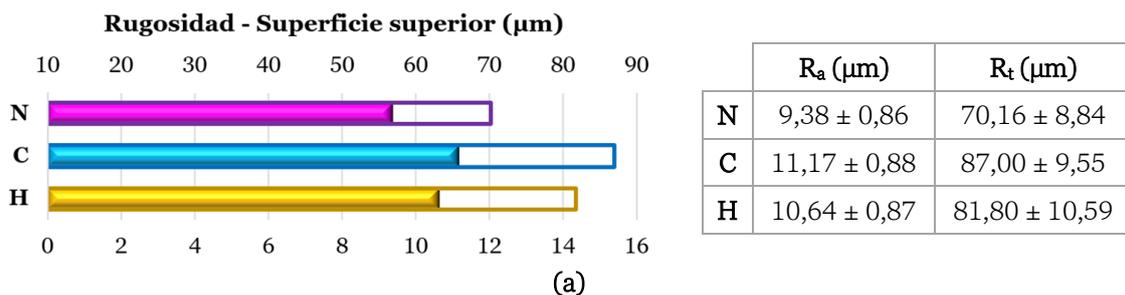


Figura 4.32. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con aumentos de x200 ((a) N, (c) H y (e) C) y x1.000 ((b) N, (d) H y (f) C).

4.4.5. Rugosidad

Los resultados del análisis de rugosidad muestran la influencia tanto de la estrategia de escaneo láser utilizada para la fabricación SLM (N, C, H) como de la superficie medida (superior o lateral). Respecto a la superficie superior o superficie donde se hacen visibles las marcas de la estrategia de escaneo utilizada en el proceso de fabricación SLM, los valores de rugosidad más bajos se obtienen para las muestras N y los más altos para las muestras C (Figura 4.33a). En el caso de las superficies laterales (Figura 4.33b), la rugosidad se reduce ligeramente para las estrategias N y H, siendo más notable la diferencia en el caso de las muestras H. Esta variación en los resultados en función de la superficie analizada de la estrategia H se debe principalmente al solape entre hexágonos que se produce en cada capa (Figura 4.21c) y, finalmente, se refleja en la superficie superior de las piezas fabricadas. Por otro lado, en el caso de las muestras impresas con la estrategia C se observa un descenso importante en la rugosidad de la superficie lateral respecto a la superior, alcanzando los valores más bajos tanto en el parámetro R_a ($5,12 \mu\text{m}$) como R_t ($53,50 \mu\text{m}$) en comparación con el resto de las estrategias. De estos resultados se puede concluir que la trayectoria láser concéntrica, idéntica en cada capa de fabricación (Figura 4.21b), produce el mejor acabado superficial en las caras laterales, cuyos resultados concuerdan con la baja porosidad externa obtenida en las muestras C (Figura 4.23).



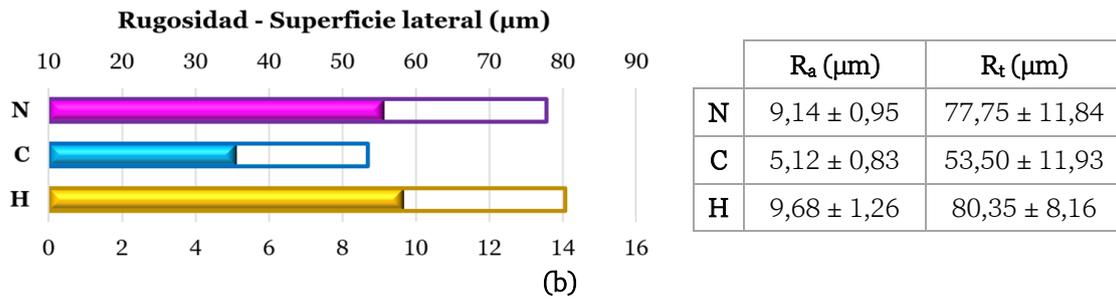


Figura 4.33. Resultados de rugosidad (R_a y R_t) de las superficies (a) superior y (b) lateral de las muestras N, C y H.

4.4.6. Calidad geométrica y dimensional

Este apartado contiene los resultados del análisis geométrico y dimensional del conjunto de piezas fabricadas con las diferentes estrategias de escaneo láser. Este estudio se realizó antes de separar las piezas de la placa de fabricación con el objetivo de evaluar las deformaciones del conjunto placa-piezas tras la fabricación SLM y la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones (postproceso recomendado y de habitual aplicación en este tipo de proceso de fabricación). También es interesante realizar la evaluación geométrica y dimensional de la placa antes del tratamiento térmico para analizar su efecto (estudio abordado en el apartado 7.3.1 de la presente tesis doctoral).

La Figura 4.34 muestra la comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos resultantes del escaneo del conjunto de piezas (N, C y H).

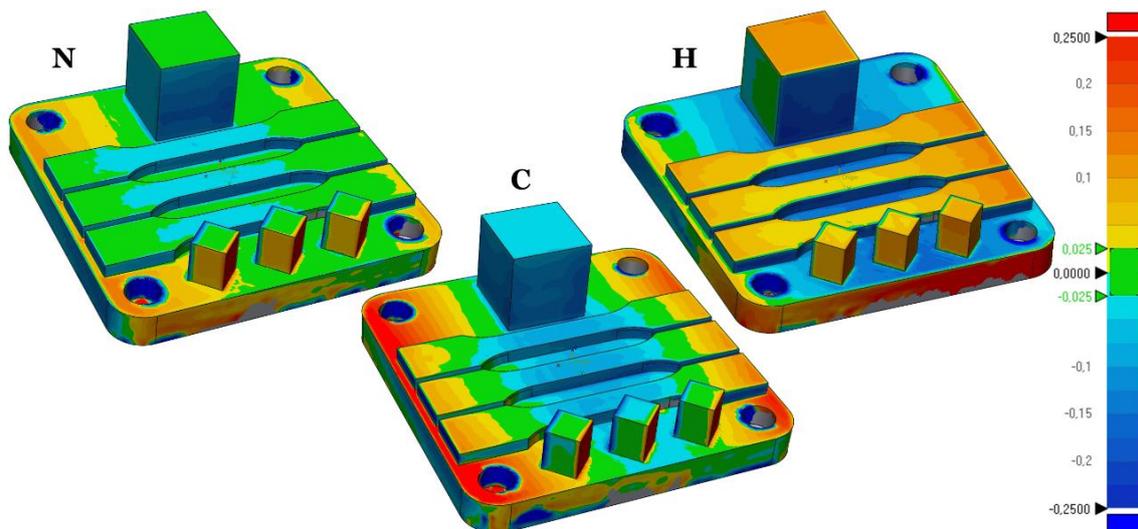


Figura 4.34. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las muestras N, C y H en la placa base.

El color verde revela las superficies de mejor ajuste entre el CAD nominal y las piezas fabricadas por SLM (Figura 4.34). Los resultados de la comparación 3D muestran una ligera

deformación con forma cóncava de la placa base después del proceso SLM. Como se muestra en la Figura 4.34, este efecto es más notable en la estrategia C y, en particular, en las muestras más largas y estrechas (muestras de tracción). Esto puede ser debido a que la variación del gradiente térmico que sufren las piezas impresas con esta estrategia da lugar a tensiones de compresión residuales en el área central de las piezas y de tracción en el borde, difíciles de eliminar por completo con el tratamiento térmico.

Los resultados del análisis geométrico y dimensional muestran los errores relativos a las superficies superiores de todas las muestras (tracción y cubos) y a las superficies laterales de las muestras cúbicas (debido al pequeño espesor de las muestras de tracción). El paralelismo y la dimensión según el eje Z se calcularon respecto al plano base. Mientras que la perpendicularidad de las muestras cúbicas se calculó como el error entre sus caras laterales (planos XZ e YZ) y su cara superior XY (tomada como referencia).

Los resultados del análisis geométrico (Figura 4.35 y Tabla 4.5) revelaron que independientemente de la estrategia de escaneo utilizada en la fabricación SLM, los errores de planitud ($<80 \mu\text{m}$), paralelismo y perpendicularidad ($<140 \mu\text{m}$) de las piezas cúbicas (grande y pequeñas) son similares. Sin embargo, cabe destacar el notable aumento del error geométrico en la fabricación de muestras alargadas (muestras de tracción), así como la influencia de la estrategia utilizada. En el caso de las estrategias N y H, las muestras de tracción presentaron errores de planitud inferiores a $105 \mu\text{m}$ (N) y $140 \mu\text{m}$ (H) y errores de paralelismo inferiores a $200 \mu\text{m}$ (N) y $285 \mu\text{m}$ (H). Mientras que las muestras alargadas impresas con la estrategia C presentaron elevados errores tanto de planitud ($303 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$) como de paralelismo ($438 \mu\text{m} \pm 31 \mu\text{m}$), debido principalmente a la gran longitud de los vectores de escaneo recorridos por el láser durante la fabricación.

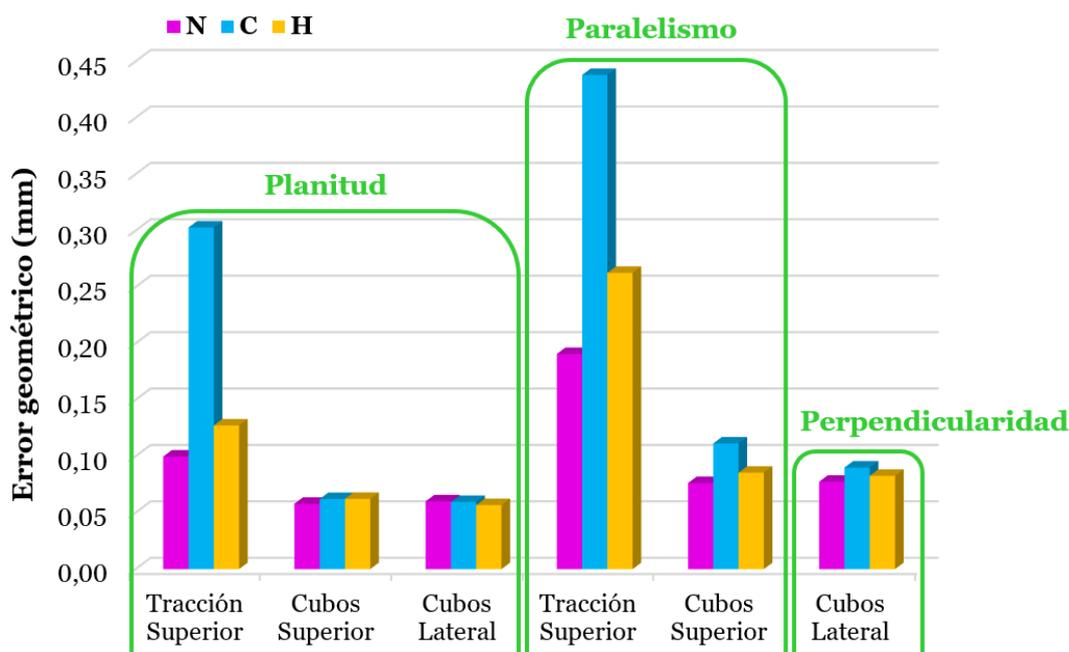


Figura 4.35. Resultados promedio del análisis geométrico de las muestras N, C y H.

Tabla 4.5. Resultados del análisis geométrico de las muestras N, C y H.

Estrategia	Muestra	Plano	Error geométrico (μm)		
			Planitud	Paralelismo	Perpendicularidad
N	Tracción	Superior	100 \pm 1	191 \pm 7	-
	Cubos	Superiores	58 \pm 6	76 \pm 10	-
		Laterales	60 \pm 16	-	77 \pm 25
C	Tracción	Superior	303 \pm 20	438 \pm 31	-
	Cubos	Superiores	62 \pm 9	111 \pm 25	-
		Laterales	60 \pm 14	-	90 \pm 25
H	Tracción	Superior	127 \pm 10	263 \pm 20	-
	Cubos	Superiores	62 \pm 10	85 \pm 3	-
		Laterales	57 \pm 15	-	83 \pm 23

En cuanto al análisis dimensional de las muestras cúbicas (Figura 4.36 y Tabla 4.6), los resultados de las tres estrategias presentan una disminución en el ancho y largo con valores promedio en torno a $-60 \mu\text{m}$ (H), $-75 \mu\text{m}$ (N) y $-95 \mu\text{m}$ (C). Por otro lado, el análisis de la altura revela una tendencia diferente en función de la estrategia. Las piezas fabricadas con las estrategias N y C sufren también contracciones, con valores en torno a $-95 \mu\text{m}$ (N) y $-230 \mu\text{m}$ (C), mientras que las muestras H aumentan su altura en torno a $70 \mu\text{m}$.

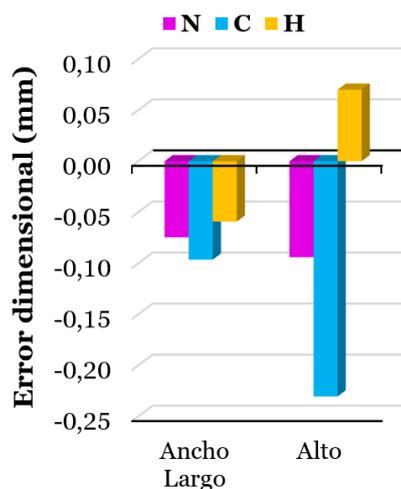


Figura 4.36. Resultados promedio del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H.

Tabla 4.6. Resultados del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H.

Estrategia	Error dimensional (μm)	
	Ancho / Largo	Alto
N	-75 \pm 31	-94 \pm 13
C	-96 \pm 26	-230 \pm 78
H	-59 \pm 37	70 \pm 24

Estos efectos dimensionales se pueden observar en la comparación 3D (Figura 4.34). Cabe destacar, el elevado error dimensional de las piezas fabricadas con la estrategia C, que puede ser causado principalmente por las tensiones resultantes de la fabricación SLM utilizando esta estrategia de escaneo.

4.4.7. Conclusiones del efecto de la estrategia de escaneo

Con la finalidad de analizar la influencia de la estrategia de escaneo láser utilizada en la fabricación SLM sobre la calidad de las piezas de acero inoxidable 17-4PH, este apartado se centra en la evaluación de piezas fabricadas utilizando los patrones de escaneo láser normal (N), concéntrico (C) y hexagonal (H). Este estudio permite seleccionar la estrategia de escaneo láser más adecuada para la fabricación de este tipo de piezas en función de su aplicación final, en relación a las propiedades del material de fabricación (densidad y microestructura), las propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción), así como la calidad geométrica, dimensional y superficial (rugosidad).

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ Las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo H se consideran las más adecuadas en términos de porosidad ya que presentan el menor porcentaje de porosidad interna y, en general, sus poros son de menor tamaño y forma más esférica. Por otro lado, las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo C presentan la menor porosidad total, a pesar de contener los poros más grandes. Estos poros de tamaño grande y forma irregular están ubicados en la zona donde el láser cambia de dirección durante el escaneo de acuerdo con el patrón de la estrategia C.
- ❖ Respecto a las propiedades mecánicas, la estrategia de escaneo láser influye ligeramente tanto en el comportamiento a tracción como en la dureza de las muestras impresas. Las piezas fabricadas con las estrategias N y H presentan un comportamiento a tracción similar, alcanzando valores cercanos a los 1.100 MPa de R_m , 712 MPa de R_p y 30 % de coeficiente de estricción. Asimismo, la curva tensión-deformación es muy similar en estas dos estrategias, pero completamente diferente a la obtenida con la estrategia C. Las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo C presentan un comportamiento más dúctil y, por lo tanto, tienen menor dureza (330 HV2) que las fabricadas con las estrategias N (366 HV2) y H (352 HV2).
- ❖ En cuanto al acabado superficial, se observaron diferencias notables entre las superficies superior (resultante de la estrategia de escaneo láser) y lateral (resultante del proceso de AM capa a capa) de las piezas fabricadas con la estrategia C, presentando los mayores valores de rugosidad en la cara superior y los menores valores en las caras

laterales (resultados directamente relacionados con la baja porosidad externa de estas muestras) en comparación con las estrategias N y H. La rugosidad lateral de las muestras N y H disminuye ligeramente respecto a los resultados de la superficie superior, alcanzando valores ligeramente inferiores en el caso de la estrategia de escaneo N.

- ❖ En general, las estrategias de escaneo láser N y H proporcionan piezas con menores errores geométricos y dimensionales. Mientras que la fabricación SLM utilizando la estrategia C produce elevados errores tanto geométricos como dimensionales, especialmente en las piezas cuyos vectores de escaneo son largos. En consecuencia, se recomienda evitar la estrategia C para la fabricación de componentes largos y estrechos que requieran altos requisitos en cuanto a calidad geométrica y dimensional.

En resumen, si se requiere la fabricación SLM de piezas de baja porosidad interna se recomienda la utilización de la estrategia de escaneo láser H. Por otro lado, si se precisa de buenas propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción) o buena precisión geométrica y dimensional, se recomienda la utilización de la estrategia H o N. Por el contrario, si lo que se busca son piezas con alta ductilidad, la estrategia más adecuada es la C. Finalmente, en cuanto al acabado superficial, se recomienda la estrategia de escaneo láser N, si lo que se requiere es un acabado superficial similar en toda la superficie exterior del componente, o la estrategia C, si lo que se necesita es una rugosidad superficial baja en ciertas superficies (las cuales requieren orientarse a 90° respecto a la placa de fabricación SLM).

4.5. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados descritos en este capítulo han dado lugar a dos publicaciones en Revistas JCR:

- ▶ Leo, P., Cabibbo, M., Del Prete, A., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S. y Barreiro, J. (2021) «Laser Defocusing Effect on the Microstructure and Defects of 17-4PH Parts Additively Manufactured by SLM at a Low Energy Input», *Metals*, 11(4), 588. doi: 10.3390/met11040588 – Factor de impacto JCR: Q2.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J., Leo, P. y Castro-Sastre, M. A. (2022) «Impact of the laser scanning strategy on the quality of 17-4PH stainless steel parts manufactured by selective laser melting», *Journal of Materials Research and Technology*, 20, pp. 2734-2747. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.040 – Factor de impacto JCR (2021): Q1.

Tres publicaciones en Congresos Internacionales (DAAAM 2018, MESIC 2019 y WCE 2019) y Revistas Internacionales:

- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Fernández-Abia, A. I. y Castro-Sastre, M. A. (2018) «Influence of Laser Energy in the Surface Quality of Parts Manufactured by Selective Laser Melting», *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 29(1), pp. 0279-0286. doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.040.
- ▶ Giganto, S., Zapico, P., Castro-Sastre, M. A., Martínez-Pellitero, S., Leo, P. y Perulli, P. (2019) «Influence of the scanning strategy parameters upon the quality of the SLM parts», *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 698-705. doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.060 – Factor de impacto SJR: Q2.
- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S. y Barreiro, J. (2019) «Improvement Surface Quality of SLM Parts by means of the Combination of Different Scanning Strategies», *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2240, pp. 327-330. [publication/WCE2019/WCE2019_pp327-330.pdf](https://www.elsevier.com/locate/engcomp) – *Certificate of Merit for The 2019 International Conference of Manufacturing Engineering and Engineering Management*.

Capítulo 5

INFLUENCIA DEL RECICLAJE DEL POLVO

En este capítulo se estudia la influencia del reciclaje del polvo de acero inoxidable 17-4PH tanto en las propiedades del propio polvo como en las propiedades de las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. INTERÉS DEL ESTUDIO*
- 2. CARACTERIZACIÓN DEL POLVO*
- 3. CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM*
- 4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS*

5.1. INTERÉS DEL ESTUDIO

La calidad del polvo metálico utilizado en la fabricación SLM desempeña un papel vital para garantizar la alta calidad de las piezas finales. Caracterizar los materiales de partida se convierte en un requisito absoluto en aplicaciones críticas de ciertos sectores como el aeroespacial o biomédico. El reciclaje del polvo es otro factor fundamental, ya que una porción importante del mismo no se funde durante el proceso de fabricación y, en consecuencia, su reciclaje y reutilización supone una estrategia viable para mejorar la economía de la AM. El polvo reutilizado presenta cambios morfológicos y químicos que pueden afectar tanto al comportamiento del polvo durante el proceso de fabricación, como a las propiedades de las piezas finales. Por lo tanto, la caracterización del polvo de partida, tanto en estado virgen como en diferentes grados de reutilización, es un aspecto importante para establecer buenos procedimientos de reciclaje y optimizar el rendimiento del proceso de fabricación SLM.

Por otro lado, los diferentes materiales no envejecen de la misma manera, incluso el mismo material envejece de manera diferente cuando está sujeto a diferentes parámetros SLM. Así pues, el polvo de diferentes proveedores presenta diferentes características y, en consecuencia, puede requerir diferentes parámetros de procesamiento para garantizar las propiedades óptimas de las piezas finales. En relación a esto, el polvo de acero inoxidable 17-4PH mencionado en el estado del arte (apartado 2.2.1) es del fabricante EOS y las piezas obtenidas a partir de este material han sido impresas con la máquina de EOS utilizando alta potencia láser (en torno a 200 W) y atmósfera inerte de argón. Los estudios realizados con este material han concluido que tras 10 ciclos de reciclaje se producen cambios morfológicos y químicos en el polvo que afectan ciertas propiedades de las piezas impresas como la porosidad y la rugosidad, sin tener efecto en las propiedades de tracción, el comportamiento a fatiga y la microestructura. Sin embargo, el efecto del reciclaje del polvo de acero inoxidable 17-4PH del fabricante 3DSystems sobre la calidad de las piezas impresas por SLM, en atmósfera inerte de nitrógeno y utilizando baja potencia láser, aún no ha sido estudiado.

Por todo ello, en este capítulo se realizan dos estudios fundamentales relacionados con el reciclaje del polvo metálico para la fabricación SLM. En primer lugar, se lleva a cabo la caracterización del polvo de acero inoxidable 17-4PH del fabricante 3DSystems, tanto en estado virgen como en diferentes grados de reciclaje (ampliando el número de ciclos de reutilización hasta 20, a diferencia de los estudios de otros autores). El número máximo de ciclos de reciclaje lo determina la capacidad del depósito de alimentación de polvo de la máquina, esto es, tras 20 ciclos de fabricación es necesario rellenar el depósito para poder fabricar una nueva placa de piezas. En segundo lugar, se realiza la evaluación de las propiedades de las piezas fabricadas a partir de los estados de reciclaje del polvo límites (polvo virgen y polvo reciclado 20 veces).

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL POLVO

En este apartado se detalla la caracterización morfológica, química y microestructural del polvo de acero inoxidable 17-4PH utilizado en el proceso de fabricación SLM. Este material se caracterizó en diferentes estados de reciclaje: estado original o polvo virgen (P_0), después de 10 (P_{10}) y 20 (P_{20}) ciclos de fabricación-reciclaje. Adicionalmente, se realizó el análisis morfológico del polvo residual (P_R) o polvo acumulado en el tamiz de la tamizadora automática tras el proceso de reciclaje. La Figura 5.1 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio.

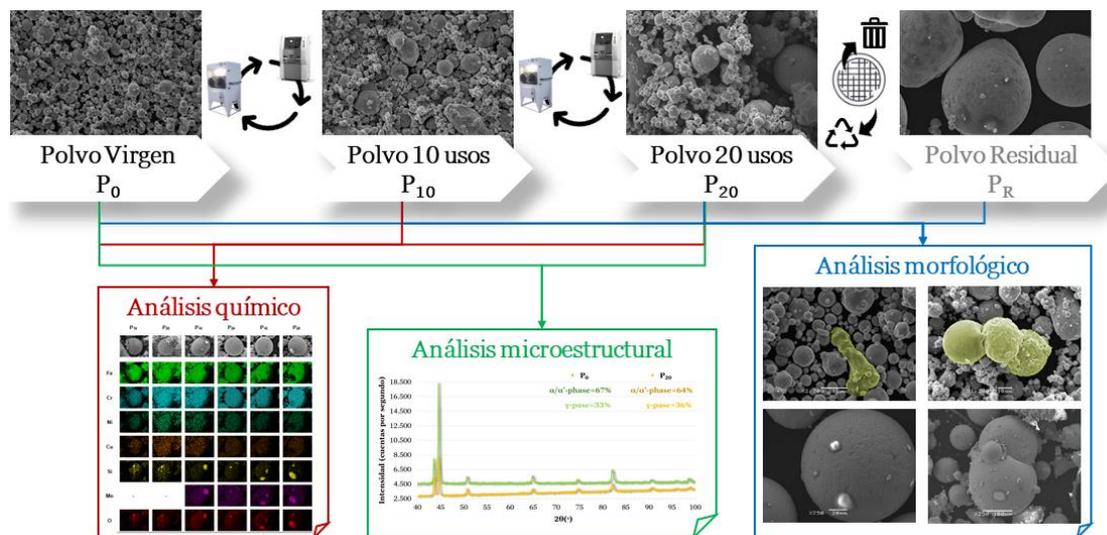


Figura 5.1. Metodología de la caracterización del polvo en diferentes estados de reciclaje.

Los equipos y métodos utilizados para los diferentes análisis fueron:

- El **análisis morfológico** se realizó a nivel macroscópico y microscópico. A nivel macroscópico se tomaron varias imágenes aleatorias de cada estado de polvo utilizando el macroscopio con x80 aumentos, lo que permitió captar el color y el aspecto general de las partículas de polvo. A nivel microscópico, se utilizó el SEM en modo de señal SEI para determinar el tamaño y la forma de las partículas de polvo tanto cuantitativa como cualitativamente. Para ello, utilizando x750 aumentos, se realizaron 20 imágenes distribuidas aleatoriamente en varias muestras de cada estado de polvo. De cada imagen se midieron 50 partículas aleatorias (seleccionadas usando un algoritmo desarrollado en Matlab) utilizando el software ImageJ. Este análisis se realizó manualmente debido a los resultados poco fiables obtenidos por el sistema automático de análisis de partículas de ImageJ para este caso concreto. Finalmente, se analizaron 1.000 partículas para cada estado de polvo, considerando su tamaño, redondez y relación de aspecto.

- El **análisis de la composición química** se realizó utilizando el SEM en modo de señal BEI junto con el software AZtec y a través del análisis EDS. Adicionalmente, se determinó la concentración de oxígeno presente en el polvo mediante la técnica de fusión por gas inerte utilizando un equipo de detención LECO.
- El **análisis microestructural** se realizó mediante el análisis XRD utilizando el difractómetro. Los datos obtenidos en el análisis XRD permiten determinar las proporciones relativas mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM E975-13:2016 para determinar la proporción de austenita retenida en aceros con una orientación cristalográfica casi aleatoria. Esta proporción se calcula utilizando la ecuación (8), donde « I_γ » e « I_α » son las intensidades integradas por pico de difracción, « p » y « q » son los números de pico de difracción en la fase γ y en la fase α , respectivamente.

$$V_\gamma = \left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right) / \left[\left(\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{I_{\alpha i}}{R_{\alpha i}} \right) + \left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right) \right] \quad (8)$$

El parámetro proporcional «R», que permite ponderar la intensidad integrada para cada pico, depende del espacio interplanar (hkl), el ángulo de Bragg, la estructura cristalina, la composición de la fase que se mide, la radiación de rayos X y la temperatura de la muestra durante el ensayo. Teniendo en cuenta las condiciones del estudio, el parámetro «R» se calculó mediante valores tabulados (Waseda, Matsubara y Shinoda, 2011).

5.2.1. Morfología

Análisis cuantitativo

Como se puede observar en las imágenes del SEM mostradas en la Figura 5.2, las partículas de polvo van aumentando de tamaño con su reutilización, siendo las partículas de polvo virgen las de menor tamaño (Figura 5.2a). El polvo residual (Figura 5.2d) presenta un tamaño de partícula muy superior al resto de los estados de polvo, en consecuencia, se descartó para su uso adicional. Este tipo de polvo (P_R), considerado polvo residual o polvo no apropiado para la fabricación SLM, se elimina periódicamente del tamiz de la PX-BOX (tamizadora automática) en las operaciones de mantenimiento.

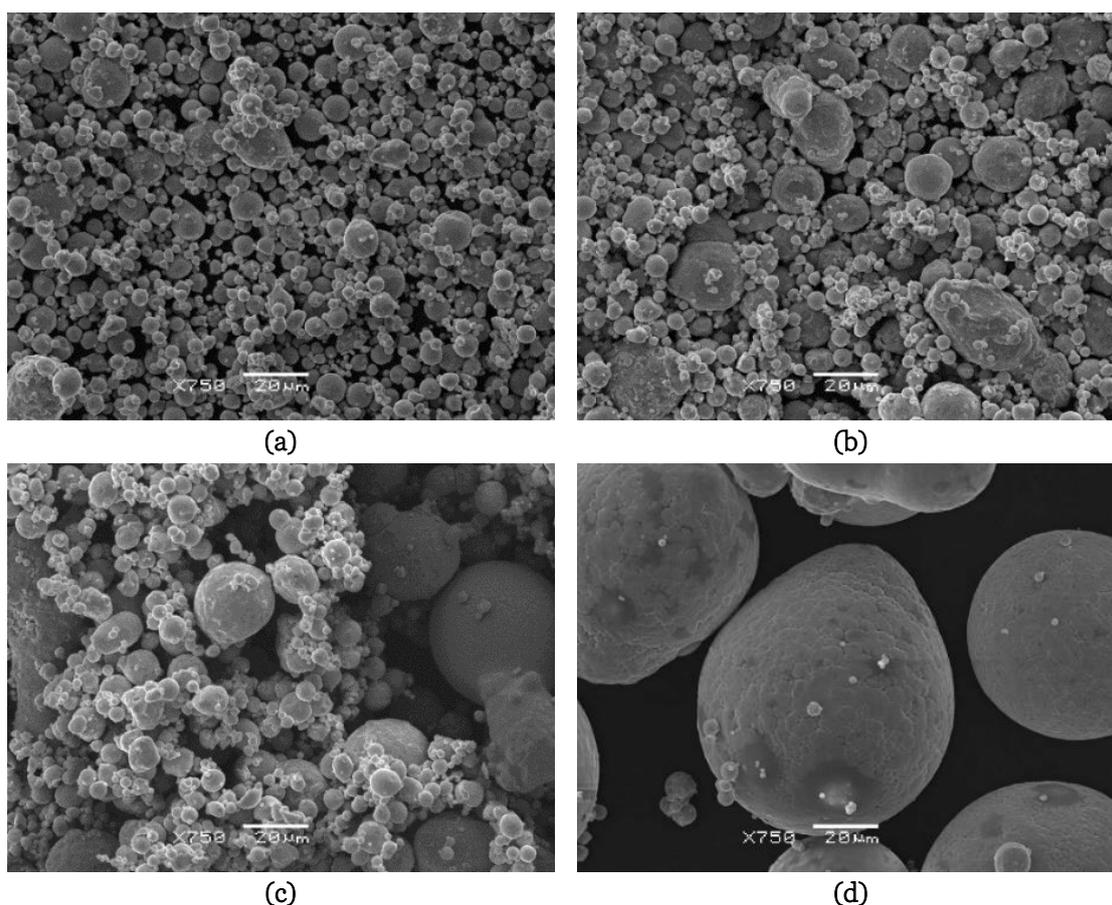


Figura 5.2. Imágenes del SEM con x750 aumentos del polvo en los diferentes estados de reciclaje: (a) P₀, (b) P₁₀, (c) P₂₀ y (d) P_R.

El análisis llevado a cabo mediante el software ImageJ de las imágenes capturadas en el SEM permitió obtener el valor promedio de los diámetros medios (\bar{D}) y máximos (\bar{D}_{max}), de la redondez (\bar{R}) y de la relación de aspecto (\bar{RA}) de todas las partículas de polvo analizadas para cada estado de reciclaje (Tabla 5.1). De forma gráfica, la Figura 5.3 muestra la PSD de cada estado de polvo.

Tabla 5.1. Resultados del tamaño, la redondez y la relación de aspecto de las partículas de polvo de cada estado de reciclaje (P₀, P₁₀, P₂₀ y P_R).

Estado de polvo	\bar{D} (μm)	\bar{D}_{max} (μm)	\bar{R} (%)	\bar{RA} (%)
P ₀	6,50	40,16	90,04	88,11
P ₁₀	7,69	42,42	89,04	86,68
P ₂₀	9,77	75,11	87,55	85,30
P _R	65,87	267,49	86,76	82,10

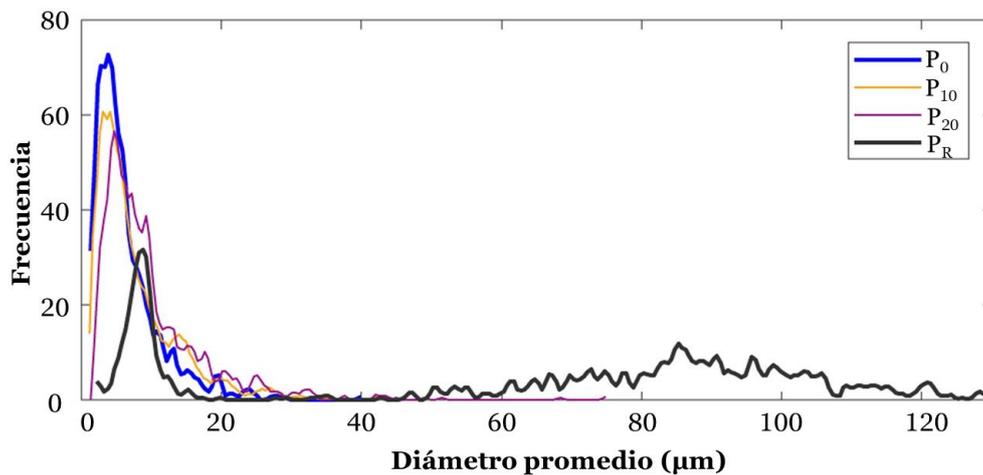


Figura 5.3. PSD de cada estado de polvo (P_0 , P_{10} , P_{20} y P_R).

Durante el proceso de reciclaje del polvo (Tabla 5.1), el tamaño de las partículas evoluciona de un diámetro promedio de $6,50 \mu\text{m}$ en el estado inicial (P_0) a $9,77 \mu\text{m}$ tras 20 ciclos de reciclaje (P_{20}). En el caso del diámetro promedio máximo, se observa un comportamiento similar, con un aumento de $35 \mu\text{m}$ entre estos dos estados. Además del claro aumento del tamaño de las partículas de polvo con el reciclaje, su redondez y relación de aspecto también se ven afectadas. Entre el estado inicial y el polvo después de 20 ciclos de fabricación-reciclaje, se produce una disminución del 2,49 % en la redondez y del 2,81 % en la relación de aspecto. La variación de estos parámetros es menos significativa en el caso del polvo reciclado 10 veces, con una disminución del 1,00 % y del 1,43 %, respectivamente.

La evolución en el tamaño y la forma de las partículas de polvo no solo afecta a sus características morfológicas, sino que también puede afectar el correcto funcionamiento del proceso de fabricación SLM y la calidad de las piezas impresas. Esto puede explicarse por una reducción en la fluidez del polvo (Gu, Xia y Dai, 2019), que se ve afectada por la aglomeración de partículas pequeñas (Slotwinski *et al.*, 2014) y por el aumento de la irregularidad en la forma de las partículas debido al aumento de las fuerzas cohesivas entre ellas (Yablokova *et al.*, 2015).

Análisis cualitativo

La morfología del polvo virgen se debe a su proceso de producción, es decir, las partículas esféricas con superficies lisas y pequeños satélites unidos a ellas están relacionadas con el proceso de atomización por gas (Slotwinski *et al.*, 2014). Además de estas características, el polvo virgen también presenta peculiaridades como partículas alargadas (Figura 5.4a), unidas (Figura 5.4b), fracturadas (Figura 5.4c) o con textura rugosa (Figura 5.4d).

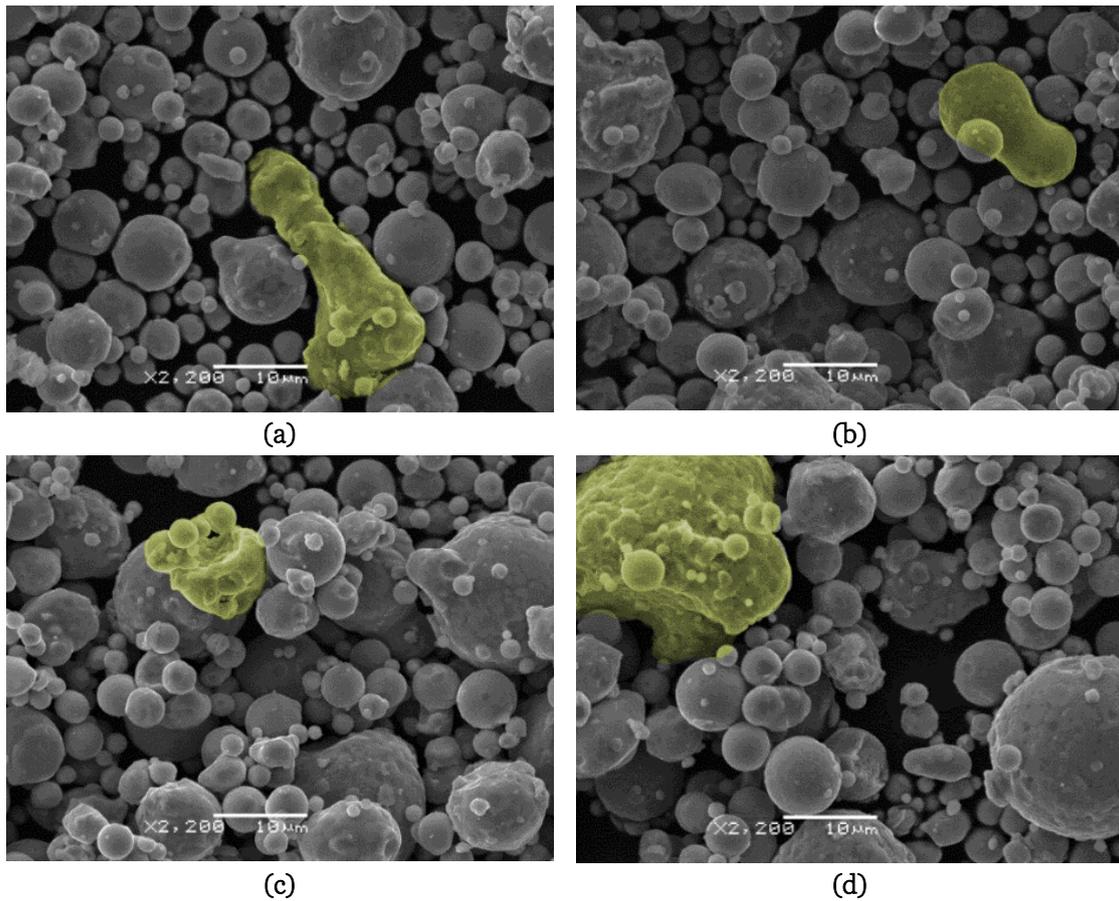
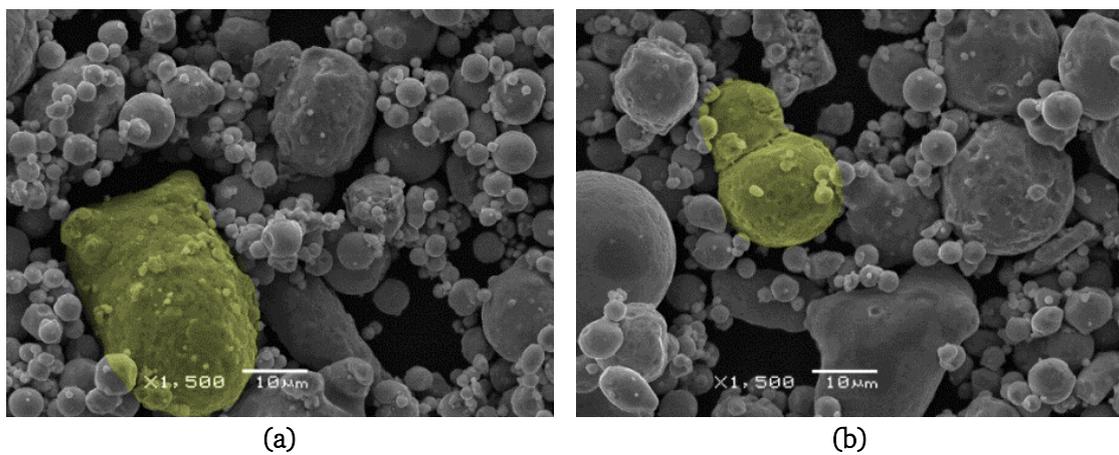


Figura 5.4. Imágenes del SEM con x2.200 aumentos de las características morfológicas peculiares del polvo P₀, partículas: (a) alargadas, (b) unidas, (c) fracturadas, (d) con textura rugosa.

La cantidad de partículas de forma irregular, unidas, con textura cerebelosa, de aglomeraciones de partículas o de partículas con proyecciones fundidas aumentan con el reciclaje del polvo. La Figura 5.5 y la Figura 5.6 muestran algunas características morfológicas del polvo sometido a 10 y 20 ciclos de fabricación-reciclaje, respectivamente.



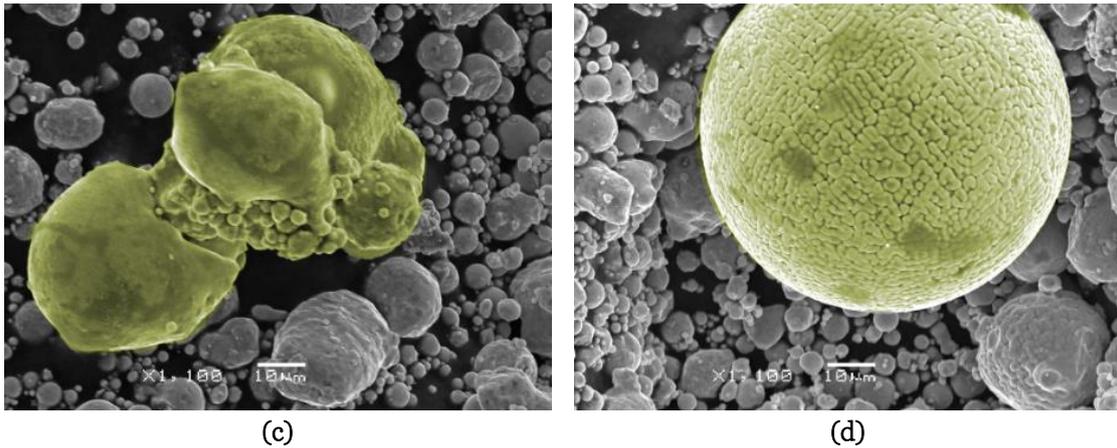


Figura 5.5. Imágenes del SEM con x1.500 y x1.100 aumentos de las características morfológicas del polvo P₁₀: (a) partículas irregulares o alargadas, (b) partículas unidas, (c) acumulaciones de partículas, (d) partículas con textura cerebelosa.

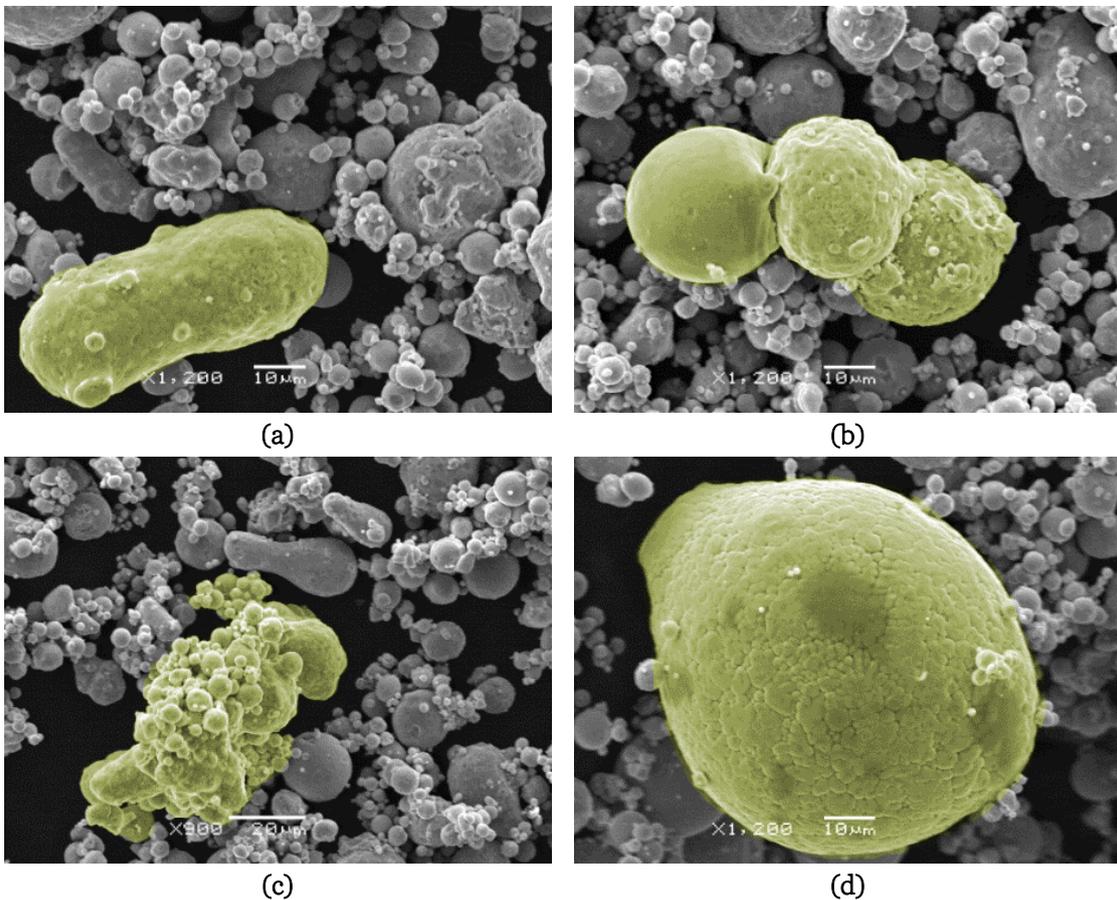


Figura 5.6. Imágenes del SEM con x1.200 y x900 aumentos de las características morfológicas del polvo P₂₀: (a) partículas irregulares o alargadas, (b) partículas unidas, (c) acumulaciones de partículas, (d) partículas con textura cerebelosa.

Esta evolución morfológica podría continuar en el caso de que todo el polvo aspirado de la máquina SLM hubiera sido reutilizado para la fabricación. El análisis de las imágenes del SEM del polvo residual (Figura 5.7) revela que las principales características del polvo altamente reutilizado son las mismas que aparecen, gradualmente, en el polvo con cada

reciclaje. El polvo eliminado en la etapa de reciclaje presenta diferentes características morfológicas como: partículas de gran tamaño (Figura 5.7a); partículas con forma irregular (Figura 5.7b y Figura 5.7c), algunas de ellas parcialmente aplastadas debido a la acción del rodillo durante el proceso de compactación del polvo (Figura 5.7c); partículas unidas (Figura 5.7d); acumulaciones de partículas (Figura 5.7e y Figura 5.7f); partículas con proyecciones fundidas (Figura 5.7g y Figura 5.7h) o satélites (Figura 5.7i) adheridos a ellas; así como partículas con texturas cerebelosas (Figura 5.7a y Figura 5.7h).

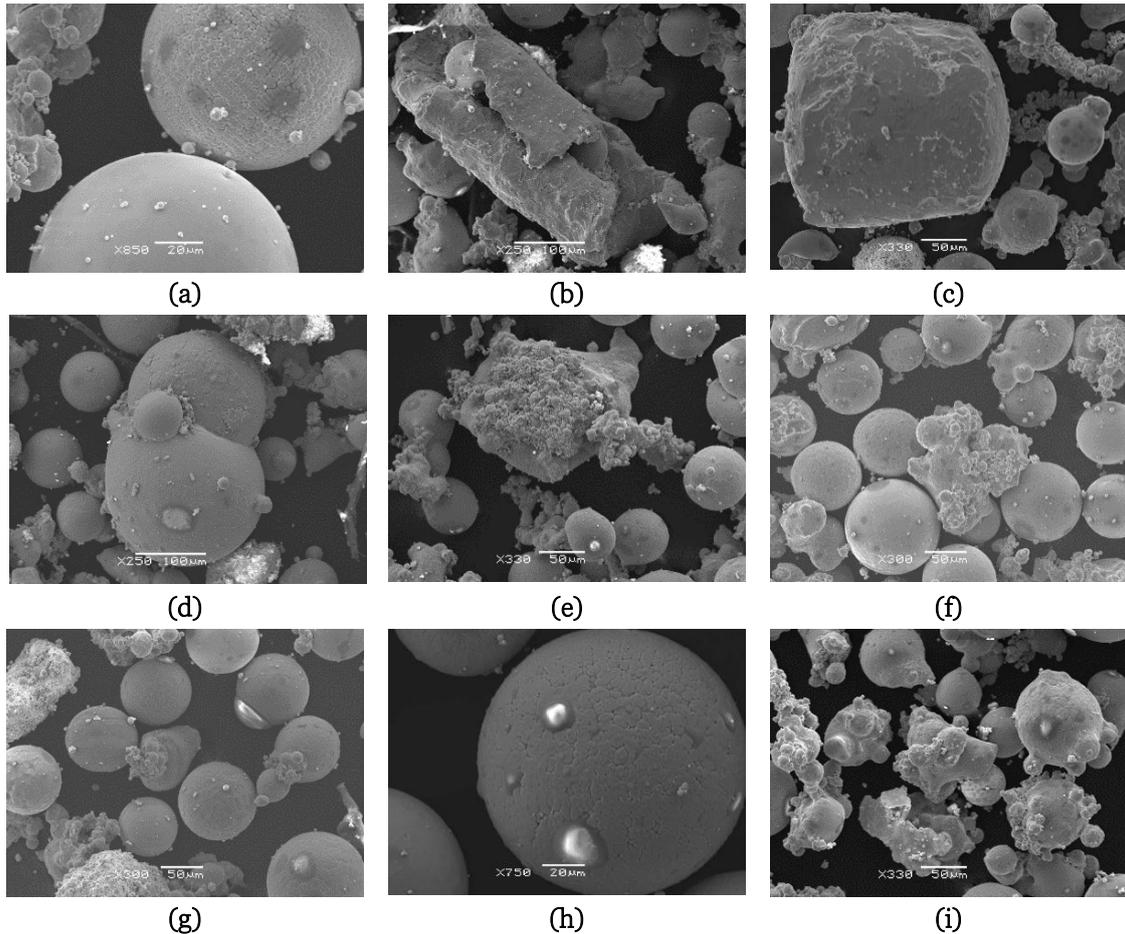


Figura 5.7. Imágenes del SEM con diferentes aumentos (x250, x300, x330, x750 y x850) de las características morfológicas del polvo P_R: (a) partículas grandes con textura suave o cerebelosa; partículas con forma (b) enrollada o (c) irregular deformadas por la acción del rodillo; (d) partículas unidas; (e) y (f) acumulaciones de partículas de diferentes tamaños; (g) y (h) partículas con proyecciones fundidas adheridas; (i) partículas con satélites adheridos.

Además de la evolución morfológica, el reciclaje produce cambios en el color del polvo, como se puede observar en las imágenes capturadas con el macroscopio (Figura 5.8), en ciertas zonas, el color gris (característico del polvo metálico de acero 17-4PH) se vuelve dorado. Estos cambios de color podrían estar relacionados con el aumento de la concentración de oxígeno debido a la formación de óxidos. En el siguiente apartado (5.2.2) se estudia en detalle la composición química del polvo, así como la posible formación de óxidos.

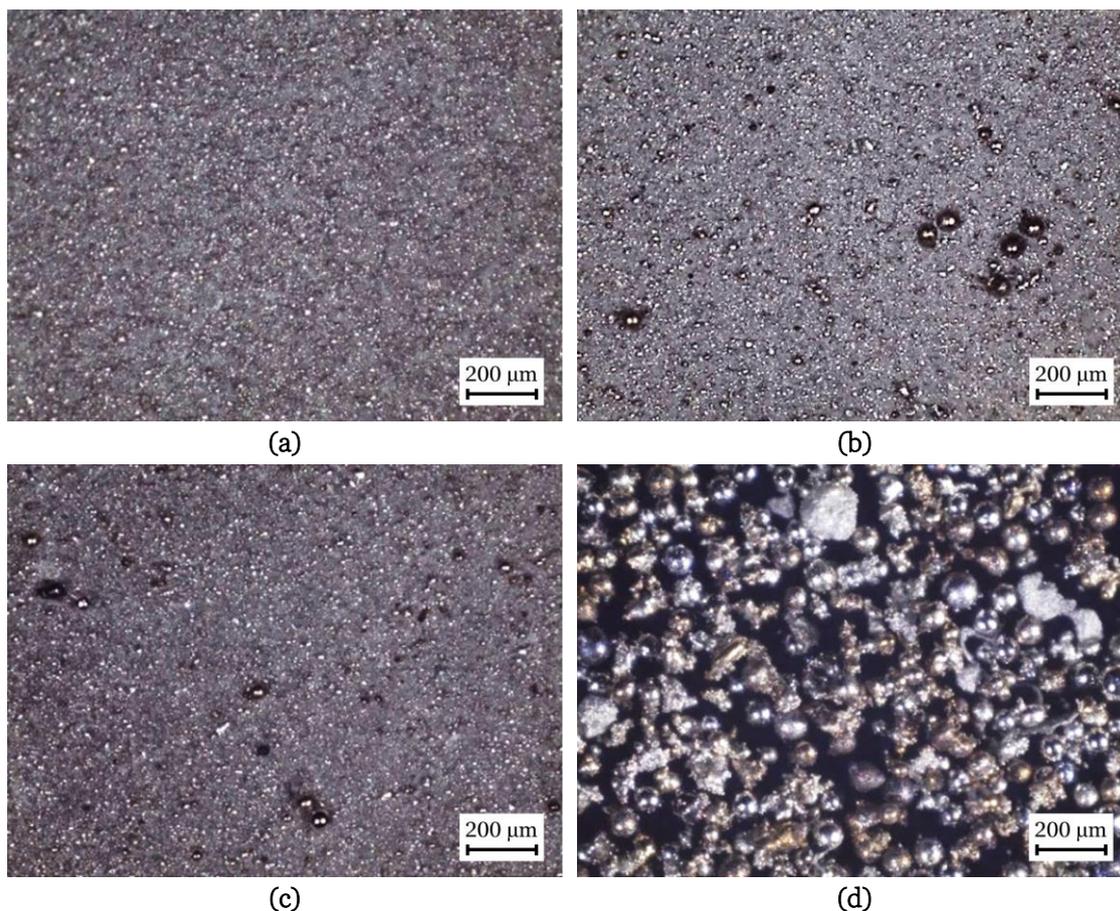


Figura 5.8. Imágenes del macroscopio con x80 aumentos del polvo en los diferentes estados de reciclaje: (a) P₀, (b) P₁₀, (c) P₂₀ y (d) P_R.

5.2.2. Composición química

Con el objetivo de comprobar si aumenta la cantidad de oxígeno con el reciclaje, se realizó el análisis químico mediante la técnica de fusión por gas inerte. Los resultados de este análisis (Tabla 5.2) no revelaron el aumento esperado de oxígeno producido por la formación de óxidos en el polvo reciclado, probablemente debido a su alta estabilidad termodinámica. Por lo que se realizó un análisis EDS más detallado.

Tabla 5.2. Contenido de oxígeno de los estados de polvo P₀, P₁₀ y P₂₀.

Estado de polvo	Composición en peso (%) de oxígeno	% variación
P ₀	0,0970 ± 0,0006	-
P ₁₀	0,1104 ± 0,0062	13,8
P ₂₀	0,1142 ± 0,0055	17,7

La realización de pruebas EDS preliminares demostraron que la composición de las partículas de polvo depende principalmente de su tamaño. En consecuencia, las partículas se clasificaron en tres grupos relacionados con su tamaño. Estos grupos se corresponden con los terciles de la PSD conjunta de los tres estados P₀, P₁₀ y P₂₀ (Figura 5.9 y Tabla 5.3). Los terciles se han establecido en función del diámetro de todas las partículas analizadas en estos tres estados de polvo, de tal forma que cada tercil contiene el mismo número de partículas.

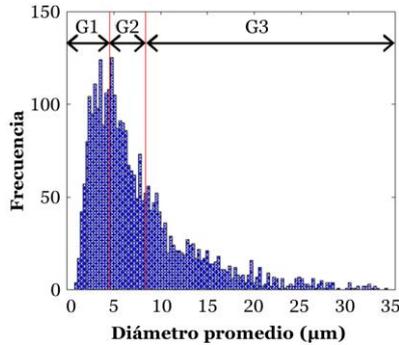


Figura 5.9. PSD conjunta de los estados de polvo P₀, P₁₀ y P₂₀.

Tabla 5.3. Clasificación de grupos según la PSD conjunta de los estados de polvo P₀, P₁₀ y P₂₀.

Grupo	Diámetro (μm)
G1	$\varnothing < 4,58$
G2	$4,58 \leq \varnothing \leq 8,35$
G3	$8,35 < \varnothing$

Tras la clasificación de las partículas, se realizó el análisis EDS de 12 partículas de cada grupo (G1, G2 y G3) para cada estado de polvo (P₀, P₁₀ y P₂₀) (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Composición química promedio según el grupo de tamaño (G1, G2 y G3) para cada estado de polvo (P₀, P₁₀ y P₂₀).

Estado de polvo	Grupo	Composición química (% en peso)							
		Fe	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	Nb	O
P ₀	G1	72,2	17,5	4,4	4,4	0,8	0,8	-	-
	G2	72,0	17,8	4,4	4,2	0,7	0,8	-	-
	G3	72,0	18,0	4,3	4,1	0,7	0,9	-	-
P ₁₀	G1	72,5	18,5	3,6	3,6	0,8	1,0	-	-
	G2	72,7	17,6	4,2	4,1	0,7	0,7	-	-
	G3	69,4	17,5	4,0	4,0	1,4	1,1	-	2,6
P ₂₀	G1	72,5	17,7	4,0	4,2	0,8	0,8	-	-
	G2	72,4	17,8	4,1	4,0	0,7	0,8	-	-
	G3	67,6	17,8	3,7	3,8	1,7	1,6	-	3,9

Los resultados del análisis EDS (Tabla 5.4) muestran la composición de los diferentes elementos del polvo de partida (Tabla 3.1), excepto el niobio, lo que puede estar relacionado con la baja concentración de este elemento en el acero inoxidable 17-4PH (0,15-0,45 % en peso). Además, se detectó una notable concentración de oxígeno en el grupo G3 del polvo reciclado (P₁₀ y P₂₀), así como un aumento del silicio y el manganeso (Tabla 5.4), lo que podría estar relacionado con la formación de óxidos de dichos elementos.

Con la finalidad de analizar en detalle el aumento de la concentración de oxígeno, silicio y manganeso en el grupo G3 del polvo reciclado, se realizaron varios mapas de colores de la composición química utilizando el SEM en combinación con el software AZtec. Debido al amplio rango de valores de diámetro contenidos en el grupo G3 (Figura 5.9), este se dividió en tres subgrupos (A, B y C), correspondientes a sus terciles (Tabla 5.5). El procedimiento de mapeo aplicado en estos subgrupos reveló la aparición de oxígeno únicamente en las partículas de mayor tamaño (G3-C), como se puede observar en el ejemplo de la Figura 5.10.

Tabla 5.5. Clasificación de subgrupos del grupo G3 según la PSD conjunta de los estados de polvo P₀, P₁₀ y P₂₀.

Subgrupos G3	Diámetro (µm)
G3-A	8,35 < Ø < 10,56
G3-B	10,56 ≤ Ø ≤ 15,14
G3-C	15,14 < Ø

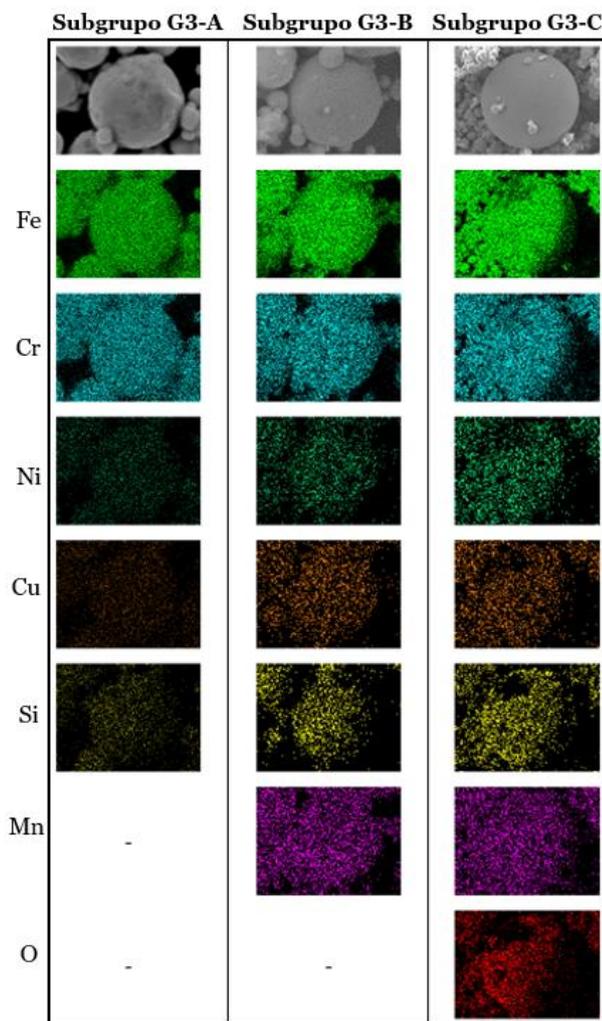


Figura 5.10. Mapa de colores de la composición química de partículas de polvo P₁₀ correspondientes a los subgrupos G3-A, G3-B y G3-C.

A través de un análisis más detallado de las partículas del grupo G3-C, se observó que había partículas en las que el oxígeno no se distribuía homogéneamente, si no que se localizaba en una zona bien definida. Este fenómeno se puede observar en partículas de diferentes tamaños perteneciente tanto al polvo P₁₀ como P₂₀ (Figura 5.11). En algunos casos, estas áreas parecen burbujas unidas a las partículas (como por ejemplo la partícula P₁₀ de tamaño mediano y la P₂₀ de tamaño grande de la Figura 5.11), por lo que podrían ser proyecciones de polvo fundido producidas durante el proceso de fabricación SLM.

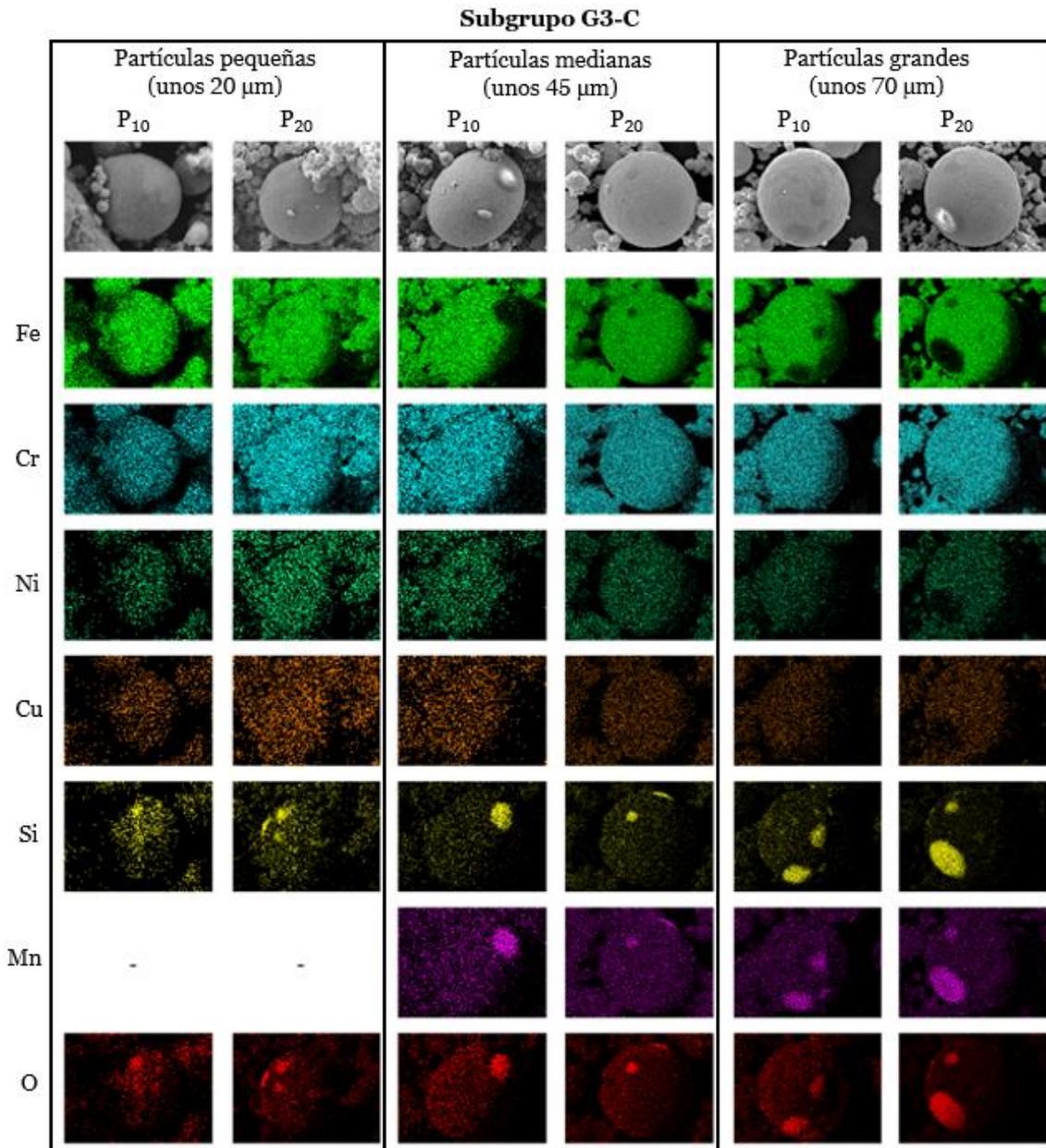
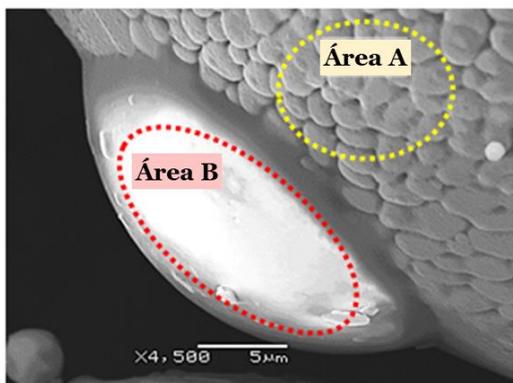


Figura 5.11. Mapa de colores de la composición química de partículas de polvo P₁₀ y P₂₀ correspondientes al subgrupo G3-C con concentraciones de oxígeno localizadas.

La Figura 5.12 muestra un análisis detallado de este efecto para una partícula de polvo P₁₀ del subgrupo G3-C. Como se observa tanto en la imagen del SEM como en la tabla de la Figura 5.12, hay una zona bien definida (Área B) que tiene una composición muy diferente al resto de la partícula (Área A).

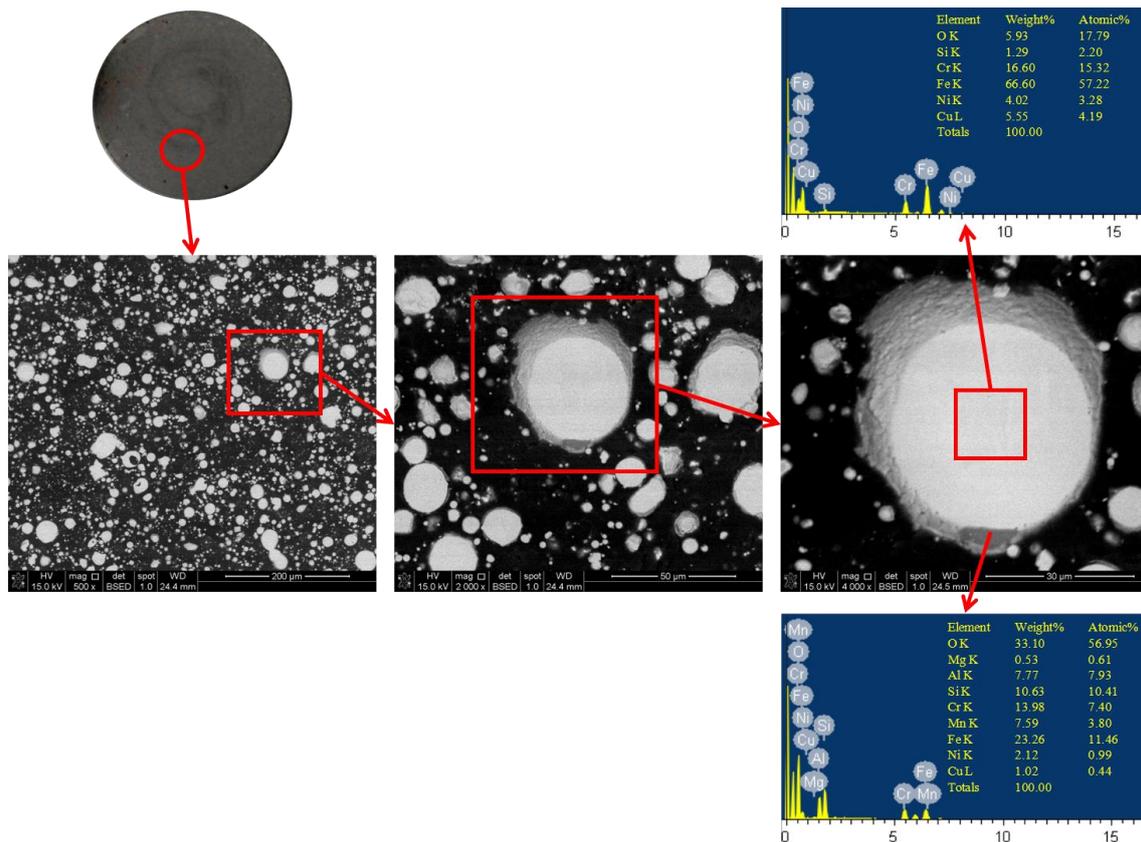


Elemento	% en peso		% atómico	
	Área A	Área B	Área A	Área B
Fe	64,05	7,28	57,64	3,43
Cr	15,76	14,07	15,23	7,12
Ni	4,60	0,48	3,94	0,22
Cu	4,87	0,57	3,85	0,24
Si	1,07	17,08	1,91	15,99
Mn	0,92	17,69	0,84	8,47
O	5,45	39,27	16,59	64,55

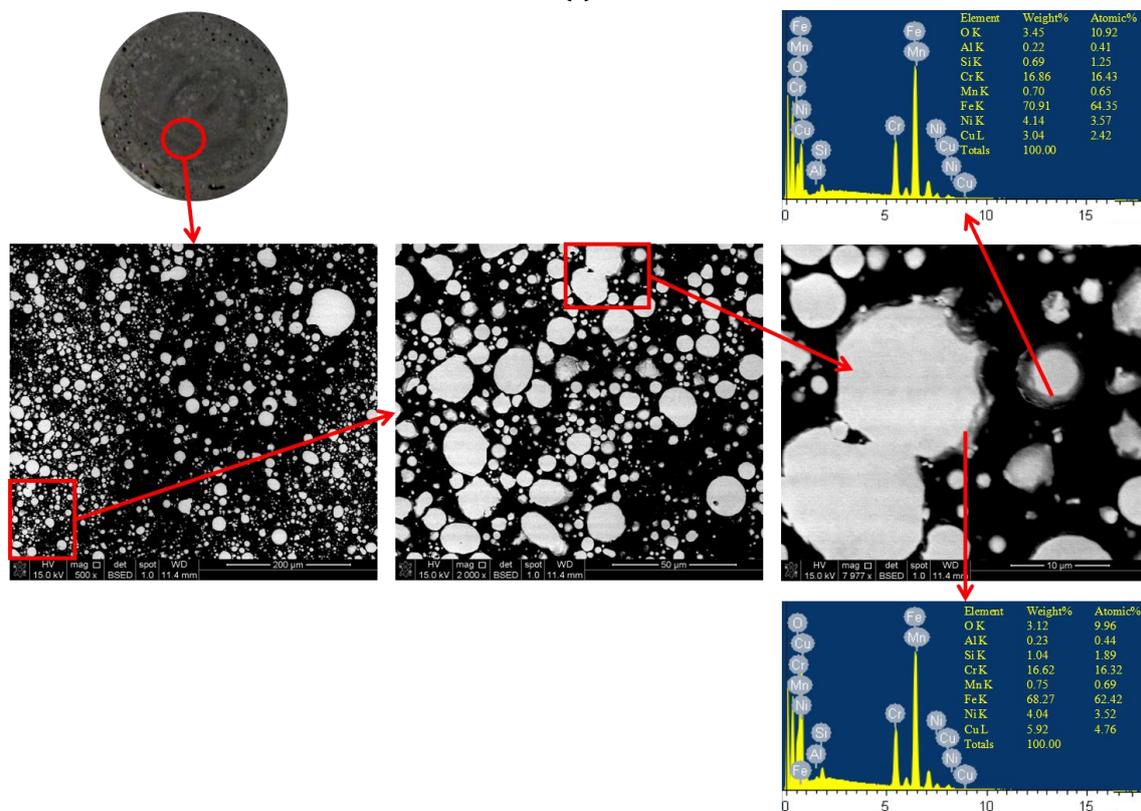
Figura 5.12. Imagen del SEM con x4.500 aumentos y análisis EDS de una partícula de polvo P₁₀ correspondiente al subgrupo G3-C con concentración de óxidos localizada.

Las concentraciones de oxígeno, silicio y manganeso aumentan en el Área B, al igual que sucede en las partículas del grupo G3 de los polvos reutilizados (Tabla 5.4). Aunque la mayor parte de la partícula tiene una concentración de oxígeno apreciable, el Área B es una zona de concentración de óxido, ya que la concentración de oxígeno aumenta drásticamente (Figura 5.12). La concentración atómica de oxígeno puede explicarse, con bastante precisión (<1 % de error en la estimación), por la formación de óxidos de todos los elementos de la aleación detectados en el análisis, es decir, Fe₂O₃, Cr₂O₃, NiO, Cu₂O, SiO₂ y MnO₂. Esto no aplica en el caso del Área A. Por lo tanto, se puede afirmar que el Área B de esta partícula (Figura 5.12) podría considerarse un área completamente oxidada ubicada dentro de una partícula también oxidada. Un razonamiento similar se podría aplicar a la partícula P₁₀ de tamaño mediano y P₂₀ de tamaño grande que se muestran en la Figura 5.11.

A continuación, se muestra algún ejemplo de los análisis EDS realizados mediante el SEM sobre las muestras de polvo engastadas para los dos estados de reciclaje P₁₀ (Figura 5.13a) y P₂₀ (Figura 5.13b). En la Figura 5.13 se puede observar la composición química de partículas de polvo que contienen oxígeno.



(a)



(b)

Figura 5.13. Imágenes del SEM y análisis EDS de partículas de polvo: (a) P₁₀ y (b) P₂₀.

5.2.3. Microestructura

Las imágenes tomadas en el SEM (Figura 5.14) muestran la microestructura del polvo en los diferentes estados de reciclaje. Como se puede observar en la Figura 5.14, este polvo presenta una microestructura muy fina, debido principalmente a la elevada velocidad de enfriamiento, lo que favorece que el tamaño de grano sea pequeño.

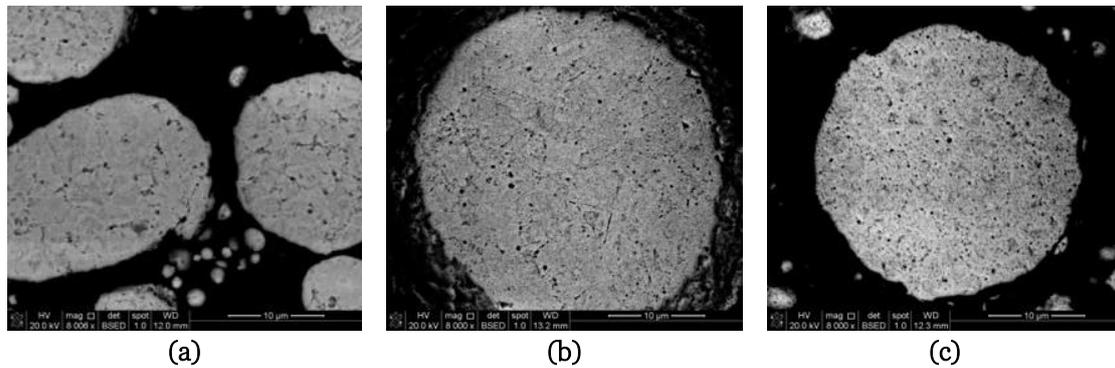


Figura 5.14. Imágenes del SEM de la microestructura de partículas de polvo: (a) P₀, (b) P₁₀ y (c) P₂₀.

El análisis XRD se realizó para los dos estados límites (P₀ y P₂₀). Como se muestra en los resultados de la Figura 5.15, las proporciones de fase varían ligeramente cuando se reutiliza el polvo, produciéndose un ligero aumento de la fase γ . Este resultado concuerda con los estudios de otros investigadores, en los se produce una ligera variación de las proporciones de fase en las piezas impresas cuando se utiliza nitrógeno como gas inerte en la cámara durante el proceso de fabricación (Murr *et al.*, 2012), aplicable, en este caso, a los polvos que se ven afectados térmicamente durante el proceso SLM. La proporción de austenita permanece casi constante debido a la característica estabilizadora de austenita del nitrógeno. Sin embargo, esta ligera variación puede afectar a las propiedades mecánicas de las piezas impresas.

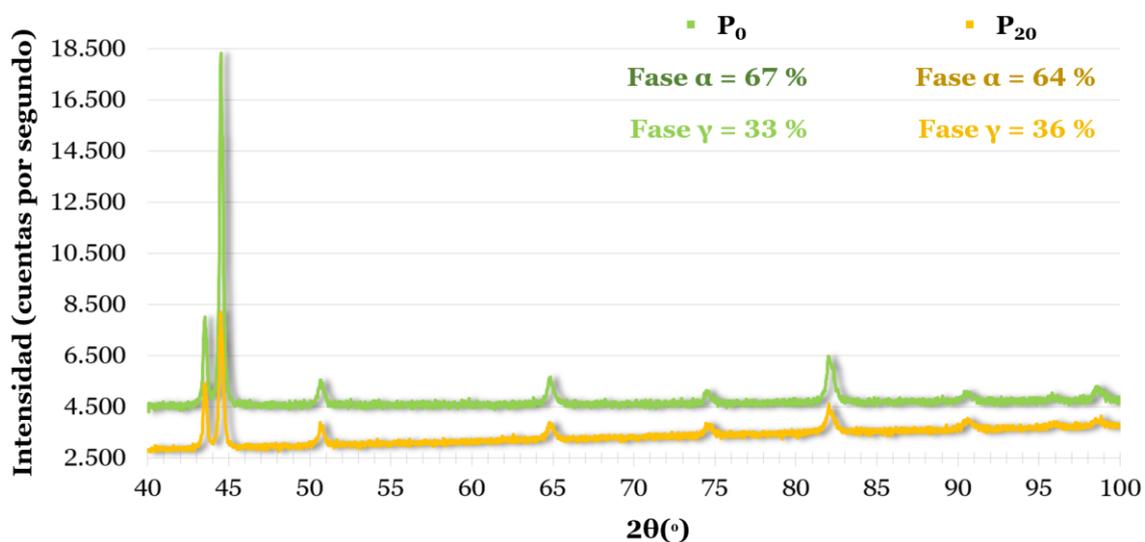


Figura 5.15. Resultados esquemáticos del análisis XRD del polvo P₀ y P₂₀.

5.2.4. Conclusiones de la caracterización del polvo

En este apartado, el polvo de acero inoxidable 17-4PH, utilizado en el proceso de fabricación SLM, ha sido evaluado en diferentes grados de reciclaje con el objetivo de caracterizar los cambios sufridos y determinar el número apropiado de ciclos de reciclaje para garantizar un rendimiento óptimo del proceso SLM. Para ello, el polvo se ha caracterizado morfológica, química y microestructuralmente en su estado original y después de 10 y 20 ciclos de fabricación-reciclaje. El proceso de reciclaje consiste en aspirar el polvo sobrante de la fabricación, tamizarlo y volver a cargarlo en el almacén de polvo de la máquina SLM para una nueva producción.

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ El análisis morfológico revela cambios (tamaño y forma) notables en el polvo después de 20 ciclos de fabricación-reciclaje. Dichos cambios podrían afectar las propiedades mecánicas de las piezas impresas.
- ❖ El análisis químico realizado mediante la técnica de fusión por gas inerte muestra concentraciones estables de oxígeno (debido a la formación de óxidos termodinámicamente estables) que no se describen en la especificación original del material. Por otro lado, el análisis EDS revela que la composición química de las partículas de polvo cambia con el reciclaje, aumentando notablemente las concentraciones de óxido en las partículas de mayor tamaño ($>15 \mu\text{m}$ de diámetro), así como en ciertas áreas bien definidas de algunas partículas, también de mayor tamaño.
- ❖ El análisis microestructural de XRD muestra un ligero incremento de la fase austenita con el reciclaje del polvo, lo que puede estar relacionado con el carácter estabilizador de austenita del gas inerte (nitrógeno) utilizado durante el proceso de fabricación SLM.

En resumen, en este estudio se han demostrado cambios morfológicos, químicos y microestructurales del polvo de acero inoxidable 17-4PH, utilizado en el proceso SLM, relacionados con su reciclaje. Los cambios morfológicos concuerdan con los obtenidos por otros autores para este material, a pesar de que en su caso el proceso SLM se realiza con valores de potencia considerablemente mayores. Debido al efecto revisado en la literatura sobre las características del polvo en la calidad de las piezas impresas, el reciclaje del polvo es un aspecto importante que debe considerarse.

5.3. CALIDAD DE LAS PIEZAS SLM

Con la finalidad de analizar la influencia del reciclaje del polvo de acero inoxidable 17-4PH en la calidad de las piezas impresas en SLM y continuando con el estudio previo sobre la caracterización del polvo en diferentes grados de reciclaje (apartado 5.2), este apartado se centra en la evaluación de las piezas fabricadas a partir de los dos estados de reciclaje límites, polvo en estado virgen (P_0) y polvo sometido a 20 ciclos de fabricación-reciclaje (P_{20}). La Figura 5.16 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio.

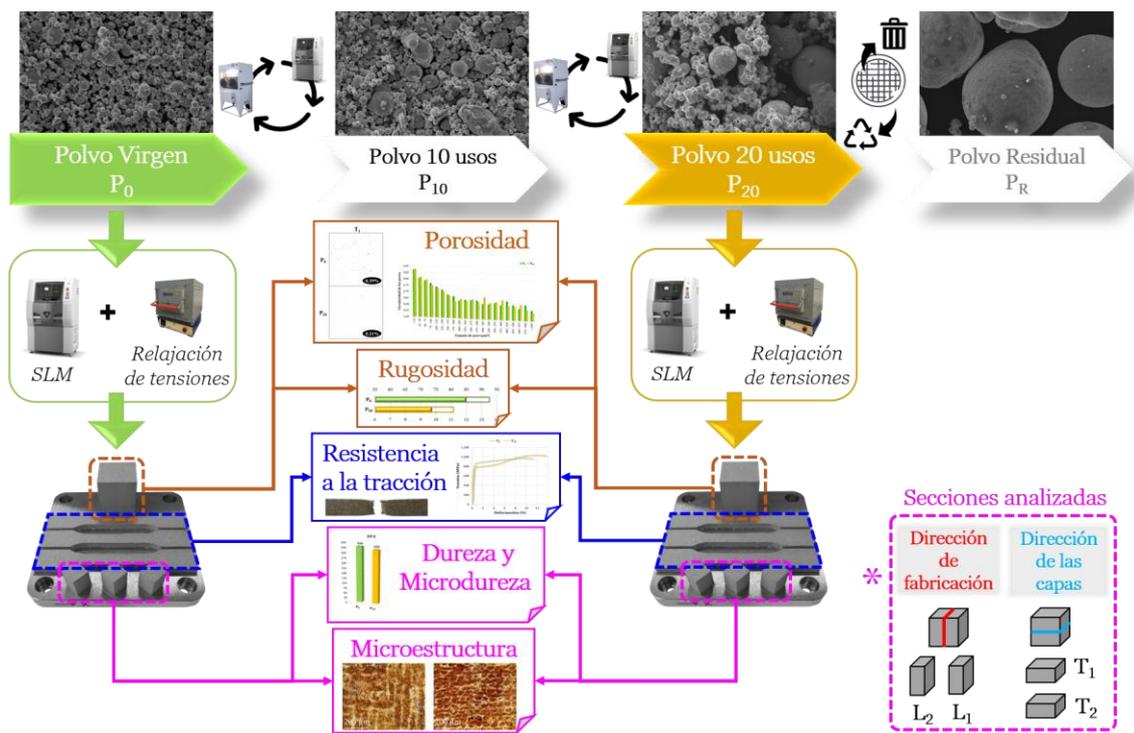


Figura 5.16. Metodología de evaluación de la calidad de las piezas fabricadas por SLM a partir de polvo en diferentes estados de reciclaje.

Se fabricó un conjunto de piezas a partir del polvo P_0 y P_{20} , se sometió al tratamiento térmico de relajación de tensiones y se separó de la placa base. Dichas piezas fueron diseñadas para la evaluación de las propiedades del material de partida (densidad y microestructura), el acabado superficial (rugosidad) y las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y dureza). Como se muestra en la Figura 5.16, este conjunto de piezas está compuesto por: un cubo de 25 mm de lado destinado al análisis de la densidad/porosidad (mediante el principio de Arquímedes), así como de la rugosidad superficial (realizada tanto en las caras laterales como en la superficie superior); tres probetas diseñadas para la evaluación de la resistencia a la tracción; y tres cubos de 10 mm de lado destinados al análisis de la dureza, la porosidad interna, la microestructura y la microdureza. Uno de los cubos pequeños se utilizó para el análisis de la microestructura a través del ensayo de XRD, realizado tanto en las caras laterales como en la superior. Los otros dos cubos fueron divididos por la mitad: uno según

la dirección de fabricación o longitudinal (L_1 y L_2) y el otro según la dirección de las capas fabricadas o transversal (T_1 y T_2) (Figura 5.16). Lo que permite evaluar las diferentes propiedades en función de la dirección (transversal y longitudinal). Las cuatro muestras se encapsularon y pulieron para el análisis de la porosidad interna. Dicho análisis se llevó a cabo mediante la creación de los mosaicos de las imágenes de las superficies internas pulidas, las cuales fueron capturadas mediante el microscopio óptico con x50 aumentos y procesadas utilizando el software ImageJ. A continuación, las superficies de las muestras se atacaron químicamente con Vilella para el análisis de la microestructura, evaluando también la microdureza de las fases reveladas. Los resultados de microdureza (HV0,01) se obtuvieron a partir de cinco medidas tomadas en cada fase para cada una de las muestras (T_1 , T_2 , L_1 y L_2). Finalmente, se realizaron los ensayos de dureza (HV2), cuyos resultados son el promedio de nueve mediciones de la superficie distribuidas en una matriz de puntos equidistantes a 2,5 mm. Todo ello se realizó para cada estado de polvo (P_0 y P_{20}).

5.3.1. Densidad/porosidad

La Figura 5.17 muestra el análisis de la porosidad de las piezas P_0 y P_{20} . El porcentaje de porosidad total es de 1,18 % y 1,02 % en las muestras fabricadas a partir de polvo P_0 y P_{20} , respectivamente. Esto supone una disminución del 0,16 % en la porosidad tras 20 ciclos de reciclaje del polvo. La porosidad externa (P_e) es prácticamente la misma en ambas condiciones. Sin embargo, en los resultados de la porosidad interna (P_i) se observa mayor variación entre las piezas fabricadas con polvo virgen (0,39 %) y polvo reciclado (0,24 %).

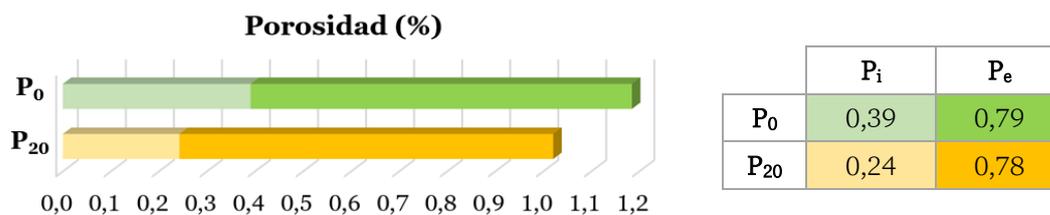


Figura 5.17. Resultados de porosidad de las muestras P_0 y P_{20} (P_i : porosidad interna; P_e : porosidad externa).

El estudio de la porosidad interna, realizado a través de las imágenes obtenidas con el microscopio óptico y analizadas con el software ImageJ (Figura 5.18), proporciona información más detallada sobre las características (tamaño y forma) de los poros encontrados en las diferentes muestras. Respecto al tamaño promedio de poro, se obtuvo un valor de $82 \mu\text{m}^2$ (P_0) y $50 \mu\text{m}^2$ (P_{20}), lo que revela que, en general, el tamaño de poro es mayor en las piezas fabricadas con polvo virgen. Asimismo, el mayor tamaño máximo de poro se obtuvo en el estado P_0 , alcanzando un valor de $6.535 \mu\text{m}^2$ frente a los $4.542 \mu\text{m}^2$ de las muestras del estado P_{20} . El tamaño mínimo de poro en ambos tipos de polvo fue de $0,5 \mu\text{m}^2$. Respecto a la circularidad de los poros, se obtuvo un valor ligeramente superior en las piezas

fabricadas con polvo reciclado, alcanzando valores promedios de 0,78 (P_0) y 0,81 (P_{20}). La Figura 5.18 muestra la porosidad interna tanto de las secciones transversales como longitudinales, entre las cuales no se aprecian grandes diferencias.

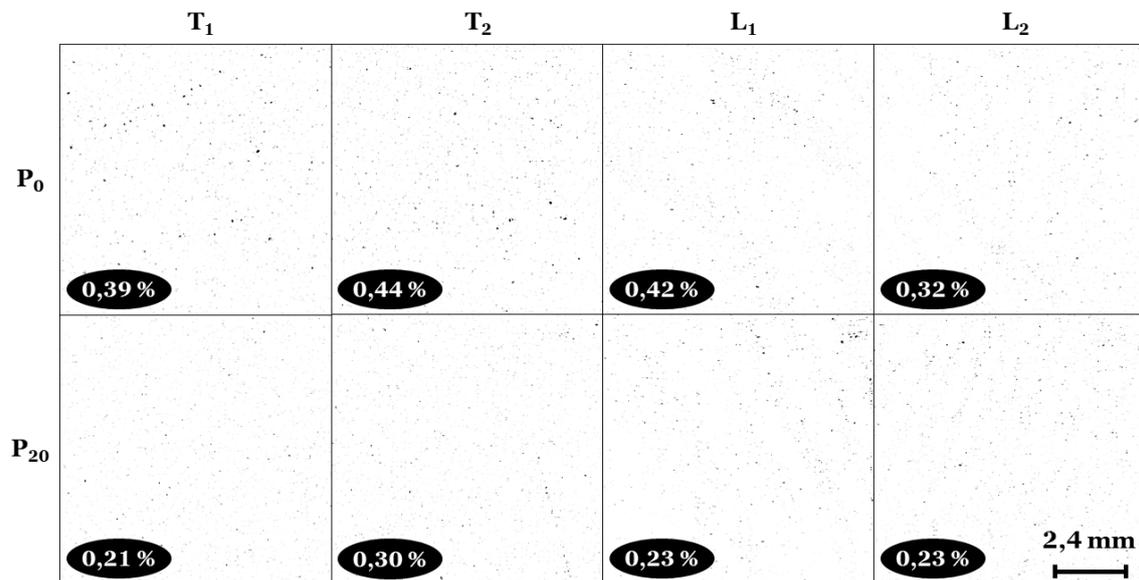


Figura 5.18. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T₁, T₂, L₁ y L₂ de las muestras P₀ y P₂₀.

Analizando más en detalle el número y la circularidad de los poros en función de su tamaño, se observa una clara tendencia decreciente a medida que aumenta el tamaño de poro (Figura 5.19 y Figura 5.20). Los valores de la circularidad en función del tamaño del poro se ajustan a una función logarítmica, es decir, disminuye rápidamente y luego se nivela (Figura 5.19). La gráfica del número de poros en función de su tamaño se ajusta perfectamente a una función potencial (Figura 5.20). Ambas tendencias se muestran en ambos estados de polvo P₀ y P₂₀, sin observarse grandes diferencias entre ellos.

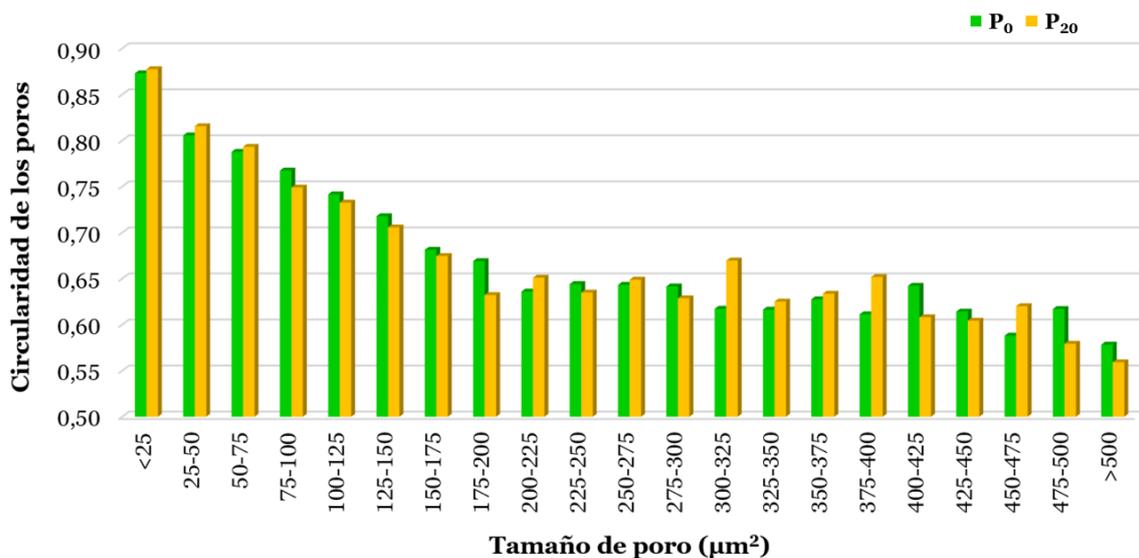


Figura 5.19. Circularidad promedio de los poros en función de su tamaño en las muestras P₀ y P₂₀.

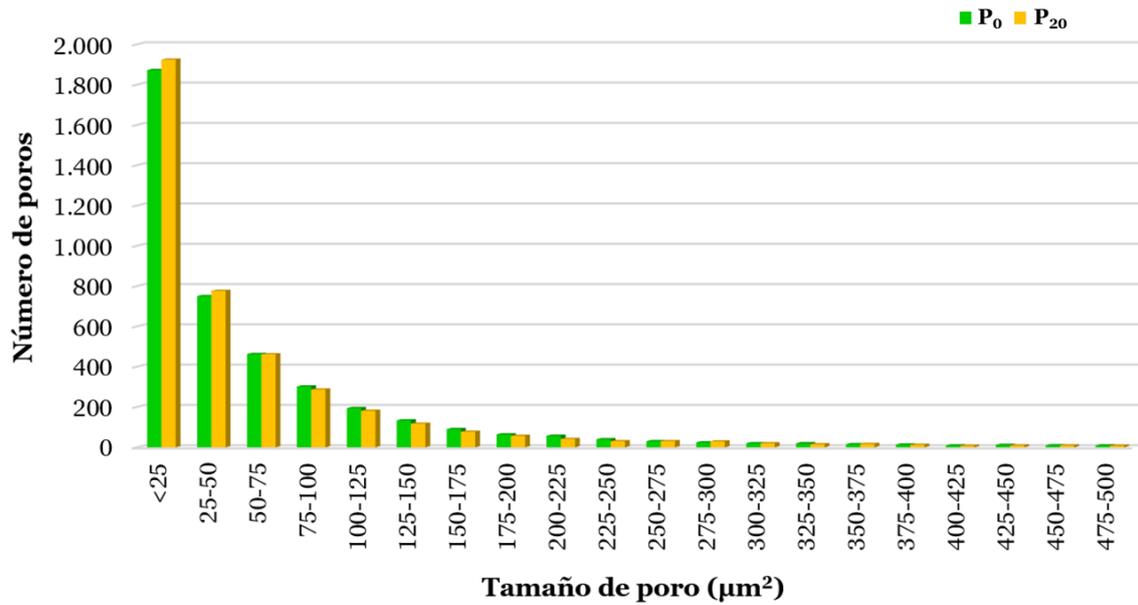


Figura 5.20. Número promedio de poros en función de su tamaño en las muestras P₀ y P₂₀.

La forma y la distribución de los poros en las piezas fabricadas por SLM están directamente relacionadas con la causa de su formación. Los poros esféricos suelen ser el resultado de los gases atrapados en la piscina de fusión debido a un aporte excesivo de energía, así como a las altas velocidades de enfriamiento durante el proceso de solidificación. Dicha porosidad se distribuye aleatoriamente en las piezas y es difícil de eliminar por completo. Por otro lado, los defectos irregulares suelen ser producidos por la falta de fusión, causada principalmente por la insuficiente entrada de energía durante el proceso SLM, y generalmente se distribuyen entre las pasadas de escaneo y entre las capas depositadas (Zhang, Li y Bai, 2017).

De los resultados obtenidos en este apartado se puede concluir que la porosidad disminuye ligeramente con el reciclaje del polvo, debido al cambio morfológico (tamaño y forma) de las partículas (apartado 5.2.1). La combinación de partículas pequeñas y grandes en el polvo reutilizado favorece la ocupación de los huecos, la fusión y, por lo tanto, la disminución de la porosidad. Además, la fabricación SLM utilizando polvo reciclado da como resultado piezas con poros generalmente de menor tamaño y mayor circularidad que las piezas fabricadas con polvo virgen. En cuanto a la porosidad interna, los resultados son similares tanto en la dirección perpendicular (sección longitudinal) como paralela (sección transversal) a las capas fabricadas, lo que indica una distribución de poros homogénea en todo el volumen de la pieza.

5.3.2. Rugosidad

La rugosidad de las piezas impresas se ve afectada por el reciclaje del polvo (Figura 5.21). El parámetro R_a disminuye 2,25 µm después de 20 ciclos de fabricación-reciclaje, mientras que el parámetro R_t se reduce 11,76 µm. Esta mejora en el acabado superficial de las piezas

fabricadas a partir de polvo reciclado podría estar relacionada también con la morfología de las partículas de polvo (al igual que la porosidad), cuya distribución sobre la capa de polvo puede dar lugar a una fusión más uniforme.

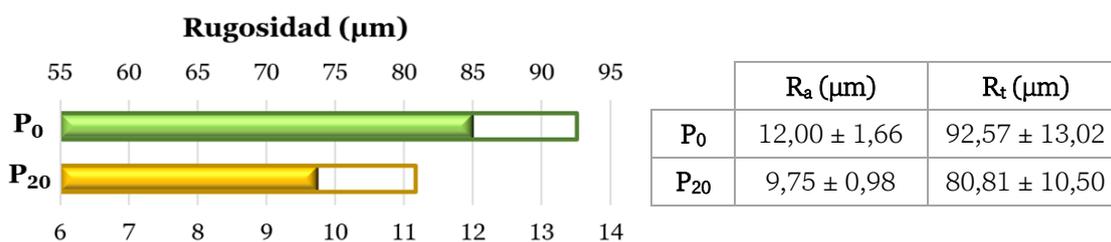


Figura 5.21. Resultados de rugosidad (R_a y R_t) de las muestras P_0 y P_{20} .

La Figura 5.21 muestra los valores de rugosidad promedio de las piezas evaluadas, mientras que la Tabla 5.6 presenta los resultados más detallados según el tipo de superficie externa del cubo, superior o lateral (promedio de las cuatro caras laterales). Como era de esperar, los valores de rugosidad más elevados se obtuvieron en la superficie superior de ambos estados de polvo (Tabla 5.6). Esta superficie es donde se hacen visibles las marcas de la estrategia de escaneo láser utilizada en el proceso de fabricación, caracterizada, en este caso, por parches hexagonales (estrategia de escaneo hexagonal).

Tabla 5.6. Resultados de rugosidad (R_a y R_t) de las superficies superior y laterales de las muestras P_0 y P_{20} .

Muestra	Superficie	R_a (μm)	R_t (μm)
P_0	Superior	$12,47 \pm 0,77$	$97,77 \pm 9,36$
	Lateral	$11,83 \pm 1,87$	$90,62 \pm 13,75$
P_{20}	Superior	$10,52 \pm 0,48$	$80,92 \pm 12,73$
	Lateral	$9,46 \pm 0,96$	$80,77 \pm 9,71$

5.3.3. Microestructura y microdureza

La Figura 5.22 muestra la microestructura de las secciones transversal (T_1) y longitudinal (L_1) de ambos estados de polvo tras la acción del atacante químico Vilella. Las secciones transversales se caracterizan por las marcas de la trayectoria recorrida por el láser (visibles como líneas paralelas), mientras que las secciones longitudinales revelan las piscinas de fusión. Estas piscinas de fusión muestran un color oscuro (martensita) en el interior rodeado por una zona clara (austenita) en el borde (Figura 5.22). Este análisis no reveló diferencias notables entre ambos tipos de polvo. De igual forma, los resultados del ensayo de

microdureza fueron similares para ambos estados de polvo (P_0 y P_{20}) y para ambas secciones analizadas (transversal y longitudinal). La zona oscura exhibió un valor promedio de microdureza de 300 HV0,01 frente a los 237 HV0,01 de la zona clara.

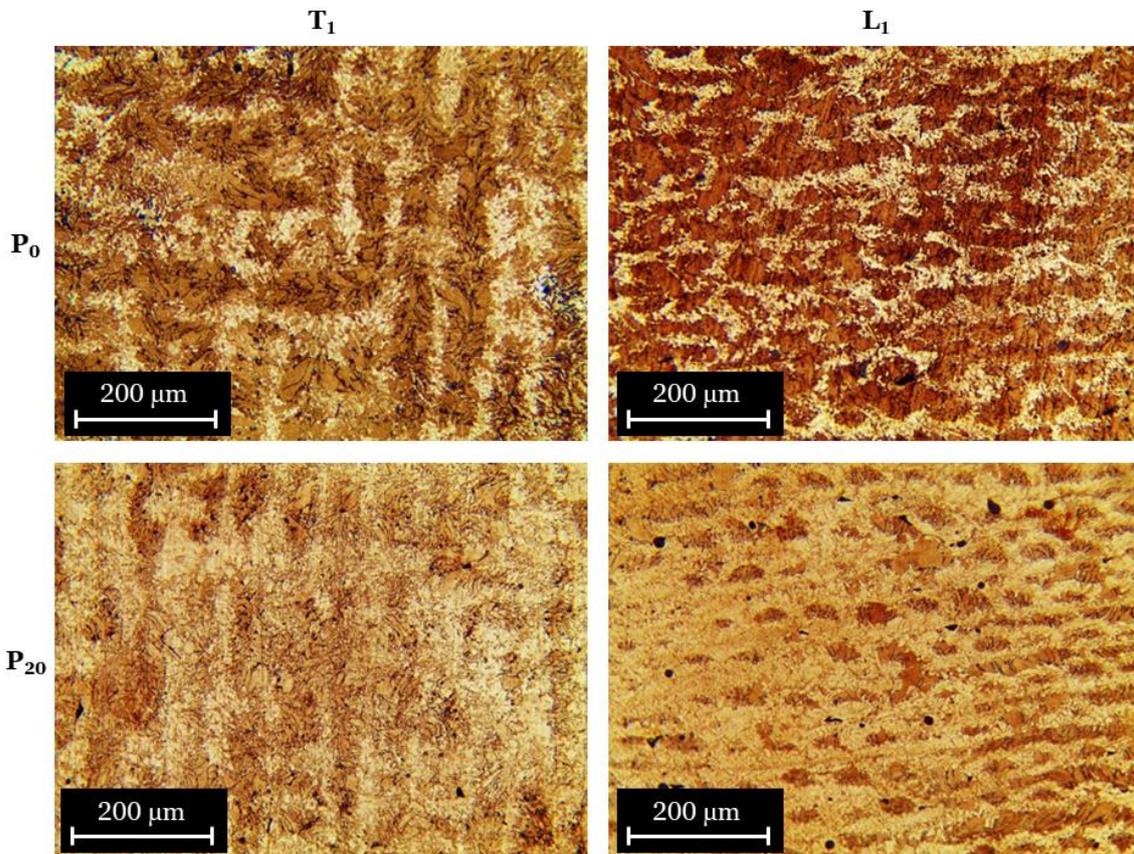


Figura 5.22. Imágenes del microscopio óptico con x100 aumentos de la microestructura de la sección transversal (T_1) y lateral (L_1) de las muestras P_0 y P_{20} .

Los resultados del análisis de XRD, tanto de las caras laterales como de las caras superiores de las muestras P_0 y P_{20} , se representan esquemáticamente en la Figura 5.23. Las proporciones de cada fase se han calculado de acuerdo al procedimiento explicado en el apartado 5.2. En general, las proporciones de las fases son muy similares independientemente del estado de reciclaje del polvo y de la superficie analizada. El porcentaje de fase y aumenta ligeramente con la reutilización del polvo, alcanzando un valor promedio de 31,5 % en las muestras P_0 frente al 32,5 % de las muestras P_{20} . Este ligero incremento en la proporción de la fase y sigue la misma tendencia que en el análisis de XRD del polvo correspondiente a estos dos estados de reciclaje (Figura 5.15). Como se analiza en los siguientes apartados (5.3.4 y 5.3.5), esta ligera variación en las proporciones de la fase y produce ligeras variaciones en las propiedades mecánicas de las piezas impresas.

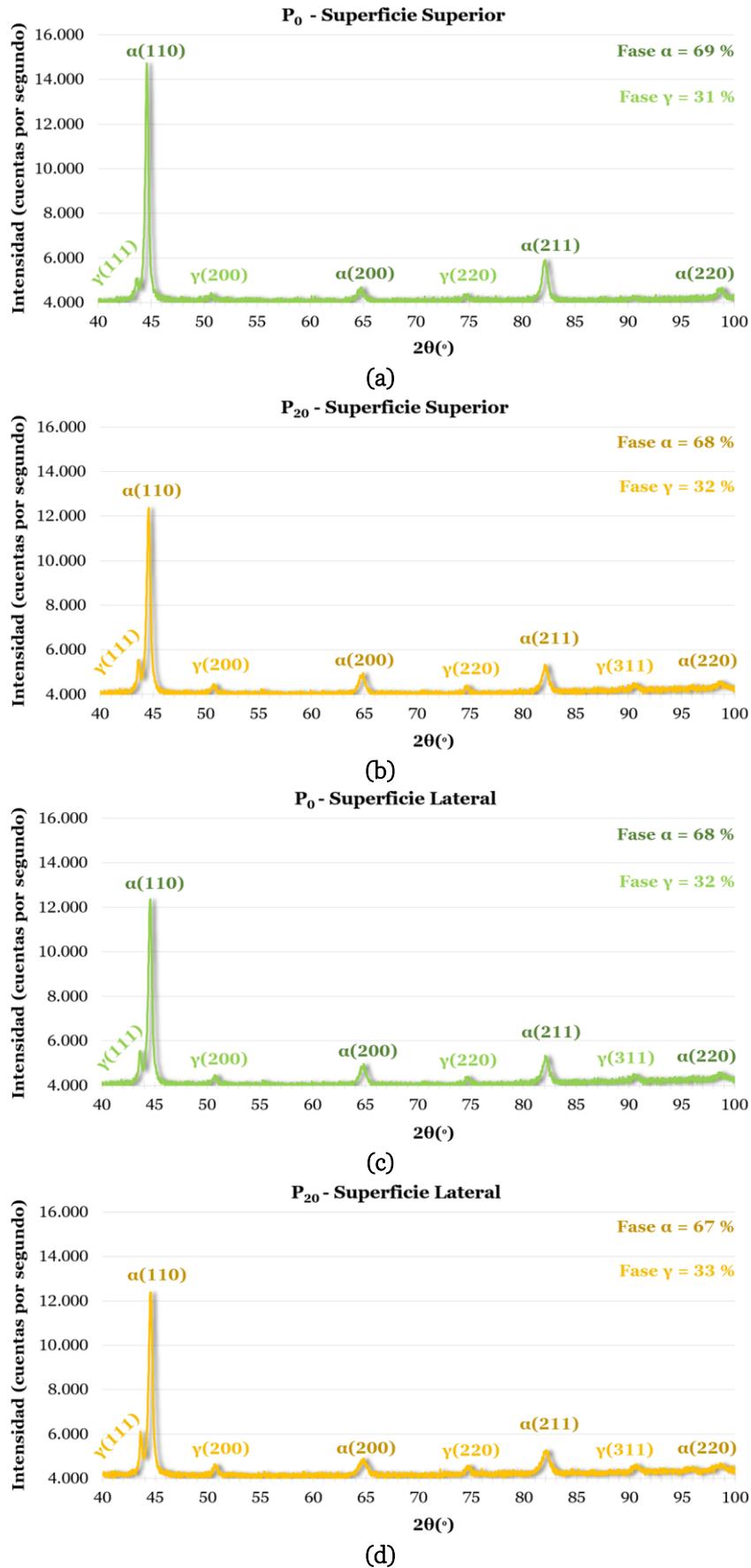


Figura 5.23. Resultado esquemático del análisis XRD realizado en la cara superior de las muestras: (a) P₀ y (b) P₂₀; y en la cara lateral de las muestras: (c) P₀ y (d) P₂₀.

Los análisis de XRD de las muestras recogen los datos de intensidad en función del ángulo de difracción (2θ), lo que da como resultado una serie de planos de refracción. Los patrones de XRD (Figura 5.23) muestran la presencia de picos relacionados tanto con la austenita (fase γ) como con la martensita (fase α). La Tabla 5.7 muestra la relación de intensidad máxima (I/I_{\max}) de las muestras en función de la superficie analizada (superior y lateral) y del estado de reciclaje del polvo (P_0 y P_{20}). Independientemente del tipo de polvo utilizado en la fabricación SLM, el plano (110) presenta la máxima relación de intensidad pico (I/I_{\max}) entre planos atómicos (Figura 5.23 y Tabla 5.7), tomándose como referencia. Como se muestra en los resultados, existe una ligera variación en la relación I/I_{\max} entre las superficies superior y lateral de las muestras, sin suponer cambios significativos.

Tabla 5.7. Relación de intensidad máxima de las superficies superior y lateral de las muestras P_0 y P_{20} .

Muestra	Superficie	Relación de intensidad máxima (I/I_{\max})							
		(111)	(110)	(200)	(200)	(220)	(211)	(311)	(220)
P_0	Superior	35	100	30	31	30	40	-	32
	Lateral	45	100	36	40	35	43	36	37
P_{20}	Superior	39	100	33	34	32	43	33	35
	Lateral	49	100	38	39	37	43	38	38

5.3.4. Resistencia a la tracción

La Figura 5.24 muestra los valores promedio resultantes del ensayo de resistencia a la tracción realizado en las muestras fabricadas con polvo P_0 y P_{20} . El comportamiento a tracción varía en función del reciclaje del polvo, el valor de R_m aumenta 54 MPa mientras que el valor de R_p disminuye 89 MPa con la reutilización del polvo. Sin embargo, el porcentaje de reducción de la sección producido en la zona de la rotura (Z) es similar en ambos estados de polvo (aproximadamente del 30 %). Las piezas fabricadas con polvo reciclado son más dúctiles que las impresas a partir de polvo virgen. La disminución de concentradores de tensión, debido a la disminución de la porosidad, puede ser la causa de esta ligera mejora en el comportamiento a tracción con la reutilización del polvo metálico.

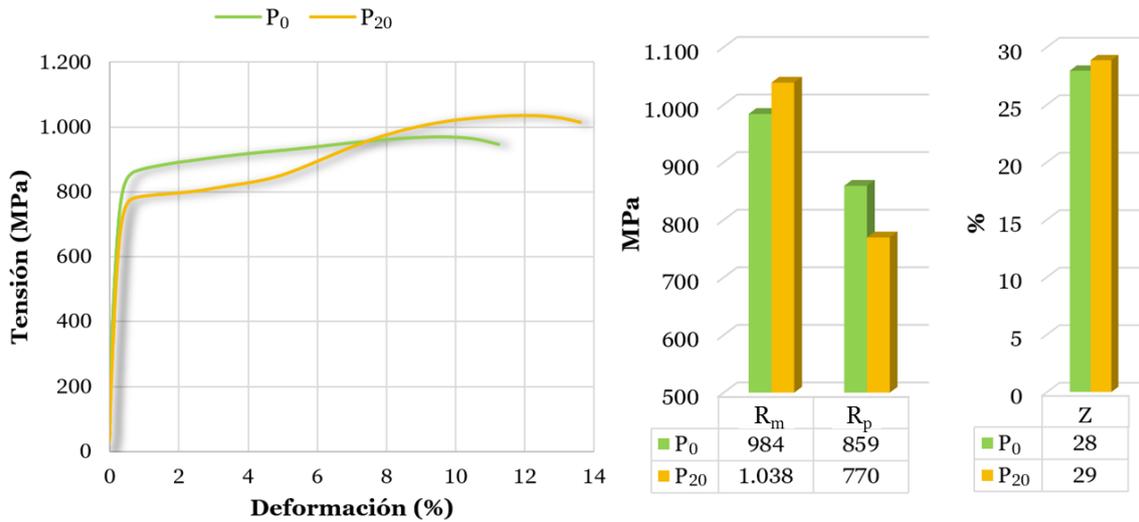


Figura 5.24. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras P₀ y P₂₀ (curva tensión-deformación, R_m, R_p y Z).

La Figura 5.25e y la Figura 5.25f muestran la reducción de la sección producida en la zona de la rotura de los estados de polvo P₀ y P₂₀, respectivamente, observándose un comportamiento similar. Las imágenes tomadas mediante el SEM de la superficie de fractura producida por el ensayo de tracción en las muestras P₀ (Figura 5.25a y Figura 5.25c) y P₂₀ (Figura 5.25b y Figura 5.25d) muestran la porosidad y las inclusiones presentes en esta zona, causantes directos de la nucleación de los huecos hasta producir su unión y, finalmente, la rotura. Dicha porosidad se debe a la falta de fusión del polvo o al gas atrapado durante el proceso de impresión, mientras que las inclusiones son principalmente producidas por el polvo sin fundir y las partículas de salpicaduras. Independientemente de la condición inicial del polvo, no hay cambios apreciables ni en la morfología ni en el tamaño de los huecos.

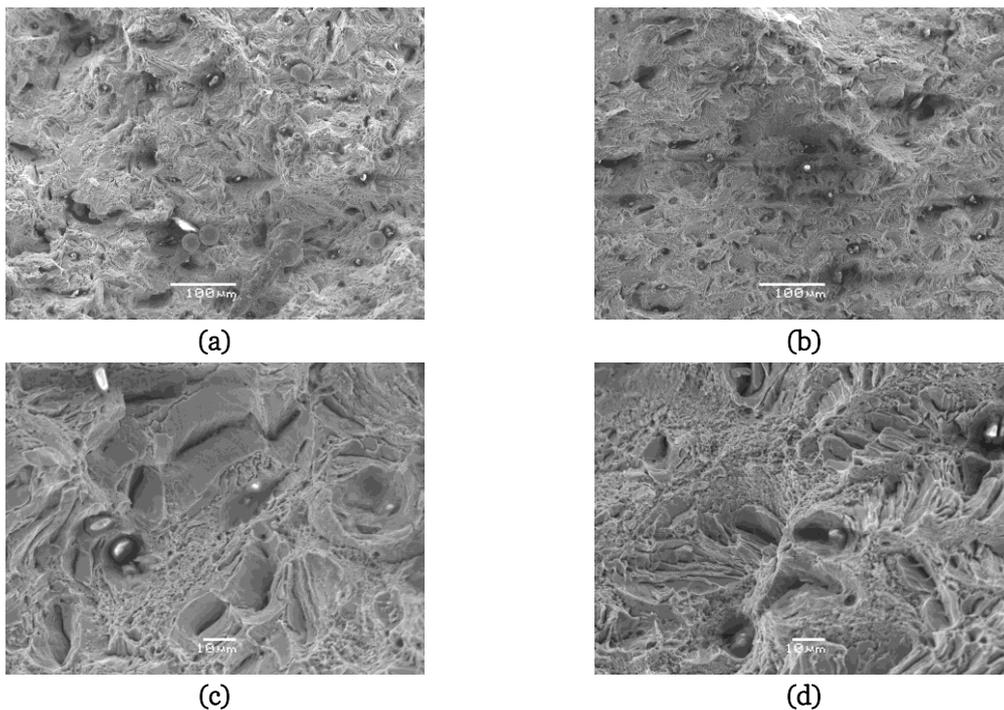




Figura 5.25. Imágenes del SEM de las superficies de fractura por tracción con x200 ((a) P₀ y (b) P₂₀) y x1.000 ((c) P₀ y (d) P₂₀) aumentos. Estricción debida a la fractura por tracción de las muestras: (e) P₀ y (f) P₂₀.

5.3.5. Dureza

La dureza de las distintas muestras varía ligeramente, alcanzando valores promedio de (336 ± 11) HV2 y (320 ± 7) HV2 en los estados P₀ y P₂₀, respectivamente (Figura 5.26). Como se muestra en la Tabla 5.8, los resultados son ligeramente superiores para el estado de polvo virgen independientemente de la sección analizada. Por otro lado, no se aprecian grandes diferencias entre las secciones transversales y longitudinales. Estos resultados concuerdan con los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la tracción (apartado 5.3.4).

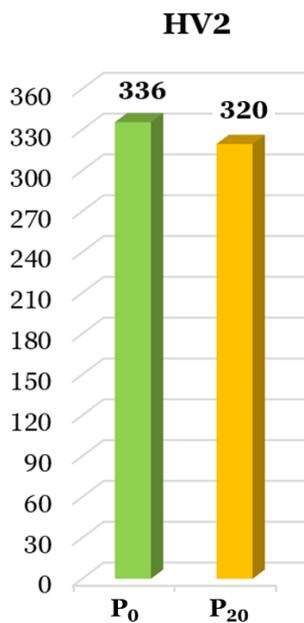


Figura 5.26. Resultados promedio de dureza de las muestras P₀ y P₂₀.

Tabla 5.8. Resultados de dureza de las secciones T₁, T₂, L₁ y L₂ de las muestras P₀ y P₂₀.

Muestra	Sección	HV2
P ₀	Transversal	T ₁ 331 ± 7
		T ₂ 347 ± 6
	Longitudinal	L ₁ 335 ± 6
		L ₂ 329 ± 13
P ₂₀	Transversal	T ₁ 318 ± 5
		T ₂ 322 ± 6
	Longitudinal	L ₁ 321 ± 5
		L ₂ 317 ± 9

5.3.6. Conclusiones de la calidad de las piezas SLM

Continuando con el estudio previo sobre la caracterización del polvo de acero inoxidable 17-4PH en diferentes grados de reciclaje (apartado 5.2), este apartado se centra en la evaluación

de las piezas fabricadas por SLM utilizando polvo en estado virgen (P_0) y polvo sometido a 20 ciclos de fabricación-reciclaje (P_{20}).

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ El análisis de la porosidad revela una disminución en el tamaño de los poros con el reciclaje del polvo. La circularidad y el número de poros están directamente relacionados con el tamaño de poro, siguiendo en ambos casos una tendencia decreciente a medida que aumenta el tamaño. En consecuencia, se obtuvo una circularidad ligeramente superior en las muestras P_{20} (0,81) en comparación con las muestras P_0 (0,78). Respecto a los porcentajes de porosidad, la porosidad externa o abierta es prácticamente la misma en ambos estados de polvo, sin embargo, la porosidad interna o cerrada se reduce un 0,16 % tras 20 ciclos de reciclaje del polvo.
- ❖ Los valores promedio de R_a y R_t fueron superiores para el estado de polvo virgen, lo que demuestra que la morfología más irregular del polvo reciclado favorece ligeramente la mejora del acabado superficial, así como la disminución de la porosidad de las piezas impresas. Como era de esperar, los valores de rugosidad más altos se obtuvieron en la superficie superior de las piezas para ambos estados de polvo, ya que es la superficie donde se hacen visibles las marcas de la estrategia de escaneo láser.
- ❖ El análisis microestructural de ambas condiciones de polvo no presenta diferencias notables, observándose un ligero aumento en la fase γ con el reciclaje del polvo metálico. Los patrones de XRD revelan una porción aproximadamente del 68 % de la fase α (martensita) y del 32 % para la fase γ (austenita).
- ❖ En cuanto a las propiedades mecánicas, el reciclaje del polvo metálico influye ligeramente tanto en el comportamiento a tracción como en la dureza de las muestras impresas. La reutilización del polvo produce el aumento del R_m , de 984 MPa (P_0) a 1.038 MPa (P_{20}), y la disminución del R_p , de 859 MPa (P_0) a 770 MPa (P_{20}), manteniéndose constante el coeficiente de estricción en un valor cercano a 30 %. Estos resultados revelan el aumento de la ductilidad de las piezas SLM con el reciclaje del polvo y, con ello, la disminución de la dureza, de 336 HV2 (P_0) a 320 HV2 (P_{20}).

En resumen, en el proceso de fabricación SLM se recomienda la reutilización del polvo de acero inoxidable 17-4PH, garantizando de esta forma la viabilidad económica y medioambiental del proceso. Tanto el polvo reciclado (incluso después de 20 ciclos) como una mezcla de polvo reciclado y polvo virgen pueden utilizarse sin afectar significativamente las propiedades de las piezas impresas. El proceso de reciclaje recomendado consiste en recuperar el polvo no fundido de la impresora de metal aplicando vacío, tamizar dicho polvo (aplicando calor al mismo tiempo) mediante un tamiz de malla de 75 μm y cargar el polvo reciclado en el depósito de alimentación de polvo de la máquina SLM.

5.4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados descritos en este capítulo han dado lugar a dos publicaciones en Revista JCR:

- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Barreiro, J. y Martínez-Pellitero, S. (2020) «Characterisation of 17-4PH metallic powder recycling to optimise the performance of the selective laser melting process», *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), pp. 1273-1285. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.054 – Factor de impacto JCR: Q1.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J. y Zapico, P. (2022) «Influence of 17-4 PH stainless steel powder recycling on properties of SLM additive manufactured parts», *Journal of Materials Research and Technology*, 16, pp. 1647-1658. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.12.089 – Factor de impacto JCR (2021): Q1.

Capítulo 6

INFLUENCIA DEL DISEÑO PARA FABRICACIÓN SLM

En este capítulo se estudia la influencia del posicionamiento de las piezas en la placa base, así como el diseño de diferentes geometrías sobre planos inclinados en la calidad geométrica y dimensional de las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. INTERÉS DEL ESTUDIO*
- 2. POSICIÓN DE PIEZAS EN LA PLACA BASE*
- 3. DISEÑO DE GEOMETRÍAS INCLINADAS*
- 4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS*

6.1. INTERÉS DEL ESTUDIO

Varios investigadores han analizado la influencia de la orientación de las piezas para la fabricación SLM (principalmente según la dirección vertical y horizontal), sin embargo, no hay estudios sobre la influencia del posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación a pesar de que la acción del rodillo de compactación también puede afectar la precisión geométrica y dimensional de las piezas según su posición en la placa base. Teniendo en cuenta estos factores, el primer estudio de este capítulo consiste en el diseño y la fabricación de una pieza patrón destinada a la evaluación de la precisión geométrica y dimensional de las piezas en función de su posición en la placa base. Mediante esta pieza patrón se estudiará el error cometido por la máquina SLM en sus tres ejes: según la dirección del movimiento del rodillo (eje X), según la dirección perpendicular al movimiento del rodillo (eje Y) y según la dirección de fabricación o altura de las piezas impresas (eje Z).

Por otro lado, entre las diferentes metodologías utilizadas para el control en la fabricación de precisión, la medición de piezas patrón metrológicas es muy importante para la caracterización, optimización y evaluación del rendimiento de los sistemas de AM. Ninguno de los estudios mencionados en el estado del arte (apartado 2.4.2) ha evaluado la precisión lograda en la fabricación SLM de piezas que contengan características geométricas en planos inclinados respecto a los ejes de impresión. Los estudios existentes únicamente han evaluado piezas patrón con entidades geométricas fabricadas sobre planos verticales y horizontales. Hay que tener en cuenta que el ubicar estas geometrías en planos inclinados es de gran interés, pues supone una gran complejidad adicional en la fabricación convencional utilizando fresadoras (requiere sujeción especial, rotación de herramienta/cabezal, etc.), mientras que esto no es ningún problema para las tecnologías de AM, a no ser que la inclinación sea excesiva y requieran de estructuras de soporte adicionales. Por ello, el segundo estudio de este capítulo se centra en la evaluación geométrica y dimensional de la fabricación SLM de piezas patrón con diferentes geometrías sobre planos inclinados, así como del efecto de la inclinación de los planos, en consecuencia, este estudio permitirá generar recomendaciones de diseño para la fabricación SLM de piezas metálicas de acero inoxidable 17-4PH.

6.2. POSICIÓN DE PIEZAS EN LA PLACA BASE

En este apartado se ha diseñado y fabricado una pieza patrón con la finalidad de evaluar la influencia del posicionamiento en la placa base sobre la precisión geométrica y dimensional de las piezas impresas por SLM. La pieza patrón consiste en la combinación de diferentes superficies planas formando cubos, ya que es la entidad geométrica más simple, fácil e inequívoca de evaluar desde el punto de vista metrológico. La Figura 6.1 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio.



Figura 6.1. Metodología de evaluación geométrica y dimensional del posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación SLM.

La pieza patrón consiste en la colocación de planos distribuidos uniformemente en la placa de fabricación según las direcciones paralela y perpendicular al movimiento del rodillo en las operaciones de deposición y compactación de las capas de polvo (dirección según el eje X de la máquina). Dicha pieza consta de 21 cubos distribuidos uniformemente en la placa base, cuyas dimensiones son de 100 mm x 100 mm. Los cubos tienen una dimensión nominal de 10 mm x 10 mm con una altura de 9,99 mm (ya que el espesor de las capas es de 30 μm) y la distancia entre ellos es de 10 mm, tanto en la dirección del eje X como del eje Y. La Figura 6.2 muestra la distribución de los cubos en 5 filas y 5 columnas, ocupando la totalidad de la placa base (los extremos se dejan libres, porque es donde se encuentran los agujeros de los tornillos que anclan la placa a la plataforma de fabricación durante el proceso SLM). La designación de cada cubo consta de 2 dígitos, el primero representa la columna en la que se localiza y el segundo la fila, ambos aumentan con la separación al origen de la placa base (Figura 6.2). El diseño de esta pieza patrón se enfocó principalmente en tres factores: cumplir con las restricciones de la máquina SLM, permitir la caracterización de los límites de la impresora y ser fácilmente medible con una CMM. Este diseño permite relacionar la precisión geométrica y dimensional de cada cubo con su ubicación sobre la placa de fabricación. Además, esta precisión puede estar relacionada con la orientación del rodillo de compactación y su dirección de movimiento. Si la capacidad de compactación del rodillo a lo largo de su

dirección de movimiento (eje X) y de la dirección de su eje de rotación (eje Y) no es la misma, podría ser un problema importante en la fiabilidad de la precisión de las piezas impresas. Además, la relación posición/precisión se puede aplicar a la dirección vertical analizando la altura real de los cubos.

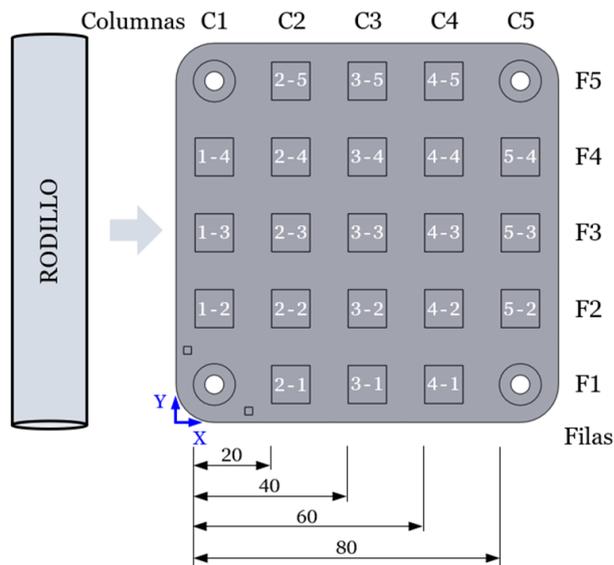


Figura 6.2. Distribución de los cubos de la pieza patrón según los ejes X e Y de la máquina SLM.

Una vez fabricada la pieza, se palparon 100 puntos, distribuidos en una matriz de 10 x 10, en cada cara accesible de los 21 cubos (suficiente densidad de datos para revelar cualquier desviación geométrica) para la creación del plano medido correspondiente. Estas mediciones permitieron obtener los datos de las dimensiones, distancias, paralelismos y planitudes de los todos cubos. Las distancias fueron medidas desde la cara del cubo inicial más cercana al origen hasta la cara homóloga de los cubos sucesivos siguiendo la dirección de cada fila (según el eje X) y cada columna (según el eje Y), como se muestra en la Figura 6.2.

Finalmente, los resultados de la medición CMM se comparan con las dimensiones del CAD nominal para obtener las desviaciones dimensionales.

6.2.1. Análisis geométrico

La Figura 6.3 muestra los resultados de planitud de las caras accesibles de los 21 cubos mediante un gráfico de colores, mientras que los valores detallados de cada una de las caras se exponen en la Tabla 6.1 (caras XZ), Tabla 6.2 (caras YZ) y Tabla 6.3 (cara XY). Las caras laterales de los cubos se designan como «1» y «2» en función de su posición respecto al origen de coordenadas de la placa base, respectivamente. En el caso de las caras laterales (XZ e YZ), no existe una tendencia notable relacionada con la ubicación del cubo en la placa base, esto es, la calidad de la planitud de las caras laterales se distribuye aleatoriamente sobre la placa. Por el contrario, la planitud de los planos XY sí que está influenciada por su posición en la placa, obteniéndose mayores errores en los cubos ubicados más cerca del origen de la placa base (esquina inferior izquierda en la Figura 6.3).

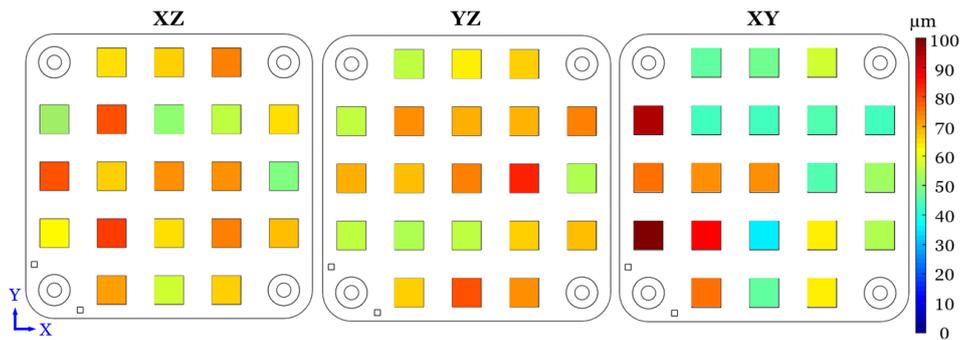


Figura 6.3. Distribución de la planitud de los cubos de la pieza patrón según sus caras XZ, YZ y XY.

Tabla 6.1. Resultados de planitud XZ de los cubos de la pieza patrón (Cara 1 / Cara 2).

Planitud XZ (μm) (cara 1 / cara 2)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	69 / 62	55 / 81	81 / 68	-
F4	52 / 55	69 / 90	50 / 55	59 / 62	63 / 68
F3	80 / 79	59 / 73	69 / 78	71 / 75	56 / 45
F2	59 / 68	61 / 102	67 / 63	78 / 72	83 / 55
F1	-	58 / 88	47 / 71	50 / 85	-

Tabla 6.2. Resultados de planitud YZ de los cubos de la pieza patrón (Cara 1 / Cara 2).

Planitud YZ (μm) (cara 1 / cara 2)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	58 / 56	68 / 58	87 / 50	-
F4	61 / 52	76 / 69	64 / 76	49 / 90	65 / 86
F3	66 / 75	72 / 66	86 / 64	87 / 82	56 / 54
F2	67 / 49	61 / 49	72 / 44	74 / 59	68 / 68
F1	-	74 / 63	70 / 91	69 / 77	-

Tabla 6.3. Resultados de planitud XY de los cubos de la pieza patrón.

Planitud cara XY (μm)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	47	48	58	-
F4	96	44	43	46	43
F3	77	74	73	45	53
F2	104	89	36	63	54
F1	-	77	47	63	-

Analizando los valores promedio de planitud en función de la dirección de las caras del cubo, se obtiene un error de 67 μm en las caras laterales (XZ e YZ) y 61 μm en la cara superior (XY). La variabilidad de estos resultados en la cara XY es mayor (19 μm de desviación estándar) que en las caras laterales (en torno a 12,5 μm de desviación estándar).

Otra característica geométrica evaluada fue el paralelismo, aspecto que permite analizar el efecto de las tensiones residuales que ocurren durante el proceso de fabricación SLM. El error de planitud del plano base (plano de referencia), utilizado tanto para analizar el paralelismo como la altura de los cubos (dimensión según el eje Z), es de 41 μm . Este plano se midió palpando 80 puntos distribuidos homogéneamente entre los cubos de la pieza patrón. La Figura 6.4 muestra los resultados del paralelismo de las caras superiores de los cubos respecto al plano base. Estos resultados reflejan una distribución similar a la obtenida en los resultados del error de planitud en dichas caras XY (Figura 6.3 y Tabla 6.3). Al igual que en el caso de la planitud, la variabilidad de los resultados del error geométrico de paralelismo es elevada, obteniéndose un valor mínimo de 41 μm y máximo de 118 μm , y un valor promedio de 72 μm con una desviación estándar de 21 μm (Tabla 6.4).

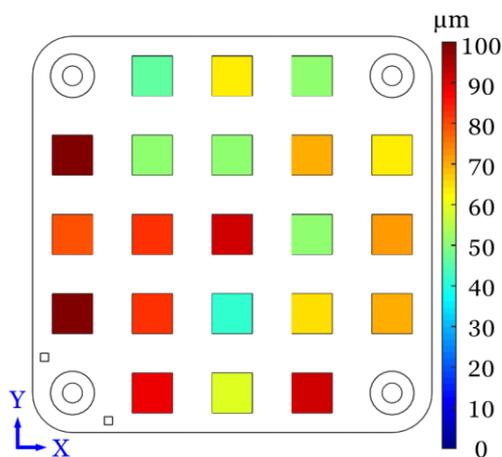


Figura 6.4. Distribución de paralelismo de la cara XY de los cubos respecto al plano base.

Tabla 6.4. Resultados de paralelismo XY de los cubos respecto al plano base.

		Paralelismo XY (μm)				
		Columna				
Fila		C1	C2	C3	C4	C5
F5		-	46	63	51	-
F4		113	51	52	69	64
F3		79	82	93	51	72
F2		118	83	41	65	68
F1		-	89	59	93	-

6.2.2. Análisis dimensional

El análisis dimensional permite conocer el error de posicionamiento de la máquina SLM, teniendo en cuenta tanto las dimensiones del tamaño real de cada cubo como las desviaciones de su posición nominal.

La Figura 6.5 muestra de forma gráfica las desviaciones de las dimensiones de los cubos a largo de los ejes X (Tabla 6.5), Y (Tabla 6.6) y Z (Tabla 6.7) (largo, ancho y alto). La distribución de estas desviaciones sobre la placa base es muy similar a la tendencia evaluada con el error de planitud (Figura 6.3), es decir, la desviación dimensional de los cubos se distribuye aleatoriamente en el caso de las caras laterales (dimensiones según los ejes X e Y), mientras que en la altura de los cubos (dimensión según el eje Z) se aprecia una tendencia en función de la posición en la placa (mayor desviación cerca del origen de la placa base).

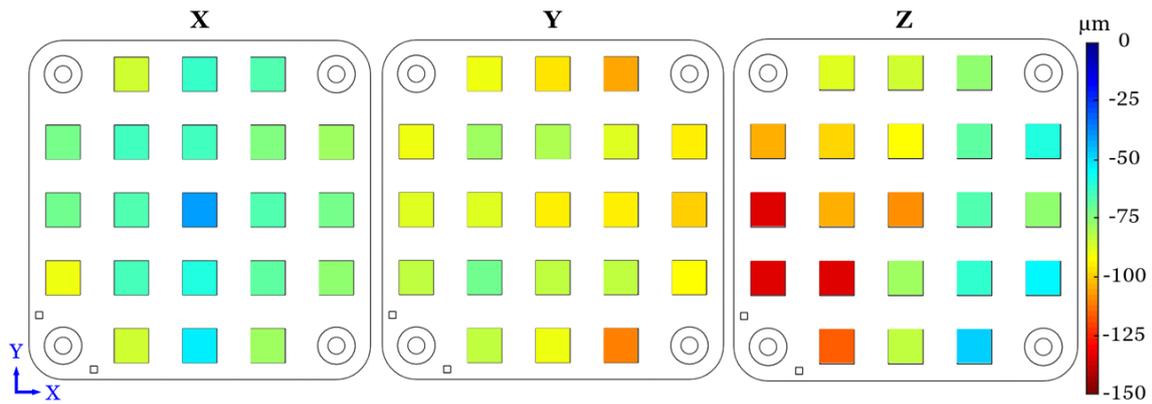


Figura 6.5. Distribución de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según los ejes X, Y y Z.

Tabla 6.5. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje X.

Desviación dimensional según X (µm)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	-82	-63	-68	-
F4	-73	-65	-66	-74	-77
F3	-70	-67	-37	-68	-73
F2	-88	-64	-61	-68	-76
F1	-	-84	-53	-77	-

Tabla 6.6. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje Y.

Desviación dimensional según Y (µm)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	-91	-98	-105	-
F4	-87	-77	-79	-89	-94
F3	-90	-89	-94	-93	-100
F2	-81	-72	-81	-80	-93
F1	-	-85	-90	-109	-

Tabla 6.7. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según el eje Z.

Desviación dimensional según Z (μm)					
Columna					
Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	-87	-84	-75	-
F4	-105	-98	-90	-67	-60
F3	-132	-106	-111	-65	-77
F2	-134	-130	-79	-59	-53
F1	-	-116	-85	-49	-

Todas las desviaciones dimensionales evaluadas fueron negativas, lo que significa que las dimensiones reales de los cubos son menores que sus respectivos valores nominales. Respecto a los valores promedio, la menor desviación se obtuvo en la dimensión X ($-69 \mu\text{m}$), correspondiente a la dimensión alineada con el movimiento del rodillo durante el proceso de compactación del polvo. La desviación promedio de las dimensiones según los ejes Z e Y fue de $-89 \mu\text{m}$. La variabilidad de estos resultados es consistente con la desviación estándar del error de planitud de las caras involucradas en cada dimensión, obteniéndose la mayor variabilidad en la dimensión de la altura ($26 \mu\text{m}$ de desviación estándar), mientras que en las dimensiones de la longitud y anchura de los cubos la desviación estándar es de aproximadamente $10 \mu\text{m}$.

En relación al análisis dimensional de las distancias entre las caras homólogas de diferentes cubos según las direcciones X e Y, prácticamente todos los resultados son negativos, dicho en otras palabras, las distancias son menores a las establecidas en el CAD nominal. Como se puede observar en la Tabla 6.8 y en la Tabla 6.9, las desviaciones presentan una tendencia creciente con el aumento de la distancia entre cubos (20 mm, 40 mm, 60 mm y 80 mm), siendo más notable en la dirección del eje Y, cuyas desviaciones promedio van desde $-18 \mu\text{m}$ en el caso de la distancia de 20 mm hasta $-56 \mu\text{m}$ en la distancia de 80 mm (Tabla 6.9). Las desviaciones de las distancias según las filas no siguen una tendencia destacable (Tabla 6.8), mientras que según las columnas se observa un aumento del error con el aumento de la distancia al origen de la placa base (Tabla 6.9).

Tabla 6.8. Desviación en las distancias entre los cubos de la pieza patrón según el eje X.

Fila	Desviación en la distancia según el eje X (μm)				
	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	Promedio
F1	-22	-4	-	-	-13
F2	-24	-28	-29	-28	-27
F3	-12	-33	-16	-20	-20
F4	-12	-9	-8	-25	-14
F5	-6	-9	-	-	-8
Promedio	-15	-17	-18	-24	-18

Tabla 6.9. Desviación en las distancias entre los cubos de la pieza patrón según el eje Y.

Columna	Desviación en la distancia según el eje Y (μm)				
	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	Promedio
C1	1	4	-	-	3
C2	-8	-17	-20	-23	-17
C3	-16	-33	-46	-54	-37
C4	-42	-59	-75	-90	-67
C5	-23	-52	-	-	-38
Promedio	-18	-31	-47	-56	-35

6.2.3. Conclusiones de la posición de las piezas en la placa base

En este apartado se analiza la precisión geométrica y dimensional de la máquina SLM en función del posicionamiento de las piezas en la placa base, relacionando los resultados con el movimiento de compactación del rodillo (según la dirección del eje X de la máquina). El gran número de características prismáticas fabricadas en la placa base y su distribución espacial uniforme permitieron obtener valores de repetibilidad de fabricación dentro del volumen de impresión de la máquina SLM, proporcionando tanto las desviaciones respecto al modelo CAD nominal como la variabilidad alcanzada en las diferentes direcciones.

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ Respecto al análisis geométrico, se detectó que la planitud de las caras superiores (XY) de los cubos depende de su ubicación en la placa base, mientras que la planitud de las superficies laterales no sigue ninguna tendencia en función de su posición en la placa. Este efecto detectado en las caras superiores revela el aumento del error geométrico con la disminución de la distancia al origen de la placa base. De igual forma, el error de paralelismo sigue la misma tendencia que la planitud.

- ❖ Respecto al análisis dimensional, a pesar de que el software de fabricación aplica una compensación, se obtuvieron desviaciones negativas sistemáticas en todas las dimensiones de los cubos, es decir, los cubos presentaron tamaños menores a los establecidos en el CAD nominal. Este efecto se debe principalmente a la contracción sufrida por la pieza, causada por el rápido enfriamiento del material durante el proceso de fabricación SLM.
- ❖ Al igual que las dimensiones, las desviaciones de las distancias entre las caras paralelas de los cubos también son menores a las nominales. En cuanto a los resultados, se obtuvieron desviaciones menores en los cubos alineados según el eje X de la máquina que según el eje Y, es decir, las desviaciones detectadas en las distancias paralelas al movimiento del rodillo son menores. En consecuencia, este error dimensional podría ser causado principalmente por la acción del rodillo en su movimiento lineal (eje X) de deposición y compactación de las capas de polvo metálico.

En base a los resultados obtenidos en el análisis dimensional, para la fabricación de diferentes piezas en una misma placa base, se recomienda su distribución a lo largo del eje X de la máquina SLM. Además, se recomienda orientar las piezas alineadas también con el eje X, debido a las menores desviaciones dimensionales detectadas en esta dirección. Con la finalidad de obtener mejor calidad, tanto geométrica como dimensional, según el eje Z (altura), se recomienda la ubicación de las piezas alejadas del origen de coordenadas de la placa base (Figura 6.2).

También es necesario analizar la influencia del posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación tras la aplicación de postprocesos SLM debido a su influencia en la calidad geométrica y dimensional de los componentes impresos. Como se mencionó en el estado del arte (apartado 2.2.5) la aplicación de postprocesos es habitual después de la fabricación SLM con la finalidad de mejorar diferentes propiedades de las piezas. Este estudio se aborda en el capítulo 7 (apartado 7.2.3) de la presente tesis doctoral.

6.3. DISEÑO DE GEOMETRÍAS INCLINADAS

El contexto de este estudio es la evaluación de piezas de pequeño tamaño que puedan fabricarse por SLM sin inconvenientes adicionales salvo la inclinación, y que puedan ser inspeccionadas por sistemas ópticos evitando el problema habitual de oclusión. La utilización de sistemas de medición óptica, en lugar del contacto, gana relevancia por su capacidad de captar gran volumen de datos de forma rápida. El objeto principal de este apartado es estudiar la influencia de la inclinación y el tipo de geometría. Este estudio, además de generar reglas o recomendaciones de diseño para la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH, permite evaluar el rendimiento del proceso de fabricación a través de la inspección de las piezas patrón diseñadas.

Para la realización de este estudio se siguió la metodología mostrada en la Figura 6.6. En primer lugar, se diseñaron las piezas patrón teniendo en cuenta las restricciones del proceso y la máquina SLM, así como los requisitos de la medición óptica. Tras la fabricación, las piezas de acero inoxidable 17-4PH se sometieron al tratamiento térmico de relajación de tensiones y, a continuación, se separaron de la placa base. Finalmente, se digitalizaron utilizando un escáner de luz estructurada (sistema que permite el escaneo de este tipo de piezas con buena precisión, resultados mostrados en capítulos posteriores, pero cuyos estudios se realizaron previamente) y se realizaron tanto las mediciones de las GD&T como las comparaciones 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos resultantes del escaneo.

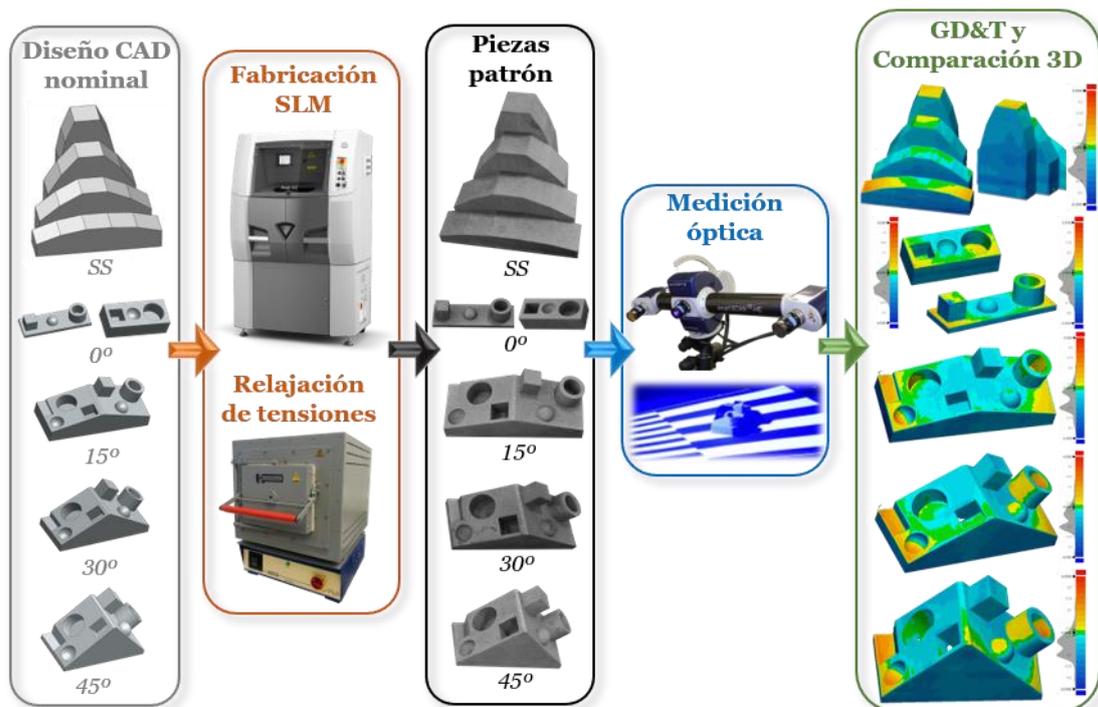


Figura 6.6. Metodología de la evaluación geométrica y dimensional de diferentes geometrías fabricadas por SLM en planos inclinados.

Las piezas patrón se diseñaron de acuerdo a las recomendaciones del fabricante (condiciones de fabricación SLM), así como a las recomendaciones de diseño de los autores citados en el estado del arte (apartado 2.4.2):

- ✓ Diseño en base a primitivas geométricas, lo que permite una definición perfecta y una fácil verificación.
- ✓ Tener entidades de tamaño adecuado para verificar el rendimiento de la máquina SLM considerando su capacidad máxima, así como su área de fabricación máxima por capa (según las recomendaciones del fabricante el área de fabricación de cada capa no debe exceder el 50 % de la superficie total de la placa base para evitar su deformación).
- ✓ Tener geometrías tanto interiores (vaciado) como exteriores (extrusión).
- ✓ No requerir la fabricación de estructuras de soporte para evitar las operaciones de eliminación posterior y el pulido de la zona afectada.
- ✓ Ser fáciles de medir mediante sistemas ópticos teniendo en cuenta, entre otros aspectos, los problemas de oclusión, el tamaño mínimo y la profundidad máxima de las geometrías interiores.

Teniendo en cuenta todos estos factores, en este estudio se diseñaron dos tipos de pieza patrón: uno destinado a la evaluación del ángulo de inclinación de las superficies planas, y otro destinado a la evaluación de diferentes geometrías fabricadas sobre superficies planas inclinadas.

La Figura 6.7 muestra el primer tipo de pieza patrón diseñada en este estudio. La pieza patrón de superficies inclinadas y escalones (SS, *Sloped and Stair-shaped surface*) consta de: cuatro planos a 0° (P_0^1 a P_0^4); cinco planos a 90° (P_{90}^1 a P_{90}^5); y dieciocho planos inclinados (12 mm x 12 mm), con un incremento entre cada uno de 5° , desde los 5° (P_5) hasta los 90° (P_{90}).

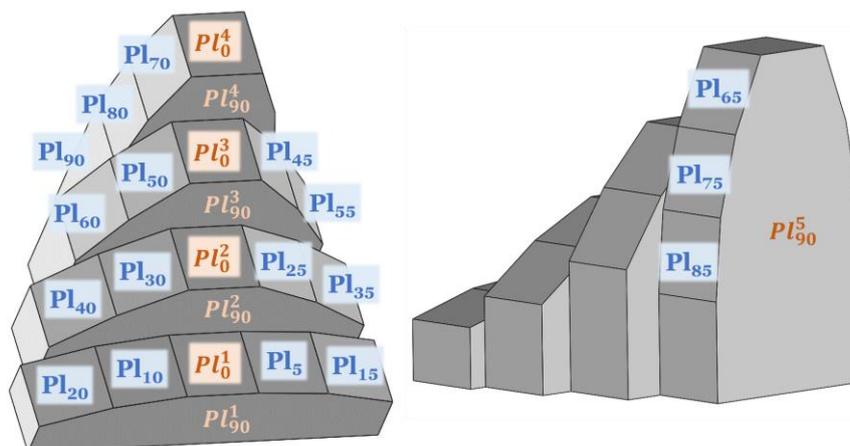


Figura 6.7. Designación de los planos de la pieza patrón de superficies inclinadas y escalones (SS).

El segundo tipo de pieza patrón diseñado en este estudio consta de tres entidades canónicas interiores y tres exteriores (cubo, semiesfera y cilindro) fabricadas sobre planos inclinados a 0° (Figura 6.8a), 15° (Figura 6.8b), 30° (Figura 6.8c) y 45° (Figura 6.8d). El cubo es de 10 mm de lado; la semiesfera tiene 10 mm de diámetro; el cilindro interior es de 15 mm de diámetro y 10 mm de altura; y el cilindro hueco tiene un diámetro interior de 10 mm, un diámetro exterior de 15 mm y una altura de 10 mm.

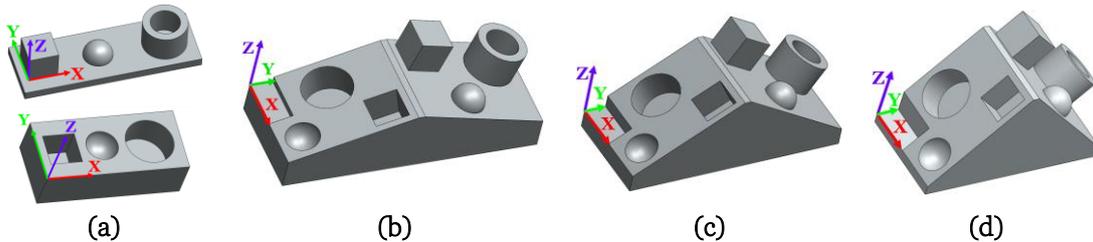


Figura 6.8. Diseño CAD de las piezas patrón de geometrías interiores y exteriores fabricadas sobre planos inclinados a: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° y (d) 45° .

La Figura 6.9 muestra la designación de las entidades geométricas de la pieza patrón de 15° a modo de ejemplo, siendo análogas las correspondientes a las piezas patrón de 0° , 30° y 45° . Los planos de los cubos interiores y exteriores se designan según su eje de coordenadas normal (X, Y, Z) y su distancia al origen de coordenadas (1 si es el más cercano y 2 el más alejado).

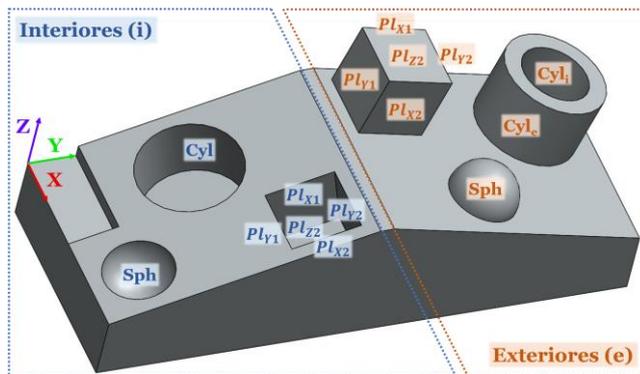


Figura 6.9. Designación de las geometrías de la pieza patrón de 15° .

Las seis piezas patrón se fabricaron por SLM en tres placas base (ocupando el 35 % de la superficie total de la placa) (Figura 6.10) para reducir el consumo de material y ahorrar tiempo. Tras la fabricación, estas placas se sometieron al tratamiento térmico de relajación de tensiones y, a continuación, las piezas patrón se separaron de la placa base correspondiente mediante el proceso mecánico de WEDM.

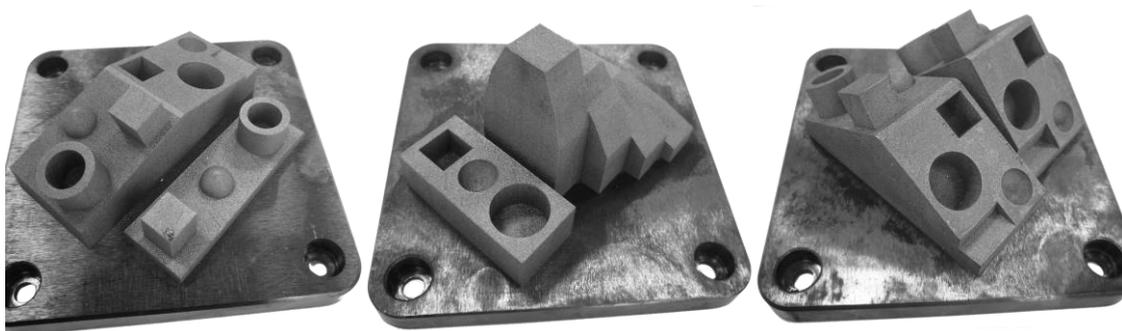
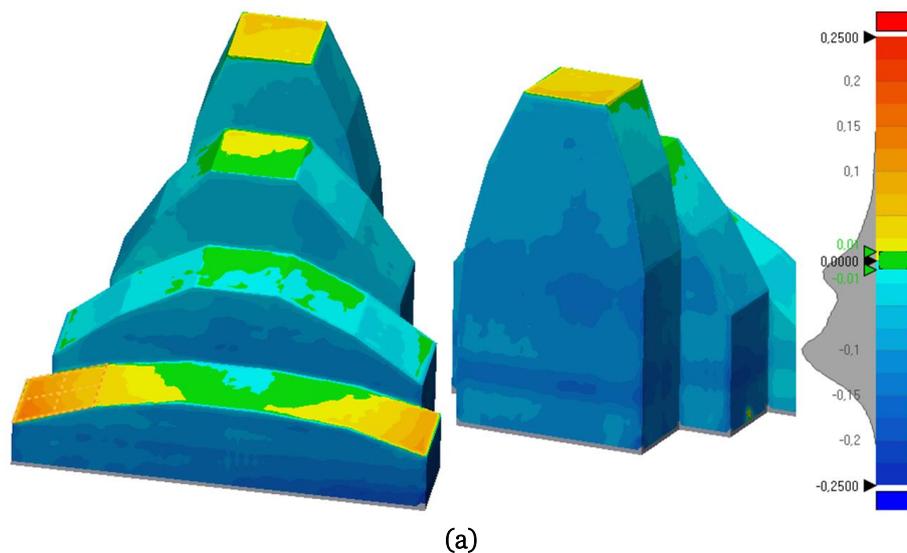


Figura 6.10. Piezas patrón tras el proceso de fabricación SLM.

Para la medición óptica se utilizó el escáner de luz azul estructurada (apartado 3.3.4) con el FOV de 125 mm, el cual permite capturar el volumen completo de las piezas patrón con la máxima precisión. Tras la calibración previa del escáner y bajo las mismas condiciones, se realizaron 15 escaneos de cada pieza patrón para su digitalización completa. Finalmente, las nubes de puntos resultantes de la digitalización óptica se trataron y analizaron con el software de inspección Geomagic Control X.

6.3.1. Comparación 3D

La Figura 6.11 muestra gráficamente la comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas. El color verde indica las superficies de mejor ajuste entre las piezas SLM y su CAD nominal. La comparación de la pieza patrón SS (Figura 6.11a) revela una disminución de tamaño según las direcciones X e Y (superficie azul). En las piezas patrón con geometrías inclinadas se observa una tendencia común: una desviación negativa en el centro que se convierte en positiva hacia los extremos de la pieza según la dirección del eje Y (Figura 6.11). Este error puede deberse a las tensiones residuales producidas durante el proceso de fabricación SLM, que tienden a deformar las piezas según una forma cóncava al separarse de la placa base (Li *et al.*, 2017). Según los estudios realizados por Mercelis y Kruth (Mercelis y Kruth, 2006), las piezas extraídas de sus placas de fabricación exhiben una distribución básica de tensiones residuales en la dirección del eje Z que consiste en una zona de tensiones de tracción justo debajo de la superficie superior, seguida de una gran zona de tensiones de compresión, y finalizando de nuevo con una zona de tensiones de tracción en la parte inferior.



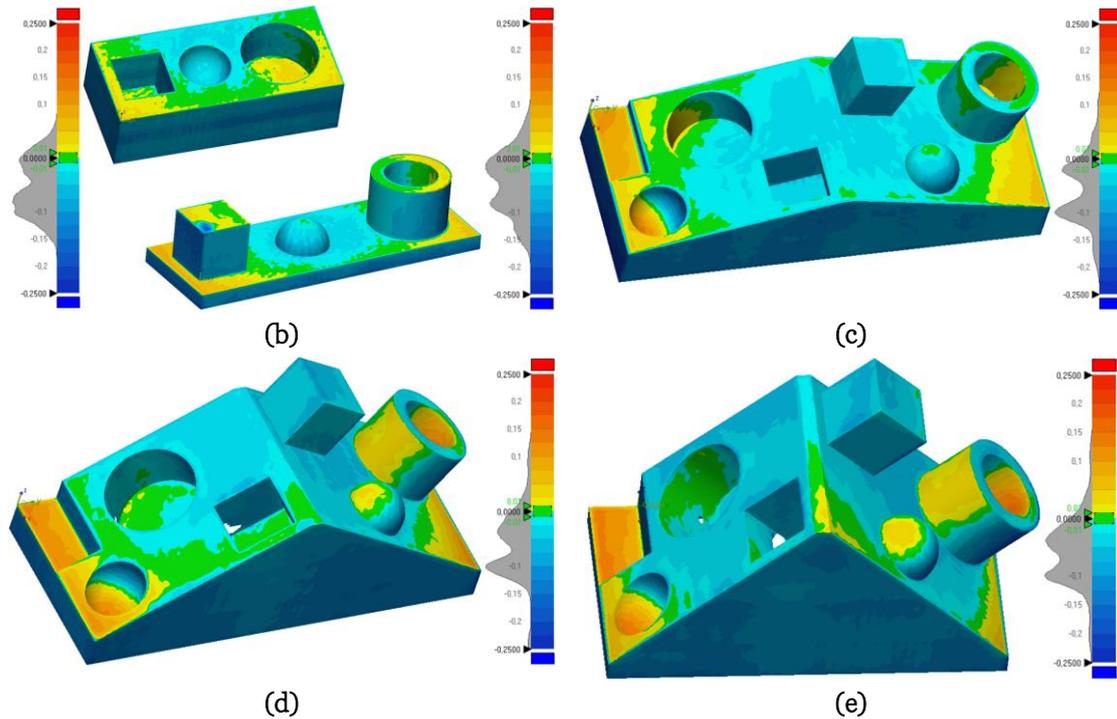


Figura 6.11. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las piezas patrón: (a) SS, (b) 0°, (c) 15°, (d) 30° y (e) 45°.

Respecto a las geometrías del cilindro y la semiesfera, las desviaciones son mayores (superficie amarilla) cuando aumenta el ángulo del plano base, como muestra la Figura 6.11 (b-e). La tendencia es similar en las caras del cubo (desviaciones negativas), excepto en el caso de la superficie con inclinación negativa, donde la desviación se vuelve positiva. En consonancia, al aumentar el ángulo del plano base, la desviación general de las piezas patrón aumenta (Tabla 6.10). Asimismo, el valor de la desviación media cuadrática (RMS, *Root Mean Square*), que es una combinación del valor promedio del error de forma y su dispersión, también muestra una tendencia creciente con el aumento del ángulo del plano base (Tabla 6.10). Además, como se puede observar en la Figura 6.11, el valor promedio presenta desviaciones negativas en todas las piezas patrón, debido al mencionado efecto de contracción.

Tabla 6.10. Desviación estándar y RMS de la comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos de las piezas patrón.

Pieza patrón	SS	0° _e	0° _i	15°	30°	45°
Desviación estándar (µm)	61	58	52	63	67	64
RMS (µm)	88	73	74	87	89	89

6.3.2. Análisis geométrico

Pieza patrón con superficies inclinadas y escalones (SS)

El error de forma de los planos fabricados con diferentes ángulos (pieza patrón SS) muestra una tendencia decreciente al aumentar la inclinación (Figura 6.12). Estos resultados se deben al «efecto escalera» provocado por el proceso de AM capa a capa, el cual depende tanto del grosor de la capa como del ángulo de fabricación. En este caso el espesor de capa se mantiene constante, por consiguiente, las diferencias entre los valores obtenidos son causadas por el ángulo de fabricación de los planos, obteniéndose el mayor error (76 μm) en el plano Pl_5 y el menor error en el plano Pl_{85} (46 μm) (Figura 6.12), con una tendencia, que aunque despreciable, se observa ligeramente decreciente al aumentar la inclinación.

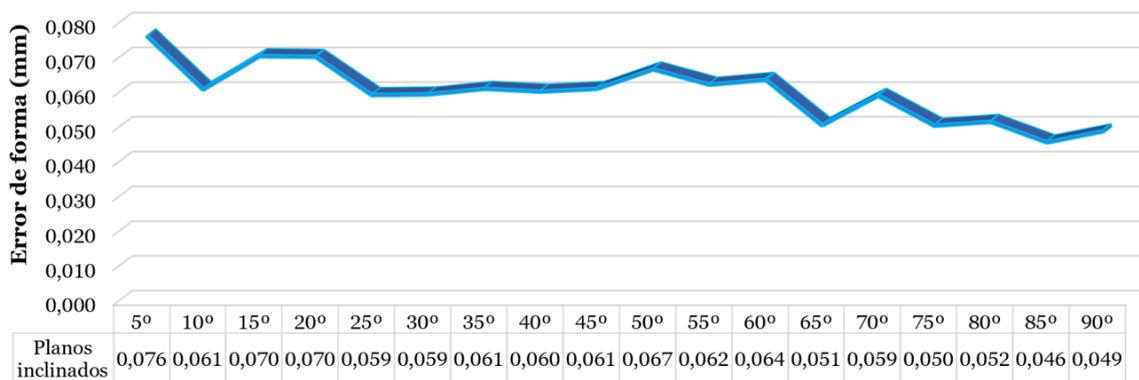


Figura 6.12. Error de forma de los planos inclinados de la pieza patrón SS.

Los planos fabricados horizontal y verticalmente presentan errores de forma que oscilan entre 48 μm y 77 μm (Figura 6.13), siendo ligeramente inferiores en los planos horizontales (56 $\mu\text{m} \pm 9 \mu\text{m}$) que en los verticales (66 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$). En general, no se observan diferencias destacables en los errores geométricos de los planos inclinados entre 0° y 90° (Figura 6.12 y Figura 6.13).

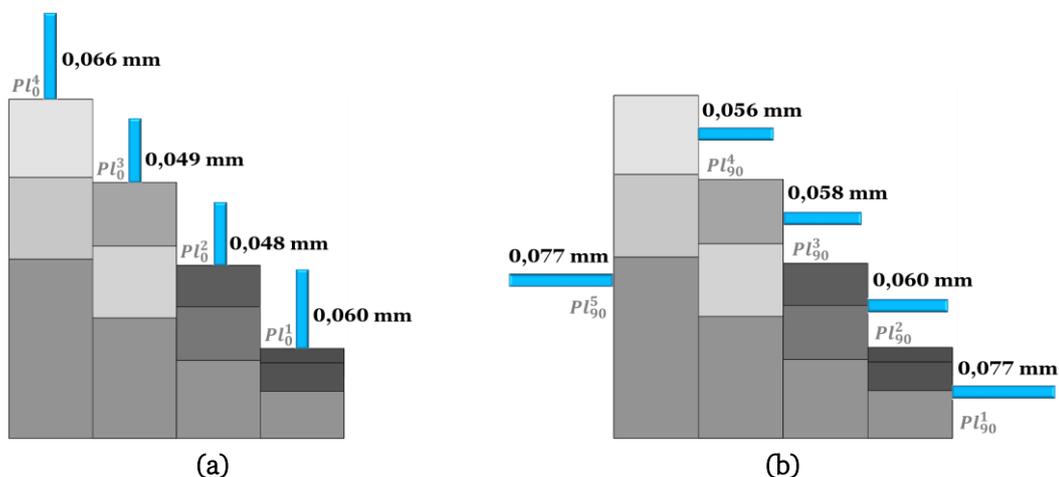


Figura 6.13. Error de forma de los planos de la pieza patrón SS: (a) 0° y (b) 90°.

Pieza patrón con geometrías inclinadas

El error de forma de las geometrías exteriores se muestra en la Figura 6.14. Las caras de los cubos (correspondientes a los diferentes planos analizados) muestran resultados similares independientemente del ángulo del plano base (0° , 15° , 30° , 45°), así como de la dirección de fabricación (X, Y, Z), excepto en el caso del plano $P_{Y_2}^e$ (Figura 6.14a). El $P_{Y_2}^e$ (correspondiente a la cara con pendiente negativa del cubo) de la pieza patrón de 45° presenta un error de forma muy superior al resto, con un valor de $135 \mu\text{m}$ en comparación con los valores inferiores a $65 \mu\text{m}$ del resto de las piezas patrón. Esto coincide con la recomendación de los fabricantes de las máquinas SLM de añadir estructuras de soporte en la fabricación de planos con pendiente negativa igual o superior a 45° . Respecto a los cilindros huecos y las semiesferas, no existen diferencias significativas en los ángulos menores (0° y 15°), observándose una tendencia creciente a partir de 30° (Figura 6.14b). En particular, cabe destacar el elevado error de forma del cilindro hueco de la pieza patrón de 45° , que alcanza un valor aproximadamente de $120 \mu\text{m}$ (Figura 6.14b).

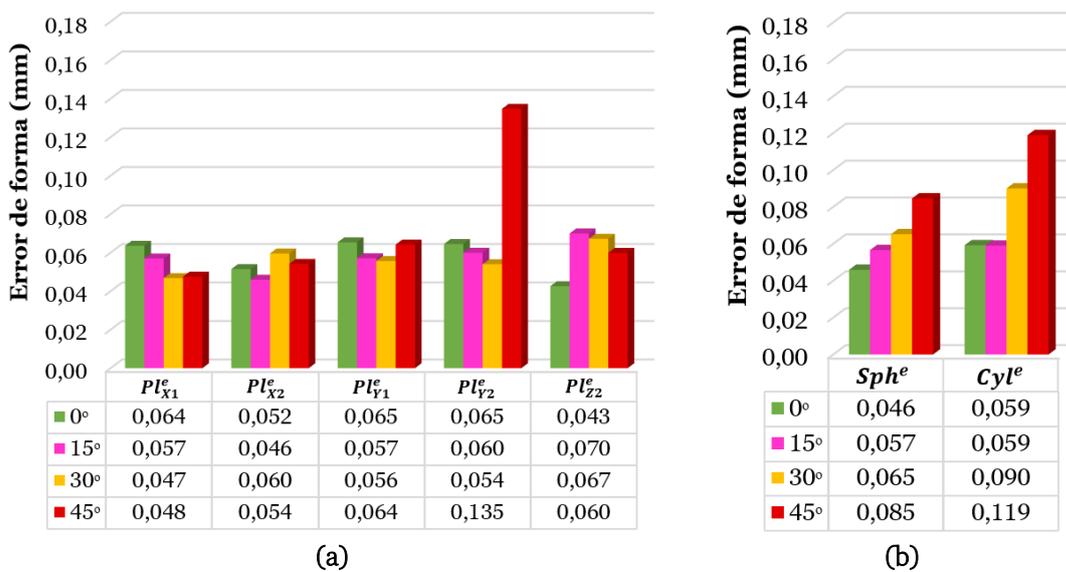


Figura 6.14. Error de forma de las geometrías exteriores: (a) planos, (b) semiesfera y cilindro.

Como se muestra en la comparación 3D (Figura 6.11), las geometrías interiores se han captado con suficiente número de puntos para ser definidas con precisión. Las especificaciones de forma de las características interiores presentan una tendencia similar entre las diferentes piezas patrón, a excepción de algunas desviaciones superiores (Figura 6.15). El mayor error de forma corresponde al plano $P_{Y_2}^i$ de la pieza patrón de 45° ($179 \mu\text{m}$), seguida por la misma superficie de la pieza patrón de 30° ($134 \mu\text{m}$) (Figura 6.15a). Estos resultados son análogos al error derivado de la inclinación negativa de las superficies, ya mencionado en el párrafo anterior. Respecto a las semiesferas y los cilindros interiores, los valores son similares ($<80 \mu\text{m}$) a excepción de las geometrías cilíndricas de la pieza patrón de

45°, cuyos errores de forma son superiores, alcanzando valores cercanos a 105 μm (Figura 6.15b).

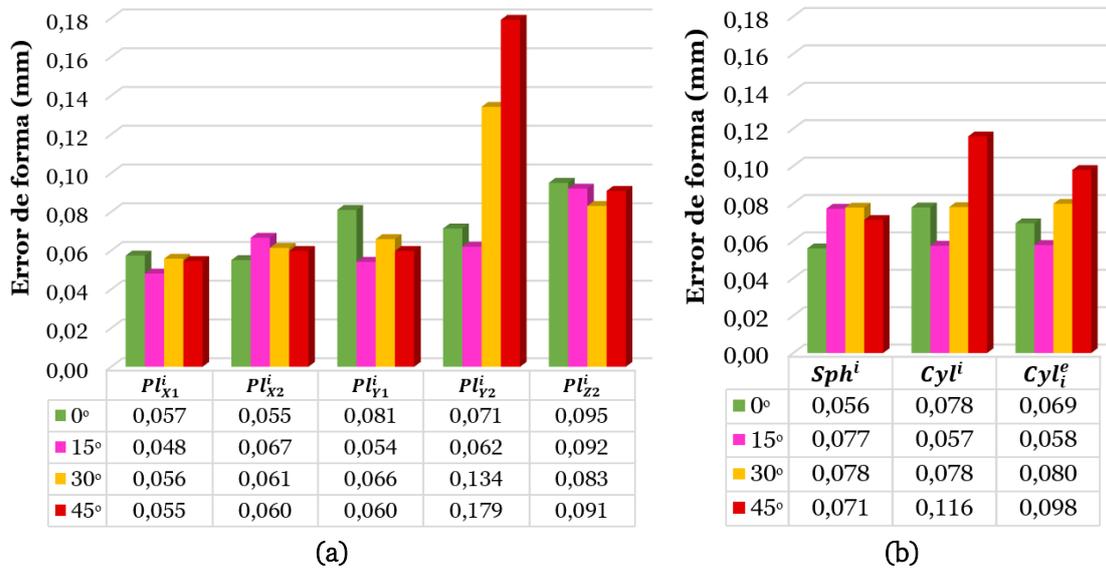


Figura 6.15. Error de forma de las geometrías interiores: (a) planos, (b) semiesfera y cilindro.

En general, a 45° de pendiente el error geométrico es mayor, sin embargo, se encuentran diferencias entre las diferentes entidades geométricas. Estas diferencias se deben principalmente a que la porción de superficie libre a 45° es diferente en cada caso (cubo, cilindro, semiesfera) como se muestra en color rojo en la Figura 6.16. La situación más desfavorable es la del cubo, tanto interior (plano P_{Y2}^i) como exterior (plano P_{Y2}^e), ya que esta superficie a 45° está completamente libre (Figura 6.16). Sin embargo, en el caso del cilindro, solo una pequeña porción de la superficie está completamente libre, mientras que el resto está de alguna manera soportada por las capas anteriores.

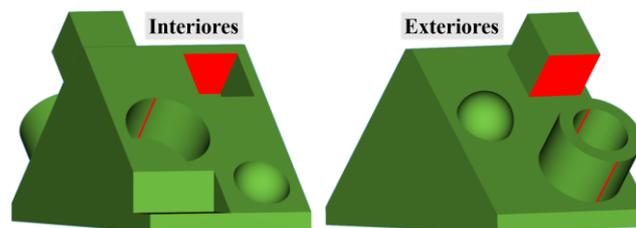


Figura 6.16. Superficies con pendiente negativa a 45° de las geometrías interiores y exteriores de la pieza patrón de 45°.

6.3.3. Análisis dimensional

Los resultados obtenidos en este apartado se calcularon como la desviación entre los valores medidos respecto a los valores de referencia (CAD nominal).

Pieza patrón con superficies inclinadas y escalones (SS)

Las desviaciones dimensionales de los escalones de la pieza patrón SS se muestran en la Figura 6.17b. Para realizar la medición de la altura se tomaron las distancias lineales (dirección normal desde el punto central de la primera geometría) desde el plano P_0^1 hasta los planos P_0^2 (Z1), P_0^3 (Z2) y P_0^4 (Z3) (Figura 6.17a). Del mismo modo, para obtener el ancho se midieron las distancias desde el plano P_{90}^1 hasta los planos P_{90}^2 (Y1), P_{90}^3 (Y2), P_{90}^4 (Y3) y P_{90}^5 (Y4) (Figura 6.17a). Para comparar correctamente los resultados, los valores de la desviación dimensional se calcularon en función de la distancia medida. En el caso de la altura de los escalones, se observa una tendencia creciente, es decir, aumenta el error con el aumento de la altura de la pieza. Este error se cuantifica aproximadamente en $10\ \mu\text{m}$ en cada escalón (Figura 6.17b), sin embargo, considerando que este aumento regular con la altura de la pieza es un valor de desviación inferior a la resolución del escáner, debe despreciarse. En el caso de la anchura, además de ser desviaciones pequeñas, no muestran ninguna tendencia.

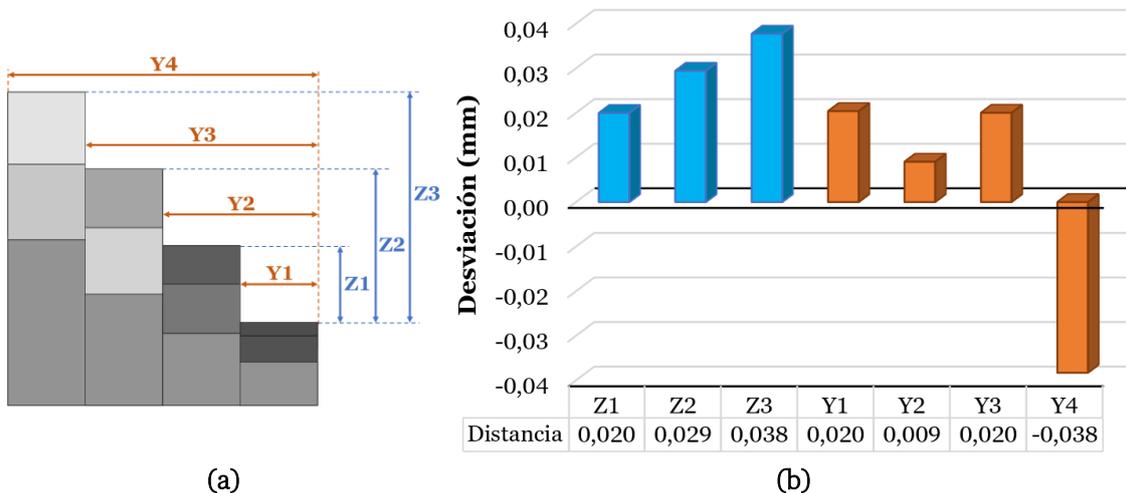


Figura 6.17. (a) Dimensiones representadas sobre el CAD nominal y (b) desviaciones en la altura y el ancho de los escalones de la pieza patrón SS.

Pieza patrón con geometrías inclinadas

La Figura 6.18 muestra la desviación dimensional del cubo (según el eje X, Y y Z) interior y exterior de cada pieza patrón. Independientemente del ángulo de fabricación, las dimensiones X e Y de los cubos exteriores se contraen de forma similar, aproximadamente $150\ \mu\text{m}$, lo que supone un valor importante a compensar en la fase de diseño de las piezas SLM. Por el contrario, las desviaciones a lo largo del eje Z (altura) de los cubos exteriores son positivas y despreciables ($<15\ \mu\text{m}$). Una tendencia similar, pero con signo opuesto, se observa en los cubos interiores (Figura 6.18). En este caso, las desviaciones según la dirección del eje Z son inferiores a $25\ \mu\text{m}$, mientras que las desviaciones según los ejes X e Y rondan

los 100 μm a excepción de la dimensión Y de los cubos fabricados a 30° y 45°, cuyas desviaciones ascienden a 150 μm y 200 μm , respectivamente.

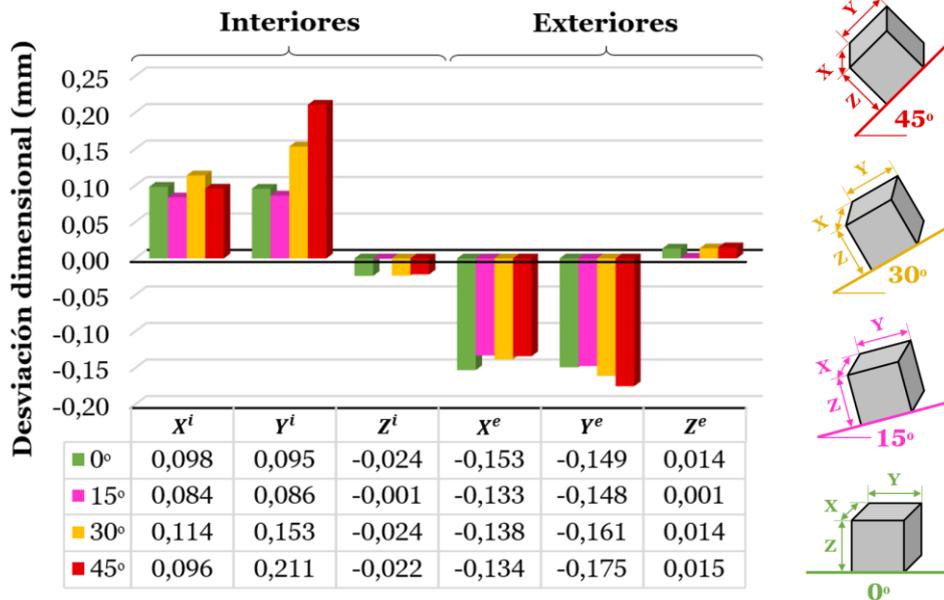


Figura 6.18. Desviaciones dimensionales de los cubos de las piezas patrón de geometrías inclinadas.

Las desviaciones de los diámetros de las semiesferas y los cilindros, tanto interiores como exteriores, se muestran en la Figura 6.19. En los cilindros exteriores se observa una contracción significativa, en torno a 170 μm para los fabricados a 0° y 15°, aumentando a 220 μm para los ángulos de 30° y 45°. Las semiesferas exteriores presentan una contracción del orden de 180 μm independientemente del ángulo de fabricación. Respecto a las semiesferas y los cilindros interiores, las desviaciones muestran una tendencia decreciente al aumentar el ángulo de fabricación (Figura 6.19).

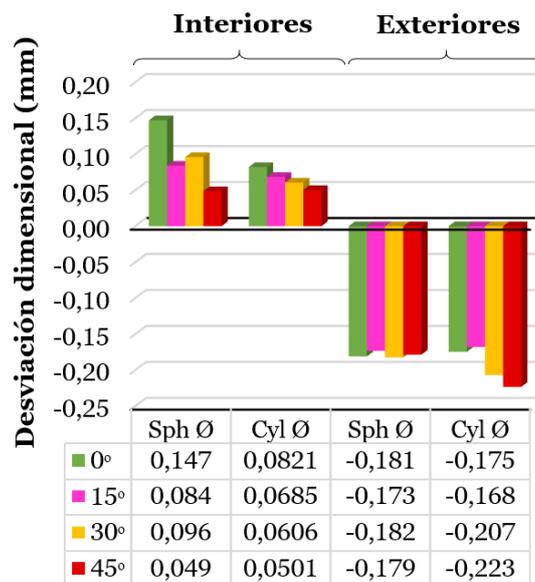


Figura 6.19. Desviaciones dimensionales de las semiesferas y cilindros de las piezas patrón de geometrías inclinadas.

Independientemente del ángulo del plano base (0° , 15° , 30° , 45°), las entidades geométricas presentan importantes desviaciones dimensionales a lo largo de los ejes X e Y (direcciones paralelas al plano base) y desviaciones despreciables en la altura (eje Z o dirección perpendicular al plano base). Las dimensiones X e Y de las geometrías exteriores son inferiores a los valores del CAD nominal debido al efecto de contracción causado por el enfriamiento durante el proceso SLM. El elevado gradiente de temperatura, debido al calentamiento y enfriamiento localizados por el movimiento de la fuente de calor, provoca una expansión y contracción térmica del material y, en consecuencia, la deformación de las piezas. Por ello, se recomienda redimensionar las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas con la tecnología SLM considerando estas desviaciones dimensionales en la etapa de diseño.

6.3.4. Conclusiones del diseño de geometrías inclinadas

La ventaja de estudiar geometrías en planos inclinados es de gran interés para la AM, y es precisamente en lo que se centra este estudio. Además de evaluar la calidad geométrica y dimensional de las piezas SLM, se propone una guía práctica para diseñar este tipo de piezas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda considerar las siguientes conclusiones en la etapa de diseño de las piezas SLM de acero inoxidable 17-4PH:

- ❖ Los planos impresos con ángulo de inclinación entre 0° y 90° presentan un error de forma promedio de $60 \mu\text{m} \pm 9 \mu\text{m}$. Se observa una ligera tendencia creciente del error geométrico al reducir el ángulo de fabricación, lo que está directamente relacionado con el típico «efecto escalera» de las técnicas de fabricación basadas en la adición de capas, sin obtenerse grandes diferencias entre los valores resultantes.
- ❖ La fabricación de superficies horizontales y verticales proporciona buena precisión dimensional, con desviaciones respecto a los valores nominales inferiores a $40 \mu\text{m}$.
- ❖ El error geométrico de las entidades semiesféricas y cilíndricas, tanto interiores como exteriores, muestra una tendencia creciente al aumentar el ángulo del plano base. Respecto a las caras de los cubos, tanto interiores como exteriores, destaca el elevado error geométrico de las superficies con pendiente negativa de 45° . Por lo tanto, desde el punto de vista de la precisión geométrica, se recomienda evitar las superficies con pendientes negativas iguales o superiores a 45° .
- ❖ El análisis dimensional de las geometrías fabricadas en planos inclinados muestra un error importante en las direcciones X e Y, siendo despreciable en la dirección Z. Estos errores dimensionales se deben a la contracción de la pieza causada por el rápido

enfriamiento sufrido durante el proceso SLM, dando como resultado entidades interiores más grandes y entidades exteriores más pequeñas que las dimensiones de diseño del CAD nominal. El porcentaje de contracción del material depende del tamaño de la pieza, a medida que disminuye el tamaño aumenta dicho porcentaje. Para la fabricación de piezas (con geometrías de tamaño similar a las de este estudio) destinadas a aplicaciones con tolerancias dimensionales estrechas, se recomienda redimensionar las geometrías de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Redimensionamiento de geometrías en función del ángulo de inclinación del plano base.

Redimensionamiento de geometrías (%)						
Ángulo	↑ Exteriores			↓ Interiores		
	Dimensión XY cubos	Ø esferas	Ø cilindros	Dimensión XY cubos	Ø esferas	Ø cilindros
0°	1,50	1,80	1,20	-1,00	-1,50	-0,70
15°	1,50	1,80	1,20	-1,00	-1,00	-0,60
30°	1,50	1,80	1,50	-1,50	-1,00	-0,50
45°	1,50	1,80	1,50	-1,50	-0,50	-0,40

- ❖ Respecto a la precisión geométrica de las entidades fabricadas en planos inclinados, el factor más influyente es el ángulo de fabricación, obteniéndose mejores resultados para los ángulos pequeños. En el caso de la precisión dimensional, además del ángulo de fabricación, el tipo de geometría es otro factor importante a tener en cuenta.

Las piezas patrón propuestas en este estudio se deben redimensionar ajustándose al volumen de fabricación para la evaluación de diferentes sistemas de AM.

6.4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados descritos en este capítulo han dado lugar a una publicación en Revista JCR:

- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Zapico, P. y Barreiro, J. (2022) «Proposal of design rules for improving the accuracy of selective laser melting (SLM) manufacturing using benchmarks parts», *Rapid Prototyping Journal*, 28(6), pp. 1129-1143. doi: 10.1108/RPJ-06-2021-0130 – Factor de impacto JCR (2021): Q2.

Y una publicación en Congreso Internacional (MESIC 2019) y Revista Internacional:

- ▶ Cuesta, E., Gesto, A., Álvarez, B. J., Martínez-Pellitero, S., Zapico, P. y Giganto, S. (2019) «Dimensional accuracy analysis of Direct Metal Printing machine focusing on roller positioning errors», *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 2-9. doi: 10.1016/j.promfg.2019.07.022 – Factor de impacto SJR: Q2.

Capítulo 7

INFLUENCIA DE LOS POSTPROCESOS SLM

En este capítulo se estudia la influencia de la aplicación de los postprocesos mecánicos (arenado) y térmicos (relajación de tensiones, puesta en solución, envejecimiento, HIP) en la calidad de las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. INTERÉS DEL ESTUDIO*
- 2. PROCESO MECÁNICO DE ARENADO*
- 3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS*
- 4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS*

7.1. INTERÉS DEL ESTUDIO

Entre los diferentes postprocesos mecánicos aplicados con la finalidad de mejorar diversos aspectos en la calidad de las piezas SLM se encuentra el arenado o chorreo de arena. Se trata de un método abrasivo comúnmente aplicado que permite tanto mejorar la resistencia a la fatiga como eliminar los defectos e irregularidades superficiales típicos de esta técnica de fabricación, lo que conlleva la disminución de la rugosidad y la mejora de la topología superficial de las piezas. Sin embargo, este postproceso aún no ha sido estudiado en las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH. Por ello, el primer estudio de este capítulo se centra en la evaluación de la influencia del postproceso de arenado en diferentes aspectos de la calidad de las piezas fabricadas con este material. Aspectos directamente relacionados con esta operación como la calidad superficial, geométrica y dimensional, así como propiedades relacionadas indirectamente como la porosidad externa, ya que la erosión de la superficie puede influir en su valor.

Por otro lado, después de la fabricación, se recomienda la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones, debido a que es el método más efectivo para aliviar las tensiones residuales generadas durante el proceso SLM. Las piezas separadas de la placa base contienen niveles de tensión mucho más bajos que las que permanecen unidas a ella, pero sufren deformaciones durante la operación de separación. Por consiguiente, el tratamiento de relajación de tensiones alcanza gran relevancia después de la fabricación SLM y antes de la separación de las piezas de la placa base. Además, este postproceso térmico es beneficioso para homogeneizar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas de las piezas impresas. Asimismo, existen otros tratamientos térmicos, como la puesta en solución y el envejecimiento, también aplicados para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas metálicas tras su fabricación. Por otro lado, el postproceso térmico HIP se utiliza para reducir la porosidad interna de las piezas y, en consecuencia, mejorar sus propiedades mecánicas.

Los diferentes tratamientos térmicos pueden influir de diferente forma en las piezas impresas en función de diferentes aspectos como el material, los parámetros propios del postproceso (tiempo y temperatura), los tratamientos previos, así como los parámetros específicos de la fabricación SLM. En relación, los estudios realizados por otros autores respecto al análisis de la influencia de diferentes tratamientos térmicos en las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH, han utilizado potencia del láser mayor a 200 W, muy superiores a las utilizadas en esta tesis. Por esta razón, el segundo estudio de este capítulo se centra en evaluar la aplicación de postprocesos térmicos en la calidad de las piezas de acero 17-4PH fabricadas con potencias bajas (38 W). Este estudio permitirá establecer recomendaciones relativas a los tratamientos térmicos específicas para estos componentes en función de su aplicación final.

7.2. PROCESO MECÁNICO DE ARENADO

En este apartado se estudia la influencia del postproceso mecánico de arenado en la calidad de las piezas impresas mediante SLM en acero inoxidable 17-4PH. Con la finalidad de unificar y simplificar la denominación de los estados de las piezas antes y después de la aplicación del postproceso de arenado se utiliza la siguiente designación:

- **F:** Fabricación SLM (sin aplicación del postproceso de arenado).
- **A:** Aplicación del postproceso mecánico de arenado.

7.2.1. Mejora de la rugosidad superficial

Comúnmente los postprocesos mecánicos se aplican a las piezas impresas mediante SLM con el objetivo de mejorar su acabado superficial. Teniendo en cuenta que en general las estrategias de escaneo normal y hexagonal son las que presentan una mejor combinación de propiedades (porosidad, propiedades mecánicas, rugosidad, calidad geométrica y dimensional), tal como se concluyó en el apartado 4.4, este apartado se centra en la optimización del proceso de arenado para las piezas fabricadas utilizando estas dos estrategias. Por otro lado, la superficie con peor acabado en las piezas SLM es la superior, correspondiente con la superficie que revela la estrategia de escaneo láser empleada en la fabricación. Por ello, este estudio se enfoca únicamente en la optimización de esta superficie, considerada la más desfavorable. Puesto que, al mejorar esta superficie, en consecuencia, el resto de las superficies (superficies laterales) mejoraran de la misma forma, o incluso más. La Figura 7.1 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio.

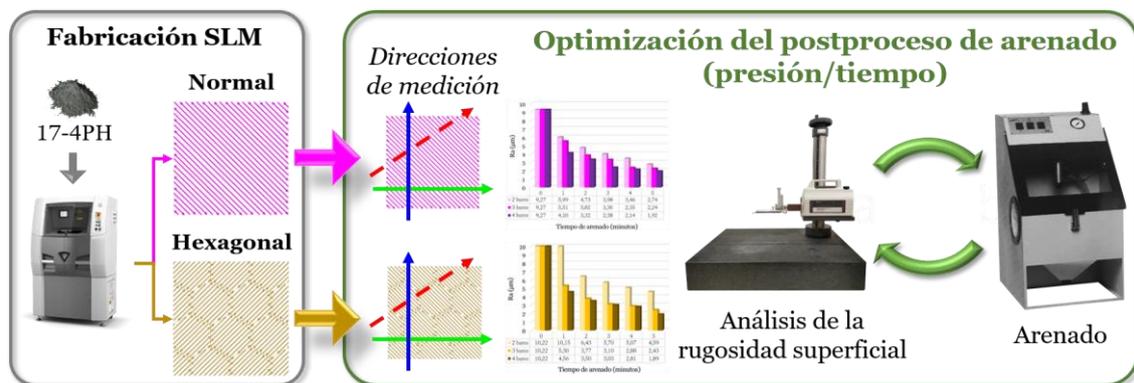


Figura 7.1. Metodología de optimización del postproceso de arenado (presión y tiempo) en función del acabado superficial.

En primer lugar, se fabricaron piezas prismáticas con un tamaño reducido para no tener que desplazarlas durante el arenado y, por otro lado, con un tamaño adecuado para la medición

de la rugosidad en su superficie superior (10 mm x 10 mm x 2,5 mm). A continuación, se realizó un proceso iterativo de aplicación del postproceso de arenado y medición de la rugosidad. Los resultados de rugosidad son el promedio de 5 mediciones realizadas según cada una de las tres direcciones mostradas en la Figura 7.1 (verde o eje X, azul o eje Y, roja o inclinación aleatoria).

Los sistemas de arenado convencionales ofrecen la posibilidad de utilizar diferentes abrasivos (principalmente Al_2O_3 o SiC) en función de los materiales a tratar. Además, permiten variar el rango de presión del aire con el fin de realizar el tratamiento de manera más suave o más agresiva. En este estudio, el arenado se realizó con Al_2O_3 , estableciendo la presión en tres valores de ensayo (2, 3 y 4 bares) y variando el tiempo de exposición desde 1 minuto hasta 5 minutos (en incrementos de 1 minuto), manteniendo constante la distancia de exposición. Para mantener constante la distancia entre la boquilla de arenado y la pieza se diseñó un soporte formado por ocho piezas, cuyo montaje final se muestra en la Figura 7.2a. Este utillaje utilizado en la experimentación, además de mantener la distancia del arenado constante, también permite posicionar y fijar la pieza justo debajo de la boquilla de arenado gracias al diseño de una placa móvil que contiene un vaciado de dimensiones adecuadas para encajar la pieza. La Figura 7.2b muestra una pieza encajada en la placa móvil durante el proceso de medición de la rugosidad superficial. Las diferentes piezas que componen el utillaje se fabricaron mediante la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM, *Fused Deposition Modeling*) con filamento de ácido poliláctico (PLA, *Poly-Lactic Acid*).

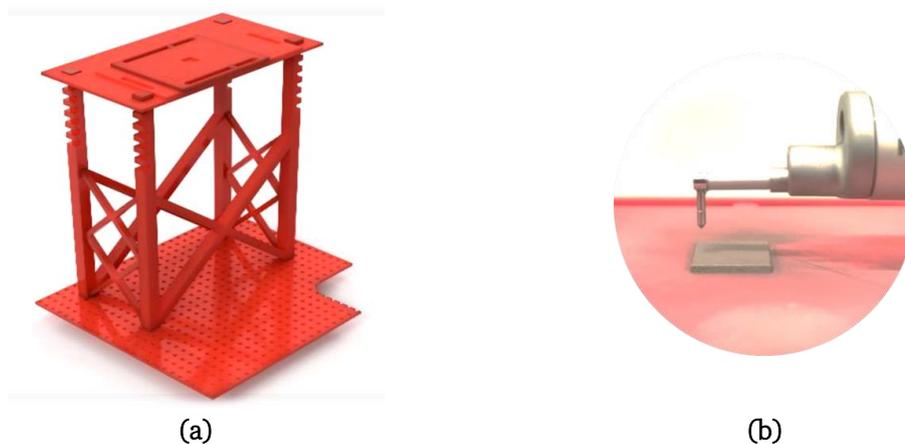


Figura 7.2. (a) Utillaje utilizado en el proceso de optimización del arenado. (b) Pieza encajada en el utillaje durante el proceso de medición de la rugosidad.

Optimización del proceso de arenado

Para la optimización del proceso de arenado se midió la rugosidad a través de los parámetros habituales R_a y R_t . Como era de esperar, los resultados muestran una disminución de la rugosidad superficial, tanto del parámetro R_a (Figura 7.3) como R_t (Figura 7.4), con el aumento del tiempo de aplicación del arenado. Asimismo, el aumento de la presión de este postproceso mecánico también mejora el acabado superficial.

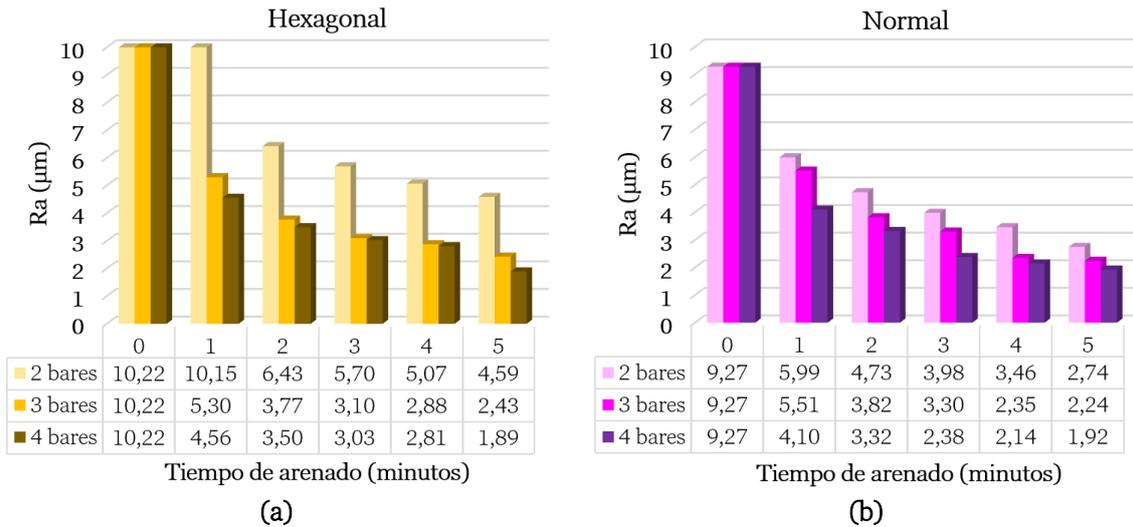


Figura 7.3. Resultados promedio de rugosidad (R_a) de las muestras sometidas a los diferentes parámetros de arenado e impresas con la estrategia de escaneo: (a) hexagonal y (b) normal.

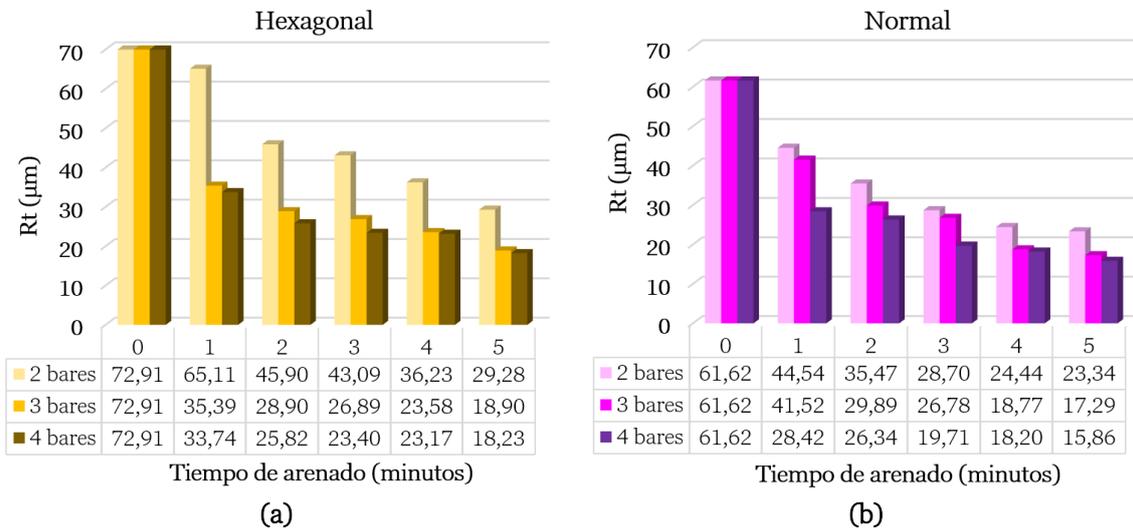


Figura 7.4. Resultados promedio de rugosidad (R_t) de las muestras sometidas a los diferentes parámetros de arenado e impresas con la estrategia de escaneo: (a) hexagonal y (b) normal.

Para realizar el ensayo se fija como objetivo conseguir una rugosidad superficial con un R_a inferior a $3 \mu\text{m}$. Por lo tanto, en el caso de las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo hexagonal, el proceso de arenado óptimo consiste en la aplicación de 3 bares o 4 bares de presión durante 4 minutos (Figura 7.3a). Mientras que, para las piezas fabricadas con la estrategia normal, este resultado se puede conseguir con 2 bares durante 5 min, 3 bares durante 4 min o 4 bares durante 3 min (Figura 7.3b).

En base a los resultados obtenidos en este estudio, cabe destacar la importante mejora del acabado superficial de las piezas fabricadas por SLM con el postproceso mecánico de arenado. Por otro lado, también es importante destacar la influencia de la estrategia de escaneo en este postproceso. Los resultados mostrados en la Figura 7.3 y la Figura 7.4 demuestran que la estrategia de escaneo hexagonal requiere más tiempo/presión de arenado

que la estrategia de escaneo normal para conseguir una rugosidad superficial similar. Ambas estrategias de escaneo tienen cierto solape entre pasadas del láser, pero en el caso de la estrategia hexagonal también tiene solape entre hexágonos, razón por la cual presenta una rugosidad de partida ligeramente superior y requiere parámetros de arenado (tiempo/presión) mayores que la estrategia normal para conseguir resultados similares.

7.2.2. Mejora de la porosidad externa

La aplicación del postproceso mecánico de arenado, al eliminar los defectos superficiales y mejorar el acabado superficial (Figura 7.5), puede influir en la porosidad externa de las piezas SLM. Para comprobar si realmente el arenado afecta sobre la porosidad externa de las piezas, se fabricaron cubos de 25 mm de lado utilizando la estrategia de escaneo hexagonal, considerada como una de las más desfavorable en términos de acabado superficial de la superficie superior, además requiere más tiempo/presión durante el proceso de arenado para obtener resultados similares a los de la estrategia de escaneo normal (como se concluyó en el apartado 7.2.1). A continuación, los cubos se arenaron uniformemente durante 10 minutos con una presión de 4 bares y se sometieron tanto al análisis de la densidad/porosidad mediante el principio de Arquímedes como a la medición de la rugosidad superficial de todas sus caras (laterales y superior).

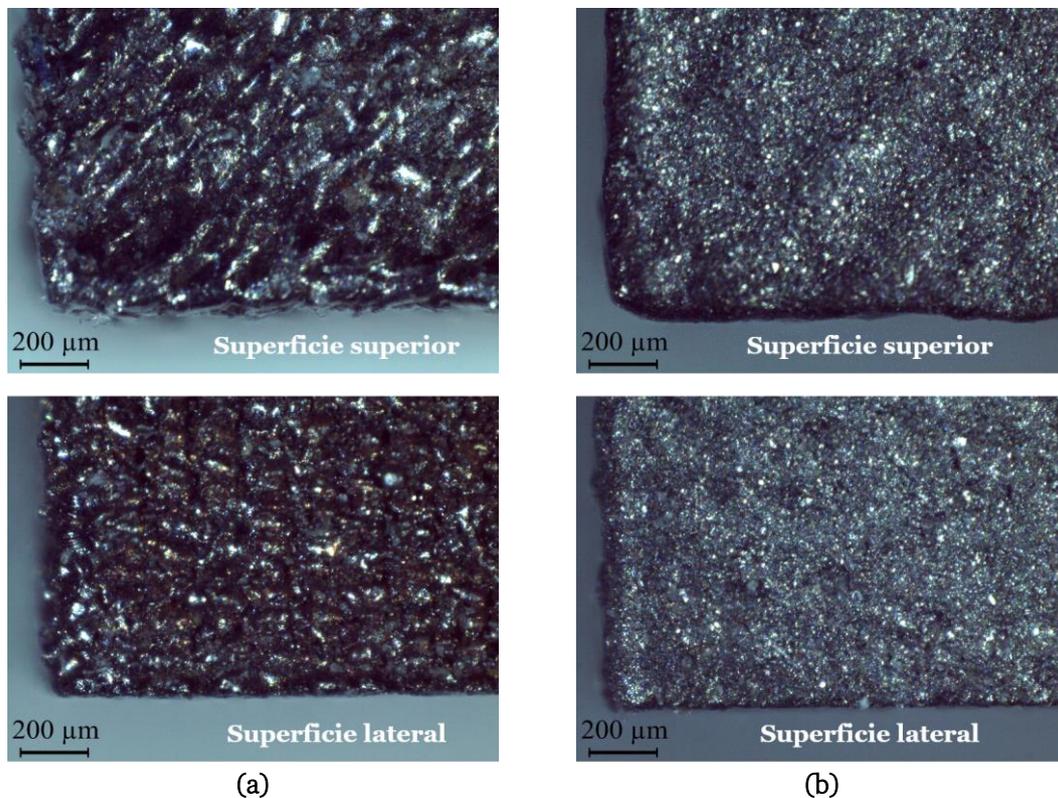


Figura 7.5. Imágenes del macroscopio con x80 aumentos de la superficie superior y lateral de un cubo en los estados: (a) F y (b) A.

La aplicación del postproceso de arenado consiguió reducir la rugosidad tanto de la cara superior como de las caras laterales de los cubos logrando una mejora superior al 20 % en la superficie superior y al 40 % en las superficies laterales para ambos parámetros de rugosidad, R_a y R_t (Tabla 7.1). Estos resultados demuestran que el arenado erosiona las superficies laterales (correspondientes a la adición de capas) en mayor medida que la superficie superior (correspondiente a la última capa, donde se revelan las marcas producidas por la estrategia de escaneo láser utilizada en la fabricación SLM), efecto que se estudia más en detalle en el siguiente apartado (7.2.3). Esta operación de acabado redujo la porosidad externa de las piezas en tono a un 35 % (Tabla 7.1), resultado que demuestra que las propiedades de rugosidad y porosidad externa están íntimamente ligadas y, por supuesto, directamente influenciadas por la aplicación del postproceso de arenado.

Tabla 7.1. Resultados de la rugosidad superficial y la porosidad externa de los cubos en los estados F y A.

Estado	Rugosidad (μm)				Porosidad externa (%)
	Superficie Superior		Superficie Lateral		
	R_a	R_t	R_a	R_t	
F	11,50 \pm 1,18	89,35 \pm 13,93	10,64 \pm 1,90	85,69 \pm 12,82	0,80
A	9,01 \pm 1,04	71,09 \pm 10,81	5,72 \pm 1,29	52,64 \pm 16,57	0,28

7.2.3. Influencia en la calidad geométrica y dimensional

La modificación de las superficies de las piezas fabricadas por SLM tras el postproceso de arenado influye directamente en su calidad geométrica y dimensional. En este apartado, se evalúa precisamente el efecto de la aplicación de este proceso mecánico, comparando los resultados de los estados pre (F) y post arenado (A). Para ello, se utilizan dos piezas patrón diseñadas y fabricadas para la evaluación geométrica y dimensional de otros estudios de la presente tesis doctoral.

A) Pieza patrón de cubos: consta de 21 cubos de 10 mm x 10 mm x 9,99 mm distribuidos uniformemente en la placa de fabricación. Esta pieza se utilizó para evaluar la influencia del posicionamiento de las piezas en la placa base (apartado 6.2). Como se describió detalladamente en el apartado 6.2, los planos de la pieza patrón de cubos se midieron por contacto palpando 100 puntos distribuidos uniformemente en una matriz de 10 x 10.

B) Pieza patrón de esferas: consta de 9 esferas de 5 mm, 10 mm y 15 mm de diámetro distribuidas en una matriz de 3 x 3 (Figura 7.6). Esta pieza se diseñó para evaluar la influencia de diferentes sistemas de medición óptica en la inspección de piezas SLM (estudio que se aborda en el apartado 8.3). La geometría canónica de tipo esfera, elegida por ser un elemento ideal desde el punto de vista metrológico, se diseñó con un ángulo de barrido de 210° y se ubicó sobre bases cilíndricas permitiendo así la medición de su hemisferio superior y evitando el uso de estructuras de soporte. La distribución de las esferas en diferentes alturas se basó en la idea metrológica de evaluar todo el volumen de trabajo de la máquina SLM.

Para la evaluación del efecto del arenado, las esferas de la pieza patrón se palparon por contacto (manteniendo constante la densidad de puntos por área) mediante una distribución uniforme de 100 puntos en las esferas de 5 mm de diámetro, 400 puntos en las de 10 mm de diámetro y 900 puntos en las de 15 mm, tanto en el estado pre (F) como post (A) arenado.



Figura 7.6. Diseño CAD pieza patrón esferas.

La evaluación de ambas piezas patrón permite definir el efecto del arenado sobre diferentes entidades geométricas, así como en las mismas geometrías con diferentes tamaños. Como se muestra en la Figura 7.7, las piezas patrón, tras la medición CMM y el análisis de la GD&T en el estado F, se someten al postproceso mecánico de arenado (aplicando una presión de 4 bares) y se vuelven a medir por contacto para comparar los resultados de ambos estados (F y A). El proceso de arenado se lleva a cabo de forma uniforme por toda la superficie de las piezas consiguiendo un valor medio de rugosidad de 6 μm de R_a .

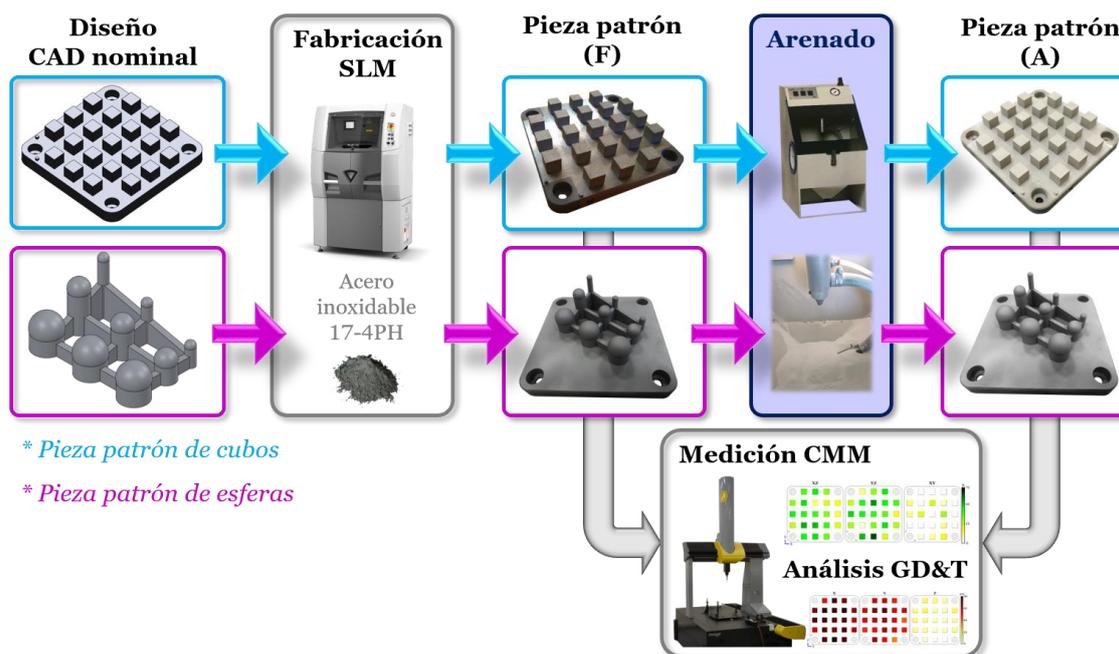


Figura 7.7. Metodología de evaluación de la calidad geométrica y dimensional de las piezas SLM sometidas al postproceso mecánico de arenado.

Análisis geométrico

A) Pieza patrón de cubos

Como se muestra en la Figura 7.8, el postproceso mecánico de arenado mejora notablemente el error geométrico de las caras XZ e YZ de los cubos, reduciendo 23 μm y 24 μm el valor promedio de la planitud, respectivamente (Tabla 7.2). Sin embargo, la planitud de las caras superiores de los cubos no se ve afectada por este postproceso, reduciendo ligeramente el valor promedio 2 μm (Tabla 7.2).

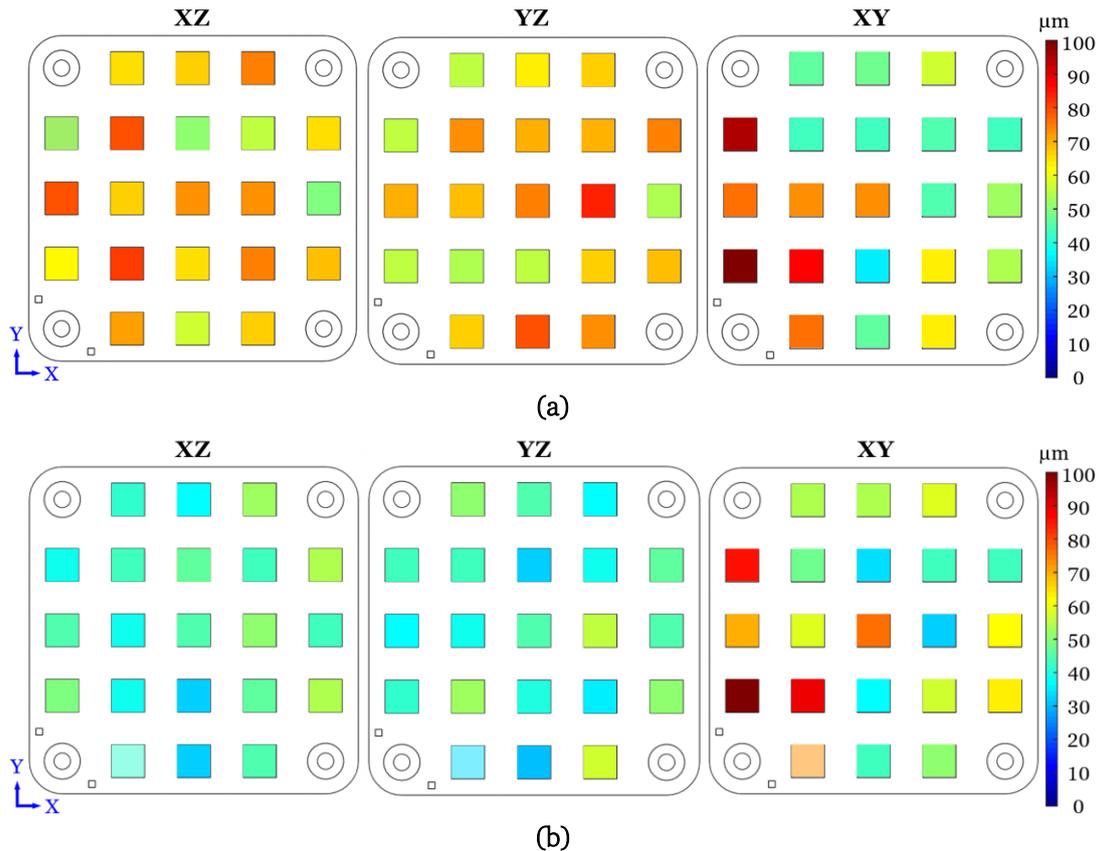


Figura 7.8. Distribución de la planitud de los cubos de la pieza patrón según sus caras XZ, YZ y XY en los estados: (a) F y (b) A.

Tabla 7.2. Resultados de la planitud de las caras XZ, YZ y XY de los cubos de la pieza patrón en los estados F y A.

Cara del cubo	Planitud (μm)		Tasa de mejora de planitud tras el arenado (%)
	F	A	
XZ	67 ± 13	44 ± 9	35
YZ	67 ± 12	43 ± 11	37
XY	61 ± 19	59 ± 19	4

En la Figura 7.9 se representa el porcentaje de mejora del error geométrico de planitud tras la aplicación del arenado. Este postproceso logra una tasa promedio de mejora de la planitud mayor al 35 % en las caras laterales (XZ e YZ) y de un 4 % en la cara superior (XY) de los cubos (Tabla 7.2).

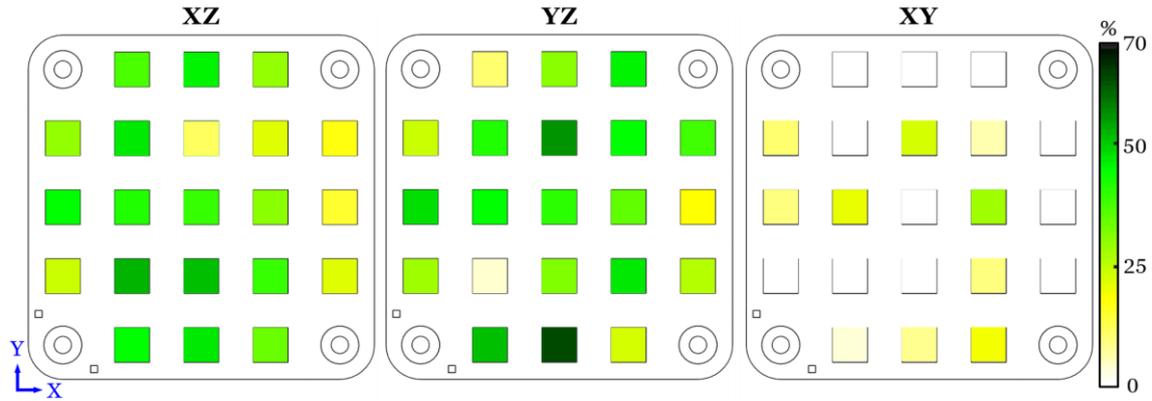


Figura 7.9. Distribución de la tasa de mejora de la planitud tras la aplicación del postproceso de arenado.

Respecto al error de paralelismo de las caras XY, el arenado no afecta prácticamente a los resultados (Tabla 7.3). El valor promedio disminuye ligeramente de 72 μm (con una desviación estándar de 21 μm) a 71 μm (con una desviación estándar de 20 μm), el valor mínimo varía de 41 μm a 40 μm y el valor máximo de 118 μm a 121 μm tras la aplicación de este postproceso mecánico.

Tabla 7.3. Resultados del paralelismo de las caras XY de los cubos de la pieza patrón respecto al plano base en los estados F y A.

Paralelismo (μm)											
F						A					
Cubo	Columna					Cubo	Columna				
Fila	C1	C2	C3	C4	C5	Fila	C1	C2	C3	C4	C5
F5	-	46	63	51	-	F5	-	57	66	51	-
F4	113	51	52	69	64	F4	103	45	53	61	79
F3	79	82	93	51	72	F3	74	73	92	40	85
F2	118	83	41	65	68	F2	121	86	45	62	72
F1	-	89	59	93	-	F1	-	83	57	77	-

B) Pieza patrón de esferas

Desde el punto de vista del error de forma, la impresora SLM fabrica las esferas con un error del orden de 100 μm (condición F) independientemente de su tamaño (Tabla 7.4). Sin embargo, el proceso de arenado afecta al error de forma dependiendo del diámetro de la esfera. Para las esferas de menor diámetro (5 mm) se produce una mejora del 7 %. En el caso de las esferas de 10 mm de diámetro, el error de forma se reduce 10 μm , lo que supone una mejora del 11 %. Y finalmente, para las esferas de mayor tamaño (15 mm de diámetro) se produce una mejora del 22 % (Tabla 7.4). Los errores de forma de cada una de las esferas se muestran de forma gráfica en la Figura 7.10.

Tabla 7.4. Resultados del error de forma de las esferas según su diámetro en los estados F y A.

Diámetro esferas (mm)	Error de forma (μm)		Tasa de mejora del error de forma tras el arenado (%)
	F	A	
5	103 \pm 16	96 \pm 24	7
10	94 \pm 15	84 \pm 19	11
15	100 \pm 7	78 \pm 1	22

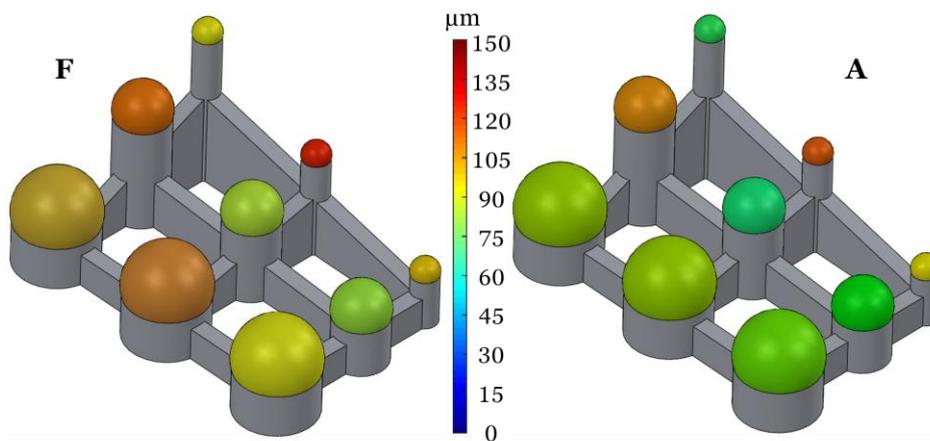


Figura 7.10. Resultados del error de forma de las esferas en los estados F y A.

Análisis dimensional

A) Pieza patrón de cubos

La Figura 7.11 representa gráficamente las desviaciones de las dimensiones de los cubos según los ejes X, Y y Z (largo, ancho y alto). Como se muestra en la Tabla 7.5, el proceso de arenado influye notablemente en las dimensiones relativas a las caras laterales de los cubos (largo y ancho), sin alterar prácticamente su altura (relativa a la cara superior).

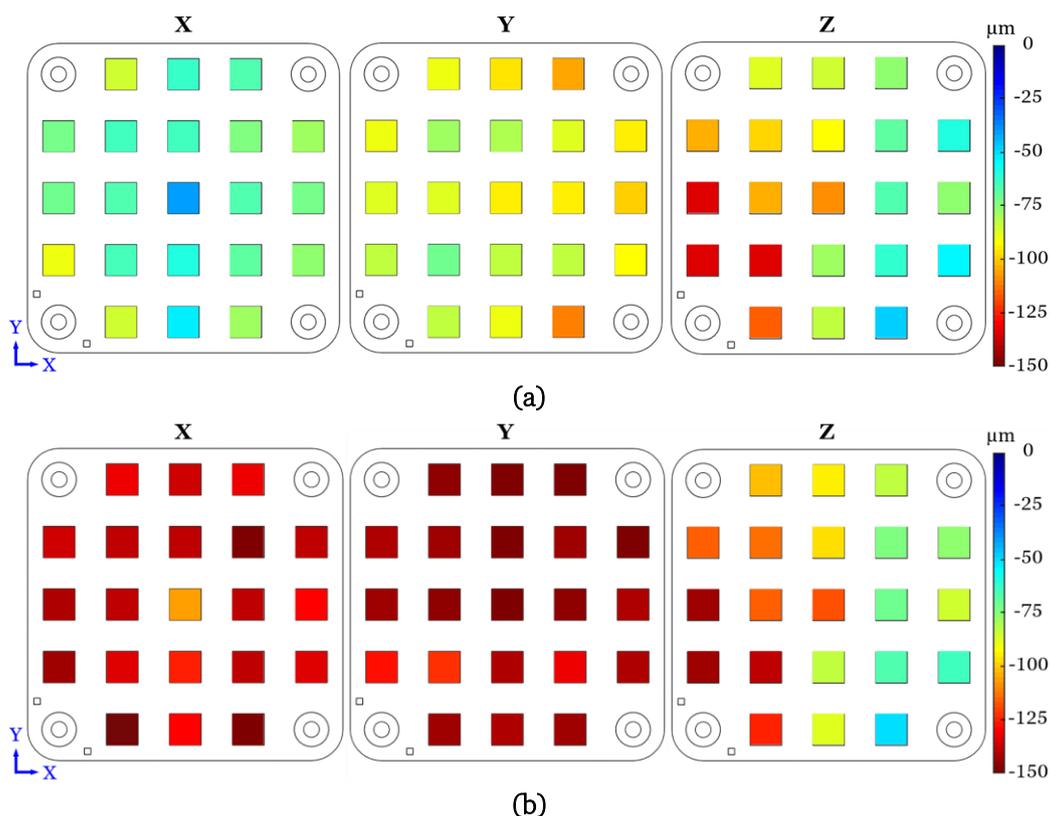


Figura 7.11. Distribución de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según X, Y y Z en los estados: (a) F y (b) A.

Tabla 7.5. Resultados de la desviación dimensional de los cubos de la pieza patrón según X, Y y Z en los estados F y A.

Dimensión del cubo	Desviación dimensional (μm)	
	F	A
X	-69 ± 11	-137 ± 10
Y	-89 ± 9	-144 ± 8
Z	-89 ± 26	-98 ± 27

La operación de arenado afecta notablemente a las caras laterales de los cubos, tanto a la planitud (caras XZ e YZ) como a las dimensiones (X e Y), debido a la eliminación de partículas adheridas a estas caras. Este efecto favorece la calidad geométrica de las piezas SLM, ya que disminuye su error de planitud, mientras que, desde el punto de vista dimensional, aumenta la desviación respecto a los valores nominales, haciendo las piezas aún más pequeñas que en el estado previo al arenado (F). La erosión de las piezas producida por la aplicación del arenado (Tabla 7.6 y Figura 7.12) alcanza valores promedios de $68 \mu\text{m}$ y $54 \mu\text{m}$ en las dimensiones X e Y, respectivamente, siendo despreciable su efecto en la dimensión Z (valor promedio de $9 \mu\text{m}$).

Tabla 7.6. Efecto de la erosión del arenado en las dimensiones (X, Y, Z) de los cubos.

Dimensión	Erosión (μm)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
X	51	78	68
Y	35	71	54
Z	1	16	9

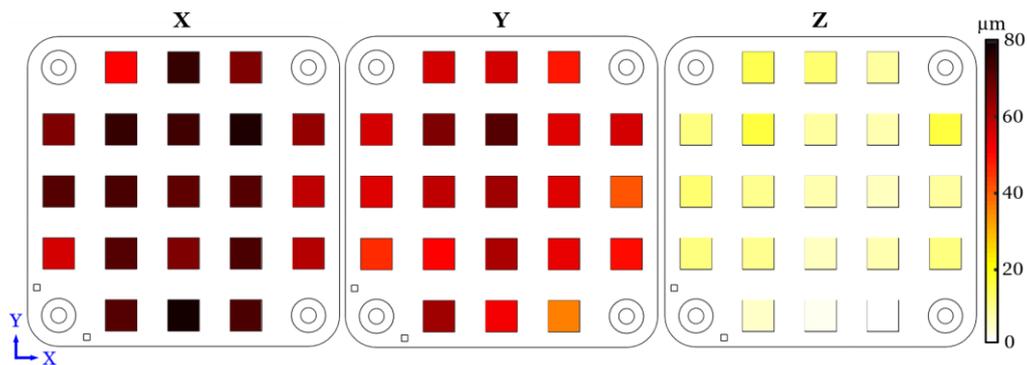


Figura 7.12. Distribución de la variación dimensional de los cubos tras la aplicación del postproceso de arenado.

En relación al análisis dimensional de las distancias entre las caras homólogas de diferentes cubos, se observa una disminución de la desviación según el eje X tras la aplicación del arenado (Tabla 7.7), mientras que según el eje Y las desviaciones varían sin una tendencia clara (Tabla 7.8). Este efecto podría estar relacionado con la acción del rodillo en su movimiento lineal (eje X) para la deposición y compactación de las capas de polvo metálico.

Tabla 7.7. Desviación en las distancias entre los cubos según el eje X en los estados F y A.

Fila	Desviación en la distancia X (μm)	
	F	A
F1	-13 ± 13	-9 ± 12
F2	-27 ± 2	-17 ± 6
F3	-20 ± 9	-14 ± 10
F4	-14 ± 8	-9 ± 8
F5	-8 ± 2	7 ± 3

Tabla 7.8. Desviación en las distancias entre los cubos según el eje Y en los estados F y A.

Columna	Desviación en la distancia Y (μm)	
	F	A
C1	3 ± 2	5 ± 7
C2	-17 ± 6	-24 ± 5
C3	-37 ± 17	-37 ± 18
C4	-67 ± 21	-57 ± 21
C5	-38 ± 21	-36 ± 19

B) Pieza patrón de esferas

Como se muestra en la Tabla 7.9, los diámetros de las esferas también son menores que los valores nominales del modelo CAD diseñado. Las desviaciones dimensionales oscilan entre $(-104 \pm 8) \mu\text{m}$ (esferas de menor diámetro) y $(-136 \pm 16) \mu\text{m}$ (esferas de mayor tamaño) en el estado F (Tabla 7.9). Cabe destacar que el postproceso de arenado provoca tasas de erosión muy constantes independientemente del tamaño de las esferas, con un valor promedio de unos $50 \mu\text{m}$ (Tabla 7.9). El hecho de que la tasa de erosión sea constante e independiente del diámetro y la posición de las esferas en la placa, sugiere que un arenado manual puede ser suficientemente uniforme y homogéneo para todos los tipos de superficies.

Tabla 7.9. Resultados de la desviación dimensional de las esferas en los estados F y A.

Diámetro esferas (mm)	Desviación dimensional (μm)		Tasa de erosión tras el arenado (μm)
	F	A	
5	-104 ± 8	-156 ± 8	52
10	-123 ± 9	-171 ± 6	48
15	-136 ± 16	-186 ± 6	50

7.2.4. Conclusiones de la aplicación del arenado

En conclusión, cabe destacar la influencia del postproceso de arenado sobre diferentes propiedades de las piezas fabricadas en acero 17-4PH mediante la tecnología SLM:

❖ Influencia en la rugosidad superficial

La aplicación del arenado mejora sustancialmente el acabado superficial de las piezas fabricadas por SLM. Por otro lado, también es importante destacar la influencia de la estrategia de escaneo láser en este postproceso mecánico. Los resultados obtenidos revelan que la estrategia de escaneo hexagonal requiere más tiempo/presión de arenado que la estrategia de escaneo normal para conseguir una rugosidad superficial similar. El postproceso de arenado óptimo necesario para conseguir un acabado superficial con un parámetro de $R_a < 3 \mu\text{m}$, consiste en la aplicación de 4 bares de presión durante 3 minutos para las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo normal y 3-4 bares de presión durante 4 minutos para las piezas fabricadas utilizando la estrategia hexagonal. Estos parámetros de arenado son aplicables a características

de tamaño similar a las de este estudio, en consecuencia, si las características tienen mayor superficie el tiempo requerido también se incrementará.

❖ **Influencia en la porosidad externa**

Las propiedades de rugosidad superficial y porosidad externa de las piezas impresas en metal están íntimamente ligadas y directamente influenciadas por la aplicación del postproceso de arenado. Este postproceso permite mejorar ambas propiedades en este tipo de piezas.

❖ **Influencia en la calidad geométrica y dimensional**

Respecto al análisis geométrico, se encuentran diferencias en la influencia del arenado en función del tipo de geometría y del tamaño de las entidades. En el caso de entidades prismáticas, la aplicación de este postproceso mecánico afecta notablemente la calidad de las caras laterales, mejorando el error de planitud en torno a un 36 %. Sin embargo, la cara superior de estas geometrías no se ve afectada por este postproceso, ni en sus resultados de planitud ni de paralelismo. En el caso de entidades de forma esférica, el arenado produce una mejora del error de forma del 11 % (en esferas de tamaño similar a los prismas anteriores). Por otro lado, el tamaño de la entidad también influye en los resultados, el porcentaje de mejora del error de forma aumenta a medida que aumenta el tamaño de la geometría. En el caso de las esferas, el porcentaje de mejora es del 7 %, 11 % y 22 % para los diámetros de 5 mm, 10 mm y 15 mm, respectivamente.

Respecto al análisis dimensional, como era de esperar, el arenado erosiona las piezas disminuyendo su tamaño. En el caso de geometrías prismáticas, este postproceso mecánico afecta notablemente las dimensiones X (largo) e Y (ancho), reduciendo su tamaño en torno a 60 μm . Sin embargo, este efecto de erosión no afecta prácticamente a la altura de las piezas prismáticas. En el caso de geometrías esféricas, la tasa de erosión provocada por el arenado es prácticamente constante e independiente de los diámetros, con un valor del orden de 50 μm . En consecuencia, se recomienda tener en cuenta estos resultados dimensionales en la etapa de diseño del CAD de las piezas SLM con el fin de mejorar su precisión dimensional. El hecho de que la tasa de erosión sea constante e independiente del tamaño y la posición de las entidades en la placa de fabricación, valida la aplicación del arenado manual como proceso homogeneizador de las superficies fabricadas mediante la tecnología SLM.

En resumen, el estudio de la influencia del arenado en diferentes propiedades de las piezas fabricadas por SLM revela una mejora notable de los resultados. Este proceso mecánico permite mejorar la calidad superficial y geométrica, así como la porosidad externa de las piezas. Por todo ello, se recomienda la aplicación del postproceso mecánico de arenado después de la fabricación SLM de piezas de acero inoxidable 17-4PH.

7.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En este apartado se estudia la influencia de los diferentes tratamientos térmicos (recomendados por el fabricante) en la calidad de las piezas fabricadas por SLM en acero inoxidable 17-4PH. Teniendo en cuenta que los tratamientos térmicos se aplican como postprocesos SLM con la finalidad de: (a) aliviar las tensiones residuales (relajación de tensiones), (b) mejorar las propiedades mecánicas (relajación de tensiones, puesta en solución y envejecimiento), y (c) reducir la porosidad (HIP); los estudios realizados en este apartado se centran en estos tres aspectos principales. Para unificar y simplificar la denominación de los diferentes estados de las piezas tras la aplicación de los tratamientos térmicos se utiliza la siguiente designación:

- **F: Fabricación SLM** (sin aplicación de tratamientos térmicos).
- **TT_{RT}**: Aplicación del **tratamiento térmico de relajación de tensiones** (650 °C durante 2 h y enfriamiento al aire).
- **TT**: Aplicación completa de los **tratamientos térmicos** recomendados por el fabricante: **relajación de tensiones** (650 °C durante 2 h y enfriamiento al aire) + **puesta en solución** (1.100 °C durante 1 h y enfriamiento al aire) + **envejecimiento** (480 °C durante 1 h y enfriamiento al aire).

7.3.1. Alivio de las tensiones residuales

Las tensiones residuales generadas durante el proceso SLM causan deformaciones en las piezas impresas que pueden limitar su rendimiento, aspecto de mayor relevancia en piezas cuyas aplicaciones demandan altos requisitos geométricos y dimensionales. El principal postproceso empleado para aliviar estas tensiones residuales es el tratamiento térmico de relajación de tensiones (TT_{RT}). Entre otros parámetros del proceso SLM, la estrategia de escaneo láser afecta el comportamiento termomecánico de las piezas y, por lo tanto, modificar la trayectoria recorrida por el láser puede reducir también estas tensiones residuales y las deformaciones al influir en la distribución de entrada de la intensidad del calor. En consecuencia, y completando el análisis sobre la influencia de las estrategias de escaneo láser realizado en el apartado 4.4, en este estudio se evalúa la influencia del tratamiento térmico de relajación de tensiones en la calidad geométrica y dimensional del conjunto de piezas fabricadas utilizando las tres estrategias de escaneo láser más habituales (normal, concéntrica y hexagonal) (Figura 4.21). Este conjunto de piezas fue fabricado e inmediatamente después digitalizado con el escáner de luz estructura antes de la realización del estudio descrito en el apartado 4.4, de esta forma se ha podido comparar ambos estados (F y TT_{RT}).

Todas las caras accesibles (superior y laterales) de las piezas cúbicas se evaluaron tanto dimensional como geoméricamente (planitud, paralelismo de su cara superior respecto al plano base y perpendicularidad de sus caras laterales respecto a su cara superior), mientras que de las muestras de tracción, debido a sus dimensiones, únicamente se analizó el error de planitud y paralelismo (respecto al plano base) de su cara superior.

Análisis geométrico

La Figura 7.13 muestra la comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos resultantes del escaneo del conjunto de piezas con diferentes estrategias de escaneo láser (N, C y H) en las condiciones pre (F) y post tratamiento térmico (TT_{RT}). El color verde revela las superficies de mejor ajuste entre el CAD nominal y las piezas fabricadas por SLM. Los resultados de la comparación 3D muestran una ligera deformación con forma cóncava de la placa base después del proceso SLM, efecto más pronunciado en la estrategia concéntrica y, en particular, en las muestras más largas y estrechas. Como se muestra en la Figura 7.13, el tratamiento térmico de relajación de tensiones parece no afectar notablemente a los conjuntos de piezas fabricados con las estrategias N y H. Sin embargo, en el caso de las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo C se observa cierta modificación geométrica (acentuándose aún más la forma cóncava del conjunto).

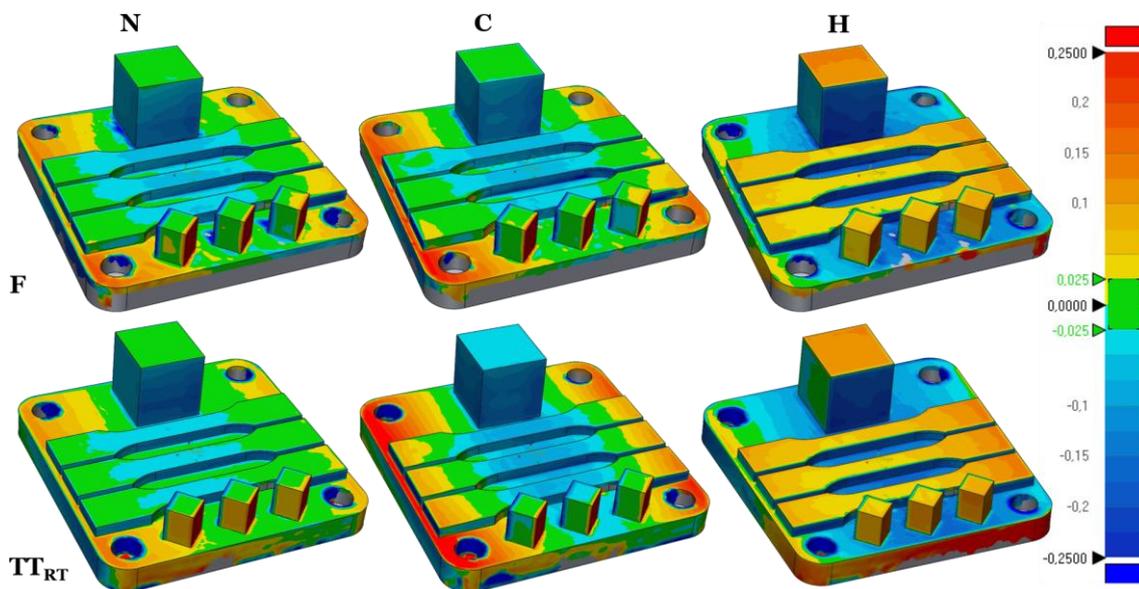
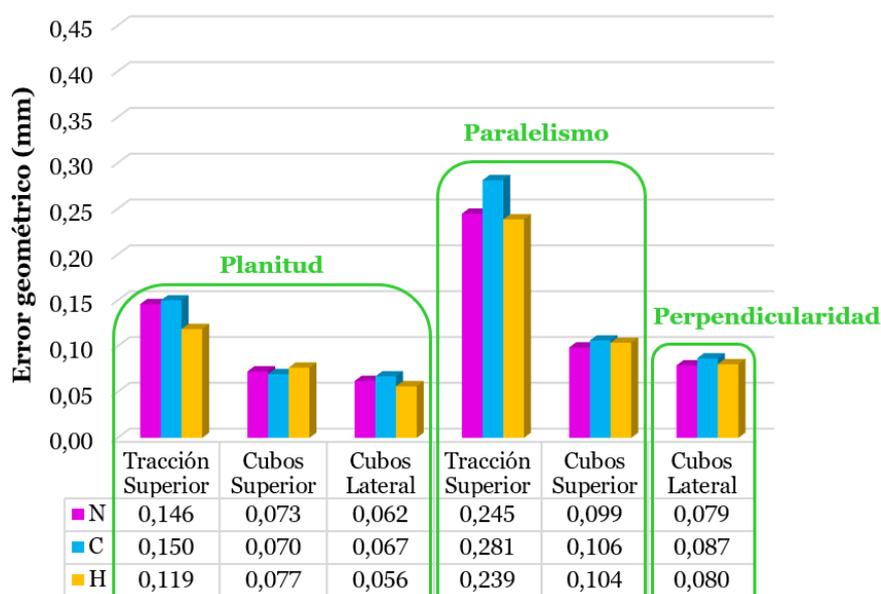


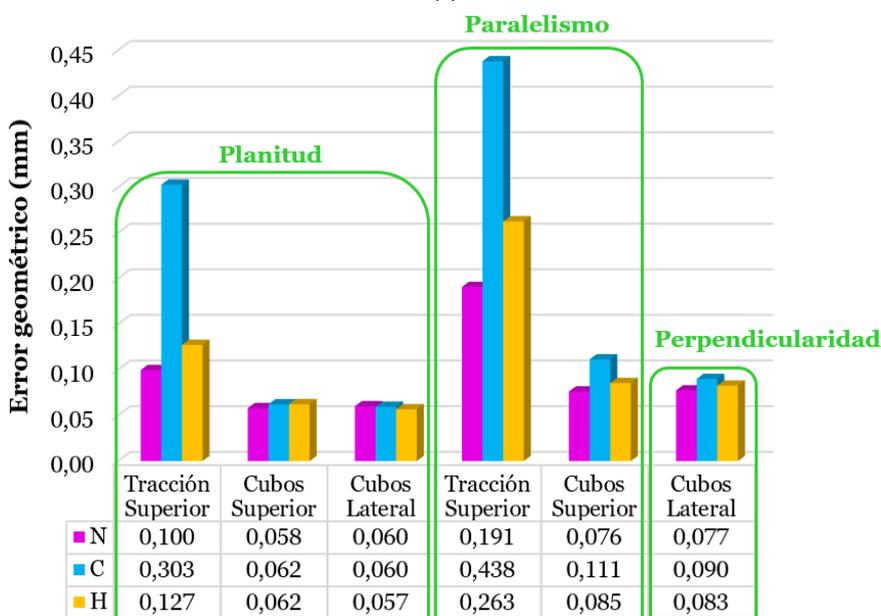
Figura 7.13. Comparación 3D entre el CAD nominal y las nubes de puntos escaneadas de las muestras N, C y H en la placa base en los estados: (a) F y (b) TT_{RT} .

La Figura 7.14 muestra los resultados del análisis geométrico en los estados F (Figura 7.14a) y TT_{RT} (Figura 7.14b) para las diferentes estrategias de escaneo láser evaluadas. Las variaciones resultantes de la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones en las muestras fabricadas con la estrategia H son despreciables ($<25 \mu\text{m}$) (Figura 7.14). En el caso de la estrategia N, la planitud y el paralelismo de las muestras de tracción disminuye

ligeramente en torno a 50 μm tras la aplicación del tratamiento térmico (Figura 7.14). Mientras que, en el caso de la estrategia de escaneo C, tanto la planitud como el paralelismo de las muestras de tracción aumentan significativamente (en torno a 155 μm) después de la aplicación de este postproceso térmico (Figura 7.14). Estos resultados revelan el aumento del error geométrico tras la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones en las muestras fabricadas con vectores de escaneo largos, como es el caso de la fabricación de muestras alargadas (muestras de tracción) utilizando la estrategia de escaneo C.



(a)



(b)

Figura 7.14. Resultados promedio del análisis geométrico de las muestras N, C y H en los estados: (a) F y (b) TT_{RR}.

En conclusión, el tratamiento térmico de relajación de tensiones residuales no afecta geoméricamente a las piezas fabricadas con las estrategias de escaneo N y H, mientras que

influye negativamente (aumentando el error) en las piezas alargadas impresas con la estrategia C.

Análisis dimensional

La Figura 7.15 muestra los resultados del análisis dimensional en las condiciones F (Figura 7.15a) y TT_{RT} (Figura 7.15b) para las tres estrategias. La aplicación del postproceso de relajación de tensiones varía ligeramente (disminución en torno a $50\ \mu\text{m}$) el valor del ancho y largo de los cubos impresos con la estrategia H, mientras que la dimensión Z permanece prácticamente constante (Figura 7.15). En las muestras fabricadas con las estrategias N y C, se observan ligeros cambios en la dimensión Z, con una disminución de $56\ \mu\text{m}$ en el caso de la estrategia N y un aumento de $42\ \mu\text{m}$ en la estrategia C (Figura 7.15). En conclusión, el tratamiento térmico de relajación de tensiones residuales no afecta notablemente a las dimensiones de las piezas fabricadas mediante SLM independientemente de la estrategia de escaneo láser utilizada, ya que las diferencias entre ambos estados se encuentran dentro de la resolución del sistema de medición.

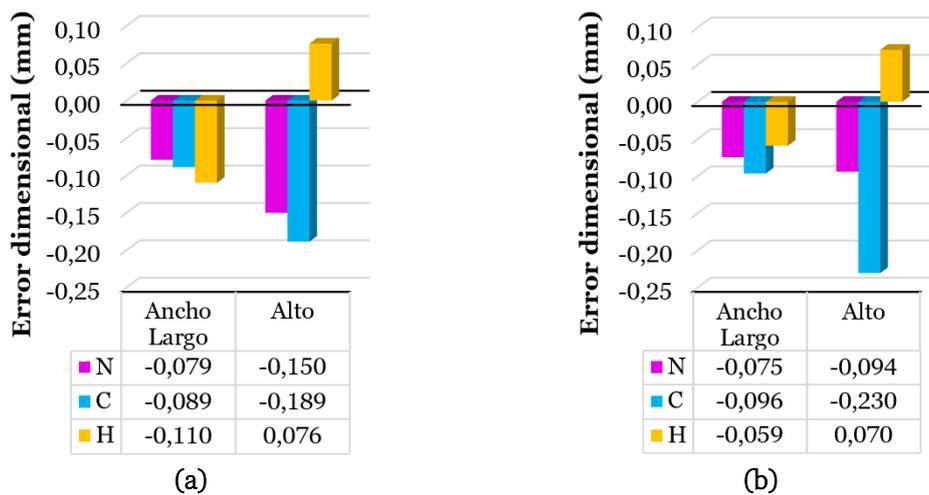


Figura 7.15. Resultados promedio del análisis dimensional de las muestras cúbicas N, C y H en los estados: (a) F y (b) TT_{RT} .

Comparando los resultados con los valores nominales, se concluye que, tras la aplicación del TT_{RT} (comúnmente recomendado), las estrategias de escaneo N y H proporcionan menores errores geométricos y dimensionales.

7.3.2. Mejora de las propiedades mecánicas

El postproceso de relajación de tensiones residuales, además de aliviar las tensiones generadas durante la fusión del polvo metálico, también puede homogeneizar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas. Por otro lado, el tratamiento térmico

de puesta en solución se suele aplicar seguido del tratamiento de envejecimiento con la finalidad de homogeneizar la microestructura, aumentar la dureza y mejorar las propiedades de tracción. Razón por la cual es interesante evaluar la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas por SLM en los tres estados: F, TT_{RT} y TT.

Para la realización de este estudio se fabricaron por SLM en acero inoxidable 17-4PH tres conjuntos de piezas, las cuales se separaron de la placa de fabricación mediante WEDM tras los estados correspondientes F, TT_{RT} y TT. Este conjunto de piezas contiene tres probetas diseñadas para la evaluación de la resistencia a la tracción y dos cubos de 10 mm de lado para la evaluación tanto de la microestructura como de la dureza, ambas analizadas en dos secciones transversales (T₁ y T₂) y dos longitudinales (L₁ y L₂).

Microestructura

Respecto a la microestructura, se revelan diferencias significativas tras la aplicación de los tratamientos térmicos (Figura 7.16). La Figura 7.16 muestra la microestructura de la sección transversal (correspondiente a la dirección de las capas de fabricación y caracterizada por las marcas visibles de la trayectoria del láser) de las muestras en los estados F, TT_{RT} y TT. La microestructura de las muestras F (Figura 7.16a) está formada por granos columnares solidificados en el centro de las piscinas de fusión y una microestructura mixta que contiene granos finos y equiaxiales en el borde. Tras el tratamiento térmico de relajación de tensiones o estado TT_{RT} (Figura 7.16b) se revela una microestructura más fina que en el estado F, observándose en mayor medida la microestructura mixta. Mientras que, tras la aplicación del tratamiento térmico completo o estado TT (Figura 7.16c), la microestructura es completamente martensítica.

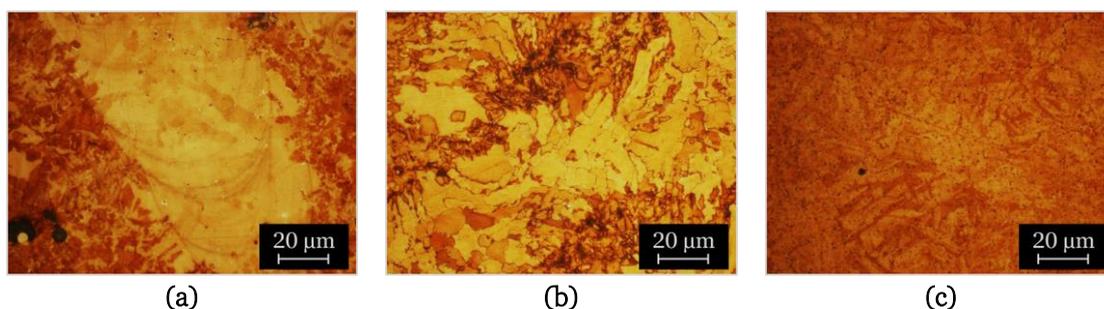


Figura 7.16. Imágenes del microscopio óptico con x500 aumentos de la microestructura de la sección T₁ de las muestras: (a) F, (b) TT_{RT} y (c) TT.

Dureza

Los resultados de dureza (promedio de nueve mediciones en cada muestra (T₁, T₂, L₁ y L₂) para cada estado) varían notablemente en función del postproceso térmico aplicado, alcanzando valores promedio de (286 ± 8) HV2, (352 ± 14) HV2 y (382 ± 9) HV2 para los estados F, TT_{RT} y TT, respectivamente (Figura 7.17). Tras la aplicación del tratamiento

térmico de relajación de tensiones (TT_{RT}) se observa un aumento en la dureza (Figura 7.17), probablemente debido a la nucleación heterogénea y al crecimiento de partículas o a una reducción en la fracción de la fase austenita a temperatura ambiente. Como era de esperar, las muestras sometidas al tratamiento térmico de envejecimiento presentan la mayor dureza (Figura 7.17), debido tanto a la microestructura martensítica como a las partículas duras precipitadas. Como se puede observar en la Tabla 7.10, no existe una correlación significativa entre la dureza y la sección analizada.

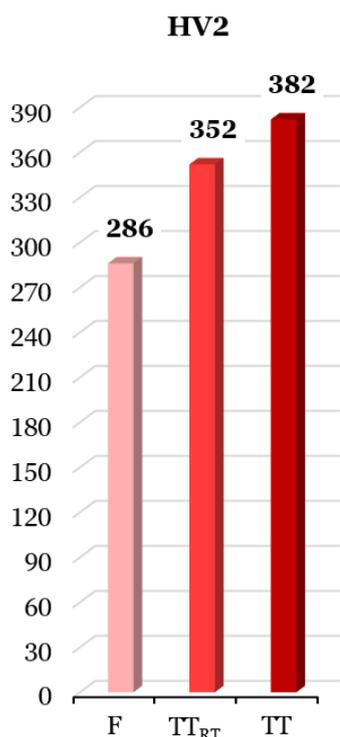


Figura 7.17. Resultados promedio de dureza de las muestras F, TT_{RT} y TT.

Tabla 7.10. Resultados de dureza de las secciones T_1 , T_2 , L_1 y L_2 de las muestras F, TT_{RT} y TT.

Estado	Sección	HV2	
F	Transversal	T_1 283 ± 9	
			279 ± 8
		T_2 274 ± 5	
	Longitudinal	L_1 285 ± 7	
			288 ± 8
		L_2 290 ± 8	
TT_{RT}	Transversal	T_1 354 ± 12	
			355 ± 16
		T_2 357 ± 20	
	Longitudinal	L_1 346 ± 7	
			349 ± 12
		L_2 352 ± 15	
TT	Transversal	T_1 378 ± 10	
			377 ± 9
		T_2 375 ± 8	
	Longitudinal	L_1 386 ± 7	
			388 ± 5
		L_2 389 ± 4	

Resistencia a la tracción

La Figura 7.18 muestra los valores promedio resultantes del ensayo de resistencia a la tracción realizado en las muestras sometidas a los diferentes tratamientos térmicos. El comportamiento a tracción varía notablemente en función del tratamiento térmico, las piezas que no han sido sometidas a ningún tratamiento térmico son las más dúctiles (Figura 7.18) y, en consecuencia, las menos duras (Figura 7.17). La aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones (TT_{RT}) da lugar a un aumento tanto de la dureza (en torno a 66 HV2

superior a las muestras F) como de los parámetros R_m (aproximadamente 121 MPa superior a las muestras F) y R_p (en torno a 87 MPa superior a las muestras F), aumentando notablemente el porcentaje de reducción de la sección producido en la zona de la rotura (Z). Si al estado TT_{RT} le añadimos la aplicación del tratamiento térmico de puesta en solución y el envejecimiento (estado TT), se observa también un aumento tanto en la dureza como en los parámetros del ensayo de tracción, alcanzando resultados de R_m de 1.144 MPa y R_p de 897 MPa (Figura 7.18).

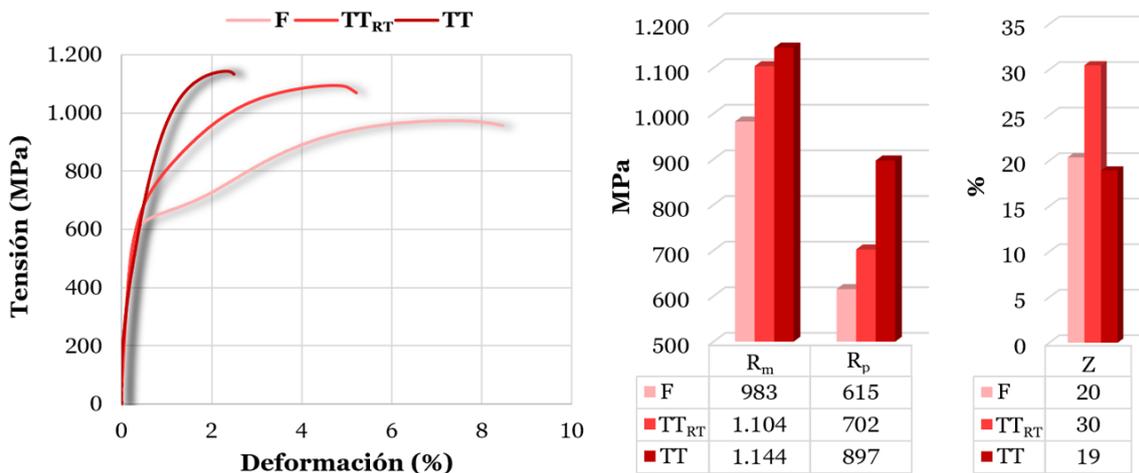


Figura 7.18. Resultados promedio del ensayo de tracción de las muestras F, TT_{RT} y TT (curva tensión-deformación, R_m , R_p y Z).

7.3.3. Reducción de la porosidad

La porosidad interna que se consigue con el proceso de fabricación SLM utilizado en esta tesis doctoral es muy pequeña, resultando en la fabricación de piezas con densidad interior superior al 99,50 %. Los altos valores de densidad son esenciales para aplicaciones en sectores críticos como el aeroespacial, donde se buscan piezas con densidad total. Por ello, y a pesar de obtener buenos resultados con este proceso de fabricación, se exploran formas de optimizar aún más la densidad obtenida, y así poder competir en estos sectores tan exigentes.

Entre los postprocesos más recomendados tanto por fabricantes como en la literatura revisada, el tratamiento térmico HIP permite la eliminación de las imperfecciones internas de las piezas (poros y zonas de polvo sin fundir). Este proceso consiste en aplicar alta presión isostática junto con altas temperaturas en una atmósfera inerte provocando la deformación plástica del material y, en consecuencia, la eliminación de las imperfecciones internas. La adecuada selección de los parámetros del proceso HIP (presión, temperatura y tiempo) en función del material utilizado en la fabricación SLM permite mejorar también las propiedades mecánicas del componente.

Inicialmente este estudio se planteó con la finalidad de comparar las propiedades de las piezas fabricadas por SLM y sometidas al tratamiento térmico completo (TT) tanto en un horno convencional como en un horno HIP. La realización del mismo tratamiento térmico en ambos tipos de horno permitiría evaluar la influencia de ambos procesos y recomendar el más adecuado, no solo en términos de propiedades finales de las piezas, sino también teniendo en cuenta aspectos como el coste y el tiempo final. La principal ventaja del horno HIP frente al convencional es la posibilidad de aplicar presión de forma simultánea a la aplicación de temperatura, así como la alta tasa de enfriamiento, lo que permite combinar la aplicación de diferentes tratamientos térmicos en un único ciclo HIP reduciendo el tiempo de proceso y, en consecuencia, el consumo. Sin embargo, debido a problemas técnicos en el horno HIP utilizado, no se pudo realizar el enfriamiento tan rápido como es necesario para conseguir la solución supersaturada y provocar la precipitación de compuestos intermetálicos tras el tratamiento térmico de puesta en solución, por lo que las propiedades mecánicas resultantes de este proceso seguramente no sean las mismas que se obtendrían con la aplicación del temple antes del envejecimiento. Por esta razón, las piezas resultantes de la aplicación del postproceso TT tanto en horno convencional como en HIP únicamente se compararon en términos de porosidad interna.

Para la realización de este estudio se fabricó un conjunto de piezas destinadas a la evaluación de diferentes propiedades, entre las que se encuentran dos cubos de 10 mm de lado utilizados para el análisis de la porosidad interna. Tras la aplicación del tratamiento térmico completo (TT) en ambos tipos de horno, convencional y HIP, las muestras se separaron de la placa de fabricación mediante WEDM y se cortaron utilizando la cortadora metalográfica: una según la dirección transversal o dirección de las capas de fabricación (muestras T_1 y T_2) y otra según la dirección de fabricación o dirección longitudinal (muestras L_1 y L_2).

La Figura 7.19 muestra la porosidad interna de las cuatro secciones analizadas (T_1 , T_2 , L_1 y L_2) de las muestras tratadas térmicamente tanto en el horno convencional como en el HIP. La porosidad interna promedio resultante en el horno convencional es de 0,35 %, mientras que en el horno HIP este valor se reduce a la mitad (0,18 %). En consecuencia, la densidad resultante de las piezas sometidas al tratamiento TT en horno HIP es de 99,82 %, frente al valor de 99,65 % de las muestras tratadas en el horno convencional. Respecto al tamaño de los poros, la aplicación simultánea de presión y temperatura favorece notablemente los resultados, dando lugar a valores promedio de 51 μm (HIP) en comparación con los 132 μm del horno convencional. Los poros de mayor tamaño de las muestras resultantes del HIP y del horno convencional son de 1.936 μm^2 y 8.598 μm^2 , respectivamente. En términos de circularidad no se observan diferencias notables entre los resultados del HIP (0,82) y del horno convencional (0,83). Respecto a las secciones analizadas, en el horno convencional no se observan diferencias notables en función de la dirección, mientras que el tratamiento HIP presenta resultados ligeramente diferentes en las secciones transversales y longitudinal,

siendo menores los valores obtenidos en las secciones correspondientes a la dirección de las capas de fabricación SLM (T_1 y T_2). Sin embargo, esta variación entre secciones es pequeña, del orden de 0,06 % (Figura 7.19).

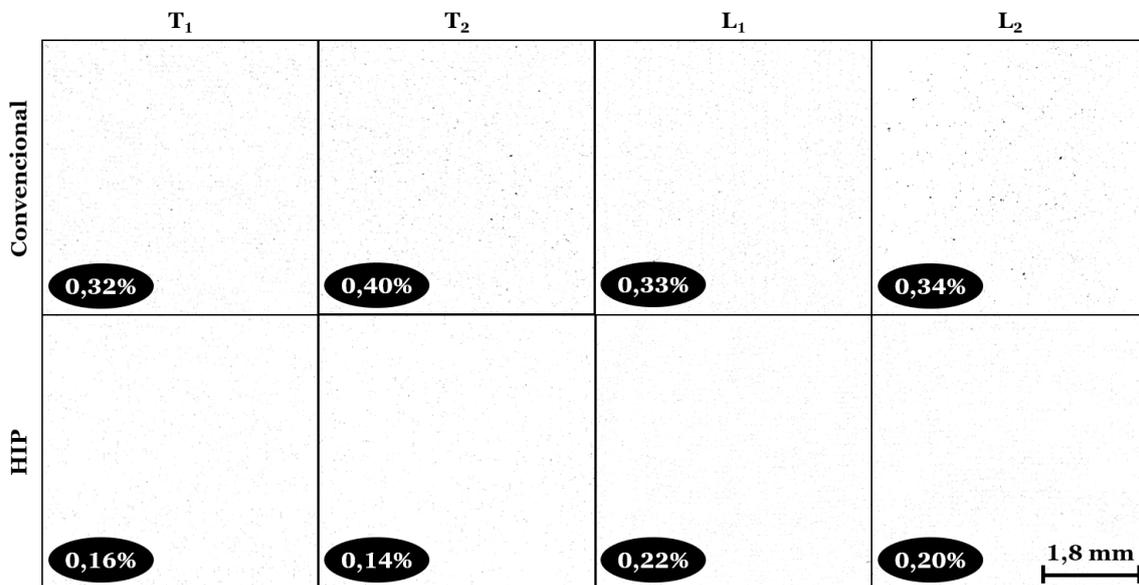


Figura 7.19. Análisis de la porosidad interna utilizando el software ImageJ de las secciones T_1 , T_2 , L_1 y L_2 de las muestras TT en horno convencional y HIP.

7.3.4. Conclusiones de la aplicación de tratamientos térmicos

En este apartado se evalúa la aplicación de los tratamientos térmicos como postproceso de la fabricación SLM con la finalidad de aliviar las tensiones residuales generadas durante el proceso, homogeneizar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas y la porosidad interna de las piezas impresas en acero inoxidable 17-4PH.

A continuación, se muestran las principales conclusiones de este estudio en función de la finalidad con la que se aplican los tratamientos térmicos:

❖ Alivio de las tensiones residuales

Respecto a la precisión geométrica y dimensional de las piezas fabricadas por SLM, la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones no produce cambios significativos en las piezas impresas con las estrategias de escaneo normal y hexagonal. Sin embargo, en las piezas fabricadas con la estrategia de escaneo concéntrica, la aplicación de este postproceso térmico afecta negativamente a los resultados, aumentando en torno a 155 μm el error de planitud y paralelismo de las piezas más largas y estrechas (muestras de tracción). Esto podría deberse a la longitud de los vectores de escaneo láser, ya que cuanto mayor es el vector de escaneo, mayor es la deformación producida.

❖ Homogeneización de la microestructura y mejora de las propiedades mecánicas

La aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones aumenta la dureza de las piezas fabricadas por SLM en torno a 66 HV₂, probablemente debido a la nucleación heterogénea y al crecimiento de partículas o a la reducción en la fracción de la fase austenita a temperatura ambiente. Como era de esperar, las piezas sometidas al tratamiento térmico completo (relajación de tensiones + puesta en solución + envejecimiento) presentan la mayor dureza debido tanto a la microestructura martensítica como a las partículas duras precipitadas. El comportamiento a tracción de las muestras sometidas a los diferentes tratamientos térmicos varía en consonancia con los resultados de dureza. Las muestras de menor dureza (F) presentan un comportamiento dúctil, mientras que, tras la aplicación de los tratamientos térmicos (TT_{RT} y TT), el aumento de la dureza da lugar a un comportamiento más frágil, aumentando notablemente los valores R_m y R_p del ensayo de tracción.

❖ Reducción de la porosidad

La aplicación del tratamiento térmico (TT) en un horno HIP, esto es, aplicando presión y temperatura simultáneamente, permite la reducción de la porosidad interna en torno a 0,17 %, disminuyendo de valores promedio de 0,35 % de las muestras tratadas en horno convencional a 0,18 % resultante en las muestras sometidas al HIP. En consecuencia, se reduce notablemente tanto el valor máximo como promedio del tamaño de los poros internos. Estos resultados promedios y máximos son de 51 μm y 1.936 μm² en el caso del HIP y de 132 μm y 8.5598 μm² en el caso del horno convencional, respectivamente.

En conclusión, se recomienda la aplicación del tratamiento térmico de relajación de tensiones (TT_{RT}), no solo como solución para reducir las tensiones generadas en el proceso SLM, sino también como tratamiento de homogeneización de la microestructura y aumento de las propiedades mecánicas de las piezas impresas por SLM en acero inoxidable 17-4PH. Además, este tratamiento, no afecta la precisión geométrica y dimensional de las piezas fabricadas utilizando las estrategias de escaneo láser normal o hexagonal. Sin embargo, si se requiere la impresión de piezas mediante la estrategia concéntrica, cabe destacar que la aplicación de este tratamiento térmico deforma las piezas con vectores de escaneo largos, aspecto a tener en cuenta en la fase de diseño y orientación de las piezas sobre la placa de fabricación. Por otro lado, para componentes que demandan buenas propiedades mecánicas (en términos de dureza y resistencia a la tracción) se recomienda la aplicación del tratamiento térmico completo (relajación de tensiones + puesta en solución + envejecimiento). Finalmente, en términos de porosidad, el postproceso HIP permite reducir notablemente la cantidad de poros internos de este tipo de piezas.

7.4. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados descritos en este capítulo han dado lugar a una publicación en Revista JCR:

- ▶ Cuesta, E., Álvarez, B. J., Zapico, P. y Giganto, S. (2020) «Analysis of post-processing influence on the geometrical and dimensional accuracy of selective laser melting parts», *Rapid Prototyping Journal*, 26(10), pp. 1713-1722. doi: 10.1108/RPJ-02-2020-0042 – Factor de impacto JCR: Q2.

Capítulo 8

OPTIMIZACIÓN DE LA INSPECCIÓN ÓPTICA DE PIEZAS SLM

En este capítulo se estudia la idoneidad de la inspección óptica de las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM en función de: la aplicación de postprocesos mecánicos y térmicos, el software de metrología utilizado, la aplicación de filtros para la eliminación de puntos espurios y los sistemas de medición óptica utilizados.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. INTERÉS DEL ESTUDIO*
- 2. SISTEMAS DE DIGITALIZACIÓN 3D*
- 3. INFLUENCIA DEL FILTRADO DE PUNTOS*
- 4. INFLUENCIA DE LOS POSTPROCESOS SLM*
- 5. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS*

8.1. INTERÉS DEL ESTUDIO

La inspección es fundamental para el control de calidad de las piezas metálicas fabricadas mediante la tecnología SLM, así como para proporcionar retroalimentación para la optimización del proceso. La libertad de diseño que ofrece la AM con respecto a las tecnologías de fabricación sustractivas requiere técnicas de medición más complejas y con mayor capacidad de procesamiento de datos. Los sistemas de medición por contacto pueden medir geometrías prismáticas y superficies de forma libre de piezas impresas por SLM con alta precisión, sin embargo, son relativamente lentos y solo permiten adquirir un número limitado de puntos. Por consiguiente, los sistemas de medición óptica se están adoptando cada vez más para la verificación de las GD&T en el contexto de la Industria 4.0.

Sin embargo, la superficie de las piezas impresas por SLM presenta una textura superficial particular, caracterizada por «cordones de soldadura» y «partículas de salpicaduras» generados por el láser durante el proceso de fusión del polvo metálico, así como una rugosidad típicamente alta que depende de diferentes factores, como los parámetros del proceso SLM y las características del material de partida. Todos estos factores aumentan la dificultad para obtener escaneos 3D con alta precisión. Por esta razón, y con la finalidad de mejorar el acabado superficial de las piezas fabricadas por SLM, a menudo se aplican postprocesos mecánicos como el arenado. Estas operaciones son imperativas en muchas aplicaciones como la fabricación de implantes dentales, prótesis, etc.

La selección del sistema de inspección óptica más apropiado depende, entre otros factores, de las especificaciones de diseño de la pieza, la geometría, el acabado superficial (textura, color), el tamaño y/o la accesibilidad. Además, la precisión del propio proceso de inspección depende de diferentes aspectos, incluyendo los parámetros de configuración específicos del propio sensor óptico, así como la estrategia de escaneo 3D utilizada (orientación y/o posición del sensor con respecto a la superficie a digitalizar, número de escaneos necesarios, etc.).

Por todo ello, en este capítulo se realizan tres estudios relacionados con la optimización de la inspección óptica de las piezas fabricadas por SLM. En primer lugar, se lleva a cabo la comparativa de diferentes sistemas de medición óptica con la finalidad de seleccionar el sistema más adecuado para la inspección de este tipo de piezas. Adicionalmente, en este estudio se analiza la influencia de utilizar diferentes softwares metrológicos para la realización de las mediciones. En segundo lugar, se evalúa la influencia de la aplicación de filtros, disponibles en los softwares de metrología y aplicados con el objetivo de mejorar la calidad de las nubes de puntos (eliminando puntos espurios). Por último, el tercer estudio de este capítulo se centra en la evaluación de los límites de la precisión geométrica y dimensional que se puede lograr en la digitalización sin contacto de las superficies de los componentes fabricados por SLM y sometidos a diferentes postprocesos (mecánico y térmico).

8.2. SISTEMAS DE DIGITALIZACIÓN 3D

Hoy en día, la inspección sin contacto ha ganado gran relevancia debido a la rápida verificación de las piezas fabricadas aditivamente. En este apartado, se analiza la idoneidad (ventajas y limitaciones) de cinco sistemas de medición óptica diferentes para la verificación de las GD&T de piezas fabricadas en acero inoxidable 17-4PH mediante la tecnología SLM. Con la finalidad de evaluar el sistema de medición óptica más adecuado para la inspección de este tipo de piezas, se diseñó una pieza patrón de esferas y se compararon los resultados de su digitalización en los diferentes sistemas de medición. A continuación, la Figura 8.1 muestra la metodología seguida para la realización de este estudio.

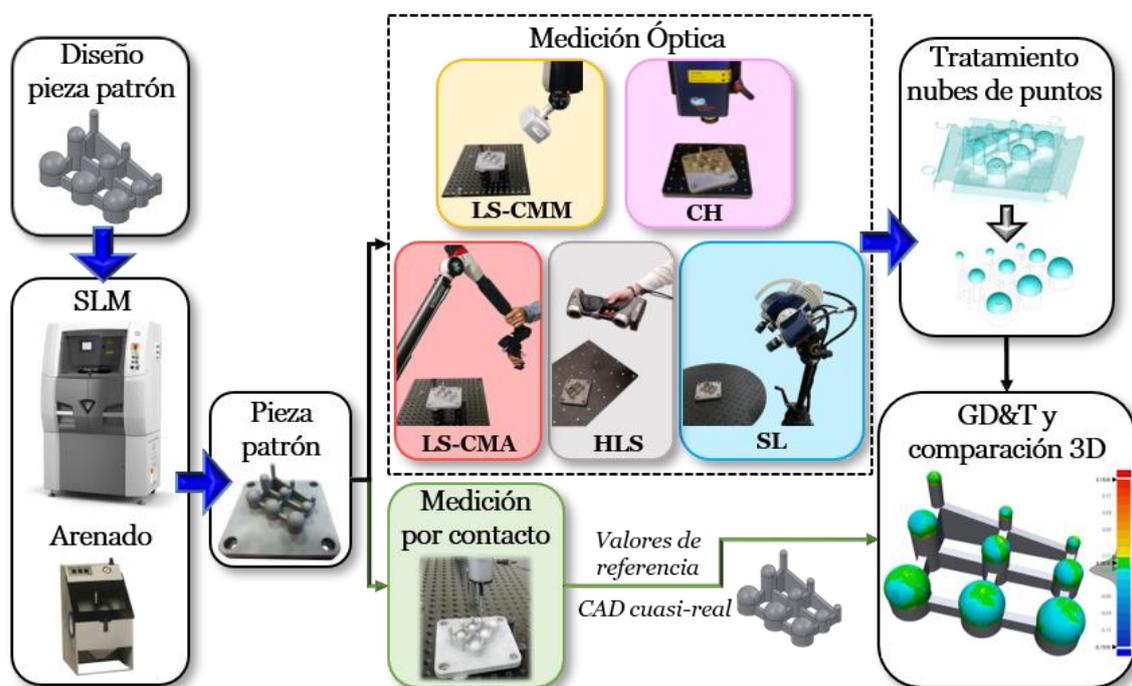


Figura 8.1. Metodología de evaluación de la idoneidad de diferentes sistemas de digitalización 3D para la inspección de piezas fabricadas por SLM.

Los equipos y métodos utilizados en las diferentes etapas fueron:

- **Diseño de la pieza patrón**

En la etapa de diseño se consideraron tanto las restricciones de la máquina y el proceso SLM (permitiendo la caracterización de sus límites), como los requisitos de medición de los sistemas ópticos y de contacto. La pieza patrón diseñada consta de nueve esferas distribuidas en una matriz de 3 x 3 (Figura 8.2). La geometría canónica de tipo esfera fue elegida por ser un elemento ideal desde el punto de vista metrológico, ampliamente utilizado como estándar de referencia y fácilmente definible como entidad de mejor ajuste en los softwares de medición. La designación de las esferas «ESF X.Y» se corresponde a su posición a lo largo de los ejes X e Y, tomando como origen de la pieza patrón el centro de la esfera ESF 1.1 (Figura

8.2). Las esferas cuya posición Y es 1 tienen un diámetro de 15 mm, las de la posición 2 tienen un diámetro de 10 mm y las de la posición 3 de 5 mm. Las posiciones X 1, 2 y 3 corresponden a los ángulos de ubicación de 30°, 15° y 0° (tomando como referencia los centros de las esferas), respectivamente (Figura 8.2). Para evitar el uso de estructuras de soporte, las esferas se diseñaron con un ángulo de barrido de 210° y se ubicaron en la parte superior de entidades cilíndricas, permitiendo así la medición del hemisferio superior. Estos cilindros se unieron mediante paredes de 3 mm de espesor para crear una sola pieza, lo que permitirá como trabajo futuro su evaluación geométrica y dimensional tras la separación de la placa base.

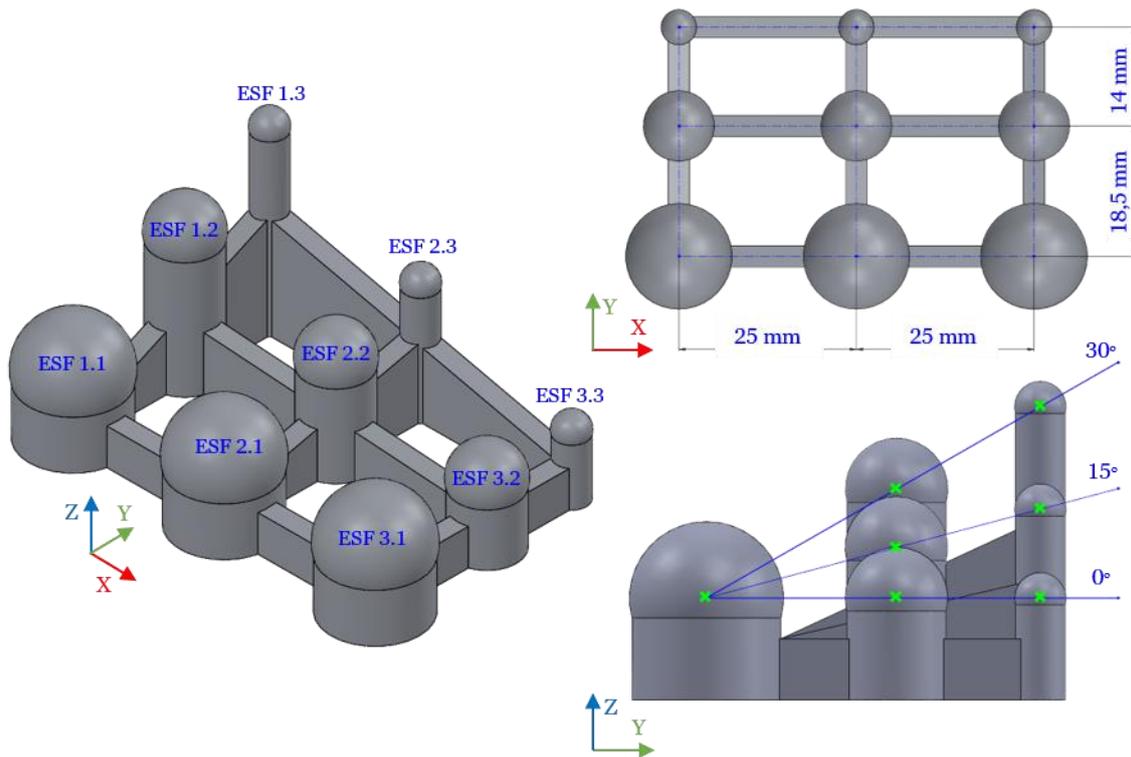


Figura 8.2. CAD de la pieza patrón: designación de las esferas y características de diseño.

La inclusión de esferas de diferentes diámetros y orientaciones se basó en la idea metrológica de evaluar todo el volumen de trabajo de la máquina SLM. La altura de las esferas alcanza valores representativos del volumen de fabricación de la impresora, en torno a 55 mm de un máximo de 80 mm. Las características geométricas válidas de la pieza patrón son las esferas, así pues, las mediciones ópticas y por contacto se realizaron únicamente en estas entidades.

- **Fabricación SLM y postproceso mecánico de arenado**

La pieza patrón se fabricó mediante la tecnología SLM en acero inoxidable 17-4PH y se sometió al postproceso de arenado, tratamiento recomendado para mejorar la calidad superficial (como se concluyó en el apartado 7.2.1). La Figura 8.3 muestra el acabado superficial de la pieza patrón en los estados pre (Figura 8.3a) y post (Figura 8.3b) arenado, observándose el cambio notable en el brillo y la textura. La mejora del acabado superficial resultante del postproceso mecánico de arenado reduce también los errores geométricos

(como se concluyó en el apartado 7.2.3), así como los errores de la medición CMM (facilitando el contacto de la punta del palpador con la superficie real de la pieza).

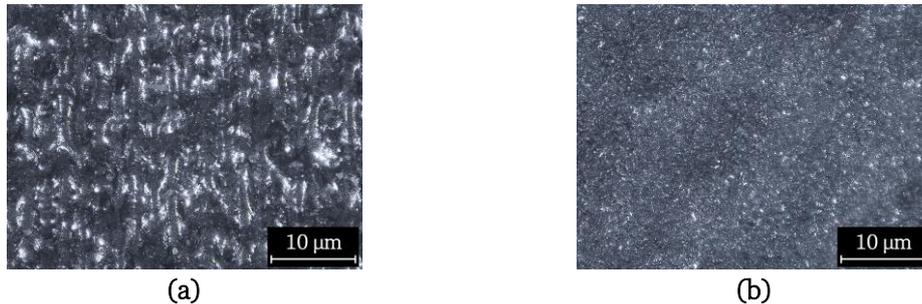


Figura 8.3. Imágenes del macroscopio con x92 aumentos de la superficie de la pieza patrón de esferas (a) antes y (b) después de la aplicación del arenado.

- **Medición por contacto**

Previamente a las mediciones con la CMM (Figura 8.4a), se llevó a cabo una primera alineación manual y, a continuación, la alineación definitiva en modo automático, digitalizándose por contacto tres esferas: ESF 1.1, ESF 3.1 y ESF 3.3. Se realizó el procedimiento de alineación 3-2-1 utilizando: el plano XY (que determina el eje Z+), construido con los centros de las tres esferas palpadas (ESF 1.1, ESF 3.1 y ESF 3.3); el eje X+, correspondiente a la línea que une los centros de las esferas ESF 1.1 y ESF 3.1; y el origen, ubicado en el centro de la esfera ESF 1.1 (Figura 8.4b).

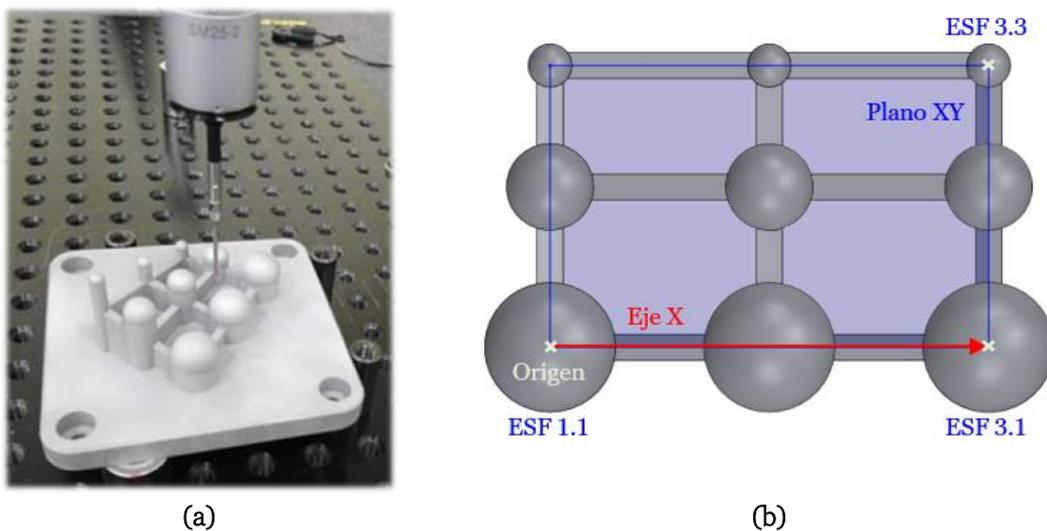
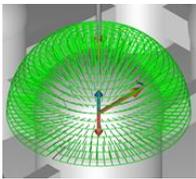
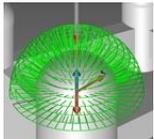
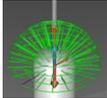


Figura 8.4. (a) Medición por contacto de la pieza patrón de esferas. (b) Esferas utilizadas para la alineación de la pieza patrón.

Teniendo en cuenta que el foco principal de este estudio es la inspección óptica, las mediciones por contacto (tomadas como referencia) deben ser lo más similares posible al escaneo óptico para obtener una comparación precisa y real. Sin embargo, el tiempo requerido para equiparar la medición por contacto con las densas nubes de puntos captadas

por los sistemas sin contacto es demasiado elevado. Por consiguiente, buscando un equilibrio entre ambos factores (tiempo y cantidad de puntos palpados), se estimó una densidad de 2,55 pto/mm² para la medición por contacto. El número y la distribución de los puntos se estableció en función del diámetro de las esferas, en particular, se palparon 900 puntos en las esferas de 15 mm de diámetro (distribuidos en 19 filas a lo largo del hemisferio superior), 400 puntos en las esferas de 10 mm de diámetro (13 filas) y 100 puntos en las esferas de 5 mm de diámetro (9 filas) (Tabla 8.1). El motivo por el cual el número de filas palpadas es impar se debe a que, de esta manera, se palpa el polo de las esferas.

Tabla 8.1. Parámetros de medición por contacto en función del diámetro de la esfera.

Visualización	Esfera	Diámetro (mm)	Área semiesfera (mm ²)	Puntos de contacto	Densidad (ptos/mm ²)
	ESF 1.1	15	353	900	2,55
	ESF 2.1				
	ESF 3.1				
	ESF 1.2	10	157	400	2,55
	ESF 2.2				
	ESF 3.2				
	ESF 1.3	5	39	100	2,55
	ESF 2.3				
	ESF 3.3				

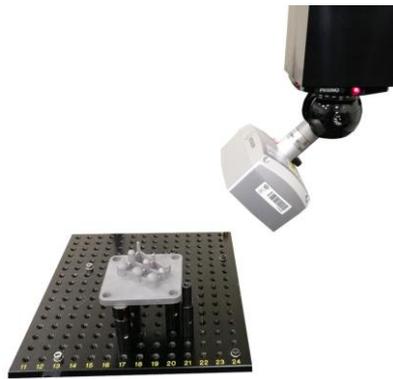
Las GD&T analizadas fueron los diámetros, los errores de forma (esfericidad) y las posiciones de los centros de las nueve esferas. Además, en esta etapa se realizó el modelo CAD cuasi real creado a partir de los valores de referencia obtenidos de la medición por contacto. El uso de este modelo CAD minimiza la influencia de los errores de fabricación al realizar comparaciones 3D y ajustes entre las superficies esféricas reales y sus nubes de puntos.

- **Medición óptica**

Las medidas ópticas y por contacto se realizaron en las mismas condiciones y siguiendo el mismo procedimiento de alineación. Los sistemas ópticos evaluados se basan en las técnicas de triangulación láser, holografía conoscópica y luz estructurada, y son equipos tanto estacionarios como portátiles (Figura 8.5). A continuación, se describen las características de digitalización de cada sistema óptico (cuyas especificaciones técnicas están detalladas en el apartado 3.3.4).

SISTEMAS ÓPTICOS ESTACIONARIOS

LS-CMM



(a)

CH



(b)

SISTEMAS ÓPTICOS PORTÁTILES

LS-CMA



(c)

HLS



(d)

SL



(e)

Figura 8.5. Medición óptica de la pieza patrón de esferas utilizando: (a) escáner láser instalado en CMM, (b) sensor de holografía conoscópica, (c) escáner láser integrado en CMA, (d) escáner láser portátil y (e) escáner de luz estructurada.

1. **Escáner láser instalado en CMM (LS-CMM):** Se digitalizó la pieza patrón de esferas según cinco orientaciones del cabezal láser con la finalidad de captar la mayor cobertura posible: un escaneo con orientación vertical (A0B0) y cuatro escaneos con una inclinación de 45° según las cuatro direcciones cardinales (A45B0, A45B180, A45B90, A45B-90), de esta manera también se captan puntos ubicados ligeramente por debajo del ecuador y, por consiguiente, aumenta la precisión en la medición del diámetro y de las coordenadas del centro de las esferas de la pieza patrón. El parámetro del ancho de línea láser se configuró en 123 mm, lo que permite captar de una sola pasada la anchura total de la pieza patrón, y una densidad de línea láser estándar de 16,8 pts/mm.
2. **Sensor de holografía conoscópica (CH):** Con la finalidad de conseguir una densidad de digitalización de 2,55 pts/mm², se ajustó la distancia de paso XY en $59 \mu\text{m}$ a lo largo del eje X (distancia entre puntos de una misma línea) y $60 \mu\text{m}$ a lo largo del eje Y (distancia entre líneas).

3. **Escáner láser integrado en CMA (LS-CMA):** Considerando la naturaleza manual de este proceso, cabe destacar la variabilidad entre las mediciones, incluso si el proceso lo realiza el mismo operario (Cuesta *et al.*, 2019). Además, cuando las mediciones son realizadas por diferentes operarios, la dispersión de los resultados es mayor que cuando un mismo operario realiza varias repeticiones. Teniendo en cuenta esta influencia, la pieza patrón de esferas fue escaneada por cinco operarios diferentes que realizaron dos mediciones cada uno. Se capturando tantos puntos como fue posible de acuerdo con las cinco orientaciones definidas en el proceso de escaneo del equipo LS-CMM (A0B0, A45B0, A45B180, A45B90, A45B-90). Los resultados de medición de este sistema se calcularon como el valor promedio de los valores resultantes de las mediciones de las diez nubes de puntos.
4. **Escáner láser portátil (HLS):** A pesar de ser un sistema manual, la variación entre las mediciones realizadas por el mismo operario en diferentes repeticiones, e incluso las realizadas por diferentes operarios (desviación máxima de 15 μm al medir el diámetro de las esferas de la pieza patrón), es insignificante debido al modo de escaneo con filtrado automático que evita las superposiciones entre nubes de puntos. Por lo tanto, para este estudio únicamente se realizó una medición con este sistema óptico.
5. **Escáner de luz estructurada (SL):** Para conseguir la digitalización completa de la pieza patrón de esferas se realizaron seis escaneos utilizando el equipo en modo automático, esto es, programando un escaneo por cada giro de 60° de la mesa giratoria.

- **Tratamiento de las nubes de puntos y mediciones (GD&T y comparación 3D)**

Las nubes de puntos resultantes de los escaneos realizados con los cinco equipos ópticos se importaron en el software de inspección Geomagic Control X como archivos ASCII (formato *.asc) para su tratamiento y medición. En primer lugar, se eliminaron todos los puntos digitalizados que no pertenecen a las esferas de la pieza patrón. Esta operación de limpieza incluyó la creación de planos virtuales ubicados 1 mm por encima de la intersección entre las esferas y los cilindros que las sostienen, para la eliminación de todos los puntos ubicados por debajo de dichos planos. A modo de ejemplo, en la Figura 8.6 se muestra la nube de puntos resultante del proceso de escaneo mediante el sistema LS-CMM antes (Figura 8.6a) y después (Figura 8.6b) de la operación de limpieza. En segundo lugar, las nueve esferas escaneadas se reconstruyeron como características virtuales de medición utilizando el método de mejor ajuste (algoritmo de mínimos cuadrados). Finalmente, se realizó la alineación de acuerdo con el procedimiento seguido en las mediciones por contacto (Figura 8.4b), esto es, utilizando las esferas ESF 1.1, ESF 3.1 y ESF 3.3 para ajustar las nubes de puntos con el CAD cuasi real (Figura 8.7). El último paso de esta etapa fue la medición de los valores dimensionales y geométricos y la comparación 3D entre el CAD cuasi real y las esferas virtuales reconstruidas a partir de las nubes de puntos escaneadas.

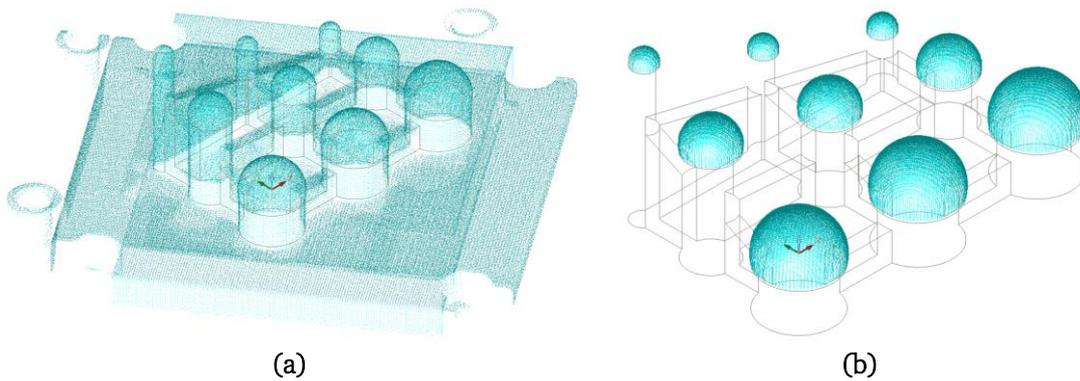


Figura 8.6. Nube de puntos obtenida de la digitalización láser (LS-CMM) de la pieza patrón de esferas: (a) sin procesar y (b) tras las operaciones de limpieza.

Los escáneres de triangulación láser (LS-CMM (Figura 8.7a), LS-CMA (Figura 8.7c) y HLS (Figura 8.7d)) y de luz estructurada (SL (Figura 8.7e)) captaron prácticamente toda la superficie de las esferas. Sin embargo, en el caso del sensor CH, debido a la posición vertical del sistema en relación a la pieza (movimiento del sensor en el plano XY), la nube de puntos resultante no cubre las esferas por completo. Como se muestra en la Figura 8.7b, el sensor CH no permite capturar los puntos ubicados en el ecuador de la pieza patrón de esferas.

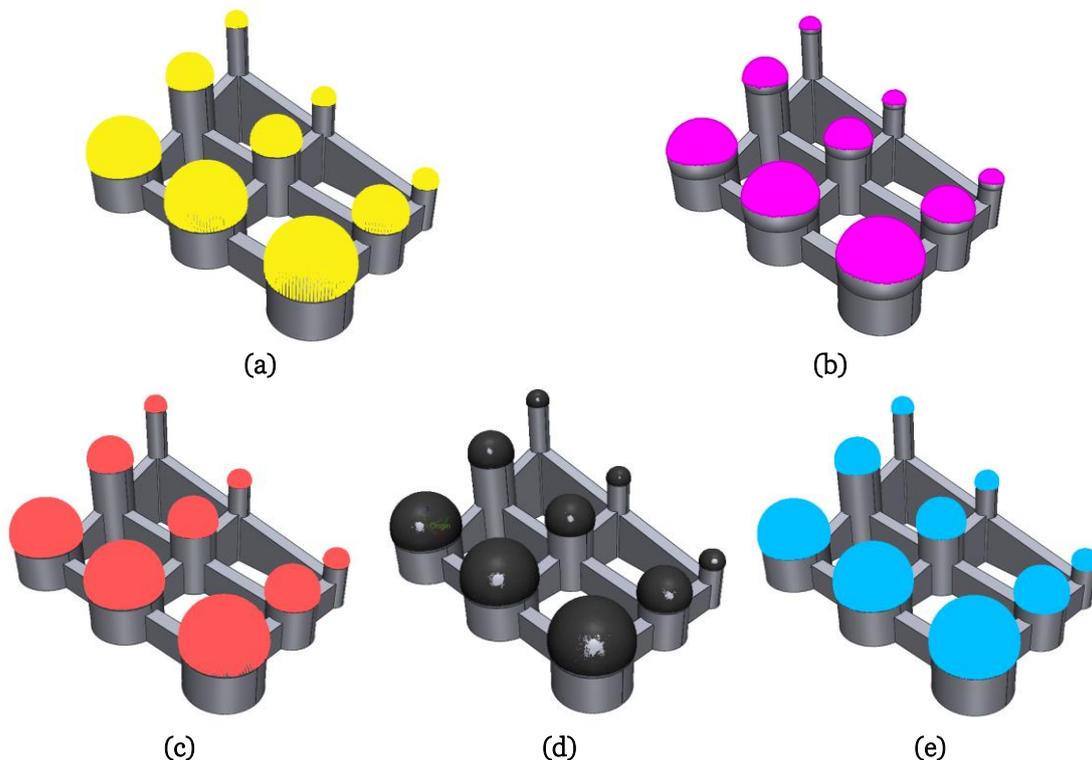


Figura 8.7. Nubes de puntos resultantes de la digitalización de la pieza patrón de esferas utilizando los sistemas ópticos: (a) LS-CMM, (b) CH, (c) LS-CMA, (d) HLS y (e) SL.

Inevitablemente, cada sistema óptico capturó un número diferente de puntos y, por consiguiente, el número de puntos utilizados para crear las esferas de control fue distinto (Figura 8.8). En todas las esferas, el número de puntos capturados por los escáneres LS-CMA

y SL es aproximadamente el doble que en el resto de los sistemas ópticos (Figura 8.8). En el caso del escáner SL esto se debe a la alta capacidad de adquisición de puntos, y en el caso del LS-CMA a las diversas pasadas de escaneo realizadas por los operarios para capturar la superficie completa de las esferas. Como se muestra en la Figura 8.8, la nube de puntos menos densa se obtuvo mediante el sistema HLS, ya que el proceso de captura de este equipo no permite la superposición de puntos en las zonas ya digitalizadas.

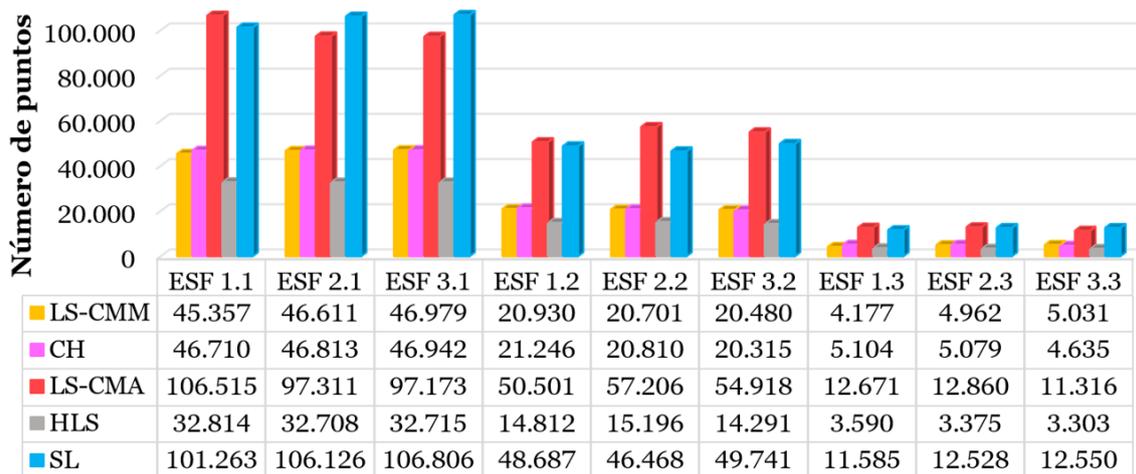


Figura 8.8. Número de puntos utilizados en la creación de las esferas de control de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica.

8.2.1. Influencia del software de metrología utilizado

Previamente a la medición de los errores geométricos y dimensionales de las nubes de puntos obtenidas del escaneo con los diferentes sistemas ópticos, se realizó la evaluación de la influencia que puede tener el software de metrología utilizado en el tratamiento de los datos 3D de las piezas fabricadas por SLM. Para ello, la misma nube de puntos (Figura 8.6b) fue procesada en cinco softwares de metrología diferentes: PC-DMIS, Geomagic Control X, PolyWorks, GOM Inspect y 3DReshaper (descritos en el apartado 3.3.5). Tras la importación de la nube de puntos en cada uno de los softwares, se reconstruyeron las nueve esferas de la pieza patrón como entidades virtuales a partir de los datos de escaneo (aplicando el algoritmo de mejor ajuste basado en mínimos cuadrados) y se realizó la medición del diámetro, posición del centro, error de forma y desviación estándar. En la Figura 8.9 se muestra una captura de pantalla tras el proceso de medición de las nueve esferas de la pieza patrón en cada uno de los softwares evaluados. Como conclusión a este estudio, cabe destacar que independientemente del software de metrología empleado para la medición de las esferas de la pieza patrón los resultados geométricos y dimensionales fueron idénticos.

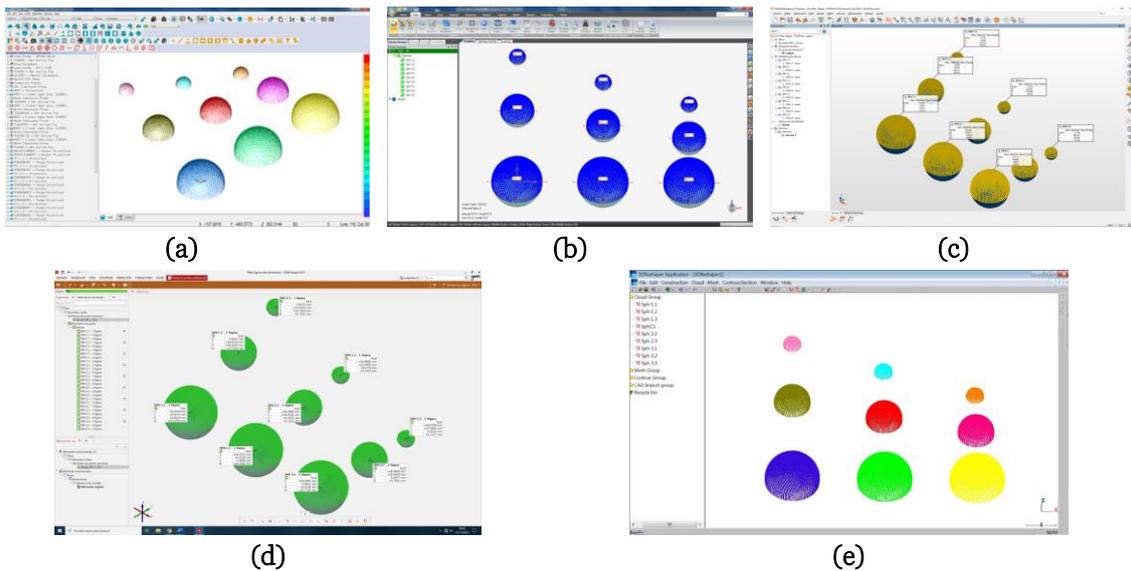


Figura 8.9. Creación de las esferas virtuales de mejor ajuste en el software: (a) PC-DMIS, (b) Geomagic Control X, (c) PolyWorks, (d) GOM Inspect y (e) 3DReshaper.

Los datos resultantes de este estudio se corresponden con los mostrados en los siguientes apartados para el sistema óptico LS-CMM. Tras la realización de este estudio previo, se seleccionó el software Geomagic Control X para llevar a cabo la comparativa de los diferentes sistemas ópticos, como se mencionó en el apartado anterior (tratamiento de las nubes de puntos y mediciones).

8.2.2. Comparación 3D

La comparación 3D entre los escaneos de los diferentes sistemas ópticos y el CAD cuasi real (Tabla 8.2 y Figura 8.10) muestra los resultados de los errores geométricos y dimensionales analizados en los siguientes apartados (8.2.3 y 8.2.4).

Tabla 8.2. Promedio, desviación estándar y RMS de la comparación 3D entre el CAD cuasi real y las nubes de puntos obtenidas con los diferentes sistemas ópticos.

	Sistema de medición óptica				
	LS-CMM	CH	LS-CMA	HLS	SL
Promedio (μm)	-56	-22	-61	-22	-12
Desviación estándar (μm)	23	28	31	13	12
RMS (μm)	61	36	69	25	17

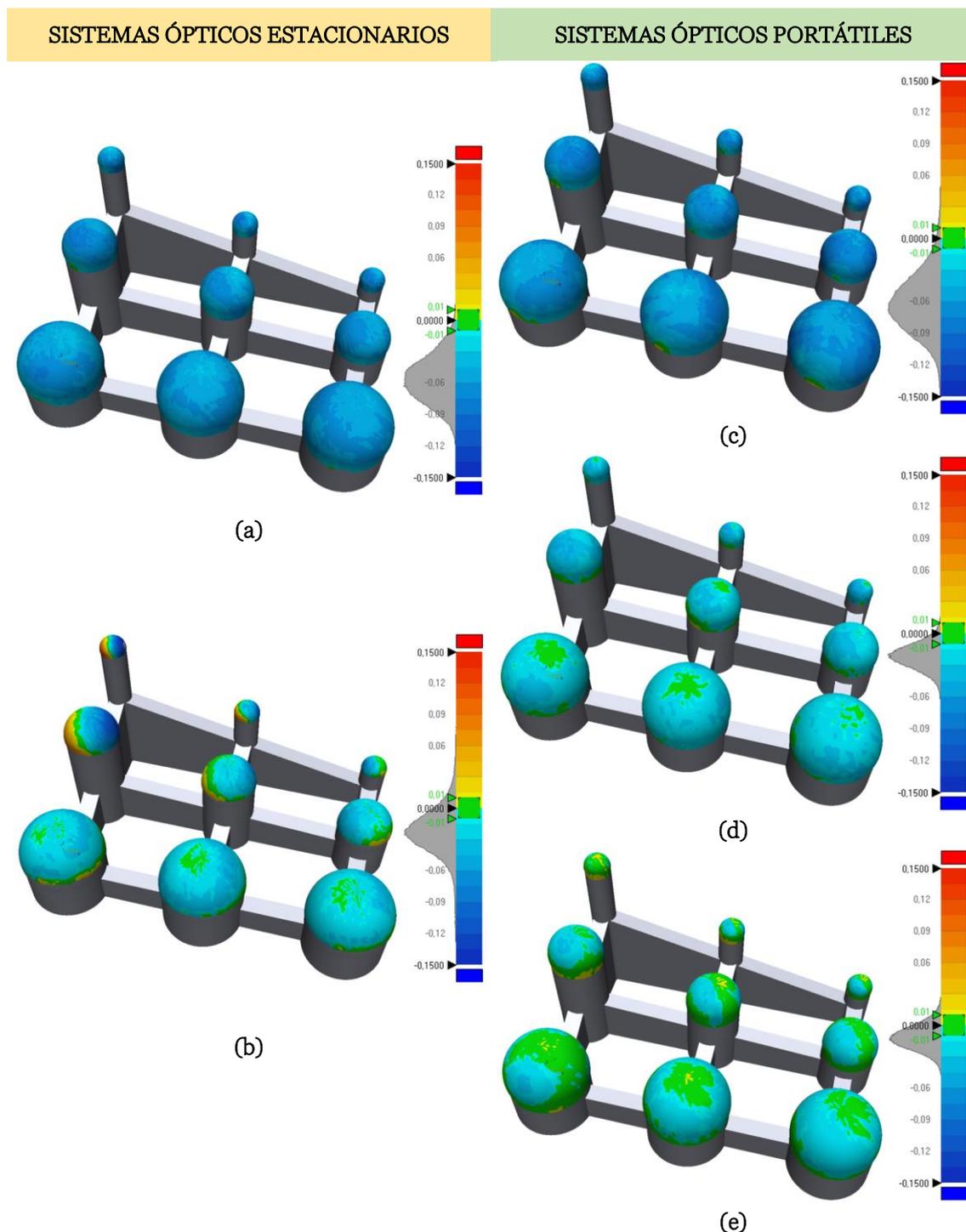


Figura 8.10. Comparación 3D entre el CAD cuasi real y las nubes de puntos obtenidas de la digitalización de la pieza patrón de esferas utilizando los sistemas ópticos: (a) LS-CMM, (b) CH, (c) LS-CMA, (d) HLS y (e) SL.

Los resultados más cercanos a los valores de referencia son los obtenidos por los sistemas portátiles HLS (Figura 8.10d) y SL (Figura 8.10e). El escáner SL presenta las desviaciones más pequeñas, con un valor promedio de $-12 \mu\text{m}$ y una desviación estándar de $12 \mu\text{m}$ (Tabla 8.2). Los resultados más desfavorables son los obtenidos por los escáneres LS-CMM (Figura 8.10a) y LS-CMA (Figura 8.10c), cuyas desviaciones promedio son $-56 \mu\text{m}$ (con una

desviación estándar de 23 μm) y -61 μm (con una desviación estándar de 31 μm), respectivamente (Tabla 8.2). Como se muestra en la Figura 8.10b, el sistema CH presenta un desplazamiento del origen de coordenadas en el eje X en función de la distancia al sensor, lo que genera mayores desviaciones con el aumento de la altura de las esferas.

8.2.3. Análisis geométrico

La Figura 8.11 muestra el error de forma de las esferas de la pieza patrón para cada sistema de medición. Los equipos ópticos cuyos resultados se aproximan más a los valores de referencia (obtenidos de la medición por contacto) son el HLS y el SL (Figura 8.11), con valores promedio de esfericidad de 98 μm y 110 μm , respectivamente. El LS-CMA es el sistema óptico que presenta los mayores errores de forma, con un valor promedio de 347 μm . Como se muestra en la Figura 8.11, cabe destacar el comportamiento irregular del sensor CH, con gran variabilidad en sus resultados (rango de errores de forma: 127-444 μm).

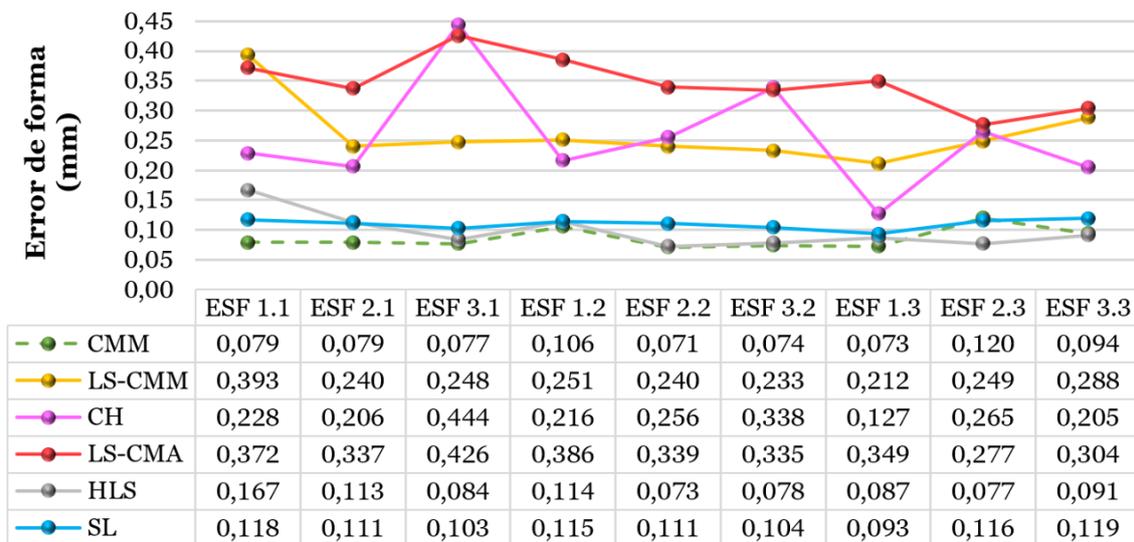


Figura 8.11. Error de forma de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición.

Desde el punto de vista metrológico, la definición del error de forma descrita en la norma UNE-EN ISO 1101:2017 no es adecuada para medir la calidad de las nubes de puntos obtenidas de las mediciones ópticas. La razón es que, si un solo punto o ciertos puntos se ubican muy lejos del diámetro de la esfera de mejor ajuste, el valor del error de forma será excesivo y poco realista. Estos puntos son los denominados puntos espurios, que suelen aparecer por encima de la superficie escaneada (varias décimas de milímetro e incluso milímetros), y en ocasiones también pueden ubicarse dentro de la pieza.

Como se mencionó anteriormente, el acabado superficial de las piezas fabricadas por SLM presenta importantes irregularidades, a pesar de la mejora superficial producida tras el

postproceso de arenado. Las imágenes del macroscopio mostradas en la Figura 8.12 revelan las irregularidades en diferentes zonas de la superficie de una de las esferas de la pieza patrón después del proceso de arenado.

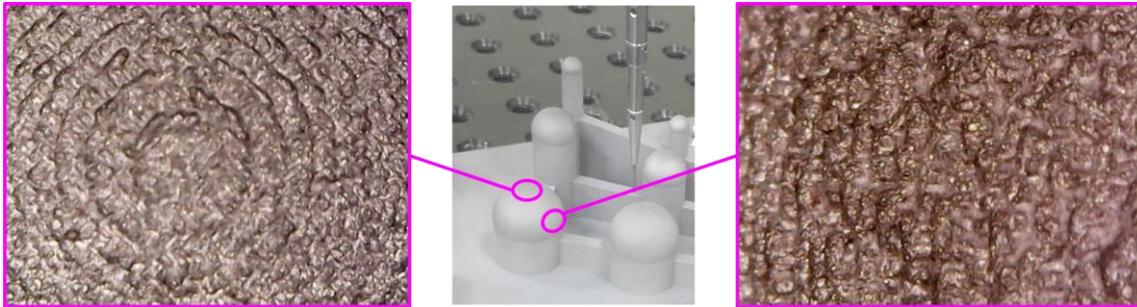


Figura 8.12. Imágenes del macroscopio con x100 aumentos de las zonas superior (izquierda) y lateral (derecha) la esfera ESF 1.1 de la pieza patrón después del postproceso de arenado.

Los sistemas ópticos pueden generar puntos espurios durante la digitalización de este tipo de piezas (con superficies reflectantes o irregulares), efecto que puede alterar los resultados de los errores de forma notablemente. Por esta razón, se decide estudiar la calidad de las nubes de puntos a partir de otro parámetro habitualmente disponible en los softwares de metrología, la desviación estándar (σ). Como se muestra en la Figura 8.13, el valor de la desviación estándar permite una medición más adecuada de la calidad de la nube de puntos resultante de la digitalización óptica.

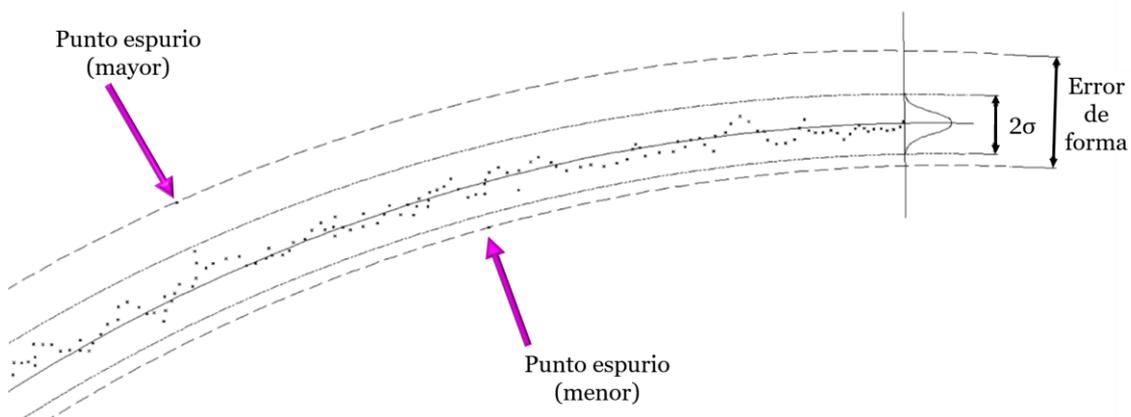


Figura 8.13. Representación gráfica del significado de los parámetros de error de forma y desviación estándar de una nube de puntos.

La Figura 8.14 muestra la desviación estándar de las nubes de puntos de cada esfera para los diferentes equipos ópticos evaluados. Los resultados muestran una tendencia horizontal, independientemente del sistema óptico y del tamaño y la posición de la esfera analizada. Los escáneres HLS y SL presentan la menor desviación estándar, con un valor promedio de 12 μm (Figura 8.14).

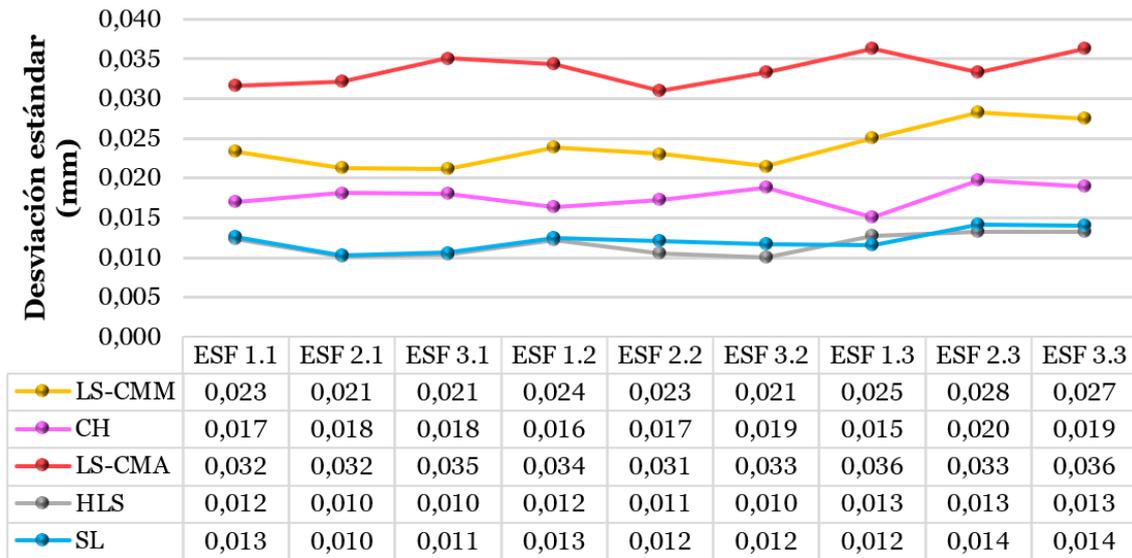


Figura 8.14. Desviación estándar de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica.

8.2.4. Análisis dimensional

Como se muestra en la Figura 8.15, todos los sistemas ópticos obtuvieron esferas con diámetros menores a los resultados de referencia (medición CMM), siendo el escáner SL el equipo que presenta las menores desviaciones. Mientras que el sistema con las mayores desviaciones es el LS-CMA, seguido de la misma tecnología de escaneo láser instalada en CMM (Figura 8.15).

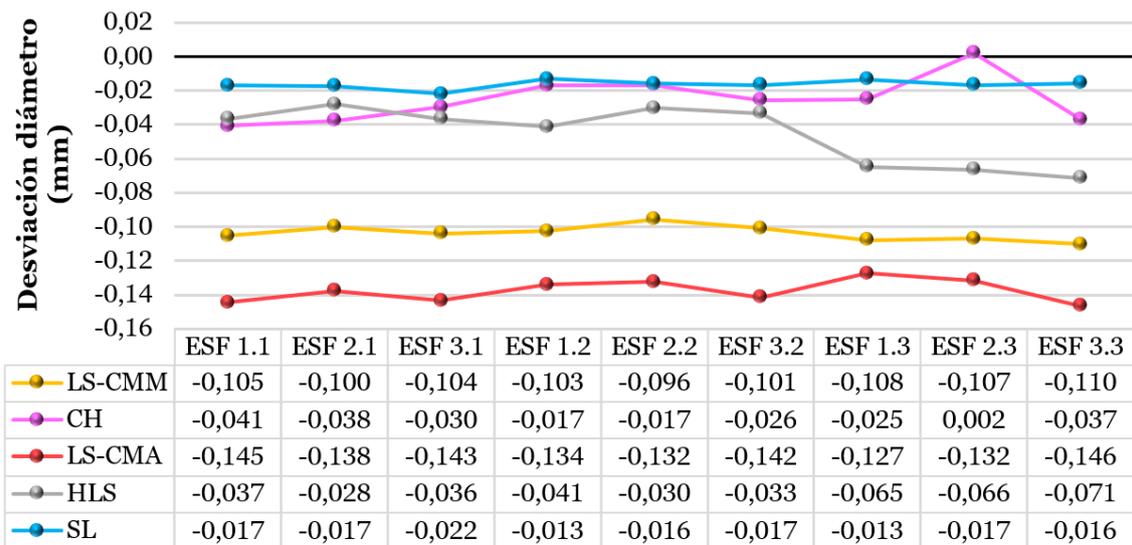


Figura 8.15. Desviación dimensional de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM).

Los errores dimensionales resultantes de las mediciones de los diámetros de las esferas presentan una tendencia horizontal (valores similares) independientemente del tamaño de la esfera para los escáneres LS-CMA (valor promedio de $-138 \mu\text{m}$), LS-CMM (valor promedio de $-104 \mu\text{m}$) y SL (valor promedio de $-16 \mu\text{m}$) (Figura 8.15). Lo que significa que estos errores están asociados con el sistema de medición y no con la dimensión de la entidad. En el caso del escáner HLS, las desviaciones dimensionales aumentan en las esferas de menor diámetro (Figura 8.15), lo que implica una disminución de la precisión de este equipo en la medición de geometrías más pequeñas. El sistema CH no sigue una tendencia clara, presentando una amplia variación entre sus medidas que van desde $2 \mu\text{m}$ hasta $-41 \mu\text{m}$ de desviación.

En cuanto a la posición de los centros de las esferas, en general, las mayores desviaciones se producen en las esferas de menor diámetro (ESF 1.3, ESF 2.3 y ESF 3.3) (Tabla 8.3). Además de aumentar con la disminución del diámetro, la desviación en la posición del centro también aumenta con el aumento de la altura de las esferas. Cabe destacar el elevado error de la posición del centro de las esferas del sistema CH en comparación con el resto (Figura 8.10b), tanto el valor promedio como la variabilidad de los resultados.

Tabla 8.3. Desviación en valor absoluto de la posición del centro de las esferas de la pieza patrón para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM) según el diámetro de las esferas.

		Sistema de medición óptica				
		LS-CMM	CH	LS-CMA	HLS	SL
Desviación del centro de las esferas (μm)	ESF ($\varnothing 5$)	10 ± 5	46 ± 51	9 ± 6	8 ± 7	9 ± 7
	ESF ($\varnothing 10$)	5 ± 2	24 ± 31	6 ± 3	3 ± 2	4 ± 5
	ESF ($\varnothing 15$)	3 ± 3	4 ± 3	2 ± 3	3 ± 3	2 ± 3

Los tres sistemas de triangulación láser (LS-CMM, LS-CMA y HLS) y el escáner SL presentan las mayores desviaciones en la coordenada Z de la posición del centro de las esferas (Tabla 8.4). A diferencia del resto, el sistema CH presenta las mayores desviaciones en la coordenada X y las menores en la coordenada Z (Tabla 8.4), lo que se debe principalmente a que el movimiento de escaneo en este equipo en particular se realiza en la dirección X, sin un desplazamiento simultáneo de los ejes Y o Z. En general, los sistemas con menos desviaciones en la posición del centro de las esferas fueron los escáneres HLS y SL (Tabla 8.4). Cabe destacar los elevados valores de desviación alcanzados con el sensor CH (valor absoluto promedio de $25 \mu\text{m}$) respecto al resto de los sistemas de medición (valor absoluto promedio en torno a $5\text{-}6 \mu\text{m}$).

Tabla 8.4. Desviación en valor absoluto de la posición del centro de las esferas de la pieza patrón según los ejes X, Y y Z para los diferentes sistemas de medición óptica respecto a los valores de referencia (CMM).

		Sistema de medición óptica				
		LS-CMM	CH	LS-CMA	HLS	SL
Desviación del centro de las esferas (μm)	X	6 \pm 5	48 \pm 57	6 \pm 5	2 \pm 2	2 \pm 2
	Y	4 \pm 3	14 \pm 17	4 \pm 4	3 \pm 3	5 \pm 6
	Z	7 \pm 5	12 \pm 9	8 \pm 6	8 \pm 7	9 \pm 6

8.2.5. Comparación del tiempo completo de inspección

Uno de los aspectos clave para las empresas es el tiempo de procesamiento. Cuanto menor sea el tiempo de proceso mayor es la producción y, en consecuencia, mayor beneficio económico. La digitalización es solo una parte del proceso completo de inspección y, por lo tanto, conlleva una parte del tiempo total requerido para inspeccionar las piezas. Teniendo en cuenta este aspecto, se realizó una comparación del tiempo completo empleado durante el proceso de inspección para cada tecnología de medición, tanto por contacto como óptica (Figura 8.16). El tiempo de inspección se dividió en cinco tareas principales:

- **Tarea 1. Puesta en marcha.** Esta tarea consiste en la preparación de los equipos, esto es, el encendido tanto del equipo de medición como del software de digitalización correspondiente. En el caso de los sistemas sin contacto, esta actividad también incluye el calentamiento del sensor óptico.
- **Tarea 2. Calibración del sistema.** La CMM se calibró utilizando una esfera de calibración certificada medida por contacto. El LS-CMM se calibró ópticamente utilizando una esfera blanca mate específica para la calibración láser. Las calibraciones de los escáneres HLS y SL se llevaron a cabo midiendo una placa de calibración (con marcas circulares). Mientras que el resto de los sistemas no tiene una tarea de calibración específica; sino que se integra en la configuración del equipo una vez iniciada la digitalización.
- **Tarea 3. Preparación del programa.** Esta actividad solo es necesaria cuando el software de medición es PC-DMIS (CMM y LS-CMM) y consiste en la creación del programa de medición, incluyendo la configuración de las variables de salida que compondrán el informe de resultados.

- **Tarea 4. Ejecución de la digitalización.** Esta tarea consiste en la adquisición tridimensional de los datos de la superficie con la finalidad de obtener la información dimensional y geométrica de la pieza patrón. En el caso de la CMM, esta tarea se subdivide en tres actividades: alineación inicial manual, alineación definitiva automática y medición automática de las esferas de la pieza patrón. En los sistemas ópticos LS-CMA y HLS esta tarea se realiza de forma manual, mientras que, para el resto de los equipos ópticos, se realiza en modo automático. Esta actividad también incluye la configuración de los parámetros de escaneo para los sistemas que carecen de la tarea 3 (preparación del programa).
- **Tarea 5. Generación del informe de resultados.** La generación del informe de resultados mediante el software PC-DMIS es automática en el caso de la CMM. Sin embargo, en el caso de los sistemas ópticos, esta actividad se realiza con el software Geomagic Control X e incluye las tareas de limpieza de las nubes de puntos, creación de las esferas virtuales de mejor ajuste y generación del informe de resultados.

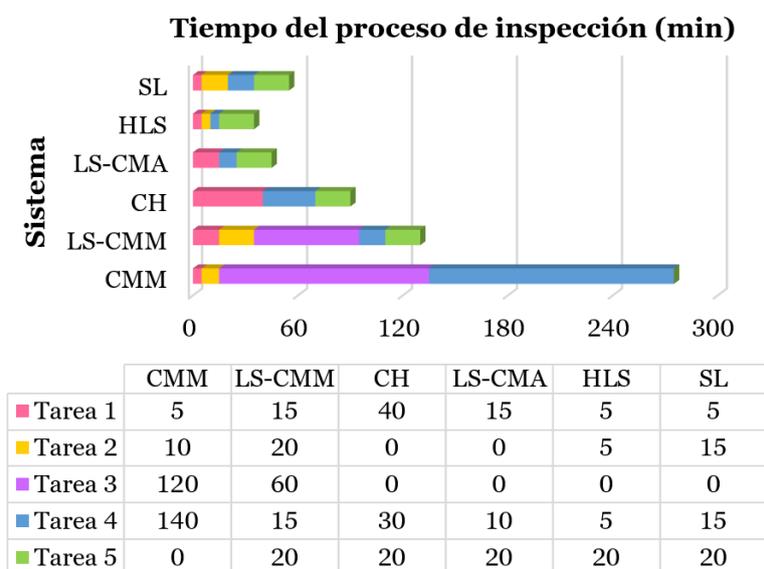


Figura 8.16. Tiempo aproximado dedicado a cada tarea de inspección en cada sistema de medición.

El tiempo empleado en el proceso completo de inspección cambia según el tipo de inspección. En el caso de una sola pieza, el tiempo invertido corresponde al tiempo total (Figura 8.16). Sin embargo, si se realiza una inspección en serie (varias piezas), el tiempo correspondería al tiempo empleado en la realización de las tres primeras tareas (tiempo común e independiente del número de piezas a inspeccionar) más el tiempo de las Tareas 4 y 5 multiplicado por el número de piezas (Figura 8.16). Por otro lado, si fuera necesaria la inspección del mismo tipo de pieza en otro momento posterior, el tiempo invertido sería el tiempo total menos el tiempo dedicado a la Tarea 3 (Figura 8.16).

Como era de esperar, para la inspección de una sola pieza patrón los sistemas de medición más rápidos son los tres escáneres portátiles (LS-CMA, HLS y SL), con los cuales se puede

realizar el proceso de inspección completo en menos de 1 hora (Figura 8.16). En el caso de la inspección en serie, los sistemas más rápidos son los tres sistemas portátiles junto con el LS-CMM (ya que en este caso se prescinde del tiempo dedicado a la Tarea 3). En general, cuando el objetivo es medir indistintamente una o varias piezas, el equipo más ventajoso es el HLS y el menos ventajoso la CMM (Figura 8.16).

8.2.6. Conclusiones de la influencia de los sistemas ópticos

En este estudio se analiza la idoneidad de la inspección óptica de las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM utilizando cinco sistemas metrológicos con diferentes características y principios de funcionamiento: tres sensores basados en el principio de triangulación láser (instalado en CMM (LS-CMM), integrado en CMA (LS-CMA) y portátil (HLS)), un sensor de holografía conoscópica (CH) y un escáner de luz estructurada (SL). Dos de ellos son estacionarios (LS-CMM y CH) y los otros tres portátiles (LS-CMA, HLS y SL).

Las principales conclusiones de este estudio se describen a continuación:

- ❖ Respecto a la influencia de la medición de las nubes de puntos con diferentes softwares metrológicos (PC-DMIS, Geomagic Control X, PolyWorks, GOM Inspect y 3DReshaper), cabe destacar que independientemente del software empleado los resultados geométricos y dimensionales son idénticos.
- ❖ Se propone el uso de la desviación estándar de las nubes de puntos como parámetro más adecuado para la medición de la calidad geométrica de los datos obtenidos de la digitalización 3D con sistemas de medición óptica.
- ❖ Los sistemas portátiles HLS y SL presentaron las menores desviaciones tanto dimensionales (diámetro y posición del centro de las esferas) como geométricas (error de forma y desviación estándar); en otras palabras, sus resultados fueron los más cercanos a los valores de referencia (obtenidos de las mediciones por contacto).
- ❖ En términos de velocidad de inspección, independientemente del número de piezas, los sistemas portátiles son los más ventajosos.

En conclusión, tanto el sistema de medición óptico HLS como SL son adecuados para la inspección precisa de piezas fabricadas mediante la tecnología SLM (caracterizadas por su alta rugosidad superficial). La extrema portabilidad, ligereza, velocidad y facilidad de manejo dotan al sistema HLS de grandes ventajas en una amplia gama de aplicaciones industriales. Sin embargo, para la medición de alta precisión de geometrías de pequeñas dimensiones, el sistema más adecuado es el SL.

8.3. INFLUENCIA DEL FILTRADO DE PUNTOS

La aplicación de filtros disponibles en los softwares de metrología se realiza con el objetivo de mejorar la calidad de las nubes de puntos obtenidas del escaneo 3D. Así pues, teniendo en cuenta la textura superficial característica de las piezas fabricadas por SLM, las operaciones de filtrado pueden mejorar la precisión de la inspección óptica de este tipo de piezas. El filtrado o eliminación de los puntos espurios más alejados del valor promedio influye directamente en los parámetros geométricos y dimensionales de las características evaluadas, convergiendo hacia valores que pueden estar más cerca o más lejos de los valores obtenidos a partir de las mediciones por contacto.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que diferentes sistemas ópticos producen diferentes resultados geométricos y dimensionales (como se concluyó en el apartado 8.2) y, en consecuencia, la aplicación del mismo filtro puede afectar de forma diferente a los resultados obtenidos para cada equipo de inspección. Probablemente, el filtrado favorezca los resultados de medición de aquellos sistemas ópticos que presentan mayores desviaciones respecto a los valores de contacto (como por ejemplo LS-CMM o LS-CMA). Mientras que, a los sistemas de mayor precisión en la medición de este tipo de componentes (como SL o HLS), puede que no les afecte o, incluso, que les afecte negativamente dando lugar a valores inferiores a los obtenidos por los sistemas de contacto. Por esta razón, y completando el estudio anterior (apartado 8.2), este apartado se centra en evaluar la influencia de la operación de filtrado aplicada a diferentes sistemas de inspección óptica. En particular, se analiza la influencia de los filtros aplicados, por un lado, a la nube de puntos resultante de la medición óptica de la pieza patrón de esferas mediante el sistema láser instalado en CMM (LS-CMM) y, por otro lado, a la nube de puntos obtenida con el escáner de luz estructurada (SL).

Entre los diferentes tipos de filtros disponibles en los softwares de metrología evaluados (apartado 3.3.5), cabe destacar el filtro $N \cdot \sigma$. Este filtro consiste en la eliminación de los puntos que se encuentran a una distancia superior a «N» veces la desviación estándar, también conocida como sigma (σ). Este tipo de filtro está disponible en los softwares Geomagic Control X, PolyWorks y GOM Inspect. En el caso del software 3DReshaper, solo está disponible el filtro basado en porcentajes (eliminación del valor porcentual asignado de los puntos que se encuentran más alejados de la esfera virtual creada). Independientemente del filtro aplicado y del software utilizado se pueden encontrar equivalencias para que la influencia en los resultados sea la misma, dicho con otras palabras, se pueden aplicar los filtros de $N \cdot \sigma$, porcentaje o distancia de tal forma que eliminen los mismos puntos espurios. Lo cual se explica de forma cuantitativa en el apartado siguiente (8.3.1) para su mejor comprensión. De igual manera, la aplicación del mismo filtro en diferentes softwares produce resultados similares (conclusión resultante de la realización de pruebas preliminares a este estudio). En consecuencia, en este apartado se estudia la influencia de la aplicación del

filtro $N \cdot \sigma$, considerando los valores 3σ , 2σ y σ , utilizando en este caso el software Geomagic Control X (obteniéndose un comportamiento similar en los softwares PolyWorks, GOM Inspect y 3DReshaper).

8.3.1. Equivalencia de filtros

La desviación estándar de los puntos que forman cada esfera virtual determina la distancia límite a partir de la cual se eliminan los puntos espurios para cada esfera. Además de esta distancia, la Tabla 8.5 muestra el porcentaje de puntos eliminados en cada esfera tras la aplicación de los filtros 3σ , 2σ y σ en el caso del sistema óptico LS-CMM. Este proceso de filtrado da lugar a un nuevo conjunto de puntos a partir del que se crean nuevas esferas virtuales y se miden sus correspondientes valores geométricos y dimensionales. De forma análoga se realiza la aplicación de los filtros para la nube de puntos resultante del escaneo mediante el sistema SL.

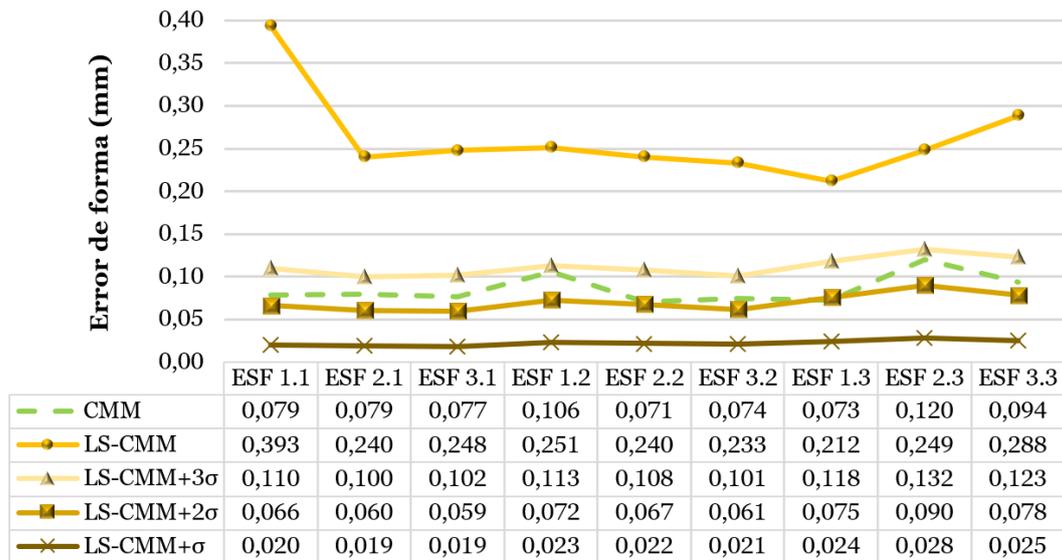
Tabla 8.5. Porcentaje de puntos eliminados según el filtro $N \cdot \sigma$ y distancia equivalente a la que se eliminan los puntos para el sistema LS-CMM.

Esfera	Puntos eliminados (%)			Distancia a la que se eliminan los puntos (μm)		
	Filtro 3σ	Filtro 2σ	Filtro σ	Filtro 3σ	Filtro 2σ	Filtro σ
ESF 1.1 ($\varnothing 5$)	0,54	3,74	30,76	70,1	46,7	23,4
ESF 2.1 ($\varnothing 5$)	0,46	3,85	31,52	63,7	42,5	21,2
ESF 3.1 ($\varnothing 5$)	0,39	4,36	31,14	63,4	42,3	21,1
ESF 1.2 ($\varnothing 10$)	0,32	3,43	33,15	71,6	47,7	23,9
ESF 2.2 ($\varnothing 10$)	0,50	3,17	32,31	69,1	46,0	23,0
ESF 3.2 ($\varnothing 10$)	0,46	3,74	31,68	64,4	42,9	21,5
ESF 1.3 ($\varnothing 15$)	0,41	3,42	33,54	75,2	50,1	25,1
ESF 2.3 ($\varnothing 15$)	0,48	2,80	35,07	84,9	56,6	28,3
ESF 3.3 ($\varnothing 15$)	0,60	3,58	31,29	82,3	54,9	27,4
Promedio	0,45	3,78	31,64	71,6	47,7	23,9
Valor propuesto de error de forma				143,2	95,5	47,7

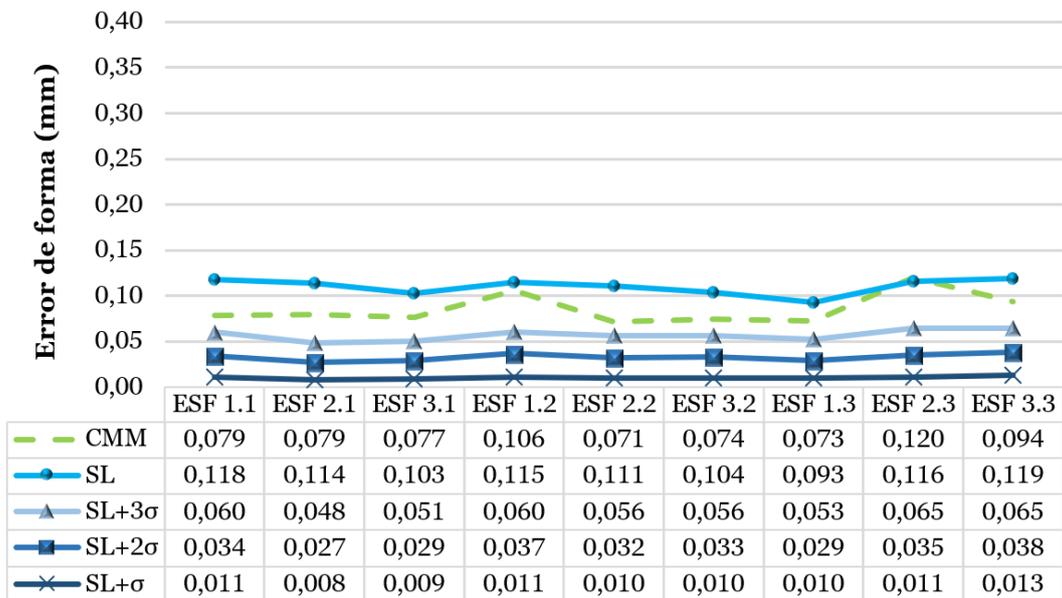
Los valores de distancia mostrados en la Tabla 8.5 deben entenderse como los valores del intervalo medio que define el error de forma límite de la nube de puntos tras la eliminación de los puntos espurios (valores atípicos). Esta definición podría ser válida para todas las nubes de puntos obtenidas mediante cualquier equipo de ingeniería inversa sin contacto. Los valores de la distancia a la que se eliminan los puntos reflejan una baja dispersión independientemente de la esfera y su diámetro, obteniendo resultados promedios de $(72 \pm 3) \mu\text{m}$ para el filtro 3σ , $(48 \pm 5) \mu\text{m}$ para el filtro 2σ y $(24 \pm 3) \mu\text{m}$ para el filtro σ , correspondientes con los intervalos de error de forma de $143 \mu\text{m}$, $95 \mu\text{m}$ y $48 \mu\text{m}$, respectivamente (Tabla 8.5).

8.3.2. Análisis geométrico

Respecto al error de forma de las esferas de la pieza patrón, la aplicación de este tipo de filtros mejora significativamente los resultados del sistema LS-CMM (Figura 8.17a). Como se muestra en la Figura 8.17, los valores de referencia (CMM) oscilan entre $71 \mu\text{m}$ y $120 \mu\text{m}$, mientras que el error de forma de las esferas reconstruidas a partir de la nube de puntos sin filtrar del sistema LS-CMM es de aproximadamente $261 \mu\text{m}$. Tras la aplicación del filtro menos restrictivo (filtro 3σ), el error de forma disminuye notablemente, resultando en valores inferiores a $150 \mu\text{m}$ (Figura 8.17a). Si se aplica un filtro algo más restrictivo (filtro 2σ), los resultados del error de forma son muy similares a los valores obtenidos con la CMM (Figura 8.17a). Por el contrario, aplicando el filtro más restrictivo (filtro σ), se falsean las mediciones del error de forma, proporcionando valores inferiores a los resultados de la medición por contacto, con valores del orden de $25 \mu\text{m}$ (Figura 8.17a). En el caso de los resultados del sistema óptico SL (Figura 8.17b), debido principalmente a la baja desviación promedio de los resultados del error de forma respecto a las mediciones CMM (en torno a $24 \mu\text{m}$), la aplicación de cualquiera de estos filtros da lugar a resultados inferiores a los obtenidos por contacto. Por consiguiente, en este caso, no se recomienda la aplicación de filtros, los cuales alcanzan errores de forma promedio de $57 \mu\text{m}$ (filtro 3σ), $33 \mu\text{m}$ (filtro 2σ) y $10 \mu\text{m}$ (filtro σ) frente al valor CMM de $86 \mu\text{m}$ (Figura 8.17b).



(a)



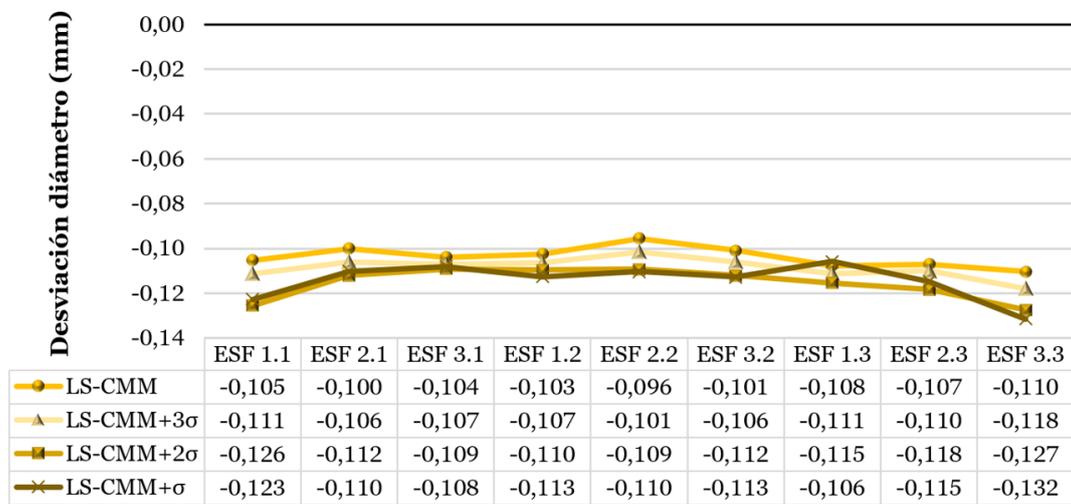
(b)

Figura 8.17. Resultados del error de forma de las esferas de la pieza patrón en los diferentes estados de filtrado de la nube de puntos del sistema: (a) LS-CMM y (b) SL.

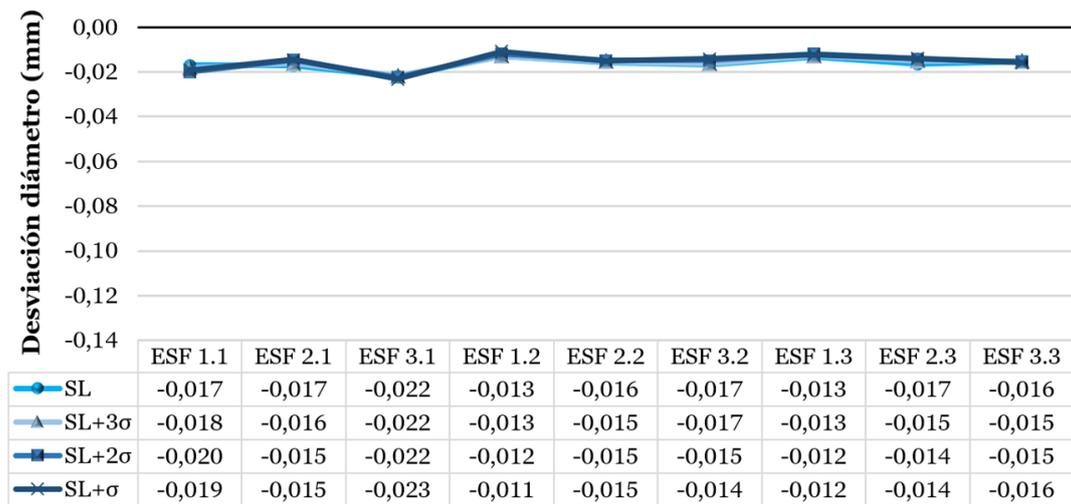
En resumen, en el caso del sistema óptico LS-CMM (Figura 8.17a) la aplicación del filtro 2σ proporciona el mejor ajuste entre la nube de puntos obtenida con la CMM y con el escáner láser. Del mismo modo es válida la aplicación del filtro 3σ , filtro más conservador ya que nunca proporciona valores inferiores a los de referencia. Por consiguiente, los intervalos de $\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$ se pueden utilizar para el filtrado de las nubes de puntos escaneadas mediante LS-CMM con la finalidad de obtener un buen nivel de aproximación geométrica de la pieza patrón de esferas, mientras que el filtro σ no se recomienda, ya que proporciona valores poco realistas. Por otro lado, en el caso de sistemas ópticos como el SL, para este tipo de pieza no se recomienda la aplicación de filtros, ya que se obtienen resultados notablemente inferiores a la medición por contacto (tomada como referencia).

8.3.3. Análisis dimensional

La Figura 8.18 muestra las desviaciones dimensionales de los diámetros de las esferas respecto a los valores de referencia. Todas las dimensiones obtenidas con equipos ópticos son inferiores a las obtenidas por contacto, lo que se debe principalmente al tipo de superficie generada por el proceso de fabricación SLM. Estas desviaciones rondan los 100 μm en el caso del sistema LS-CMM (Figura 8.18a) y los 15 μm en el caso del sensor SL (Figura 8.18b). Respecto al error dimensional del sistema LS-CMM, la aplicación de los filtros disminuye ligeramente el diámetro de las esferas, alejándose del valor de referencia obtenido por contacto. Sin embargo, independientemente del filtro aplicado y del sistema analizado, las desviaciones dimensionales son muy similares.



(a)



(b)

Figura 8.18. Resultados de la desviación de los diámetros de las esferas de la pieza patrón en los diferentes estados de filtrado de la nube de puntos del sistema: (a) LS-CMM y (b) SL.

8.3.4. Conclusiones de la influencia del filtrado de puntos

Del estudio realizado sobre la influencia de la aplicación de filtros en la inspección óptica de las piezas fabricadas por SLM, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- ❖ En el caso del sistema LS-CMM, se recomienda la aplicación del filtro 2σ (valores cercanos a las mediciones por contacto) o 3σ (valores ligeramente superiores a los de referencia) respecto al error de forma. Mientras que, en el caso del análisis dimensional, la aplicación de filtros no influye notablemente en los resultados.
- ❖ Para la inspección óptica utilizando el equipo SL, se recomienda evitar la aplicación de filtros, tanto desde el punto de vista geométrico (dando lugar a valores inferiores a los de referencia) como dimensional (sin influencia en los resultados).
- ❖ Cabe destacar que la aplicación de filtros influye de forma diferente en función de la calidad de la nube de puntos, lo que está directamente relacionado entre otros factores por el sistema de medición utilizado. Por consiguiente, para la medición de componentes SLM utilizando sistemas ópticos diferentes a los de este estudio, se recomienda realizar un análisis previo del filtrado de puntos espurios con el objetivo de trabajar siempre con los valores más próximos a los de contacto (valores de referencia).

En conclusión, la superficie de las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM presenta particularidades que provocan la aparición de puntos espurios durante la digitalización óptica con ciertos sistemas (como el LS-CMM), aumentando los errores de medición. Razón por la cual, se recomienda la aplicación de los filtros 2σ o 3σ . Sin embargo, en aquellos equipos que se obtienen nubes de puntos de calidad tras la inspección óptica de componentes SLM, como por ejemplo con el escáner de luz estructurada (SL), se recomienda evitar la aplicación de filtros, ya que distorsionan las mediciones reales.

8.4. INFLUENCIA DE LOS POSTPROCESOS SLM

Una de las principales ventajas de la aplicación de los postprocesos mecánicos tras la fabricación SLM es la mejora de la topología superficial de las piezas. En particular, el postproceso de arenado, además de la mejora superficial y geométrica (apartado 7.2), dota a las piezas de un acabado mate que puede favorecer su inspección mediante sistemas ópticos. Por otro lado, los postprocesos térmicos pueden modificar el aspecto superficial, oscureciendo generalmente el color de las piezas. Con la finalidad de evaluar la influencia de estos postprocesos SLM en la inspección óptica, se realiza el análisis geométrico y dimensional de la pieza patrón de cubos en los tres estados mostrados en la Figura 8.19: tras la fabricación SLM (F), después de la aplicación del postproceso de arenado (A) y después de la aplicación sucesiva de los postprocesos de arenado y tratamiento térmico de relajación de tensiones (A-TT_{RT}). La pieza patrón de cubos, diseñada para evaluar la influencia del posicionamiento de las piezas en la placa de fabricación SLM (apartado 6.2) y utilizada posteriormente para evaluar la influencia del postproceso de arenado en su calidad geométrica y dimensional (apartado 7.2.3), fue sometida adicionalmente al tratamiento térmico de relajación de tensiones y digitalizada mediante el escáner de luz estructura en las diferentes etapas de postproceso (Figura 8.19). Se utilizó esta pieza patrón por el elevado número de características que contiene, por su distribución uniforme ocupando la totalidad de la placa base y por contener la entidad geométrica más simple, fácil e inequívoca de evaluar desde el punto de vista metrológico. Por otro lado, el sistema de medición utilizado fue el escáner de luz estructurada ya que, como se concluyó en el apartado 8.2, es el sistema óptico más adecuado para la medición de precisión de piezas fabricadas por SLM.



Figura 8.19. Metodología de evaluación de la influencia de diferentes postprocesos SLM en la inspección óptica de las piezas.

Los resultados mostrados en los siguientes apartados (8.4.1 y 8.4.2) corresponden a las desviaciones entre los valores obtenidos de la medición óptica respecto a los valores resultantes de la medición por contacto (valores de referencia). Por lo tanto, cuanto menores son las desviaciones resultantes, más cercanas son las mediciones ópticas y por contacto. Aunque se buscan valores similares en ambos métodos de inspección, no hay que olvidar que, en este tipo de piezas, caracterizadas por una alta rugosidad superficial, puede que los sistemas de medición por contacto no palpén todos los puntos reales de la superficie, mientras que el escáner 3D puede captar de forma más fiable esa textura superficial, excepto cuando la superficie es muy brillante (dando lugar a puntos espurios).

8.4.1. Análisis geométrico

La Tabla 8.6 muestra los resultados de la desviación del error de planitud en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT_{RT}). Independientemente del estado analizado, el error de planitud es similar en las caras laterales de los cubos (XZ e YZ). Sin embargo, los resultados de las caras superiores se ven influenciados por el postproceso mecánico de arenado (A), cuya aplicación disminuye las desviaciones del error de planitud en torno a 20 μm de valor promedio (Tabla 8.6). Estos resultados obtenidos revelan que dicho efecto está influenciado por la superficie, esto es, que el acabado superficial de las caras laterales no afecta al error geométrico resultante de la medición óptica, mientras que el acabado superficial de la cara superior, principalmente influenciado por las marcas resultantes de la estrategia de escaneo láser, aumenta ligeramente el error de la medición. Lo que puede estar directamente relacionado con la mayor rugosidad superficial de las superficies superiores respecto a las laterales de este tipo de piezas. Por otro lado, la aplicación del postproceso térmico (A-TT_{RT}) no afecta los resultados obtenidos, manteniéndose similares al estado previo de la pieza (A).

Tabla 8.6. Resultados en valor absoluto de la desviación de planitud de las caras (XZ, YZ, XY) de los cubos de la pieza patrón en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT_{RT}).

Estado	Planitud (μm)			
	XZ	YZ	XY	Promedio
F	17 \pm 13	12 \pm 8	54 \pm 26	23 \pm 22
A	14 \pm 8	13 \pm 11	33 \pm 17	17 \pm 14
A-TT _{RT}	16 \pm 8	14 \pm 11	35 \pm 15	19 \pm 13

En cuanto al error de paralelismo de las caras XY de los cubos respecto al plano base, sigue la misma tendencia que el error geométrico de planitud de las caras superiores (XY). La desviación promedio en el estado F es de $(50 \pm 26) \mu\text{m}$, disminuyendo a valores de $(24 \pm 16) \mu\text{m}$ y $(27 \pm 15) \mu\text{m}$ en los estados de postproceso A y A-TT_{RT}, respectivamente. Como se muestra en la Figura 8.20, estos resultados se ven influenciados por la mejora superficial resultante de la aplicación del postproceso mecánico de arenado.

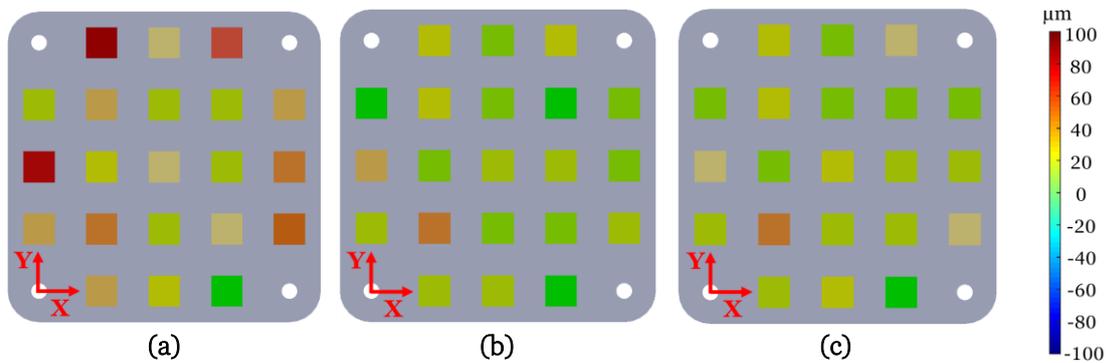


Figura 8.20. Resultados de la desviación de paralelismo de la cara superior de los cubos de la pieza patrón respecto del plano base en los tres estados de postproceso: (a) F, (b) A y (c) A-TT_{RT}.

8.4.2. Análisis dimensional

La Tabla 8.7 muestra las desviaciones promedio (entre la medición óptica y por contacto) de las dimensiones de los cubos de la pieza patrón en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT_{RT}). La aplicación del postproceso mecánico de arenado mejora la medición óptica de las dimensiones de los cubos (Tabla 8.7), siendo más notable esta influencia en las caras laterales (dimensión X e Y) que en la cara superior (dimensión Z). Como resultado de la aplicación de este postproceso, el error dimensional disminuye aproximadamente $8 \mu\text{m}$ según la dirección Z, mientras que en las direcciones X e Y disminuye en torno a $44 \mu\text{m}$ y $32 \mu\text{m}$, respectivamente (Tabla 8.7).

Tabla 8.7. Resultados en valor absoluto de la desviación dimensional (según los ejes X, Y, Z) de los cubos de la pieza patrón en los tres estados de postproceso (F, A, A-TT_{RT}).

Estado	Dimensión (μm)			Promedio
	X	Y	Z	
F	50 ± 4	40 ± 6	33 ± 6	41 ± 9
A	6 ± 4	8 ± 4	25 ± 6	13 ± 10
A-TT _{RT}	9 ± 5	7 ± 5	29 ± 5	15 ± 11

En general las desviaciones dimensionales obtenidas de las mediciones ópticas son negativas, lo que se debe al filtrado que aplica inevitablemente la punta de la sonda de palpado en la medición por contacto. Sin embargo, la desviación de la dimensión Z en el estado A es positiva, ya que en este caso el proceso de arenado elimina las pequeñas imperfecciones de la superficie exterior de las piezas permitiendo que la sonda de contacto toque una superficie más cercana a la real o escaneada. Este efecto es más notable en la cara superior (XY) de los cubos debido a su mayor rugosidad.

Por otro lado, la aplicación del tratamiento térmico tras el postproceso de arenado no produce variaciones significativas en los resultados de las medidas dimensionales de los cubos. Esto puede deberse a que el cambio de color y textura de la pieza tras la aplicación del postproceso térmico no es tan significativo como el acabado mate proporcionado por el postproceso mecánico de arenado.

8.4.3. Conclusiones de la influencia de los postprocesos SLM

Este estudio se realiza con el objetivo de evaluar la influencia de los postprocesos comúnmente aplicados tras la fabricación SLM en la inspección sin contacto de las piezas impresas. Tras la medición por contacto y óptica de la pieza patrón de cubos en tres estados de postproceso habituales (sin postproceso o según la fabricación (F), tras la aplicación del postproceso mecánico de arenado (A) y tras la aplicación sucesiva del postproceso de arenado y el tratamiento térmico de relajación de tensiones (A- TT_{RT})), se han obtenido las siguientes conclusiones:

- ❖ Respecto al error geométrico, las mediciones ópticas muestran una tendencia muy similar independientemente del estado de postproceso de la pieza (F, A, A- TT_{RT}) en las caras laterales de los cubos, correspondientes a las caras de menor rugosidad superficial. Mientras que, en las caras superiores de los cubos, la desviación del error de planitud disminuye en torno a 20 μm tras la aplicación del arenado.
- ❖ En cuanto a las mediciones del error de paralelismo de la cara superior de los cubos respecto al plano base, se obtiene una tendencia similar a la observada en el error de planitud de las caras superiores (involucradas en esta medición). En este caso, la desviación entre las mediciones por contacto y ópticas tras la aplicación del postproceso de arenado se reducen de 50 μm en el estado F a 24 μm en el estado de postproceso A.
- ❖ Los resultados del análisis dimensional revelan una mejora en las mediciones ópticas (respecto a las mediciones por contacto) después de la aplicación del postproceso mecánico. Las desviaciones dimensionales en el estado de postproceso A son

aproximadamente de 6 μm , 9 μm y 25 μm según las direcciones X, Y y Z, respectivamente.

- ❖ Desde el punto de vista de la precisión geométrica y dimensional, la aplicación del postproceso térmico no afecta las mediciones ópticas.

En resumen, la aplicación del postproceso mecánico de arenado dota a las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM de un acabado superficial más adecuado para la inspección óptica principalmente para las superficies superiores o superficies de mayor rugosidad. Este proceso mecánico alisa y elimina el brillo de la superficie de las piezas, evitando, de esta forma, la aparición de puntos espurios durante la medición óptica. Mientras que los tratamientos térmicos no producen prácticamente variaciones en los resultados. Sin embargo, las diferencias o desviaciones resultantes entre las mediciones ópticas y por contacto son pequeñas y prácticamente están dentro de la resolución del sistema de medición óptico utilizado (50 μm). Por lo que se puede concluir que independientemente del estado de postproceso (según fabricación, tras el postproceso de arenado o tras el tratamiento térmico) la inspección óptica utilizando el escáner de luz estructura de las piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas mediante la tecnología SLM es adecuada y precisa.

8.5. DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados descritos en este capítulo han dado lugar a dos publicaciones en Revistas JCR:

- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Meana, V. M. y Barreiro, J. (2020) «Analysis of Modern Optical Inspection Systems for Parts Manufactured by Selective Laser Melting», *Sensors*, 20(11), 3202. doi: 10.3390/s20113202 – Factor de impacto JCR: Q1.
- ▶ Cuesta, E., Giganto, S., Álvarez, B. J., Barreiro, J., Martínez-Pellitero, S. y Meana, V. (2021) «Laser line scanner aptitude for the measurement of Selective Laser Melting parts», *Optics and Lasers in Engineering*, 138, 106406. doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106406 – Factor de impacto JCR: Q1.

Y una publicación en Congreso Internacional (MESIC 2021) y Revista Internacional:

- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J. y Cuesta, E. (2021) «Evaluation of the influence of post-processing on the optical inspection accuracy of additively manufactured parts», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1193, 012062. doi: 10.1088/1757-899X/1193/1/012062.

Capítulo 9

CONCLUSIONES GENERALES

En este capítulo se exponen las principales contribuciones de la presente tesis doctoral, así como las líneas futuras de trabajo derivadas de esta investigación. Incluyendo la diseminación de los resultados obtenidos.

Los apartados que forman este capítulo son:

- 1. CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES*
- 2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO*
- 3. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS*

9.1. CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES

Las contribuciones de esta tesis doctoral se enmarcan en la fabricación mediante el proceso SLM de componentes de acero inoxidable 17-4PH. En particular, se utiliza la máquina ProX DMP 100, cuyos parámetros de potencia y distancia de enfoque del láser se han ajustado con la finalidad de conseguir tanto la adecuada realización del proceso de fabricación como buenas propiedades de las piezas impresas. Este proceso SLM, que utiliza baja potencia del láser, presenta su principal aplicación en la fabricación de componentes de pequeñas dimensiones orientados a sectores como el dental, aeronáutico o médico.

El objetivo principal, definido al inicio de la presente tesis doctoral, se centra en tres aspectos de destacado interés dentro del ámbito de aplicación de esta investigación: (1) el impacto de los principales factores involucrados en el proceso de fabricación SLM, (2) la influencia de la aplicación de postprocesos, y (3) la optimización del proceso de inspección óptica de este tipo de piezas. Para alcanzar este objetivo general se definieron objetivos particulares, los cuales se pueden agrupar y resumir como se muestra a continuación:

- (1) **Proceso de fabricación SLM.** Analizar la influencia de: la estrategia de escaneo láser utilizada, el reciclaje del polvo metálico, el posicionamiento de las piezas en la placa base, y la fabricación de distintos tipos de geometrías con diferente ángulo de inclinación.
- (2) **Postprocesos SLM.** Evaluar la influencia de la aplicación del postproceso de arenado (calidad superficial, geométrica y dimensional) y de los tratamientos térmicos (deformaciones, propiedades mecánicas y porosidad).
- (3) **Inspección óptica de piezas fabricadas por SLM.** Analizar la influencia de: el sistema óptico utilizado, el software de metrología utilizado, el filtrado de las nubes de puntos resultantes de la digitalización 3D, y el acabado superficial de las piezas en diferentes estados de postproceso (sin postproceso, tras la aplicación de arenado, tras la aplicación de tratamiento térmico).

Los diferentes estudios llevados a cabo en esta tesis doctoral han permitido conseguir todos los objetivos propuestos. En consecuencia, y directamente relacionadas con estos objetivos, se han extraído las principales conclusiones y contribuciones de la presente tesis doctoral, las cuales se resumen a continuación:

Proceso de fabricación SLM

- ❖ En general, se recomienda la utilización de la estrategia de escaneo hexagonal en términos de propiedades mecánicas y densidad, y la estrategia normal en cuanto al acabado superficial. Además, se ha demostrado que el tratamiento térmico de relajación de tensiones (de aplicación recomendada) no afecta la precisión geométrica y dimensional de las piezas impresas con ambas estrategias.
- ❖ Se ha caracterizado el polvo en diferentes estados de reciclaje. El análisis morfológico revela el aumento tanto del tamaño como de la forma irregular de las partículas, mientras que el análisis químico muestra un aumento de la oxidación con el reciclaje del polvo metálico. Estos resultados han permitido definir valores más detallados de las características del material de partida que los proporcionados por el fabricante.
- ❖ Se recomienda la reutilización del polvo metálico, garantizando de esta forma la viabilidad económica y medioambiental del proceso, puesto que no afecta significativamente las propiedades de las piezas fabricadas. Se propone la utilización tanto de polvo reciclado (incluso después de 20 ciclos de fabricación-reciclaje) como de una mezcla de polvo reciclado y polvo virgen.
- ❖ Respecto a la ubicación y la orientación de las piezas en la placa base durante la etapa de preparación del archivo para su transferencia a la máquina, se recomienda orientar y posicionar las piezas según el eje X (dirección de movimiento del rodillo en las operaciones de deposición y compactación de las capas del lecho de polvo) a fin de obtener menores desviaciones dimensionales respecto a los valores nominales.
- ❖ Se propone un conjunto de piezas patrón para evaluar el rendimiento de los sistemas de AM en la fabricación de distintos tipos de geometrías (tanto interiores como exteriores) con diferente ángulo de inclinación. Dichas piezas patrón deben redimensionarse ajustándose al volumen de trabajo de la máquina de AM correspondiente. Particularmente en el ámbito de aplicación de la presente tesis doctoral, se recomienda evitar las superficies con pendientes negativas iguales o superiores a 45° a fin de obtener buena precisión geométrica. Respecto a la precisión dimensional, se recomienda redimensionar las características en función tanto del ángulo de inclinación como del tipo de geometría, aumentando el tamaño de las entidades exteriores y disminuyendo el tamaño de las entidades interiores, según lo expuesto en la tabla resumen del apartado 6.3.4.

Postprocesos SLM

- ❖ Se recomienda la aplicación del postproceso mecánico de arenado después de la fabricación SLM para reducir la rugosidad superficial típicamente alta de este tipo de piezas. Los parámetros de presión y tiempo de arenado se deben seleccionar en función del tamaño de la pieza, la estrategia de escaneo láser utilizada en la fabricación SLM, así como la aplicación final de los componentes (calidad superficial requerida). Respecto a las estrategias de escaneo láser, los resultados revelan que, para conseguir una rugosidad superficial similar, las piezas fabricadas utilizando la estrategia de escaneo hexagonal requieren más tiempo/presión de arenado que las impresas mediante la estrategia normal.
- ❖ Se recomienda la aplicación del tratamiento térmico completo (relajación de tensiones residuales + puesta en solución + envejecimiento) para mejorar las propiedades mecánicas en térmicos de dureza y resistencia a la tracción. Además, se ha demostrado el potencial del tratamiento HIP para reducir notablemente la porosidad interna en este tipo de piezas.

Inspección óptica de piezas fabricadas por SLM

- ❖ Se recomienda la inspección óptica de este tipo de piezas utilizando sistemas de triangulación láser o luz estructurada, puesto que se mantiene la precisión geométrica y dimensional conseguida con la CMM y se reduce notablemente el tiempo completo del proceso de inspección frente a la medición por contacto. En particular, tanto el sistema de triangulación láser portátil (HandySCAN 700) como el escáner de luz estructurada (Breuckmann smartSCAN^{3D}-HE) han mostrado excelentes resultados.
- ❖ Se ha demostrado que independientemente del software metrológico (PC-DMIS, Geomagic Control X, PolyWorks, GOM Inspect y 3DReshaper) utilizado en la medición de las nubes de puntos resultantes de la digitalización 3D de este tipo de piezas los resultados geométricos y dimensionales son idénticos.
- ❖ Con la finalidad de obtener resultados de medición similares a los valores de referencia (CMM), se recomienda la aplicación del filtrado de puntos espurios en las nubes de puntos de peor calidad, como por ejemplo las resultantes de la digitalización de este tipo de piezas utilizando el sistema de triangulación láser instalado en CMM. Por el contrario, en aquellos equipos que se obtienen nubes de puntos de mayor calidad tras la inspección óptica de este tipo de componentes, como es el caso del escáner de luz estructurada, se recomienda evitar la aplicación de filtros, ya que distorsionan las mediciones reales (dando lugar a valores inferiores a los de referencia). Por consiguiente, se recomienda realizar un análisis previo a la inspección óptica de este

tipo de piezas para identificar la necesidad o no de aplicar filtrado a las nubes de puntos y, en caso de ser necesarios, definir el valor del filtro más adecuado.

- ❖ Se ha demostrado que independientemente del estado de postproceso de la pieza final (según la fabricación, después de la aplicación de arenado, después de la aplicación de tratamiento térmico) se mantienen la precisión geométrica y dimensional de la medición óptica utilizando el escáner de luz estructura (sistema que previamente ha sido recomendado para la inspección de este tipo de piezas) ya que los resultados de la desviación respecto a la CMM se encuentran dentro de la resolución del sistema.

9.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Dentro del ámbito de aplicación de la presente tesis doctoral se han definido las siguientes líneas futuras de investigación:

Proceso de fabricación SLM

- Completar el estudio sobre la calidad geométrica y dimensional de las piezas fabricadas por SLM utilizando diferentes estrategias de escaneo láser (N, C y H) en los estados pre (apartado 4.4.6) y post tratamiento térmico de relajación de tensiones residuales (apartado 7.3.1) mediante la evaluación, tanto de los errores de forma como de las desviaciones dimensionales, de las piezas en el estado final, esto es, después de la separación de las piezas de la placa de fabricación (operación posterior al tratamiento térmico).
- Los resultados obtenidos de la evaluación de las piezas fabricadas mediante la estrategia de escaneo láser concéntrica, principalmente en términos de porosidad interna (apartado 4.4.1), manifiestan el interés del estudio de la utilización de esta estrategia en la fabricación de piezas cilíndricas (evitando de esta forma el cambio brusco de dirección de la trayectoria del láser). Por consiguiente, se propone la evaluación detalla de este tipo de piezas, incluyendo el análisis de la porosidad, las propiedades mecánicas, así como la calidad superficial, geométrica y dimensional.
- En base a las conclusiones obtenidas del estudio sobre la influencia de la estrategia de escaneo láser en la calidad de las piezas impresas (apartado 4.4), un trabajo de análisis futuro sería la fabricación de piezas combinando diferentes estrategias. En particular, sería interesante la fabricación del núcleo de las piezas con la estrategia de escaneo hexagonal, considerada la más adecuada en términos de porosidad y propiedades mecánicas, y la envoltura con la estrategia de escaneo normal, por su acabado superficial.
- Se propone ampliar el estudio del apartado 6.3 mediante la evaluación de la influencia de las dimensiones (alto, ancho, largo, diámetro, espesor, etc.) de diferentes entidades geométricas (cubo, esfera, cilindro, cono, etc.) a través del diseño de experimentos. En relación, también se propone analizar la fabricación SLM de paredes delgadas y voladizos, características que son más sensibles a la distorsión inducida por las tensiones residuales generadas durante el proceso de fusión del polvo metálico. Entre otras aplicaciones derivadas de esta línea futura de trabajo, cabe destacar el interés de la fabricación de estructuras de tipo biónico.

Postprocesos SLM

- La mejora del acabado superficial proporcionada por el arenado está limitada a las superficies externas o internas de fácil acceso, sin embargo, este postproceso no es aplicable a conductos internos estrechos, con cambios de dirección, o incluso, de sección variable. Los altos requisitos superficiales demandados por este tipo de conductos, orientados al paso de fluidos o gases, crean la necesidad de estudiar otras técnicas y/o postprocesos de mejora de la calidad para este tipo de aplicación, que además cumplan las tolerancias dimensionales de estos componentes. En esta misma línea, las piezas patrón diseñadas en la presente tesis doctoral no han considerado el diseño de estructuras de soporte, por lo que se propone extender este estudio relativo a la mejora del acabado superficial a piezas con esta necesidad, en este caso, enfocando principalmente el proceso de mejora en la superficie de unión entre las estructuras de soporte y las piezas.
- Algo más complejo, pero con mucha importancia de cara a la obtención de piezas funcionales con altas exigencias, sería poder realizar tratamientos térmicos en horno HIP, variando tanto los tres parámetros principales: tiempo, presión y temperatura; como la velocidad de enfriamiento. Esto permitiría establecer tratamientos óptimos en términos de porosidad interna y propiedades mecánicas para este tipo de piezas.

Inspección óptica de piezas fabricadas por SLM

- Completar el estudio sobre la aplicación del filtrado de puntos espurios de las nubes de puntos obtenidas con los diferentes equipos de medición óptica analizados en el apartado 8.2. Actualmente, se conoce el efecto de los filtros en la medición utilizando dos equipos: escáner láser instalado en CMM y escáner de luz estructurada.

9.3. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del trabajo desarrollado en la presente tesis doctoral han dado lugar a varias publicaciones.

Publicaciones en Revistas JCR

- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Barreiro, J. y Martínez-Pellitero, S. (2020) «Characterisation of 17-4PH metallic powder recycling to optimise the performance of the selective laser melting process», *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), pp. 1273-1285. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.054 – Factor de impacto JCR: Q1.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Meana, V. M. y Barreiro, J. (2020) «Analysis of Modern Optical Inspection Systems for Parts Manufactured by Selective Laser Melting», *Sensors*, 20(11), 3202. doi: 10.3390/s20113202 – Factor de impacto JCR: Q1.
- ▶ Cuesta, E., Álvarez, B. J., Zapico, P. y Giganto, S. (2020) «Analysis of post-processing influence on the geometrical and dimensional accuracy of selective laser melting parts», *Rapid Prototyping Journal*, 26(10), pp. 1713-1722. doi: 10.1108/RPJ-02-2020-0042 – Factor de impacto JCR: Q2.
- ▶ Cuesta, E., Giganto, S., Álvarez, B. J., Barreiro, J., Martínez-Pellitero, S. y Meana, V. (2021) «Laser line scanner aptitude for the measurement of Selective Laser Melting parts», *Optics and Lasers in Engineering*, 138, 106406. doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106406 – Factor de impacto JCR: Q1.
- ▶ Leo, P., Cabibbo, M., Del Prete, A., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S. y Barreiro, J. (2021) «Laser Defocusing Effect on the Microstructure and Defects of 17-4PH Parts Additively Manufactured by SLM at a Low Energy Input», *Metals*, 11(4), 588. doi: 10.3390/met11040588 – Factor de impacto JCR: Q2.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J. y Zapico, P. (2022) «Influence of 17-4 PH stainless steel powder recycling on properties of SLM additive manufactured parts», *Journal of Materials Research and Technology*, 16, pp. 1647-1658. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.12.089 – Factor de impacto JCR (2021): Q1.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Cuesta, E., Zapico, P. y Barreiro, J. (2022) «Proposal of design rules for improving the accuracy of selective laser melting (SLM) manufacturing using benchmarks parts», *Rapid Prototyping Journal*, 28(6), pp. 1129-1143. doi: 10.1108/RPJ-06-2021-0130 – Factor de impacto JCR (2021): Q2.

- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J., Leo, P. y Castro-Sastre, M. A. (2022) «Impact of the laser scanning strategy on the quality of 17-4PH stainless steel parts manufactured by selective laser melting», *Journal of Materials Research and Technology*, 20, pp. 2734-2747. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.040 – Factor de impacto JCR (2021): Q1.

Publicaciones en Congresos y Revistas Internacionales

- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Fernández-Abia, A. I. y Castro-Sastre, M. A. (2018) «Influence of Laser Energy in the Surface Quality of Parts Manufactured by Selective Laser Melting», *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 29(1), pp. 0279-0286. doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.040.
- ▶ Giganto, S., Zapico, P., Castro-Sastre, M. A., Martínez-Pellitero, S., Leo, P. y Perulli, P. (2019) «Influence of the scanning strategy parameters upon the quality of the SLM parts», *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 698-705. doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.060 – Factor de impacto SJR: Q2.
- ▶ Cuesta, E., Gesto, A., Álvarez, B. J., Martínez-Pellitero, S., Zapico, P. y Giganto, S. (2019) «Dimensional accuracy analysis of Direct Metal Printing machine focusing on roller positioning errors», *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 2-9. doi: 10.1016/j.promfg.2019.07.022 – Factor de impacto SJR: Q2.
- ▶ Zapico, P., Giganto, S., Martínez-Pellitero, S. y Barreiro, J. (2019) «Improvement Surface Quality of SLM Parts by means of the Combination of Different Scanning Strategies», *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2240, pp. 327-330. doi: publication/WCE2019/WCE2019_pp327-330.pdf – *Certificate of Merit for The 2019 International Conference of Manufacturing Engineering and Engineering Management*.
- ▶ Giganto, S., Martínez-Pellitero, S., Barreiro, J. y Cuesta, E. (2021) «Evaluation of the influence of post-processing on the optical inspection accuracy of additively manufactured parts», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1193, 012062. doi: 10.1088/1757-899X/1193/1/012062.

Normas

ASTM E975-13:2016. Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation.

UNE-EN ISO 10360-2:2010. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 2: MMC utilizadas para la medición de dimensiones lineales. (ISO 10360-2:2009).

UNE-EN ISO 10360-8:2017. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de sistemas de medición por coordenadas (SMC). Parte 8: MMC con sensores ópticos sin contacto. (ISO 10360-8:2013).

UNE-EN ISO 1101:2017. Especificación geométrica de productos (GPS). Tolerancia geométrica. Tolerancias de forma, orientación, localización y alabeo (ISO 1101:2017).

UNE-EN ISO 17296-2:2017. Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas. (ISO 17296-2:2015).

UNE-EN ISO 17296-3:2017. Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Características principales y métodos de ensayo correspondientes. (ISO 17296-3:2014).

UNE-EN ISO 4288:1998. Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial. (ISO 4288:1996).

UNE-EN ISO 6507-1:2018. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo. (ISO 6507-1:2018).

UNE-EN ISO 6892-1:2020. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2019).

UNE-EN ISO 9000:2015. Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario. (ISO 9000:2015).

UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017. Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología. (ISO/ASTM 52900:2015).

UNE-EN ISO/ASTM 52902:2020. Fabricación aditiva. Artefactos de ensayo. Evaluación de la capacidad geométrica de los sistemas de fabricación aditiva. (ISO/ASTM 52902:2019).

UNE-EN ISO/ASTM 52907:2020. Fabricación aditiva. Materias primas. Métodos para caracterizar polvos metálicos. (ISO/ASTM 52907:2019).

UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020. Fabricación aditiva. Diseño. Parte 1: Fusión láser de lecho de polvo de metales. (ISO/ASTM 52911-1:2019).

UNE-EN ISO/ASTM 52915:2020. Especificación para el formato de archivo para la fabricación aditiva (AMF). Versión 1.2. (ISO/ASTM 52915:2020).

UNE-EN ISO/ASTM 52950:2021. Fabricación aditiva. Principios generales. Visión general del intercambio de datos. (ISO/ASTM 52950:2021).

Referencias

- 3DSYSTEMS (1988) «StereoLithography Interface Specification».
- 3DSYSTEMS (2012) *Technical User Guide - PX BOX*.
- 3DSYSTEMS (2015) *Specification smartSCAN-HE*.
- 3DSYSTEMS (2017a) *Direct Metal Printers. Metal Additive Manufacturing with the ProX® DMP 3D printers*. Disponible en: <https://www.3dsystems.com/>.
- 3DSYSTEMS (2017b) *LaserForm® 17-4PH (B) for ProX® DMP 100, 200 and 300 Direct Metal Printers*. Disponible en: <https://www.3dsystems.com/materials/stainless-steel-17-4-ph>.
- 3DSYSTEMS (2017c) *TECHNICAL USER GUIDE ProX100*. Disponible en: <https://www.3dsystems.com/>.
- ABSHOT (2015) *Arenadora SABLEX S2*.
- ABSHOT (2022) *Corindon Blanco*. Disponible en: <https://abshot.es/productos/abrasivos-para-chorreado-y-granallado/corindon-blanco/>.
- Adam, G.A.O. y Zimmer, D. (2014) «Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures», *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(1), pp. 20-28. doi:10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
- Aguado-Montero, S. *et al.* (2022) «Fatigue behaviour of PBF additive manufactured Ti6Al4V alloy after shot and laser peening», *International Journal of Fatigue*, 154, p. 106536. doi:10.1016/j.ijfatigue.2021.106536.
- Ahmed, F. *et al.* (2020) «Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel», *Journal of Materials Processing Technology*, 278, p. 116522. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116522.
- Ahmed Obeidi, M. *et al.* (2021) «Comparison of the porosity and mechanical performance of 316L stainless steel manufactured on different laser powder bed fusion metal additive manufacturing machines», *Journal of Materials Research and Technology*, 13, pp. 2361-2374. doi:10.1016/j.jmrt.2021.06.027.
- Ahn, J. *et al.* (2020) «Three-dimensional printing and models: Current applications, limitations, and trends in spinal surgery», *Seminars in Spine Surgery*, p. 100790. doi:10.1016/j.semss.2020.100790.
- Akbari, M. y Ha, N. (2020) «Impact of additive manufacturing on the Vietnamese transportation industry: An exploratory study», *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 36(2), pp. 78-88. doi:10.1016/j.ajsl.2019.11.001.
- Alamos, F.J. *et al.* (2020) «Effect of powder reuse on mechanical properties of Ti-6Al-4V produced through selective laser melting», *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 91, p. 105273. doi:10.1016/j.ijrmhm.2020.105273.
- Ali, H., Ghadbeigi, H. y Mumtaz, K. (2018) «Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V», *Materials Science and Engineering A*, 712, pp. 175-187. doi:10.1016/j.msea.2017.11.103.
- AlMangour, B., Grzesiak, D. y Yang, J.M. (2017) «Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites», *Journal of Alloys*

and Compounds, 728, pp. 424-435. doi:10.1016/j.jallcom.2017.08.022.

Ameta, G. *et al.* (2015) «Investigating the Role of Geometric Dimensioning and Tolerancing in Additive Manufacturing», *Journal of Mechanical Design*, 137(11), p. 111401. doi:10.1115/1.4031296.

Anant Pidge, P. y Kumar, H. (2020) «Additive manufacturing: A review on 3 D printing of metals and study of residual stress, buckling load capacity of strut members», *Materials Today: Proceedings*, 21, pp. 1689-1694. doi:10.1016/j.matpr.2019.12.012.

Andrés-Cano, P. *et al.* (2021) «Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada», *Revista Espanola de Cirugia Ortopedica y Traumatologia*, 65(2), pp. 138-151. doi:10.1016/j.recot.2020.06.014.

Ansari, P. y Salamci, M.U. (2021) «On the selective laser melting based additive manufacturing of AlSi10Mg: the process parameter investigation through multiphysics simulation and experimental validation», *Journal of Alloys and Compounds*, 890, p. 161873. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161873.

Ardila, L.C. *et al.* (2014) «Effect of IN718 recycled powder reuse on properties of parts manufactured by means of Selective Laser Melting», *Physics Procedia*, 56, pp. 99-107. doi:10.1016/j.phpro.2014.08.152.

Asgari, H. *et al.* (2017) «On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg_200C using recycled powder», *Materials Science and Engineering A*, 707, pp. 148-158. doi:10.1016/j.msea.2017.09.041.

ASTM y ISO (2017) *ASTM F42/ISO TC 261 Develops Additive Manufacturing Standards*. Disponible en: https://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf.

Avanzini, A. *et al.* (2019) «Investigation on fatigue strength of sand-blasted DMLS-AlSi10Mg alloy», *Procedia Structural Integrity*, 18, pp. 119-128. doi:10.1016/j.prostr.2019.08.146.

Bae, K.C. *et al.* (2021) «Effect of heat treatment, building direction, and sliding velocity on wear behavior of selectively laser-melted maraging 18Ni-300 steel against bearing steel», *Wear*, 482-483, p. 203962. doi:10.1016/j.wear.2021.203962.

Bai, Y. *et al.* (2020) «Dry mechanical-electrochemical polishing of selective laser melted 316L stainless steel», *Materials and Design*, 193, p. 108840. doi:10.1016/j.matdes.2020.108840.

Bai, Y. *et al.* (2022) «Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting», *Journal of Materials Processing Technology*, 299, p. 117328. doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117328.

Baicheng, Z. *et al.* (2017) «Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing», *Materials and Design*, 116, pp. 531-537. doi:10.1016/j.matdes.2016.11.103.

Basha, S.M. *et al.* (2020) «Laser polishing of 3D printed metallic components: A review on surface integrity», *Materials Today: Proceedings*, 26, pp. 2047-2054. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.443.

Bidare, P. *et al.* (2018) «Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion», *Acta Materialia*, 142, pp. 107-120. doi:10.1016/j.actamat.2017.09.051.

Boisselier, D. y Sankaré, S. (2012) «Influence of Powder Characteristics in Laser Direct Metal Deposition of SS316L for Metallic Parts Manufacturing», *Physics Procedia*, 39, pp. 455-463. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.061.

Borisov, E.V. *et al.* (2020) «Selective laser melting of Inconel 718 under high laser power», *Materials Today: Proceedings*, 30, pp. 784-788. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.571.

- Boschetto, A. *et al.* (2019) «Selective Laser Melting of a 1U CubeSat structure. Design for Additive Manufacturing and assembly», *Acta Astronautica*, 159, pp. 377-384. doi:10.1016/j.actaastro.2019.03.041.
- Bouzakis, E. *et al.* (2020) «Comparison of Additively Manufactured vs. Conventional Maraging Steel in Corrosion-Fatigue Performance after various surface treatments», *Procedia CIRP*, 87, pp. 469-473. doi:10.1016/j.procir.2020.03.003.
- Bruker (2022) *X-RAY DIFFRACTION (XRD) D8 DISCOVER*. Disponible en: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d8-discover-family/d8-discover.html>.
- Busachi, A. *et al.* (2017) «A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector», *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, pp. 117-128. doi:10.1016/j.cirpj.2017.07.001.
- Butler, C. *et al.* (2021) «Effects of processing parameters and heat treatment on thermal conductivity of additively manufactured AlSi10Mg by selective laser melting», *Materials Characterization*, 173, p. 110945. doi:10.1016/j.matchar.2021.110945.
- Calignano, F. (2014) «Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting», *Materials and Design*, 64, pp. 203-213. doi:10.1016/j.matdes.2014.07.043.
- Calignano, F. *et al.* (2017) «Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, pp. 451-458. doi:10.1007/s00170-016-8788-9.
- Campanelli, S.L. *et al.* (2010) «Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process», en *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, pp. 233-252. doi:10.5772/10432.
- Cao, L. (2021) «Mesoscopic-scale numerical investigation including the influence of scanning strategy on selective laser melting process», *Computational Materials Science*, 189, p. 110263. doi:10.1016/j.commatsci.2020.110263.
- Cao, Q. *et al.* (2020) «Removability of 316L stainless steel cone and block support structures fabricated by Selective Laser Melting (SLM)», *Materials and Design*, 191, p. 108691. doi:10.1016/j.matdes.2020.108691.
- Carmignato, S. *et al.* (2020) «Dimensional artefacts to achieve metrological traceability in advanced manufacturing», *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 69(2), pp. 693-716. doi:10.1016/j.cirp.2020.05.009.
- Carmignato, S. y Savio, E. (2011) «Traceable volume measurements using coordinate measuring systems», *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), pp. 519-522. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.061.
- Castillo, L. (2005) «Study about the rapid manufacturing of complex parts of stainless steel and titanium», *TNO and AIMME report*, pp. 1-31. Disponible en: http://www.lasercusing.nl/files/bestanden/binding_mechanisms_SLM_SLS.pdf.
- Catchpole-Smith, S. *et al.* (2017) «Fractal scan strategies for selective laser melting of 'unweldable' nickel superalloys», *Additive Manufacturing*, 15, pp. 113-122. doi:10.1016/j.addma.2017.02.002.
- Ceccanti, F., Giorgetti, A. y Citti, P. (2019) «A support structure design strategy for laser powder bed fused parts», *Procedia Structural Integrity*, 24, pp. 667-679. doi:10.1016/j.prostr.2020.02.059.
- Chahal, V. y Taylor, R.M. (2020) «A review of geometric sensitivities in laser metal 3D printing», *Virtual and Physical Prototyping*, 15(2), pp. 227-241. doi:10.1080/17452759.2019.1709255.

- Chantzis, D. *et al.* (2021) «Design for additive manufacturing (DfAM) of hot stamping dies with improved cooling performance under cyclic loading conditions», *Additive Manufacturing*, 37, p. 101720. doi:10.1016/j.addma.2020.101720.
- Chen, D. *et al.* (2020) «Stainless steel powder produced by a novel arc spray process», *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), pp. 8314-8322. doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.076.
- Cheruvathur, S., Lass, E.A. y Campbell, C.E. (2016) «Additive Manufacturing of 17-4 PH Stainless Steel: Post-processing Heat Treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure», *Jom*, 68(3), pp. 930-942. doi:10.1007/s11837-015-1754-4.
- Chivel, Y. y Smurov, I. (2011) «Temperature monitoring and overhang layers problem», *Physics Procedia*, 12, pp. 691-696. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.086.
- Cooke, A.L. y Soons, J.A. (2010) «Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts A.L. Cooke and J.A. Soons National Institute of Standards and Technology * Gaithersburg, MD, USA», en *the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1-12.
- Cordero, P.M. *et al.* (2017) «Evaluation of monitoring methods for electron beam melting powder bed fusion additive manufacturing technology», *Progress in Additive Manufacturing*, 2, pp. 1-10. doi:10.1007/s40964-016-0015-6.
- Cordova, L., Bor, T., de Smit, M., Carmignato, S., *et al.* (2020) «Effects of powder reuse on the microstructure and mechanical behaviour of Al–Mg–Sc–Zr alloy processed by laser powder bed fusion (LPBF)», *Additive Manufacturing*, 36, p. 101625. doi:10.1016/j.addma.2020.101625.
- Cordova, L., Bor, T., de Smit, M., Campos, M., *et al.* (2020) «Measuring the spreadability of pre-treated and moisturized powders for laser powder bed fusion», *Additive Manufacturing*, 32, p. 101082. doi:10.1016/j.addma.2020.101082.
- Creaform (2015) *HandySCAN 3D - Escáneres 3D completamente portátiles para aplicaciones de metrología*.
- Cuesta, E. *et al.* (2019) «Metrological evaluation of laser scanner integrated with measuring arm using optical feature-based gauge», *Optics and Lasers in Engineering*, 121, pp. 120-132. doi:10.1016/j.optlaseng.2019.04.007.
- Cui, X. *et al.* (2021) «Additive manufacturing of 24CrNiMo low alloy steel by selective laser melting: Influence of volumetric energy density on densification, microstructure and hardness», *Materials Science and Engineering A*, 809, p. 140957. doi:10.1016/j.msea.2021.140957.
- Culmone, C., Smit, G. y Breedveld, P. (2019) «Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review», *Additive Manufacturing*, 27, pp. 461-473. doi:10.1016/j.addma.2019.03.015.
- Dagkolu, A., Gokdag, I. y Yilmaz, O. (2021) «Design and additive manufacturing of a fatigue-critical aerospace part using topology optimization and L-PBF process», *Procedia Manufacturing*, 54, pp. 238-243. doi:10.1016/j.promfg.2021.07.037.
- Dai, D. *et al.* (2018) «Influence of scan strategy and molten pool configuration on microstructures and tensile properties of selective laser melting additive manufactured aluminum based parts», *Optics and Laser Technology*, 99, pp. 91-100. doi:10.1016/j.optlastec.2017.08.015.
- DebRoy, T. *et al.* (2018) «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties», *Progress in Materials Science*, 92, pp. 112-224. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- Delgado Camacho, D. *et al.* (2018) «Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review», *Automation in Construction*, 89, pp. 110-119. doi:10.1016/j.autcon.2017.12.031.

Delgado, J. *et al.* (2009) «Studying the repeatability in DMLS technology using a complete geometry test part», en *the 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping VRAP 4*, pp. 349-354.

Delic, M. y Eysers, D.R. (2020) «The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry», *International Journal of Production Economics*, 228, p. 107689. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107689.

Delic, M., Eysers, D.R. y Mikulic, J. (2019) «Additive manufacturing: empirical evidence for supply chain integration and performance from the automotive industry», *Supply Chain Management*, 24(5), pp. 604-621. doi:10.1108/SCM-12-2017-0406.

Demir, A.G. y Previtali, B. (2017) «Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting», *Materials and Design*, 119, pp. 338-350. doi:10.1016/j.matdes.2017.01.091.

DePond, P.J. *et al.* (2018) «In situ measurements of layer roughness during laser powder bed fusion additive manufacturing using low coherence scanning interferometry», *Materials and Design*, 154, pp. 347-359. doi:10.1016/j.matdes.2018.05.050.

Dhinesh, S.K. *et al.* (2022) «Recent trends in additive manufacturing of electronics devices», *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. doi:10.1016/j.matpr.2022.04.654.

Dilberoglu, U.M. *et al.* (2017) «The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0», *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 545-554. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.148.

Dowling, L. *et al.* (2020) «A review of critical repeatability and reproducibility issues in powder bed fusion», *Materials and Design*, 186, p. 108346. doi:10.1016/j.matdes.2019.108346.

Dury, M.R. *et al.* (2015) «Surface Finish and 3D Optical Scanner Measurement Performance For Precision Engineering», en *the 30th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Austin, TX, USA*, pp. 1-6.

Emminghaus, N. *et al.* (2021) «PBF-LB/M process under a silane-doped argon atmosphere: Preliminary studies and development of an innovative machine concept Nicole», *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2, p. 100040. doi:10.1016/j.aime.2021.100040.

Enneti, R.K., Morgan, R. y Atre, S. V. (2018) «Effect of process parameters on the Selective Laser Melting (SLM) of tungsten», *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 71, pp. 315-319. doi:10.1016/j.ijrmhm.2017.11.035.

Eysers, D.R. y Potter, A.T. (2017) «Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective», *Computers in Industry*, 92-93, pp. 208-218. doi:10.1016/j.compind.2017.08.002.

Fasel, U. *et al.* (2020) «Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures», *Manufacturing Letters*, 23, pp. 85-88. doi:10.1016/j.mfglet.2019.12.004.

Feng, W. *et al.* (2022) «Online defect detection method and system based on similarity of the temperature field in the melt pool», *Additive Manufacturing*, 54, p. 102760. doi:10.1016/j.addma.2022.102760.

Finazzi, V. *et al.* (2019) «Design rules for producing cardiovascular stents by selective laser melting: Geometrical constraints and opportunities», *Procedia Structural Integrity*, 15, pp. 16-23. doi:10.1016/j.prostr.2019.07.004.

Francis, Z. (2017) *The Effects of Laser and Electron Beam Spot Size in Additive Manufacturing Processes, Doctor of Philosophy In Mechanical engineering.*

Gan, M.X. y Wong, C.H. (2016) «Practical support structures for selective laser melting», *Journal of Materials Processing Technology*, 238, pp. 474-484. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006.

- Gao, P. *et al.* (2021) «Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–Ni–Co–Mo maraging stainless steel produced by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 814, p. 141149. doi:10.1016/j.msea.2021.141149.
- Geiger, F., Kunze, K. y Etter, T. (2016) «Tailoring the texture of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) by specific scanning strategies», *Materials Science and Engineering A*, 661, pp. 240-246. doi:10.1016/j.msea.2016.03.036.
- Gerbino, S. *et al.* (2016) «On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, pp. 1787-1799. doi:10.1007/s00170-015-7830-7.
- Ghany, K.A. y Moustafa, S.F. (2006) «Comparison between the products of four RPM systems for metals», *Rapid Prototyping Journal*, 12(2), pp. 86-94. doi:10.1108/13552540610652429.
- Ghayoor, M. *et al.* (2020) «Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties», *Additive Manufacturing*, 32, p. 101011. doi:10.1016/j.addma.2019.101011.
- Ghods, S. *et al.* (2021) «Powder reuse and its contribution to porosity in additive manufacturing of Ti6Al4V», *Materialia*, 15, p. 100992. doi:10.1016/j.mtla.2020.100992.
- Gibson, I., Rosen, D. y Stucker, B. (2015) *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edi, Springer. Second Edi. doi:10.1007/978-1-4939-2113-3.
- Gisario, A. *et al.* (2019) «Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review», *Journal of Manufacturing Systems*, 53, pp. 124-149. doi:10.1016/j.jmsy.2019.08.005.
- Gorji, N.E. *et al.* (2019) «Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process», *Materialia*, 8, p. 100489. doi:10.1016/j.mtla.2019.100489.
- Grimm, T., Wiora, G. y Witt, G. (2015) «Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy», *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3, p. 014001. doi:10.1088/2051-672X/3/1/014001.
- Grover, T. *et al.* (2020) «Role of titanium in bio implants and additive manufacturing: An overview», *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.636.
- Gu, D. y Chen, H. (2018) «Selective laser melting of high strength and toughness stainless steel parts: The roles of laser hatch style and part placement strategy», *Materials Science and Engineering A*, 725, pp. 419-427. doi:10.1016/j.msea.2018.04.046.
- Gu, D., Xia, M. y Dai, D. (2019) «On the role of powder flow behavior in fluid thermodynamics and laser processability of Ni-based composites by selective laser melting», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 137, pp. 67-78. doi:10.1016/j.ijmachtools.2018.10.006.
- Gu, Z. *et al.* (2021) «An important improvement of strength and ductility on a new type of CoCr_{2.5}FeNi₂TiW_{0.5} high entropy alloys under two different protective gases by selective laser melting», *Journal of Alloys and Compounds*, 868, p. 159088.
- Gunenthiram, V. *et al.* (2018) «Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process», *Journal of Materials Processing Technology*, 251, pp. 376-386. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.08.012.
- Guo, J. *et al.* (2018) «On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy», *Materials and Design*, 153, pp. 211-220. doi:10.1016/j.matdes.2018.05.012.
- Guo, L. *et al.* (2021) «Effects of elemental segregation and scanning strategy on the mechanical properties and hot cracking of a selective laser melted FeCoCrNiMn-(N,Si) high entropy alloy»,

Journal of Alloys and Compounds, 865, p. 158892. doi:10.1016/j.jallcom.2021.158892.

Guo, M. *et al.* (2019) «Selective laser melting additive manufacturing of pure tungsten: Role of volumetric energy density on densification, microstructure and mechanical properties», *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, p. 105025. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105025.

Guo, Y. *et al.* (2021) «The effect of hydrogen treatment on microstructures evolution and mechanical properties of titanium alloy fabricated by selective laser melting», *Journal of Alloys and Compounds*, 890, p. 161642. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161642.

Guoqing, Z. *et al.* (2021) «Design Optimization and Manufacturing of Bio-fixed tibial implants using 3D printing technology», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 117, p. 104415. doi:10.1016/j.jmbbm.2021.104415.

Haleem, A. y Javaid, M. (2020) «3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing», *Clinical Epidemiology and Global Health*, 8(1), pp. 215-223. doi:10.1016/j.cegh.2019.08.002.

Han, S. *et al.* (2020) «Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM)», *Precision Engineering*, 64, pp. 20-33. doi:10.1016/j.precisioneng.2020.03.006.

Hannibal, M. y Knight, G. (2018) «Additive manufacturing and the global factory: Disruptive technologies and the location of international business», *International Business Review*, 27(6), pp. 1116-1127. doi:10.1016/j.ibusrev.2018.04.003.

Hanumaiah, N. y Ravi, B. (2007) «Rapid tooling form accuracy estimation using region elimination adaptive search based sampling technique», *Rapid Prototyping Journal*, 13(3), pp. 182-190. doi:10.1108/13552540710750933.

Hassani, V. *et al.* (2020) «Rationalization algorithm for a topologically-optimized multi-branch node for manufacturing by metal printing», *Journal of Building Engineering*, 29, p. 101146. doi:10.1016/j.jobbe.2019.101146.

Heiden, M.J. *et al.* (2019) «Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process», *Additive Manufacturing*, 25, pp. 84-103. doi:10.1016/j.addma.2018.10.019.

Hexagon (2015) *FACTSHEET ROMER ABSOLUTE ARM*.

Hexagon (2019) *HP-L-10.6 Laser Scanning Sensor: Technical Data*.

Hobersal (2018a) *Hornos de mufla PR CCH series*. Disponible en: <https://fornshobersal.com/horno-pr-cch-series/>.

Hobersal (2018b) *Hornos de mufla PR serie*. Disponible en: <https://fornshobersal.com/horno-de-mufla-pr-series/>.

Hu, Z. *et al.* (2017) «Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel», *Optics and Laser Technology*, 87, pp. 17-25. doi:10.1016/j.optlastec.2016.07.012.

Hu, Z. *et al.* (2020) «Pure tungsten and oxide dispersion strengthened tungsten manufactured by selective laser melting: Microstructure and cracking mechanism», *Additive Manufacturing*, 36, p. 101579. doi:10.1016/j.addma.2020.101579.

Huang, S. *et al.* (2020) «Laser powder bed fusion of titanium-tantalum alloys: Compositions and designs for biomedical applications», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 108, p. 103775. doi:10.1016/j.jmbbm.2020.103775.

Huang, S., Sun, B. y Guo, S. (2021) «Microstructure and property evaluation of TA15 titanium alloy

- fabricated by selective laser melting after heat treatment», *Optics and Laser Technology*, 144, p. 107422. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107422.
- Hwang, S. *et al.* (2021) «Process parameter optimization for removable partial denture frameworks manufactured by selective laser melting», *Journal of Prosthetic Dentistry* [Preprint]. doi:10.1016/j.prosdent.2021.04.021.
- Imkamp, D. *et al.* (2016) «Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the “Industrie 4.0” concept», *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 5, pp. 325-335. doi:10.1515/teme-2015-0081.
- Javidrad, H.R., Ghanbari, M. y Javidrad, F. (2021) «Effect of scanning pattern and volumetric energy density on the properties of selective laser melting Ti-6Al-4V specimens», *Journal of Materials Research and Technology*, 12, pp. 989-998. doi:10.1016/j.jmrt.2021.03.044.
- Jelis, E. *et al.* (2015) «Metallurgical and Mechanical Evaluation of 4340 Steel Produced by Direct Metal Laser Sintering», *JOM*, 67(3), pp. 582-589. doi:10.1007/s11837-014-1273-8.
- Jhabvala, J. *et al.* (2012) «An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, pp. 137-142. doi:10.1007/s00170-011-3470-8.
- Jiang, P.F. *et al.* (2021) «Additive manufacturing of novel ferritic stainless steel by selective laser melting: Role of laser scanning speed on the formability, microstructure and properties», *Optics and Laser Technology*, 140, p. 107055. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107055.
- Jiang, X., Ye, T. y Zhu, Y. (2020) «Effect of process parameters on residual stress in selective laser melting of AlSi10Mg», *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 36(3), pp. 342-352. doi:10.1080/02670836.2019.1705560.
- Kajima, Y. *et al.* (2021) «Reduction in anisotropic response of corrosion properties of selective laser melted Co–Cr–Mo alloys by post-heat treatment», *Dental Materials*, 37(3), pp. e98-e108. doi:10.1016/j.dental.2020.10.020.
- Kalms, M. *et al.* (2019) «New approach to evaluate 3D laser printed parts in powder bed fusion-based additive manufacturing in-line within closed space», *Additive Manufacturing*, 26, pp. 161-165. doi:10.1016/j.addma.2019.01.011.
- Kang, J. *et al.* (2021) «Topological design and biomechanical evaluation for 3D printed multi-segment artificial vertebral implants», *Materials Science and Engineering C*, 127, p. 112250. doi:10.1016/j.msec.2021.112250.
- Karabulut, Y., Tascioglu, E. y Kaynak, Y. (2021) «Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing», *Optik*, 227, p. 163907. doi:10.1016/j.ijleo.2019.163907.
- Kassym, K. y Perveen, A. (2020) «Atomization processes of metal powders for 3D printing», *Materials Today: Proceedings*, 26, pp. 1727-1733. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.364.
- Katancik, M. *et al.* (2020) «Selective laser melting and tempering of H13 tool steel for rapid tooling applications», *Journal of Alloys and Compounds*, 849, p. 156319. doi:10.1016/j.jallcom.2020.156319.
- Khorasani, M. *et al.* (2020) «On the role of wet abrasive centrifugal barrel finishing on surface enhancement and material removal rate of LPBF stainless steel 316L», *Journal of Manufacturing Processes*, 59, pp. 523-534. doi:10.1016/j.jmapro.2020.09.058.
- Khorsandi, D. *et al.* (2021) «3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications», *Acta Biomaterialia*, 122, pp. 26-49. doi:10.1016/j.actbio.2020.12.044.

- Kruth, J.-P. *et al.* (2012) «Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), pp. 1-12. doi:10.1177/0954405412437085.
- Kudzal, A. *et al.* (2017) «Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of Powder Bed Fusion additive manufactured 17-4 stainless steel», *Materials and Design*, 133, pp. 205-215. doi:10.1016/j.matdes.2017.07.047.
- Kudzal, J.P. *et al.* (2005) «Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques», en *the 1st International Conference on Polymers and Moulds Innovations (PMI)*, pp. 1-7. doi:10.3850/2424-8967_V02-N778.
- Larimian, T. *et al.* (2020) «Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 770, p. 138455. doi:10.1016/j.msea.2019.138455.
- Lashgari, H.R. *et al.* (2020) «Microstructure, Tribological Properties and Corrosion Behaviour of Additively Manufactured 17-4PH Stainless Steel: Effects of Scanning Pattern, Build Orientation, and Single vs. Double scan», *Materials Today Communications*, 25, p. 101535. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101535.
- Leach, R.K. *et al.* (2019) «Geometrical metrology for metal additive manufacturing», *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 68(2), pp. 677-700. doi:10.1016/j.cirp.2019.05.004.
- Leary, M. *et al.* (2019) «Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures», *Materials and Design*, 183, p. 108138. doi:10.1016/j.matdes.2019.108138.
- Leung, C.L.A. *et al.* (2019) «The effect of powder oxidation on defect formation in laser additive manufacturing», *Acta Materialia*, 166, pp. 294-305. doi:10.1016/j.actamat.2018.12.027.
- Li, C. *et al.* (2017) «Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting», *Additive Manufacturing*, 17, pp. 157-168. doi:10.1016/j.addma.2017.08.014.
- Li, C. *et al.* (2018) «Residual Stress in Metal Additive Manufacturing», *Procedia CIRP*, 71, pp. 348-353. doi:10.1016/j.procir.2018.05.039.
- Li, L. *et al.* (2021) «Effects of aging treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr alloys», *Journal of Alloys and Compounds*, 890, p. 161810. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161810.
- Li, M. *et al.* (2019) «Selective laser melting of metal matrix composites: Feedstock powder preparation by electroless plating», *Materials Letters*, 247, pp. 115-118. doi:10.1016/j.matlet.2019.03.092.
- Li, R. *et al.* (2012) «Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, pp. 1025-1035. doi:10.1007/s00170-011-3566-1.
- Li, R. *et al.* (2019) «Effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-3.02Mg-0.2Sc-0.1Zr alloy printed by selective laser melting», *Materials and Design*, 168, p. 107668. doi:10.1016/j.matdes.2019.107668.
- Liang, X. *et al.* (2021) «On incorporating scanning strategy effects into the modified inherent strain modeling framework for laser powder bed fusion», *Additive Manufacturing*, 37, p. 101648. doi:10.1016/j.addma.2020.101648.
- Lin, Z. *et al.* (2021) «A New Method for Automatic Detection of Defects in Selective Laser Melting Based on Machine Vision», *Materials*, 14(15), p. 4175. doi:10.3390/ma14154175.
- Lindecke, P.N.J. *et al.* (2018) «Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts», *Procedia CIRP*, 74, pp. 53-58. doi:10.1016/j.procir.2018.08.029.

- Liu, C.Y. *et al.* (2019) «Effect of scanning strategy on microstructure and mechanical properties of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel», *Materials Science and Engineering A*, 766, p. 138364. doi:10.1016/j.msea.2019.138364.
- Liu, W. *et al.* (2015) «Hybrid Laser-arc Welding of 17-4 PH Martensitic Stainless Steel», *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2, pp. 74-90. doi:10.1007/s40516-015-0007-2.
- Liu, Y. *et al.* (eds.) (2020) *3D Imaging, Analysis and Applications*. Second Edi, Springer. Second Edi. doi:10.1007/978-3-030-44070-1.
- Lu, H.Z. *et al.* (2022) «Journal of Materials Science & Technology Simultaneous enhancement of mechanical and shape memory properties by heat-treatment homogenization of Ti₂Ni precipitates in TiNi shape memory alloy fabricated by selective laser melting», *Journal of Materials Science & Technology*, 101, pp. 205-216. doi:10.1016/j.jmst.2021.06.019.
- Lu, Y. *et al.* (2015) «Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy», *Optics and Laser Technology*, 75, pp. 197-206. doi:10.1016/j.optlastec.2015.07.009.
- Ma, M. *et al.* (2015) «Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel», *Journal of Materials Processing Technology*, 215, pp. 142-150. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.07.034.
- Mahesh, M. (2004) *Rapid Prototyping and Manufacturing Benchmarking*.
- Mallya, P.K. y Juneja, M. (2021) «Rapid prototyping of orthopedic implant materials for cranio-facial reconstruction: A survey», *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 5207-5213. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.713.
- Malý, M. *et al.* (2019) «Effect of process parameters and high-temperature preheating on residual stress and relative density of Ti6Al4V processed by selective laser melting», *Materials*, 12(6), p. 930. doi:10.3390/ma12060930.
- Marattukalam, J.J. *et al.* (2020) «The effect of laser scanning strategies on texture, mechanical properties, and site-specific grain orientation in selective laser melted 316L SS», *Materials and Design*, 193, p. 108852. doi:10.1016/j.matdes.2020.108852.
- Martínez-Pellitero, S. *et al.* (2018) «New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge», *Optics and Lasers in Engineering*, 110, pp. 193-206. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.06.002.
- Mercelis, P. y Kruth, J.P. (2006) «Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting», *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), pp. 254-265. doi:10.1108/13552540610707013.
- Meredith, S.D. *et al.* (2018) «Impact of composition on the heat treatment response of additively manufactured 17-4 PH grade stainless steel», *Materials Science and Engineering A*, 738, pp. 44-56. doi:10.1016/j.msea.2018.09.066.
- Metelkova, J. *et al.* (2018) «On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L», *Additive Manufacturing*, 23, pp. 161-169. doi:10.1016/j.addma.2018.08.006.
- Minetola, P. *et al.* (2020) «Comparison of dimensional tolerance grades for metal AM processes», *Procedia CIRP*, 88, pp. 399-404. doi:10.1016/j.procir.2020.05.069.
- Mitutoyo (2009) *Surface Roughness Measuring System SURFTEST SJ-500/SV-2100*.
- Mohr, G. *et al.* (2020) «In-situ defect detection in laser powder bed fusion by using thermography and optical tomography—comparison to computed tomography», *Metals*, 10(1), p. 103. doi:10.3390/met10010103.

- Monteiro, H. *et al.* (2022) «Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing – A review for the aeronautic and aerospace sectors», *Energy Reports*, 8, pp. 298-305. doi:10.1016/j.egy.2022.01.035.
- Montelione, A. *et al.* (2020) «Powder Reuse in Electron Beam Melting Additive Manufacturing of Ti6Al4V: Particle Microstructure, Oxygen Content and Mechanical Properties», *Additive Manufacturing*, 35, p. 101216. doi:10.1016/j.addma.2020.101216.
- Moshiri, M. *et al.* (2019) «Benchmarking of laser powder bed fusion machines», *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(4), p. 85. doi:10.3390/jmmp3040085.
- Moylan, S. *et al.* (2012) «Proposal for a standardized test artifact for additive», en *the 23th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 902-920. Disponible en: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=911953.
- Moylan, S. *et al.* (2014) «An additive manufacturing test artifact», *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, pp. 429-459. doi:10.6028/jres.119.017.
- Munther, M. *et al.* (2020) «Laser shock peening and its effects on microstructure and properties of additively manufactured metal alloys: A review», *Engineering Research Express*, 2, p. 022001. doi:10.1088/2631-8695/ab9b16.
- Murat, F., Kaymaz, I. y Korkmaz, I.H. (2021) «A new porous fixation plate design using the topology optimization», *Medical Engineering and Physics*, 92, pp. 18-24. doi:10.1016/j.medengphy.2021.04.003.
- Murr, L.E. *et al.* (2012) «Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting», *Journal of Materials Research and Technology*, 1(3), pp. 167-177. doi:10.1016/S2238-7854(12)70029-7.
- Na, T.W. *et al.* (2018) «Effect of laser power on oxygen and nitrogen concentration of commercially pure titanium manufactured by selective laser melting», *Materials Characterization*, 143, pp. 110-117. doi:10.1016/j.matchar.2018.03.003.
- Nagesha, B.K. *et al.* (2020) «A review on weldability of additive manufactured titanium alloys», *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.899.
- Nandwana, P. *et al.* (2016) «Recyclability Study on Inconel 718 and Ti-6Al-4V Powders for Use in Electron Beam Melting», *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47, pp. 754-762. doi:10.1007/s11663-015-0477-9.
- Nasrullah, A.I.H., Santosa, S.P. y Dirgantara, T. (2020) «Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration», *Structures*, 26, pp. 969-981. doi:10.1016/j.istruc.2020.05.001.
- Nghia Luu, D., Zhou, W. y Mui Ling Nai, S. (2022) «Mitigation of liquation cracking in selective laser melted Inconel 718 through optimization of layer thickness and laser energy density», *Journal of Materials Processing Tech.*, 299, p. 117374. doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117374.
- Ngo, T.D. *et al.* (2018) «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges», *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172-196. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Nguyen, Q.B. *et al.* (2019) «High mechanical strengths and ductility of stainless steel 304L fabricated using selective laser melting», *Journal of Materials Science and Technology*, 35(2), pp. 388-394. doi:10.1016/j.jmst.2018.10.013.
- Ning, Y. *et al.* (2006) «An approach to minimize build errors in direct metal laser sintering», *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 3(1), pp. 73-80. doi:10.1109/TASE.2005.857656.

Nitrocrafter (2017) *Nitrogen Generators*.

Niu, P. *et al.* (2020) «Hot cracking, crystal orientation and compressive strength of an equimolar CoCrFeMnNi high-entropy alloy printed by selective laser melting», *Optics and Laser Technology*, 127, p. 106147. doi:10.1016/j.optlastec.2020.106147.

Nong, X.D. y Zhou, X.L. (2021) «Effect of scanning strategy on the microstructure, texture, and mechanical properties of 15-5PH stainless steel processed by selective laser melting», *Materials Characterization*, 174, p. 111012. doi:10.1016/j.matchar.2021.111012.

O'Leary, R. *et al.* (2015) «An Investigation into the Recycling of Ti-6Al-4V Powder Used Within SLM to Improve Sustainability», *InImpact: The Journal of Innovation Impact*, pp. 377-388.

ONA (1996) *Manual técnico máquina de electroerosión PRIMA E 250*.

Optimet (2012) *ConoScan 4000 Unique 3D Scanner & Analysis Software Conoscopic Holography Technology*.

Ozguç, S., Pan, L. y Weibel, J.A. (2021) «Topology optimization of microchannel heat sinks using a homogenization approach», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, p. 120896. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120896.

Pajonk, A. *et al.* (2022) «Multi-material additive manufacturing in architecture and construction: A review», *Journal of Building Engineering*, 45, p. 103603. doi:10.1016/j.job.2021.103603.

Pal, S. *et al.* (2020) «Evolution of the metallurgical properties of Ti-6Al-4V, produced with different laser processing parameters, at constant energy density in selective laser melting», *Results in Physics*, 17, p. 103186. doi:10.1016/j.rinp.2020.103186.

Park, J.M. *et al.* (2021) «Effect of Heat Treatment on Microstructural Heterogeneity and Mechanical Properties of 1%C-CoCrFeMnNi Alloy Fabricated by Selective Laser Melting», *Additive Manufacturing*, 47, p. 102283. doi:10.1016/j.addma.2021.102283.

Parry, L., Ashcroft, I.A. y Wildman, R.D. (2016) «Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation», *Additive Manufacturing*, 12, pp. 1-15. doi:10.1016/j.addma.2016.05.014.

Patalas-Maliszewska, J., Topczak, M. y Kłos, S. (2020) «The Level of the Additive Manufacturing Technology Use in Polish Metal and Automotive Manufacturing Enterprises», *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3), p. 735. doi:10.3390/app10030735.

Pauzon, C. *et al.* (2020) «Argon-helium mixtures as Laser-Powder Bed Fusion atmospheres: Towards increased build rate of Ti-6Al-4V», *Journal of Materials Processing Technology*, 279, p. 116555. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116555.

Pessard, E. *et al.* (2008) «Complex cast parts with rapid tooling: Rapid manufacturing point of view», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, pp. 898-904. doi:10.1007/s00170-007-1281-8.

Pfaff, A. *et al.* (2020) «Resource analysis model and validation for selective laser melting, constituting the potential of lightweight design for material efficiency», *Sustainable Production and Consumption*, 21, pp. 182-191. doi:10.1016/j.spc.2019.12.004.

Pinto, F.C. *et al.* (2020) «Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by δ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock», *Additive Manufacturing*, 31, p. 100979. doi:10.1016/j.addma.2019.100979.

Pleass, C. y Jothi, S. (2018) «Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting», *Additive Manufacturing*, 24, pp. 419-431. doi:10.1016/j.addma.2018.09.023.

- Ponnusamy, P. *et al.* (2021) «Effect of build orientation and elevated temperature on microhardness and deformation of dynamically tested SLM processed AlSi12 alloy», *Materials Today: Proceedings*, 38, pp. 2488-2492. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.514.
- Popovich, A. y Sufiiarov, V. (2016) «Metal Powder Additive Manufacturing», *New Trends in 3D Printing*, pp. 215-236. doi:10.5772/63337.
- Poulin, J.-R., Kreitchberg, A. y Brailovski, V. (2021) «Effect of Hot Isostatic Pressing of laser powder bed fused Inconel 625 with purposely induced defects on the residual porosity and fatigue crack propagation behavior», *Additive Manufacturing*, 47, p. 102324. doi:10.1016/j.addma.2021.102324.
- Powell, D. *et al.* (2020) «Understanding powder degradation in metal additive manufacturing to allow the upcycling of recycled powders», *Journal of Cleaner Production*, 268, p. 122077. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122077.
- Prashanth, K.G. *et al.* (2017) «Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?», *Materials Research Letters*, 5(6), pp. 386-390. doi:10.1080/21663831.2017.1299808.
- Promoppatum, P. *et al.* (2017) «A Comprehensive Comparison of the Analytical and Numerical Prediction of the Thermal History and Solidification Microstructure of Inconel 718 Products Made by Laser Powder-Bed Fusion», *Engineering*, 3(5), pp. 685-694. doi:10.1016/J.ENG.2017.05.023.
- Qi, P. *et al.* (2021) «Microstructural evolution of near- β Ti-6Zr-5Fe alloy fabricated by selective laser melting before and after solution treatment», *Journal of Alloys and Compounds*, 862, p. 158496.
- Quintus (2018) *High Pressure Heat Treatment*. Disponible en: quintustechnologies.com.
- Rafi, H.K. *et al.* (2014) «Microstructure and Mechanical Behavior of 17-4 Precipitation Hardenable Steel Processed by Selective Laser Melting», *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(12), pp. 4421-4428. doi:10.1007/s11665-014-1226-y.
- Rakesh Ch, S. *et al.* (2019) «Influence of working environment and built orientation on the tensile properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy», *Materials Science and Engineering A*, 750(October 2018), pp. 141-151. doi:10.1016/j.msea.2019.01.103.
- Ramos, D., Belblidia, F. y Sienz, J. (2019) «New scanning strategy to reduce warpage in additive manufacturing», *Additive Manufacturing*, 28, pp. 554-564. doi:10.1016/j.addma.2019.05.016.
- Rashid, R. *et al.* (2017) «Effect of scan strategy on density and metallurgical properties of 17-4PH parts printed by Selective Laser Melting (SLM)», *Journal of Materials Processing Technology*, 249, pp. 502-511. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.06.023.
- Rashid, R. *et al.* (2018) «Effect of energy per layer on the anisotropy of selective laser melted AlSi12 aluminium alloy», *Additive Manufacturing*, 22, pp. 426-439. doi:10.1016/j.addma.2018.05.040.
- Rebaioli, L. y Fassi, I. (2017) «A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, pp. 2571-2598. doi:10.1007/s00170-017-0570-0.
- Rezaeifar, H. y Elbestawi, M. (2022) «Porosity formation mitigation in laser powder bed fusion process using a control approach», *Optics and Laser Technology*, 147, p. 107611. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107611.
- Riikonen, N. y Piili, H. (2020) «Characterization of part deformations in laser powder bed fusion of stainless steel 316L», *Procedia CIRP*, 94, pp. 161-166. doi:10.1016/j.procir.2020.09.031.
- Riquelme, A. *et al.* (2019) «Effect of the process parameters in the additive manufacturing of in situ Al/AlN samples», *Journal of Manufacturing Processes*, 46, pp. 271-278. doi:10.1016/j.jmapro.2019.09.011.

- Rivas Santos, V.M. *et al.* (2020) «Design and characterisation of an additive manufacturing benchmarking artefact following a design-for-metrology approach», *Additive Manufacturing*, 32, p. 100964. doi:10.1016/j.addma.2019.100964.
- Rupal, B.S., Ahmad, R. y Qureshi, A.J. (2018) «Feature-Based Methodology for Design of Geometric Benchmark Test Artifacts for Additive Manufacturing Processes», *Procedia CIRP*, 70, pp. 84-89. doi:10.1016/j.procir.2018.02.012.
- Sabooni, S. *et al.* (2021) «Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties», *Additive Manufacturing*, 46, p. 102176. doi:10.1016/j.addma.2021.102176.
- Salem, M. *et al.* (2020) «A new insight on the analysis of residual stresses related distortions in selective laser melting of Ti-6Al-4V using the improved bridge curvature method», *Additive Manufacturing*, 36, p. 101586. doi:10.1016/j.addma.2020.101586.
- Salman, O.O. *et al.* (2019) «Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting», *Journal of Manufacturing Processes*, 45, pp. 255-261. doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.010.
- Salmi, A. *et al.* (2018) «On the Effect of Part Orientation on Stress Distribution in AlSi10Mg Specimens Fabricated by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)», *Procedia CIRP*, 67, pp. 191-196. doi:10.1016/j.procir.2017.12.198.
- Sarkar, S. *et al.* (2020) «Effects of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of 15-5 PH stainless steel parts built by selective laser melting process», *Journal of Manufacturing Processes*, 50, pp. 279-294. doi:10.1016/j.jmapro.2019.12.048.
- Savio, E., De Chiffre, L. y Schmitt, R. (2007) «Metrology of freeform shaped parts», *CIRP Annals*, 56(2), pp. 810-835. doi:10.1016/j.cirp.2007.10.008.
- Scaravetti, D., Dubois, P. y Duchamp, R. (2008) «Qualification of rapid prototyping tools: Proposition of a procedure and a test part», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, pp. 683-690. doi:10.1007/s00170-007-1129-2.
- Schiltz, J. *et al.* (2020) «Fatigue performance of direct metal laser sintered parts using reused metallic feedstocks», *Procedia Manufacturing*, 48, pp. 814-820. doi:10.1016/j.promfg.2020.05.118.
- Schliephake, D. *et al.* (2022) «Mechanical behavior at elevated temperatures of an Al–Mn–Mg–Sc–Zr alloy manufactured by selective laser melting», *Materials Science and Engineering: A*, 831, p. 142032. doi:10.1016/j.msea.2021.142032.
- Schmitt, M., Mehta, R.M. y Kim, I.Y. (2020) «Additive manufacturing infill optimization for automotive 3D-printed ABS components», *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), pp. 89-99. doi:10.1108/RPJ-01-2019-0007.
- Schnitzer, M. *et al.* (2020) «A comparison of experimental compressive axial loading testing with a numerical simulation of topologically optimized cervical implants made by selective laser melting», *Journal of Biotechnology*, 322, pp. 33-42. doi:10.1016/j.jbiotec.2020.07.010.
- Schuh, G. *et al.* (2020) «Topology optimisation and metal based additive manufacturing of welding jig elements», *Procedia CIRP*, 93, pp. 62-67. doi:10.1016/j.procir.2020.04.066.
- Scipioni Bertoli, U. *et al.* (2017) «On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting», *Materials and Design*, 113, pp. 331-340. doi:10.1016/j.matdes.2016.10.037.
- Seetoh, I.P. *et al.* (2021) «Strength and energy absorption characteristics of Ti6Al4V auxetic 3D anti-tetrachiral metamaterials», *Mechanics of Materials*, 156, p. 103811. doi:10.1016/j.mechmat.2021.103811.

Selvaraj, S.K. *et al.* (2022) «Additive manufacturing of dental material parts via laser melting deposition: A review, technical issues, and future research directions», *Journal of Manufacturing Processes*, 76, pp. 67-78. doi:10.1016/j.jmapro.2022.02.012.

Servosis (2018) *Accesorios para máquina de ensayos*.

Servosis (2022) *SERIE ME-402. Máquinas para ensayos de tracción/compresión/flexión 1300 kN*. Disponible en: <https://www.servosis.com/productos/me-402>.

Shevchik, S.A. *et al.* (2018) «Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks», *Additive Manufacturing*, 21, pp. 598-604. doi:10.1016/j.addma.2017.11.012.

Shi, Q. *et al.* (2021) «Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of 17-4PH stainless steel parts fabricated by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 810, p. 141035. doi:10.1016/j.msea.2021.141035.

Shi, W. *et al.* (2018) «Beam diameter dependence of performance in thick-layer and high-power selective laser melting of Ti-6Al-4V», *Materials*, 11(7), p. 1237. doi:10.3390/ma11071237.

Shi, W. *et al.* (2020) «Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 μm layer thickness», *Powder Technology*, 360, pp. 151-164. doi:10.1016/j.powtec.2019.09.059.

Singla, A.K. *et al.* (2021) «Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments», *Journal of Manufacturing Processes*, 64, pp. 161-187. doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.009.

Slawik, S. *et al.* (2021) «Microstructural analysis of selective laser melted Ti6Al4V modified by laser peening and shot peening for enhanced fatigue characteristics», *Materials Characterization*, 173, p. 110935. doi:10.1016/j.matchar.2021.110935.

Slotwinski, J.A. *et al.* (2014) «Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing», *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, pp. 460-493. doi:10.6028/jres.119.018.

Song, J. *et al.* (2018) «Role of scanning strategy on residual stress distribution in Ti-6Al-4V alloy prepared by selective laser melting», *Optik*, 170, pp. 342-352. doi:10.1016/j.jileo.2018.05.128.

Song, Y. *et al.* (2020) «Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 793, p. 139879. doi:10.1016/j.msea.2020.139879.

Soni, H. *et al.* (2021) «A comprehensive review on effect of process parameters and heat treatment on tensile strength of additively manufactured Inconel-625», *Materials Today: Proceedings*, 47(14), pp. 4866-4871. doi:10.1016/j.matpr.2021.06.126.

Soni, R., Ponappa, K. y Tandon, P. (2022) «A review on customized food fabrication process using Food Layered Manufacturing», *Lwt*, 161, p. 113411. doi:10.1016/j.lwt.2022.113411.

Sossou, G. *et al.* (2018) «An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies», *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1), pp. 3-18. doi:10.1016/j.jcde.2017.11.005.

Spears, T.G. y Gold, S.A. (2016) «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5, pp. 16-40. doi:10.1186/s40192-016-0045-4.

Stano, G. y Percoco, G. (2021) «Additive manufacturing aimed to soft robots fabrication: A review», *Extreme Mechanics Letters*, 42, p. 101079. doi:10.1016/j.eml.2020.101079.

- Strano, G. *et al.* (2013) «A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, pp. 1247-1254. doi:10.1007/s00170-012-4403-x.
- Strano, Giovanni *et al.* (2013) «Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting», *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), pp. 589-597. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
- Strondl, A. *et al.* (2015) «Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing», *JOM*, 67(3), pp. 549-554. doi:10.1007/s11837-015-1304-0.
- Subbaian Kaliamoorthy, P. *et al.* (2020) «Benchmarking the complex geometric profiles, dimensional accuracy and surface analysis of printed parts», *Rapid Prototyping Journal*, 26(2), pp. 319-329. doi:10.1108/RPJ-01-2019-0024.
- Sun, S.H., Hagihara, K. y Nakano, T. (2018) «Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at.%Mo alloys fabricated by selective laser melting», *Materials and Design*, 140, pp. 307-316. doi:10.1016/j.matdes.2017.11.060.
- Sun, Y., Hebert, R.J. y Aindow, M. (2018) «Effect of heat treatments on microstructural evolution of additively manufactured and wrought 17-4PH stainless steel», *Materials and Design*, 156, pp. 429-440. doi:10.1016/j.matdes.2018.07.015.
- Sutton, A.T. *et al.* (2018) «Recyclability of 304L Stainless Steel in the Selective Laser Melting Process», en *the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication 2018*, pp. 1311-1326. Disponible en: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2018/108Recyclabilityof304LStainlessSteelintheSelec.pdf>.
- Sutton, A.T. *et al.* (2020) «Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process», *Additive Manufacturing*, 32, p. 100981. doi:10.1016/j.addma.2019.100981.
- Syed, A.K. *et al.* (2019) «An experimental study of residual stress and direction-dependence of fatigue crack growth behaviour in as-built and stress-relieved selective-laser-melted Ti6Al4V», *Materials Science and Engineering A*, 755, pp. 246-257. doi:10.1016/j.msea.2019.04.023.
- Tammas-Williams, S. *et al.* (2016) «The Effectiveness of Hot Isostatic Pressing for Closing Porosity in Titanium Parts Manufactured by Selective Electron Beam Melting», *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 47, pp. 1939-1946. doi:10.1007/s11661-016-3429-3.
- Tan, J.H., Wong, W.L.E. y Dalgarno, K.W. (2017) «An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process», *Additive Manufacturing*, 18, pp. 228-255. doi:10.1016/j.addma.2017.10.011.
- Tan Phuc, L. y Seita, M. (2019) «A high-resolution and large field-of-view scanner for in-line characterization of powder bed defects during additive manufacturing», *Materials and Design*, 164, p. 107562. doi:10.1016/j.matdes.2018.107562.
- Tang, H.P. *et al.* (2015) «Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting», *JOM*, 67(3), pp. 555-563. doi:10.1007/s11837-015-1300-4.
- Tang, M., Pistorius, P.C. y Beuth, J.L. (2017) «Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion», *Additive Manufacturing*, 14, pp. 39-48. doi:10.1016/j.addma.2016.12.001.
- Tang, X. *et al.* (2020) «Optimization of laser energy density and scanning strategy on the forming quality of 24CrNiMo low alloy steel manufactured by SLM», *Materials Characterization*, 170, p. 110718. doi:10.1016/j.matchar.2020.110718.
- Taylor, H.C., Garibay, E.A. y Wicker, R.B. (2021) «Toward a common laser powder bed fusion

qualification test artifact», *Additive Manufacturing*, 39, p. 101803. doi:10.1016/j.addma.2020.101803.

Teeter, M.G. *et al.* (2015) «Metrology test object for dimensional verification in additive manufacturing of metals for biomedical applications», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 229(1), pp. 20-27. doi:10.1177/0954411914565222.

Terekhina, S. *et al.* (2022) «In-nozzle impregnation of continuous textile flax fiber/polyamide 6 composite during FFF process», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 153, p. 106725. doi:10.1016/j.compositesa.2021.106725.

Terrassa, K.L. *et al.* (2018) «Reuse of powder feedstock for directed energy deposition», *Powder Technology*, 338, pp. 819-829. doi:10.1016/j.powtec.2018.07.065.

de Terris, T. *et al.* (2019) «Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts», *Additive Manufacturing*, 28, pp. 802-813. doi:10.1016/j.addma.2019.05.035.

Thomas, D. (2009) *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*, Thesis. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10369/913>.

Thompson, M.K. *et al.* (2016) «Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints», *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), pp. 737-760. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004.

Tonelli, L., Fortunato, A. y Ceschini, L. (2020) «CoCr alloy processed by Selective Laser Melting (SLM): effect of Laser Energy Density on microstructure, surface morphology, and hardness», *Journal of Manufacturing Processes*, 52, pp. 106-119. doi:10.1016/j.jmapro.2020.01.052.

Toth, A.D. *et al.* (2022) «Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry», 16, p. e01219. doi:10.1016/j.sciaf.2022.e01219.

Townsend, A. *et al.* (2016) «Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review», *Precision Engineering*, 46, pp. 34-47. doi:10.1016/j.precisioneng.2016.06.001.

Townsend, A., Racasan, R. y Blunt, L. (2018) «Surface-specific additive manufacturing test artefacts», *Surface Topography: Metrology and Properties*, 6(2), p. 024007. doi:10.1088/2051-672X/aabcaf.

Tridello, A. *et al.* (2020) «Effect of microstructure, residual stresses and building orientation on the fatigue response up to 109 cycles of an SLM AlSi10Mg alloy», *International Journal of Fatigue*, 137, p. 105659. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105659.

Tsui, J.K.S. *et al.* (2022) «Applications of three-dimensional printing in ophthalmology», *Survey of Ophthalmology*, 67(4), pp. 1287-1310. doi:10.1016/j.survophthal.2022.01.004.

Vandenbroucke, B. y Kruth, J.-P. (2007) «Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts», *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), pp. 196-203. doi:10.1108/13552540710776142.

Vaverka, O., Koutny, D. y Palousek, D. (2019) «Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by selective laser melting», *Rapid Prototyping Journal*, 25(9), pp. 1545-1551. doi:10.1108/RPJ-07-2018-0171.

Verhoef, L.A. *et al.* (2018) «The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach», *Energy Policy*, 112, pp. 349-360. doi:10.1016/j.enpol.2017.10.034.

Wan, H.Y. *et al.* (2019) «Effect of scanning strategy on mechanical properties of selective laser melted Inconel 718», *Materials Science and Engineering A*, 753, pp. 42-48.

doi:10.1016/j.msea.2019.03.007.

Wang, D. *et al.* (2020) «Influence of spatter particles contamination on densification behavior and tensile properties of CoCrW manufactured by selective laser melting», *Optics and Laser Technology*, 121, p. 105678. doi:10.1016/j.optlastec.2019.105678.

Wang, H. y Zou, Y. (2019) «Microscale interaction between laser and metal powder in powder-bed additive manufacturing: Conduction mode versus keyhole mode», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, p. 118473. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118473.

Wang, L. *et al.* (2020) «Adhesion effects on spreading of metal powders in selective laser melting», *Powder Technology*, 363, pp. 602-610. doi:10.1016/j.powtec.2019.12.048.

Wang, P. *et al.* (2018) «Microstructure and mechanical properties of a heat-treatable Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si alloy produced by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 711, pp. 562-570. doi:10.1016/j.msea.2017.11.063.

Wang, Y. *et al.* (2021) «Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-Sc-Zr alloy additively manufactured by selective laser melting», *Materials Characterization*, 180, p. 111397. doi:10.1016/j.matchar.2021.111397.

Wang, Y.C. *et al.* (2020) «Scanning strategy dependent tensile properties of selective laser melted GH4169», *Materials Science and Engineering A*, 788, p. 139616. doi:10.1016/j.msea.2020.139616.

Wang, Z. *et al.* (2021) «Support Point Determination for Support Structure Design in Additive Manufacturing», *Additive Manufacturing*, 47, p. 102341. doi:10.1016/j.addma.2021.102341.

Waseda, Y., Matsubara, E. y Shinoda, K. (2011) *X-Ray Diffraction Crystallography: Introduction, Examples and Solved Problems*. Springer. doi:10.1007/978-3-642-16635-8.

Wen, Y. *et al.* (2021) «Effects of shot peening on microstructure evolution and mechanical properties of surface nanocrystal layer on titanium matrix composite», *Materials and Design*, 206, p. 109760. doi:10.1016/j.matdes.2021.109760.

Wu, S. *et al.* (2021) «Topological design of pentamode metamaterials with additive manufacturing», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 377, p. 113708. doi:10.1016/j.cma.2021.113708.

Wysocki, B. *et al.* (2019) «The influence of chemical polishing of titanium scaffolds on their mechanical strength and in-vitro cell response», *Materials Science and Engineering C*, 95, pp. 428-439. doi:10.1016/j.msec.2018.04.019.

Xia, M. *et al.* (2016) «Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 109, pp. 147-157. doi:10.1016/j.ijmactools.2016.07.010.

Xiao, Z. *et al.* (2018) «Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting», *Materials and Design*, 143, pp. 27-37. doi:10.1016/j.matdes.2018.01.023.

Xiao, Z. *et al.* (2020) «Effect of rescanning cycles on the characteristics of selective laser melting of Ti6Al4V», *Optics and Laser Technology*, 122, p. 105890. doi:10.1016/j.optlastec.2019.105890.

Xu, W. *et al.* (2022) «Intelligent denoise laser ultrasonic imaging for inspection of selective laser melting components with rough surface», *NDT & E International*, 125, p. 102548. doi:10.1016/j.ndteint.2021.102548.

Yablokova, G. *et al.* (2015) «Rheological behavior of β -Ti and NiTi powders produced by atomization for SLM production of open porous orthopedic implants», *Powder Technology*, 283, pp. 199-209. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.015.

- Yadroitsev, I. *et al.* (2012) «Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks», *Rapid Prototyping Journal*, 18(3), pp. 201-208. doi:10.1108/13552541211218117.
- Yadroitsev, I. y Yadroitsava, I. (2015) «Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting», *Virtual and Physical Prototyping*, 10(2), pp. 67-76. doi:10.1080/17452759.2015.1026045.
- Yan, X. *et al.* (2018) «Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting», *Journal of Alloys and Compounds*, 764, pp. 1056-1071. doi:10.1016/j.jallcom.2018.06.076.
- Yan, X. *et al.* (2021) «Effect of building directions on the surface roughness, microstructure, and tribological properties of selective laser melted Inconel 625», *Journal of Materials Processing Technology*, 288, p. 116878. doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116878.
- Yang, H. *et al.* (2020) «Microstructural evolution and mechanical performances of selective laser melting Inconel 718 from low to high laser power», *Journal of Alloys and Compounds*, 828, p. 154473. doi:10.1016/j.jallcom.2020.154473.
- Yap, C.Y. *et al.* (2015) «Review of selective laser melting: Materials and applications», *Applied Physics Reviews*, 2(4), p. 041101. doi:10.1063/1.4935926.
- Yasa, E. *et al.* (2014) «Benchmarking of different powder-bed metal fusion processes for machine selection in additive manufacturing», en *the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 390-403.
- Yi, F. *et al.* (2021) «Effect of powder reuse on powder characteristics and properties of Inconel 718 parts produced by selective laser melting», *Journal of Materials Research and Technology*, 13, pp. 524-533. doi:10.1016/j.jmrt.2021.04.091.
- Yin, Y. *et al.* (2021) «Effect of microstructure on the electrochemical dissolution behaviour of Hastelloy® X superalloy processed by selective laser melting and heat treatments», *Materials and Design*, 206, p. 109828. doi:10.1016/j.matdes.2021.109828.
- Yue, H. *et al.* (2019) «Reduction of systematic errors in structured light metrology at discontinuities in surface reflectivity», *Optics and Lasers in Engineering*, 112, pp. 68-76. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.08.002.
- Zafari, A. *et al.* (2022) «Enhancing work hardening and ductility in additively manufactured β Ti: roles played by grain orientation, morphology and substructure», *Journal of Materials Science & Technology*, 105, pp. 131-141. doi:10.1016/j.jmst.2021.08.006.
- Zhai, W. *et al.* (2020) «Characterization of nanoparticle mixed 316 L powder for additive manufacturing», *Journal of Materials Science and Technology*, 47, pp. 162-168. doi:10.1016/j.jmst.2020.02.019.
- Zhang, B., Li, Y. y Bai, Q. (2017) «Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review», *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 30, pp. 515-527. doi:10.1007/s10033-017-0121-5.
- Zhang, C. *et al.* (2020) «Cracking mechanism and mechanical properties of selective laser melted CoCrFeMnNi high entropy alloy using different scanning strategies», *Materials Science and Engineering A*, 789, p. 139672. doi:10.1016/j.msea.2020.139672.
- Zhang, F. *et al.* (2017) «3D printing technologies for electrochemical energy storage», *Nano Energy*, 40, pp. 418-431. doi:10.1016/j.nanoen.2017.08.037.
- Zhang, Han *et al.* (2020) «Influence of scanning strategy and parameter on microstructural feature, residual stress and performance of Sc and Zr modified Al–Mg alloy produced by selective laser

- melting», *Materials Science and Engineering A*, 788, p. 139593. doi:10.1016/j.msea.2020.139593.
- Zhang, Hongmei *et al.* (2020) «Microstructure and tribological property of selective laser melted Ni-based composites using different scanning strategies», *Vacuum*, 177, p. 109439. doi:10.1016/j.vacuum.2020.109439.
- Zhang, H. *et al.* (2021) «Understanding tensile and creep properties of WC reinforced nickel-based composites fabricated by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 802, p. 140431. doi:10.1016/j.msea.2020.140431.
- Zhang, J. *et al.* (2019) «A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends», *Journal of Materials Science and Technology*, 35(2), pp. 270-284. doi:10.1016/j.jmst.2018.09.004.
- Zhang, J. *et al.* (2021) «Effect of process parameters and heat treatment on the properties of stainless steel CX fabricated by selective laser melting», *Journal of Alloys and Compounds*, 877, p. 160062. doi:10.1016/j.jallcom.2021.160062.
- Zhang, L., Zhang, S. y Zhu, H. (2021) «Effect of scanning strategy on geometric accuracy of the circle structure fabricated by selective laser melting», *Journal of Manufacturing Processes*, 64, pp. 907-915. doi:10.1016/j.jmapro.2021.02.015.
- Zhang, Q. *et al.* (2021) «Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy», *Journal of Materials Research and Technology*, 11, pp. 1090-1099. doi:10.1016/j.jmrt.2021.01.091.
- Zhang, S. *et al.* (2019) «An experimental study of tensile property variability in selective laser melting», *Journal of Manufacturing Processes*, 43, pp. 26-35. doi:10.1016/j.jmapro.2019.03.045.
- Zhang, W. *et al.* (2020) «Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review», *Optik*, 207, p. 163842. doi:10.1016/j.ijleo.2019.163842.
- Zhang, X. *et al.* (2020) «Simulation and experimental studies on process parameters, microstructure and mechanical properties of selective laser melting of stainless steel 316L», *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(8), pp. 1-14. doi:10.1007/s40430-020-02491-3.
- Zhao, C., Qu, N. y Tang, X. (2021) «Electrochemical mechanical polishing of internal holes created by selective laser melting», *Journal of Manufacturing Processes*, 64, pp. 1544-1562. doi:10.1016/j.jmapro.2021.03.003.
- Zhao, D. *et al.* (2020) «In situ fabrication of a titanium-niobium alloy with tailored microstructures, enhanced mechanical properties and biocompatibility by using selective laser melting», *Materials Science and Engineering C*, 111, p. 110784. doi:10.1016/j.msec.2020.110784.
- Zhou, Y. *et al.* (2019) «Microstructures and metal-ceramic bond properties of Co-Cr biomedical alloys fabricated by selective laser melting and casting», *Materials Science and Engineering A*, 759, pp. 594-602. doi:10.1016/j.msea.2019.05.085.
- Zhou, Y. *et al.* (2021) «Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical property of W/316 L multi-material fabricated by selective laser melting», *Journal of Alloys and Compounds*, 890, p. 161841. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161841.
- Zhou, Y.H. *et al.* (2021) «Effect of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Ti2AlNb intermetallic fabricated by selective laser melting», *Materials Science and Engineering A*, 817, p. 141352. doi:10.1016/j.msea.2021.141352.
- Zhou, Z. *et al.* (2021) «Microstructure evolution and mechanical properties of in-situ Ti6Al4V-TiB composites manufactured by selective laser melting», *Composites Part B: Engineering*, 207, p. 108567. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108567.

Zhuang, J. *et al.* (2020) «Preparation method and underlying mechanism of MWCNTs/Ti6Al4V nanocomposite powder for selective laser melting additive manufacturing», *Powder Technology*, 368, pp. 59-69. doi:10.1016/j.powtec.2020.04.041.

Zou, S. *et al.* (2020) «Numerical analysis of the effect of the scan strategy on the residual stress in the multi-laser selective laser melting», *Results in Physics*, 16, p. 103005. doi:10.1016/j.rinp.2020.103005.