



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

TRABAJO FIN DE GRADO

REVISIÓN DE LAS TÉCNICAS DE
FABRICACIÓN ADITIVA Y SUS
APLICACIONES

Titulación: Grado en Ingeniería Química Industrial

Alumno: Joaquín Paulo Lago Job

Tutor: Fernando Rivera López

Septiembre, 2020

ÍNDICE GENERAL

1.	Abstract	1
2.	Resumen.....	3
3.	Objetivos	5
4.	Introducción	7
5.	Estado del arte.....	9
5.1	Fabricación Aditiva	10
5.2	Técnicas de Fabricación Aditiva.....	13
5.2.1	Binder Jetting o Inyección Aglutinante	14
5.2.2	Directed Energy Deposition o Deposición Directa de Energía	20
5.2.3	Material Jetting o Proyección de Material	26
5.2.4	Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo	31
5.2.5	Sheet Lamination o Laminado de Hojas.....	38
5.2.6	VAT Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba.....	40
5.2.7	Material Extrusion o Extrusión de Material	45
6.	Materiales.....	50
6.1	Metales.....	50
6.2	Cerámicos	52
6.2.1	Impresión 3D de cerámicas a partir de suspensiones.....	53
6.2.2	Impresión 3D de cerámicas a partir de polvo.	54
6.2.3	Impresión 3D de cerámicas a partir de láminas y filamentos.	56
6.3	Polímeros.....	57
7.	Aplicaciones.....	59
7.1	Educación	60
7.2	Medicina.....	60

7.3	Automoción e Industria aeroespacial.....	64
7.4	Construcción.....	66
8.	Conclusiones.....	69
9.	Conclusions.....	71
10.	Glosário de Términos	75
11.	Bibliografía.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ingresos generados mundialmente a través de la AM [2].....	9
Fig. 2. Comparación entre (a) mecanizado, (b) fabricación aditiva y (c) moldeo [3].....	10
Fig. 3. Gráfico del crecimiento de interés por la impresión 3D [3].	11
Fig. 4. Modelo CAD (izquierda) convertido a fichero STL (derecha) [5].....	12
Fig. 5. Ejemplo de relación entre variables de impresión y la calidad del objeto [6].	12
Fig. 6. Esquema de inyección aglutinante [10].	14
Fig. 7. Representación de la distribución del líquido dentro del lecho a) para poros pequeños b) para poros grandes [15].....	16
Fig. 8. Formación de gotas según el valor de Z [17].....	17
Fig. 9. Condiciones de inyección representadas gráficamente [19].	18
Fig. 10. Ejemplos de piezas fabricadas mediante BJ para diferentes aplicaciones y con diferentes materiales [10].....	19
Fig. 11. Proceso WAAM [21].	20
Fig. 12. Ilustración genérica del sistema DED con láser como fuente energética y polvo como alimentación [26].	21
Fig. 13. Aumento de la temperatura pico frente al tiempo [22].....	22
Fig. 14. Relación de propiedades mecánicas con la disposición de la pieza durante la fabricación [79].	23
Fig. 15. Condiciones óptimas para el procesado de varios materiales mediante DED [22].....	24
Fig. 16. Ejemplos de objetos fabricados con DED [27].....	25
Fig. 17. Esquema genérico MJ [28].	26
Fig. 18. Ilustración del comportamiento de una gota al impactar con una superficie sólida, siendo θ el ángulo de contacto con la superficie, D_i el diámetro inicial de la gota, D_m el diámetro máximo de la gota durante el impacto y V_i la velocidad de impacto [16].	28
Fig. 19. Fotos de las diferentes disposiciones de las gotas [16].....	29

Fig. 20. Piezas fabricadas mediante MJ [66].	31
Fig. 21. Diagrama proceso PBF genérico [26].	31
Fig. 22. Poros en una pieza fabricada con PBF antes (izquierda) y después (derecha) del prensado isostático en caliente [86].	32
Fig. 23. Sinterizado en estado sólido. (a) Partículas antes del sinterizado. (b) Partículas expuestas a altas temperaturas aglomerándose con tal de minimizar su energía superficial a través de una reducción de su superficie. (c) A medida que avanza el sinterizado, las partículas se aproximan cada vez más y el tamaño del poro disminuye [31].	33
Fig. 24. Patrón de barrido variable [83].	35
Fig. 25. Impresión de un archivo CAD (a) con parámetros de PBF (b) sin optimizar y (c) optimizados [92].	36
Fig. 26. Ejemplos de objetos fabricados con PBF, específicamente con (A) EBM y (B) SLM [36].	37
Fig. 27. Objetos enrejados fabricados mediante SLM para ensayos mecánicos [88].	37
Fig. 28. Estructuras fabricadas mediante SLM con vidrios metálicos [103].	37
Fig. 29. LOM: Diagrama del proceso con láser [3].	38
Fig. 30. Diagrama genérico del proceso SLA (top-down) [106].	41
Fig. 31. Diagrama genérico del proceso SLA (bottom-up) [65].	42
Fig. 32. Piezas cerámicas fabricadas mediante SLA [108].	44
Fig. 33. Estructuras biodegradables fabricadas mediante estereolitografía [109].	44
Fig. 34. Proceso FDM [39].	46
Fig. 35. (a) Posibles orientaciones en la plataforma; (b) grosor de capa, tamaño del inyector y patrón de escaneado [111].	46
Fig. 36. Diferentes patrones de impresión [113].	47
Fig. 37. Ejemplos de piezas impresas con el filamento de PLA/corcho [130].	48
Fig. 38. Ejemplos de piezas impresas mediante FDM [65].	49
Fig. 39. Modelo FDM de una vértebra torácica (50% del tamaño real) [133].	49

Fig. 40. Perfil térmico en una capa de Ti-6Al-4V durante el proceso de AM [26].....	51
Fig. 41. Piezas de SiC fabricadas mediante SLA [142].	54
Fig. 42. Soporte o andamio de fosfato de calcio impreso con BJ [14].	55
Fig. 43. (a) Mezcla de ABS y BT y (b) filamento de ABS-BT [143].	56
Fig. 44. Reparto de la AM entre diferentes sectores [66].	59
Fig. 45. Motivaciones principales para la inversión en AM [39].	59
Fig. 46. Simulador para broncoscopia impreso mediante SLS con nailon [42].	61
Fig. 47. Modelos FDM utilizados para planear una operación [132].	61
Fig. 48. (a) clavícula; (b) escápula; (c) prótesis tibial [103].	62
Fig. 49. Andamios metálicos biodegradables fabricados con SLM [48].	63
Fig. 50. (A) Ilustración 3D de la oreja biónica; (B) foto de la oreja biónica impresa [45].	63
Fig. 51. Piezas antes y después de su optimización: pieza del Airbus A320 (izq.) y una pieza del Airbus A380 (dcha.) [149].	64
Fig. 52. Artículos producidos mediante AM (a) Neumático biodegradable fabricado por Michelin (b) Llanta metálica [66].	64
Fig. 53. Inyector de combustible producido con fabricación aditiva [21].	65
Fig. 54. Piezas para turbinas y motores fabricadas mediante múltiples técnicas de AM [27].	65
Fig. 55. Yhnova™ sin revestimientos (arriba); Yhnova™ terminada (abajo) [64].	66
Fig. 56. Estructuras de grandes dimensiones impresas en 3D (a) Bloom Pavilion; (b) Casas, Winsun; (c) Edificio de varios pisos, Winsun; (d) Mansión, Winsun; (e) Primera oficina fabricada con AM, Winsun; (f) Puente; (g) Edificio administrativo de dos plantas, Apis Cor; (h) Casa; (i) Escultura llamada Digital Grotesque, (j) Primer edificio impreso en 3D en Europa (The BOD); (k) Bancos de cemento, XtreeE; (l) Casa conceptual Yrys, XtreeE [150].	67

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

P R O Y E C T O

TÍTULO

Revisión de las técnicas de fabricación aditiva y sus aplicaciones.

P E T I C I O N A R I O

NOMBRE

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna

DIRECCIÓN

Camino San Francisco de Paula, s/n. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología.
San Cristóbal de La Laguna. S/C de Tenerife

A U T O R

NOMBRE

Joaquín Paulo Lago Job

DNI

78573114P

TELÉFONO

634574327

CORREO ELECTRÓNICO

alu0100881943@ull.edu.es

1. ABSTRACT

Additive manufacturing has been around for decades but has only recently gotten popular and publicized as 3D printing. The variety of techniques is discussed, as well as the compatible materials and applications. The most extended use of additive manufacturing is in prototyping and design iteration, since this was its origin, but the presence of this technology in other areas is rapidly increasing. In the present work it's described how the interest of the scientific community has given place to a considerable penetration of additive manufacturing in multiple industries. Among the industries that have adopted additive manufacturing are the medical, the automotive and the aerospace industries, some of the most important industries in the world. This adoption has resulted in numerous advances, especially in the medical sector. The potential of 3D printing in education and construction is presented. The strengths of this technology are discussed, as well as the obstacles to overcome in order to achieve its full potential.

2. RESUMEN

La fabricación aditiva existe desde hace décadas, pero sólo se ha hecho popular recientemente y recibido el nombre de impresión 3D. Las diferentes técnicas son discutidas, así como los materiales compatibles y sus aplicaciones. El uso más extendido de la fabricación aditiva es el prototipado y la rápida iteración de diseños, ya que este ha sido su origen, pero la presencia de esta tecnología en otras áreas está aumentando rápidamente. En este trabajo se describe cómo el interés científico ha llevado a una considerable penetración de la fabricación aditiva en múltiples industrias. Entre las industrias que han adoptado la fabricación aditiva están la médica, la automotriz y la aeroespacial, algunas de las industrias más importantes del mundo. Esta adopción ha resultado en numerosos avances, especialmente en el sector médico. Se presenta el potencial de la impresión 3D en la educación y en la construcción. Se discuten las fortalezas de esta tecnología, así como los obstáculos a superar para lograr su potencial.

3. OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo académico la superación de la asignatura titulada Trabajo Fin de Grado, la cual es parte del programa académico del Grado de Ingeniería Química Industrial ofrecido por la Universidad de La Laguna.

Además, este trabajo pretende:

- Divulgar el potencial de la fabricación aditiva como un método de producción viable para múltiples aplicaciones.
- Realizar una recopilación de información publicada sobre la fabricación aditiva y sus diferentes vertientes, así como sus aplicaciones y obstáculos, con tal de centralizar la información disponible.
- Exponer los principales aspectos de las diferentes variantes de la fabricación aditiva, así como los factores a tener en cuenta a la hora de seleccionar la técnica más adecuada para una aplicación y/o material.
- Presentar, para cada sistema, los parámetros que más afectan a la calidad de impresión y a las estrategias para optimizarlos.
- Facilitar la introducción a este campo a aquellas personas interesadas, al tratarse de una tecnología prometedora y relativamente nueva.

4. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva (AM, siglas referidas al término en inglés additive manufacturing) se basa en la producción capa por capa de diseños 3D realizados a ordenador. Existen diferentes técnicas de AM que realizan la lectura y la ejecución de los diseños de maneras diferentes. De acuerdo con la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 [1] la AM abarca 7 técnicas diferentes, siendo este término usado frecuentemente para referirse a la todas ellas ya que son conceptualmente similares. A su vez, cada una de estas técnicas tiene diferentes vertientes que suelen diferenciarse en el estado de agregación del material, la forma de añadir material y/o el medio por el cual se logra la fusión entre partículas.

La AM surgió en los años 80 como una herramienta para agilizar el prototipado. A pesar de que el prototipado siga siendo su función principal en la industria, la AM ya está involucrada en la producción en masa de artículos dirigidos al mercado.

5. ESTADO DEL ARTE

La AM es una técnica muy amplia de manufactura que surge con el fin de hacer el proceso de prototipado más rápido y barato. Este proceso se basa en la fabricación de ejemplares previa a la producción en masa, permitiendo optimizar diseños y métodos de fabricación, etapa clave en el desarrollo de productos. La AM, también conocida como impresión 3D, fue inventada en 1984 por Charles W. Hull, aunque la tecnología era demasiado cara para penetrar el mercado. Recientemente el precio ha bajado drásticamente, lo que ha permitido a la tecnología ganar espacio en la industria [2, 3].

El primer contacto de la AM con la industria fue con la agilización del proceso iterativo de prototipado, la aplicación para la cual fue diseñada. Desde entonces la tecnología ha evolucionado, y las empresas que han invertido capital en dicha tecnología están viendo sus frutos debido a los incrementos de eficiencia. El incremento de beneficios generados por esta tecnología a lo largo de los últimos años sirve como referencia de su inclusión y expansión en el mercado, habiendo generado 3,000 millones de dólares en 2013 y se estima que en 2020 se generen de 21,000 millones (Fig. 1) [2].

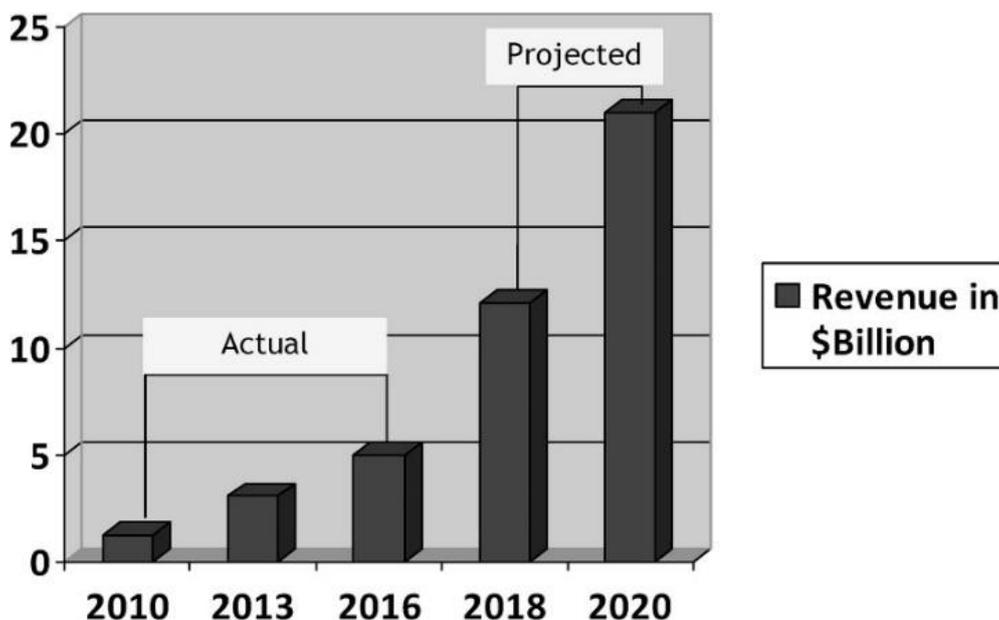


Fig. 1. Ingresos generados mundialmente a través de la AM [2].

No obstante, la AM tiene una serie de obstáculos que superar con tal de llegar a su máximo potencial [2]:

- Restricciones sobre el tamaño del objeto producido. Las técnicas de impresión 3D tienen una velocidad y una precisión de impresión inherentes al proceso, resultando en una limitación en las dimensiones posibles tanto para pequeñas como para grandes escalas. La restricción más notable es para piezas grandes, ya que sólo se puede producir un objeto tan grande como el volumen de impresión (limitado por las dimensiones del equipo).
- Velocidad de producción. Aunque es verdad que la producción con AM conlleva menores tiempos muertos debido a su flexibilidad (p. ej. al cambiar el objeto a fabricar en la línea de producción), la AM todavía no es capaz de competir con los tiempos de producción que consiguen los métodos tradicionales para la producción en masa.

- Coste. El coste tanto de las impresoras como de los materiales de impresión siguen siendo una considerable barrera de entrada, aunque se espera que esto se resuelva orgánicamente a medida que aumente la demanda y la competencia.
- Legislación. La impresión 3D permite hacer realidad virtualmente cualquier objeto sin ningún tipo de control o trazabilidad, lo que puede dar lugar, por ejemplo, a problemas de seguridad pública. Como cualquier nueva tecnología, la legislación suele ir atrasada debido a su carácter reactivo. Por ello es necesario que surjan restricciones por parte de los gobiernos para controlar quién puede tener acceso a una impresora 3D y qué se puede o no fabricar con esta.

5.1 FABRICACIÓN ADITIVA

La AM se apoya sobre sistemas de diseño asistido por computadora (CAD, siglas referidas al término en inglés Computer Aided Design) y sistemas de fabricación asistida por computadora (CAM, siglas referidas al término en inglés Computer Aided Manufacturing). Aunque técnicas tradicionales como el mecanizado también se apoyen en estas tecnologías, el método de ejecución es completamente diferente ya que, por definición, el mecanizado se basa en el arranque de material, mientras que la AM trata de fabricar piezas a través de la agregación de material. Así, el mecanizado parte de un bloque de material sólido y se consigue la forma deseada retirando pequeños fragmentos de material utilizando una variedad de herramientas, mientras que la AM agrega el material capa por capa desde cero hasta completar el objeto. Otra opción es el moldeo, que consiste en la utilización de un molde para contener el material en la forma deseada para su densificación. En la **Fig. 2** se ilustra la diferencia fundamental entre estos procesos a la hora de crear un objeto.

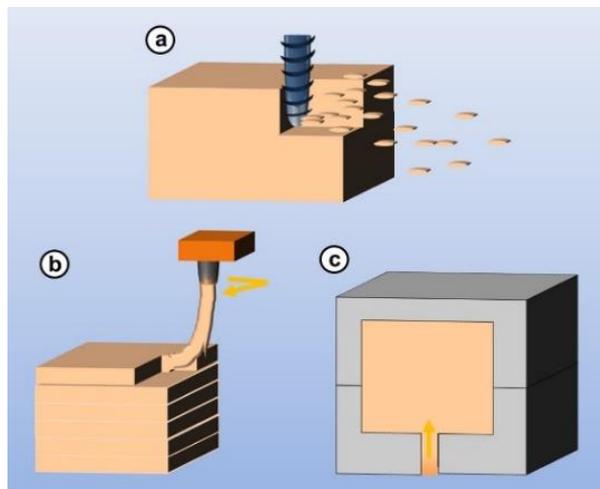


Fig. 2. Comparación entre (a) mecanizado, (b) fabricación aditiva y (c) moldeo [3].

Tanto el mecanizado como el moldeo implican ciertas limitaciones geométricas, por lo que la fabricación de objetos con estructuras complejas conlleva, o bien varias etapas de postratamiento, o bien una fabricación por partes con un posterior montaje o soldado, lo que impacta directamente la eficiencia de la producción. La AM, en algunos casos con la necesidad de soportes temporarios, tiene virtualmente cero limitaciones geométricas, abriendo puertas a nuevas posibilidades de diseño y novedosas aplicaciones.

Otra característica que destacar es que una máquina de AM es capaz de producir componentes con geometrías muy complejas sin la necesidad de equipos o herramienta extras. Esto supone una gran

ventaja respecto a las técnicas tradicionales de moldeo, conformado y arranque de material. Además, el menor desecho de material que conlleva implícitamente la AM es un factor especialmente atractivo cuando se trata de la fabricación de piezas donde el material tiene un alto impacto sobre el coste total de producción.

La versatilidad y robustez de la tecnología hace que las posibles aplicaciones sean diversas y se extiendan a una amplia diversidad de ramas de conocimiento. Las nuevas oportunidades de diseño con un gran abanico de materiales y escalas han dado lugar a una adopción extensa. Esto se debe a que se ha viabilizado una serie de aplicaciones que antes, con los costes de las técnicas tradicionales, eran inconcebibles. Esto es cierto sobre todo en industrias especialmente avanzadas como la medicina, la aeroespacial y la automoción ya que los diseños óptimos para estos campos suelen ser complejos y utilizar materiales especialmente caros. En la **Fig. 3** se ve reflejado el incremento de interés de la comunidad científica los últimos años que a su vez ha causado grandes avances en muchas disciplinas.

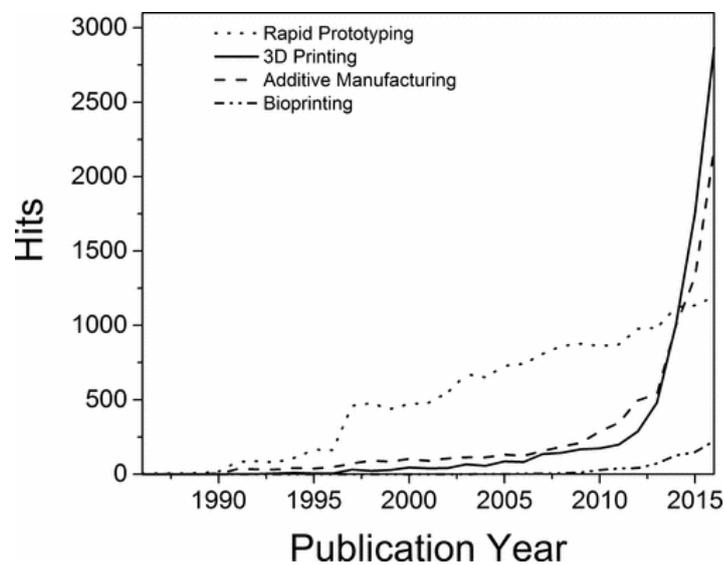


Fig. 3. Gráfico del crecimiento de interés por la impresión 3D [3].

En cuanto al funcionamiento del proceso, la AM empieza con la generación de un diseño 3D mediante un software CAD como Autodesk® Fusion 360, SolidWorks® o similares. Otra opción para la creación del diseño es el escaneado, método utilizado, por ejemplo, en aplicaciones médicas para la fabricación de prótesis personalizadas.

Una vez terminado el diseño este se exporta en formato STL, siglas referidas al término en inglés stereolithography (el formato surgió con el software CAD creado por 3DSystems para sus impresoras de estereolitografía). El formato STL nació como una iniciativa para facilitar la comunicación entre sistemas CAD y de impresión 3D debido a problemas de compatibilidad relacionados a la transferencia de datos generados con software CAD. El formato STL se encarga de traducir la superficie del diseño en triángulos (el mínimo de triángulos posible), además de eliminar cualquier otra información como colores, materiales y texturas, creando un archivo ligero y simplificado. Debido al funcionamiento del formato también es común que se enlacen las siglas STL con los términos “Standard Triangle Language” o “Standard Tessellation Language”, pero estas expresiones no son el origen de las siglas sino un retroacrónimo, es decir, fueron creadas *a posteriori* con la intención de encajar con las siglas STL. En la **Fig. 4** puede verse la simplificación de los datos CAD a un formato STL [4].



Fig. 4. Modelo CAD (izquierda) convertido a fichero STL (derecha) [5].

Importando el fichero STL a un software especializado (p. ej. Cura, PrusaSlicer o Slic3r) se pueden manejar una amplia gama de parámetros de impresión para alterar criterios directamente relacionados con la cantidad de material empleado, el tiempo de impresión, las propiedades físicas de la pieza y la calidad en general (p. ej. calidad de la superficie, calidad del enlace entre capas, precisión dimensional...). Estos softwares se denominan slicers (viene de la palabra slice en inglés, que hace referencia a repartir un diseño en un número finito de capas paralelas entre sí). Los slicers generan, a partir del STL, un modelo matemático que contiene todas las condiciones de trabajo establecidas por el usuario, así como toda la información referente a la deposición y/o aglomeración del material. Dicho modelo se almacena en un fichero G-code que finalmente es leído y ejecutado por la máquina de AM.

Los valores seleccionados en el slicer tienen una gran influencia en las propiedades del objeto fabricado, pudiendo repercutir en las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, eléctricas, etc. Además, es evidente que otros parámetros, como la cantidad de relleno o la velocidad de impresión, también van a repercutir en el coste económico del producto. Las variables manejables en un slicer incluyen altura y anchura de capa, velocidad de impresión, temperatura de trabajo, densidad y patrón de relleno, tipo de soporte, material, entre otras (siempre que el equipo de AM utilizado lo soporte). En la Fig. 5 se muestra la relación entre variables y resultados con un ejemplo visual. El modelo de la izquierda representa como el aumento de la altura de capa posibilita una impresión más rápida a costa de una reducción en la resolución. Por otro lado, el de la derecha refleja como la disminución de la altura de capa da lugar a más precisión, pero a costa de un mayor tiempo de impresión. Esta variación de tiempo se debe al mayor o menor número de ciclos que se necesitan para llegar a la última capa de material necesaria para la finalización del objeto.



Fig. 5. Ejemplo de relación entre variables de impresión y la calidad del objeto [6].

Entre los beneficios de la AM se encuentran [2, 7, 8]:

- Una alta correlación entre diseño y componente. Es decir, hay una alta precisión y baja pérdida de información.
- Alta customización de diseño, tanto de la estructura externa como interna, sin costes extras ya que no existe una relación directa entre complejidad y coste como ocurre con otras técnicas de fabricación.
- Posibilidad de crear componentes ligeros con mayor funcionalidad. Estas características están limitadas en los procesos tradicionales debido al factor económico.
- Con la AM se atribuyen todas las características geométricas al objeto en un solo paso, mientras que con la manufactura tradicional se suelen necesitar una serie de procesos para que el objeto obtenga el formato deseado.
- Permite la fabricación unificada de productos que con técnicas tradicionales tendrían que fabricarse por piezas y montarse.
- Genera pocos residuos, con la posibilidad de reciclarlos *in-situ*. Además, algunas técnicas de AM tienen una alta capacidad de reparación, alargando la vida útil de los productos y reduciendo el impacto medioambiental.
- Reducción del tiempo de desarrollo y optimización de productos a través de una aceleración del prototipado, posibilitando una más rápida entrada al mercado.
- Producción de una gran variedad de componentes sin necesitar una gran inversión de capital.
- Producción a demanda donde y cuando se necesite frente a la habitual producción basada en proyecciones, lo que reduce costes de almacenamiento, logística y transporte.
- Bajo coste inicial, posibilitando la fabricación en cantidades pequeñas. Esto no es viable con técnicas de producción convencionales como el moldeo por inyección.
- Posibilidad de modificar diseños sin gran coste añadido y sin generar retrasos en la producción.

5.2 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Desde la primera impresora 3D han surgido una serie de nuevas técnicas de AM con el fin de ampliar la gama de materiales compatibles con la tecnología y de extender las aplicaciones de esta. Estas nuevas técnicas se basan en el mismo concepto, pero conllevan diferentes ventajas y desventajas, pudiendo elegirse la más adecuada para cada aplicación dependiendo de especificaciones como el material, la dimensión, la tolerancia o la complejidad, entre otras. Las grandes diferencias entre las variantes de la AM son la forma en que se añade el material y el medio de fusión entre partículas. En algunos casos se trata de agregar material en estado sólido o semisólido, mientras que en otros la materia prima se puede encontrar en polvo, en fase líquida o en una suspensión. En cuanto a la creación de las capas, estas se densifican de manera selectiva utilizando diferentes fuentes de energía o, en algunos casos, enlazantes químicos.

Cabe señalar que cada una de las clasificaciones de AM contienen técnicas que abordan la fabricación de manera diferente para adaptar el proceso a diferentes materiales y/o aplicaciones. Así, en los siguientes apartados, se abordarán las características de cada categoría de forma generalizada, con tal de englobar el máximo número de variantes posibles.

La UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 clasifica los procesos de AM en siete categorías:

- Binder Jetting o Inyección Aglutinante
- Directed Energy Deposition o Deposición Directa de Energía
- Material Jetting o Proyección de Material
- Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo
- Sheet Lamination o Laminación
- VAT Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba
- Material Extrusion o Extrusión de Material

5.2.1 Binder Jetting o Inyección Aglutinante

La tecnología de inyección aglutinante (BJ, siglas referidas al término en inglés binder jetting) fue desarrollada por Ely Sachs et al. en el MIT (siglas en inglés referidas a Massachusetts Institute of Technology), siendo solicitada y concedida la patente en 1989 y 1993, respectivamente [9]. Se trata de una técnica AM en la que se forma un objeto a través de la deposición de un líquido aglutinante (orgánico o inorgánico) sobre un lecho de polvo (polímero, metálico, cerámico o una mezcla). Este líquido funciona como un adherente, y se deposita de tal modo que el polvo enlazado tenga la forma de la sección transversal del objeto. En la Fig. 6 se trata de ilustrar el proceso de BJ y sus principales componentes.

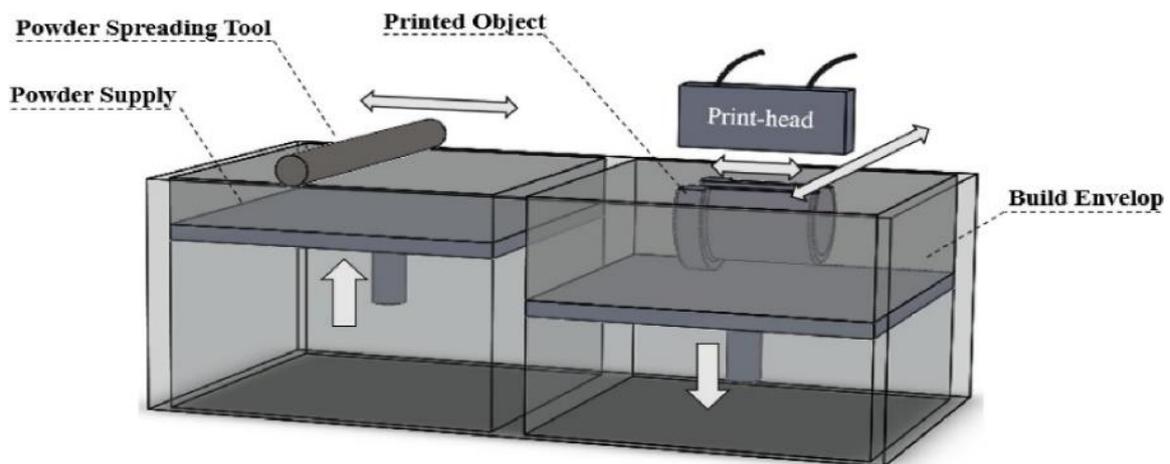


Fig. 6. Esquema de inyección aglutinante [10].

El proceso empieza con un lecho de polvo sobre el cual se deposita la primera capa de agente aglutinante. Acto seguido, la cama de polvo se traslada hacia abajo y, desde un depósito, se le añade más polvo sobre el cual se deposita la siguiente capa de líquido. Para fabricar el objeto completo se repiten los pasos descritos anteriormente. Cabe destacar que es común el uso de una fuente de calor durante el proceso de tal forma que se consiga un mayor endurecimiento de la pieza y se evite una

infiltración excesiva del líquido en el lecho. Una vez terminado el proceso, se necesita sacar el objeto y eliminar el polvo sobrante con una aspiradora, una pistola de aire a presión o con un cepillo. Esta tecnología es especialmente eficaz a la hora de crear piezas de gran tamaño y complejidad, sin la necesidad de soportes (el polvo sin enlazar sirve como soporte para la impresión) y con bajo gasto energético, aunque con propiedades mecánicas limitadas [7].

Cabe destacar que el enlace entre partículas que se logra con esta técnica es débil y la pieza se deforma fácilmente. Para mejorar sus propiedades mecánicas la pieza debe pasar por un proceso de postratamiento, normalmente una sinterización (que consiste en un ciclo térmico). La optimización de la sinterización es objeto de estudio en la industria, no solo en esta técnica sino en muchas otras, ya que las características de dicha sinterización, principalmente temperatura, atmósfera y duración, tienen un gran impacto sobre la densidad final de la pieza y sus propiedades mecánicas. Dicho proceso de sinterización es complejo y debe estudiarse caso por caso en función de los materiales y la aplicación de la pieza final.

Las características de las partes impresas con esta tecnología, así como el tiempo de impresión, dependen de los parámetros del equipo y de una serie de factores relacionados con el líquido aglomerante y con el polvo. En cuanto al polvo, la geometría de las partículas y su distribución de tamaño afectan su asentamiento, su facilidad para deslizarse (a la hora de añadir nuevas capas) y su capacidad para absorber el líquido, factores que están directamente relacionados con la calidad de impresión. Respecto a la geometría de las partículas, en general es preferible que sea esférica para facilitar el deslizamiento y empaquetamiento. Por otro lado, la selección del tamaño no es tan directa ya que conlleva la necesidad de abrir mano de unas propiedades por otras. Partículas más pequeñas dan lugar a piezas con mayor resistencia y una superficie más uniforme en comparación con partículas más grandes, pero se aumenta considerablemente la porosidad y el proceso de impresión se vuelve notablemente más lento. El hecho de que partículas más pequeñas den lugar a una mayor porosidad y que, además, piezas con mayor porosidad tengan mejores propiedades mecánicas que aquellas más densas parece contradictorio. Sin embargo, estas peculiares relaciones están enlazadas con características inherentes al proceso de BJ [11, 12].

Por un lado, la mayor porosidad que surge al utilizar partículas más pequeñas en BJ se debe a que, al añadir cada capa de polvo, se reparten las nuevas partículas deslizándolas sobre la superficie con tal de nivelar el lecho. Partículas pequeñas tienen una mayor dificultad para fluir entre ellas mismas (tienden a aglomerarse debido al incremento de las fuerzas de Van der Waals), entorpeciendo el proceso de nivelado y creando un mayor volumen de huecos. Por otro lado, la relación inversa a la esperada entre propiedades mecánicas y porosidad resulta del hecho que las partículas más pequeñas consiguen más puntos de contacto entre ellas en la sección paralela a la impresión y, además, atraen de forma más eficaz al líquido, dando lugar a un enlace más fuerte y contrarrestando el efecto que tiene la porosidad sobre las propiedades mecánicas finales [11, 12].

Tanto la porosidad como las propiedades mecánicas se pueden optimizar cuando, en vez de usar partículas pequeñas de un tamaño específico, se utiliza una distribución de polvo fino y grueso. Con esta mezcla se disminuye la tendencia de las partículas finas a aglomerarse debido a la presencia de las partículas gruesas, lo que reduce la porosidad generada por la nivelación del lecho. Además, las partículas finas rellenan los huecos entre gruesas, consiguiendo una menor distancia entre partículas, lo que conlleva no solo una reducción de la porosidad, sino también un contacto más íntimo entre las partículas y el líquido aglomerante. Por ejemplo, para la impresión con polvo de

cobre mediante BJ, se ha demostrado que utilizar una mezcla entre partículas de 30 y 5 μm de tamaño da mejores resultados que utilizar únicamente de partículas de 15 μm [13].

Otro factor que se debe controlar a la hora de utilizar la técnica BJ es la capacidad de absorción del polvo, así como la distribución del líquido aglomerante una vez este se encuentra dentro del lecho. Estos factores, altamente afectados por el tamaño de los poros presentes en el lecho, determinan en gran parte la definición y las propiedades mecánicas finales. Poca absorción reduce la unión entre capas y afecta la integridad de la pieza, mientras que demasiada absorción supone una pérdida de definición. En la Fig. 7 se puede observar el comportamiento del líquido en función del tamaño de los poros [14].

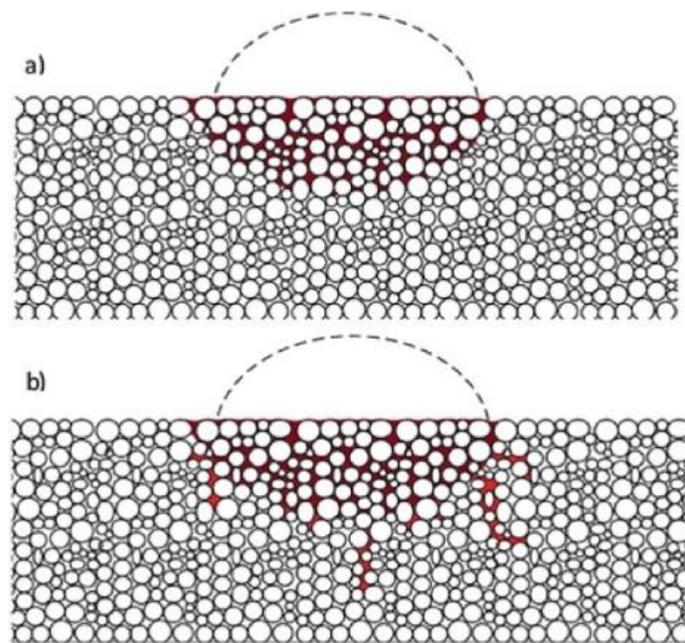


Fig. 7. Representación de la distribución del líquido dentro del lecho a) para poros pequeños b) para poros grandes [15].

En cuanto a las microgotas de líquido enlazante, es importante saber si la sustancia que se pretende utilizar tiene un comportamiento adecuado durante la inyección. La habilidad del líquido para crear gotas estables y homogéneas, la capacidad de la gota para salir del inyector y la salpicadura generada por la gota al contactar con el lecho deben ser caracterizadas. Esto es posible mediante el número de Reynolds, el número de Weber y el número de Ohnesorge, números adimensionales que relacionan las principales propiedades que influyen en el comportamiento dinámico de un fluido. Donde el número de Reynolds, el número de Weber y el número de Ohnesorge se definen como [16]:

$$Re = \frac{\nu \rho D}{\eta} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho D \nu^2}{\sigma} \quad (2)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma \rho D}} \quad (3)$$

Siendo ρ (g/cm³) = densidad del líquido, D (mm) = diámetro de la gota, ν (m/s) = velocidad del flujo, η (mPa·s) = viscosidad del líquido y σ (N/m) = tensión superficial del líquido.

La inversa de Oh se suele referir en la literatura como Z , y se ha determinado que para la generación de gotas estables Z debe estar entre 1 y 10. Para valores menores que 1 la viscosidad es predominante y la formación de gotas se ve perjudicada, mientras que valores mayores que 10 dan lugar a un alto número de gotas satélite. En la **Fig. 8** se muestra una comparación del comportamiento de un líquido para Z mayor que 10 y para Z comprendida dentro de los límites aconsejados. Cabe mencionar que no se encuentra en la figura una foto representando el comportamiento para Z menor que 1 porque el líquido no llega a formar una gota [16].

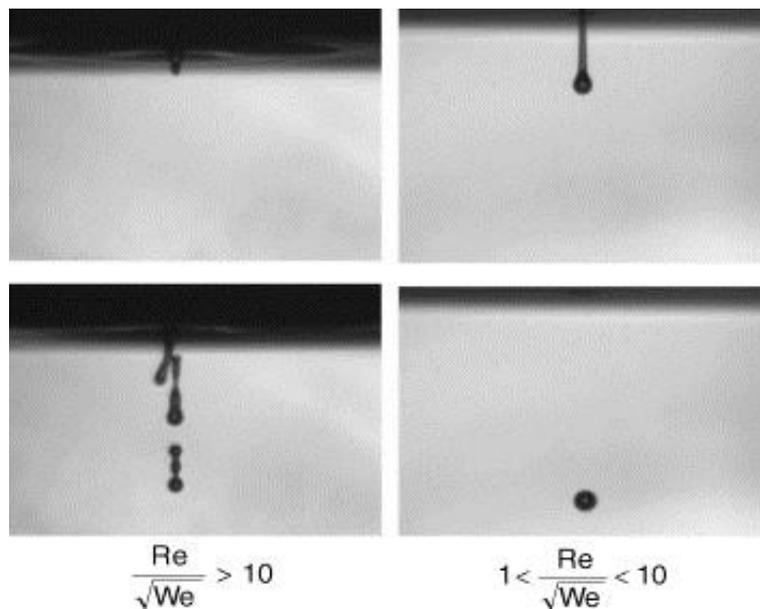


Fig. 8. Formación de gotas según el valor de Z [17].

Además, es necesario que la gota tenga suficiente energía como para superar la tensión producida por el aire sobre el orificio de la boquilla (siendo su diámetro d_n), resultando en una velocidad mínima de trabajo v_{min} . Donde v_{min} se expresa como [16]:

$$v_{min} = \sqrt{\frac{4\sigma}{\rho d_n}} \quad (4)$$

Despejando v en la expresión del número de Weber se obtiene:

$$v = \sqrt{\frac{\sigma We}{\rho D}} \quad (5)$$

Comparando las expresiones (4) y (5) se tiene que: $v \geq v_{min} \leftrightarrow We \geq 4$.

Por otro lado, la salpicadura es menos fácil de controlar y predecir, ya que depende en gran parte de cada combinación específica líquido-superficie [18]. Sin embargo, existen fórmulas empíricas en función de la rugosidad (R) que definen un valor límite para salpicadura [16]:

$$We^{1/2} Re^{1/4} > f(R) \quad (6)$$

Así, por ejemplo, $f(R)$ tiene un valor de aproximadamente 50 para $R = 20$ (superficie lisa y recta) y, por lo tanto, para cualquier $We^{1/2} Re^{1/4} \geq 50$ habría salpicadura [16]. En la **Fig. 9** se muestran las restricciones mencionadas de forma gráfica (la linealidad representada solo es aplicable a fluidos newtonianos).

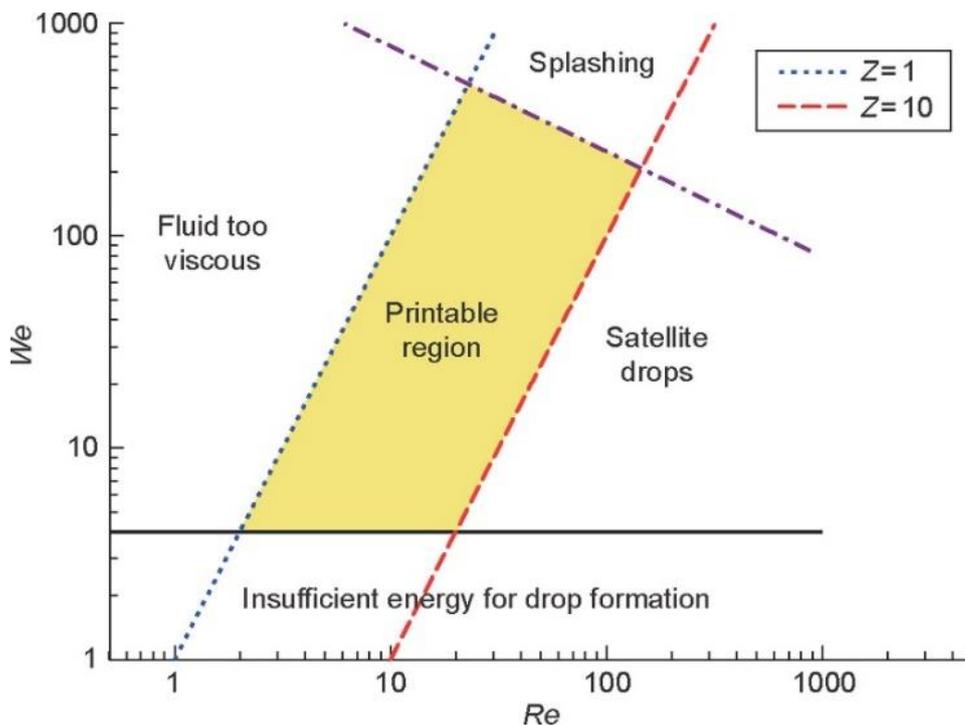


Fig. 9. Condiciones de inyección representadas gráficamente [19].

También, se debe abordar el volumen de líquido que se debe añadir al lecho con tal de optimizar la precisión geométrica y las propiedades mecánicas de la pieza. Durante la impresión el lecho está compuesto por aire, polvo y líquido enlazante, siendo la relación entre sus volúmenes, la tasa de empaquetamiento, el factor determinante de la interacción entre ellos. La saturación, por otro lado, es un parámetro de las impresoras de BJ y determina la cantidad de enlazante a añadir durante el proceso. El uso de poco enlazante resulta en uniones débiles y lleva al fallo total de la impresión, mientras que el uso de mucho enlazante causa que no se respeten los perímetros de diseño, dando lugar a una pieza de geometría diferente a la deseada. Por ello, es importante determinar el valor de equilibrio de saturación. La tasa de empaquetamiento (Packing Rate en inglés) o *PR* y la saturación (*S*) son parámetros adimensionales que se expresan como [11]:

$$PR = \frac{V_{polvo}}{V_{polvo} + V_{aire}} \quad (7)$$

$$S = \frac{V_{enlazante}}{V_{aire}} = \frac{V_{enlazante}}{(1-PR)V_{sólido}} \quad (8)$$

En BJ, una vez depositadas las gotas de líquido aglutinante sobre el lecho de polvo, el fluido migra al interior de los poros debido a dos mecanismos, la presión capilar y al gradiente de presión a lo largo del menisco que forma la gota. Este último pierde influencia a medida que el fluido permea, desapareciendo cuando deja de haber enlazante en la superficie. Así, el mecanismo principal que estimula la permeación de líquido enlazante es la presión capilar. El momento en que se detiene la penetración de líquido (debido al equilibrio de presión capilar, P_c , en todas las interfaces líquido-aire) define el estado de equilibrio del proceso. El valor de saturación en esta condición de equilibrio es un factor que impacta directamente la calidad de impresión [15].

Es difícil establecer un valor de saturación de equilibrio y se suele aproximar mediante prueba y error debido a que cambia notablemente en función del tipo de enlazante elegido y la interacción de éste con el lecho. No obstante, se han creado modelos físicos que ayudan a determinar dicho valor. Uno

de ellos lo hace a partir del cálculo de la presión capilar media en equilibrio (P) y una gráfica empírica de calibrado de P_c frente a saturación. Al leer el valor de saturación para P se puede obtener una aproximación del valor de equilibrio de saturación, que es el valor óptimo para el proceso. La presión capilar media en equilibrio (P), deducida en la literatura, se expresa como [15]:

$$P = \frac{F}{A\varepsilon} = \frac{S(1-\varepsilon)(\sigma_{sl}-\sigma_{sg})}{\varepsilon} \quad (9)$$

Siendo F (N) = fuerza, A (mm²) = área de la zona saturada, ε = porosidad del lecho, S (m²/m³) = superficie específica media del lecho y σ (N/m) = tensión superficial (sl para la interfaz sólido-líquido y sg para sólido-gas).

Además de la granulometría, las propiedades del líquido aglomerante y la saturación del lecho, parámetros de impresión como, por ejemplo, la altura de capa y la velocidad de impresión también tienen un gran impacto sobre la calidad de la impresión, afectando sobre todo la resolución y la definición. El aumento de la velocidad de barrido también disminuye la precisión (principalmente debido a la velocidad horizontal de las gotas) [20].

En la **Fig. 10** se representan, mediante ejemplos, el potencial y la flexibilidad de la tecnología BJ. Estos ejemplos muestran la capacidad de la técnica BJ para fabricar moldes (una de las aplicaciones estrella de la técnica), objetos de pequeñas dimensiones y un alto grado de detalle (tanto funcionales como artísticos) y objetos multicolor (otra aplicación interesante de la técnica, por ejemplo, en entornos educativos). Se muestran en dicha figura una pieza cuyo molde se fabricó mediante BJ (**Fig. 10 a**), una antena parabólica de acero inoxidable 316 infiltrada con cobre (**Fig. 10 b**), un objeto con un alto nivel de detalle (**Fig. 10 c**), una pieza multicolor impresa con material basado en almidón (**Fig. 10 d**) y engranajes impresos con alúmina (**Fig. 10 e**).

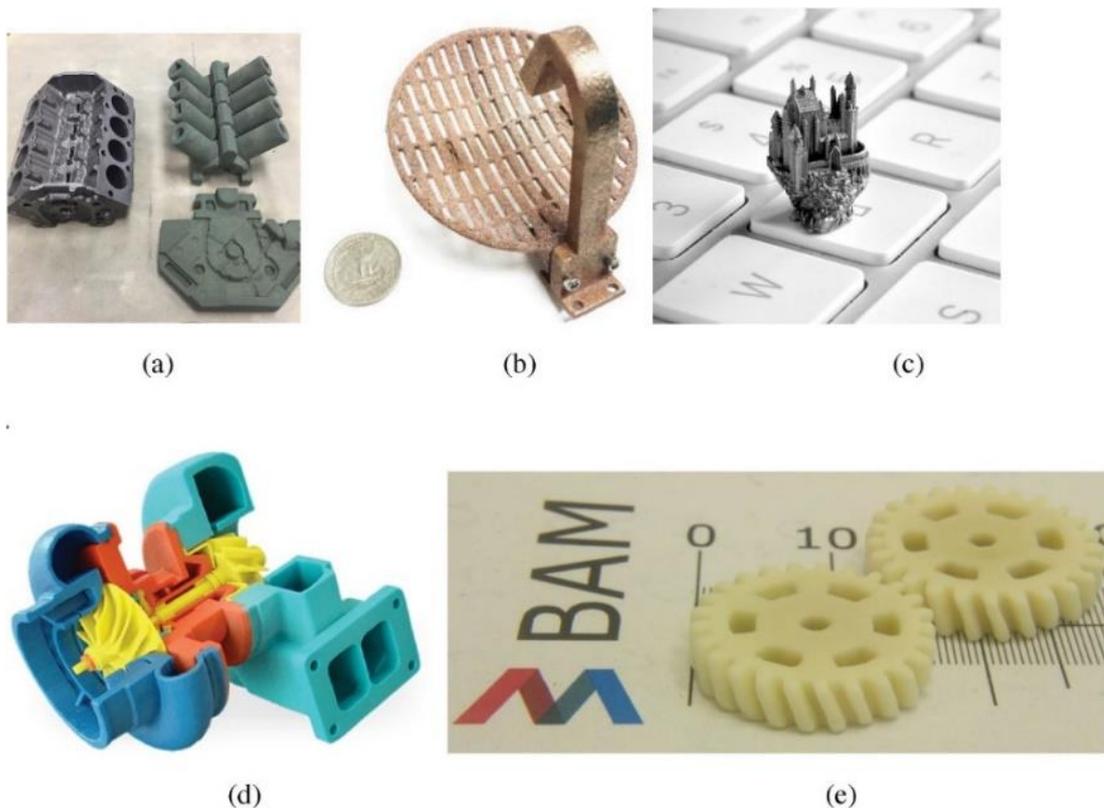


Fig. 10. Ejemplos de piezas fabricadas mediante BJ para diferentes aplicaciones y con diferentes materiales [10].

5.2.2 Directed Energy Deposition o Deposición Directa de Energía

Esta técnica de AM se utiliza principalmente con materiales metálicos y surge como una adaptación de las técnicas de soldadura. Se produce el objeto deseado en una atmósfera inerte (normalmente la atmósfera inerte se mantiene cerca o por debajo de 10 ppm de oxígeno con argón o nitrógeno) alimentando de forma continua el material metálico al punto focal de un láser, un haz de electrones o un arco de plasma dando lugar a una deposición de material fundido. A diferencia de BJ, en esta técnica es necesario imprimir soportes para aquellas partes del diseño que no estén directamente apoyadas sobre la plataforma o las anteriores capas. A la deposición directa de energía (DED, siglas referidas al término en inglés Directed Energy Deposition) también se le suele llamar “Laser Metal Deposition”, “Directed Laser Deposition” o “Directed Metal Deposition”. Las técnicas más conocidas en función de la fuente de energía bajo la categoría DED son “Laser Engineered Net Shaping” o LENS™ (que utiliza un láser), “Electron-Beam Additive Manufacturing” o EBAM (que utiliza un haz de electrones) y “Wire and Arc Additive Manufacturing” o WAAM (que utiliza un arco de plasma). Cabe aclarar que EBAM no es la misma técnica que “Electron-Beam Melting” o EBM, que corresponde a otra categoría de AM [21, 23].

Existen técnicas DED que utilizan como alimentación polvo metálico impulsado por un gas inerte (p.ej. el argón o el nitrógeno) y otras que utilizan hilo metálico, pero la segunda es poco relevante en relación con la primera. En general la metodología DED se caracteriza por su rápida velocidad de impresión (1 kg/h y 10 kg/h para alimentaciones en polvo y en hilo respectivamente) y su capacidad de realizar grandes impresiones (hasta 12 m³). La técnica de AM DED con hilo más extendida es la WAAM (**Fig. 11**), que utiliza las técnicas de soldadura en arco para dar lugar a objetos constituidos íntegramente del material soldado con la ayuda de brazos robóticos. El uso de diferentes gases inertes para la protección del metal ante la oxidación durante WAAM tiene un gran impacto sobre la calidad de la pieza y su microestructura. El diámetro del hilo suele comprenderse entre 0.5 mm y 3 mm, variando bastante en función del diámetro de foco y de la definición deseada. Esta técnica fabrica piezas con una complejidad relativamente baja y con una rugosidad superficial alta en comparación con los resultados obtenidos con el polvo metálico (aunque el metal en hilo es diez veces más barato que el metal en polvo). Piezas producidas mediante WAAM suelen requerir postratamientos para adquirir la forma y la superficie deseadas [21, 25, 82].



Fig. 11. Proceso WAAM [21].

Las técnicas DED que utilizan metal en polvo como alimentación son las más comunes y permiten la impresión de objetos de considerable complejidad y detalle. Al igual que con WAAM, la selección del gas de protección y su modo de aplicación tienen un importante impacto sobre las características finales de una pieza fabricada mediante las técnicas DED basadas en polvo. Las partículas utilizadas suelen ser esféricas (para reducir el riesgo de que quede gas atrapado y así disminuir la porosidad) y rondar los 10-100 μm de diámetro. Esta técnica puede trabajar simultáneamente con múltiples depósitos de polvo, posibilitando la impresión de materiales con función gradiente (FGMs, siglas referidas al término en inglés Functionally Graded Materials), es decir, materiales con diferentes propiedades a lo largo de su volumen debido a un gradiente en su composición y estructura interna. Además, se pueden usar para aplicar revestimientos y para la reparación de piezas, aumentando la vida útil del material y reduciendo el impacto medioambiental [24, 69, 70, 89, 93, 94].

La técnica LENS™ es la más extendida en esta categoría y, como consecuencia, la fuente de energía más utilizada en DED es el láser. La potencia de los láseres suele estar entre 500 y 5000 W, siendo normalmente el punto focal de 1 mm de diámetro (pudiendo llegar hasta 3mm). En la mayoría de los equipos DED se utilizan láseres de Nd-YAG, aunque láseres de CO₂ también son habitualmente utilizados. La superioridad del láser de Nd-YAG sobre el de CO₂ se debe a su mayor eficiencia energética, ya que la luz emitida por un láser de Nd-YAG es más fácilmente absorbida por un material metálico que aquella emitida por un láser de CO₂ (debido a la longitud de onda a la que trabaja cada uno) [22, 24].

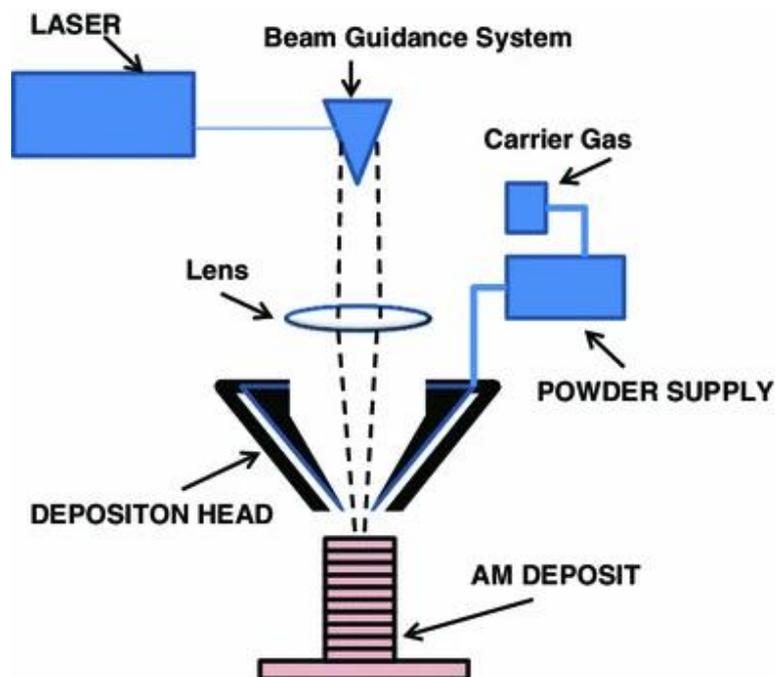


Fig. 12. Ilustración genérica del sistema DED con láser como fuente energética y polvo como alimentación [26].

La técnica DED con alimentación en polvo (representada mediante un esquema en la Fig. 12) conlleva un alto aporte energético y también rápidas velocidades de enfriamiento (que pueden llegar a 10^5 K/s). El alto aporte energético necesario para fundir el material da lugar no solo a grandes gradientes de temperatura sino también a un aumento de temperatura con cada capa debido a que el material no llega a enfriarse completamente (Fig. 13). Se ha demostrado que esta acumulación de energía puede conllevar que una capa cambie su estructura cristalina a medida que se imprimen

más capas sobre ella. Por lo tanto, los parámetros de proceso más importantes son aquellos relacionados con el aporte energético como la potencia de la fuente de energía, el tamaño del foco, la velocidad de barrido y el patrón de barrido. Asimismo, las propiedades de la alimentación y el flujo de entrada también son de gran importancia, ya que la alimentación debe ser capaz de absorber la energía eficazmente, fundirse y además soportar los gradientes térmicos sin perder su integridad [77, 78].

Además de los factores directamente relacionados con la aplicación de energía y alimentación de material, existen otros parámetros que también influyen en las características finales de la pieza. Dos a destacar son el grosor de capas y la disposición de la pieza respecto a la deposición de material. Por un lado, el grosor de capas es, en general para la AM, el factor determinante de la precisión geométrica, por lo que es importante determinar el grosor de capa adecuado en función de las dimensiones de la pieza y de sus detalles. La optimización de este grosor es complicada debido a que la selección de un grosor de capa en el software no siempre significa que dicho grosor se mantenga durante la impresión, debido a fluctuaciones en las condiciones de trabajo. Uno de los contribuidores a estas fluctuaciones es la acumulación de energía a medida que se añaden nuevas capas (**Fig. 13**). Así, con tal de optimizar la precisión, se han planteado sistemas de control para variar el grosor de capa en función de las condiciones en tiempo real del proceso y, como método alternativo, se han desarrollado procedimientos para determinar el grosor óptimo para condiciones específicas [76].

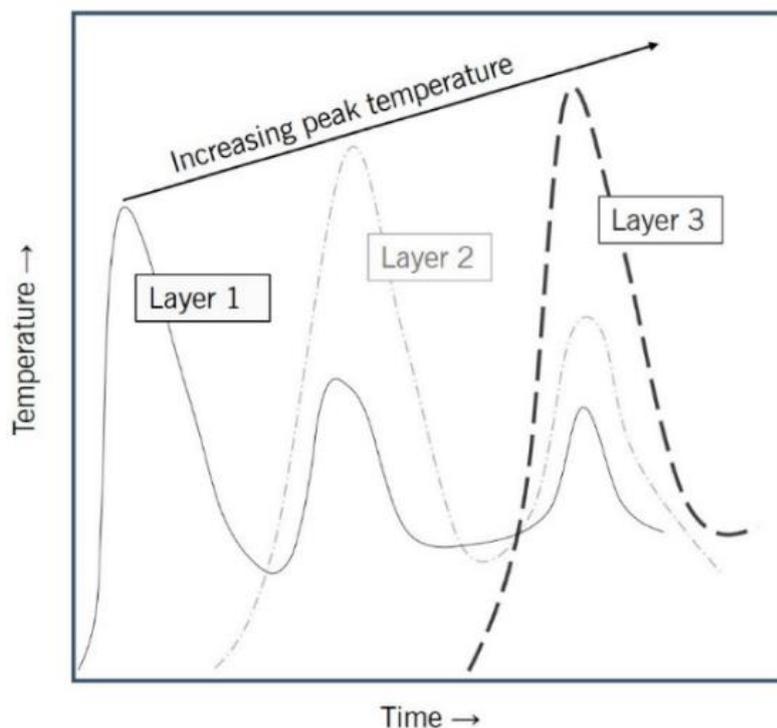


Fig. 13. Aumento de la temperatura pico frente al tiempo [22].

Por otro lado, la disposición de la pieza en relación con la deposición de las capas también tiene un efecto importante sobre la calidad de la pieza. Esto se debe principalmente a las diferentes cantidades de energía en forma de calor acumulada por las capas anteriores, asociadas a su vez a los diferentes tiempos de barrido (y consecuentemente a los diferentes tiempos de enfriamiento). Se ha determinado que la fabricación de una pieza de acero inoxidable 316L, con su elemento de mayor dimensión dispuesto horizontal o verticalmente da lugar a diferentes estructuras cristalinas,

obteniéndose con la disposición horizontal una microestructura homogénea y con la vertical una microestructura ramificada. Asimismo, dichas piezas presentan diferentes propiedades mecánicas debido a la disposición y dimensión de las capas (Fig. 14) [79].

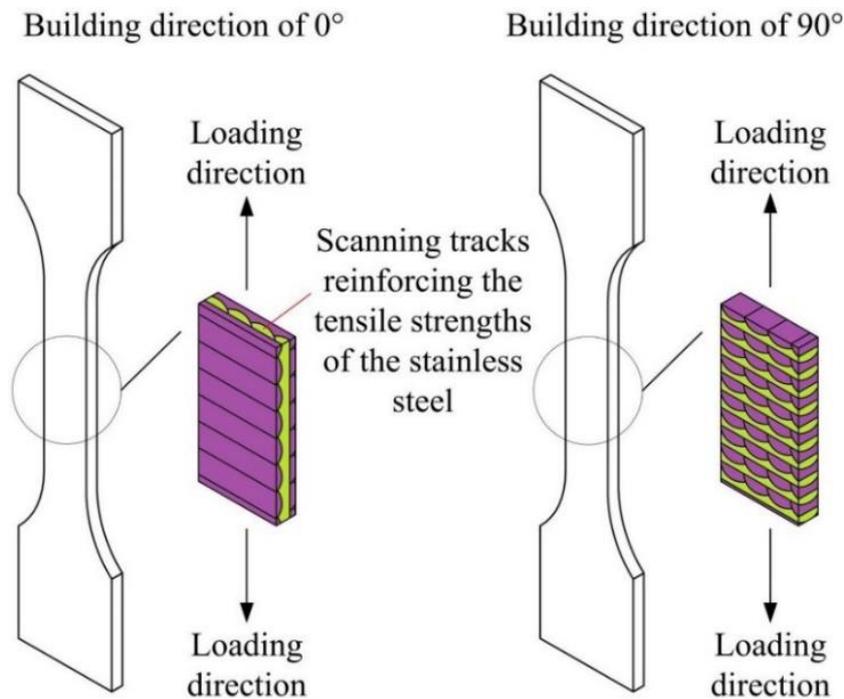


Fig. 14. Relación de propiedades mecánicas con la disposición de la pieza durante la fabricación [79].

Al combinar los parámetros mencionados anteriormente con la compleja trayectoria del polvo durante el proceso y el mecanismo de transferencia de energía en forma de calor (mediante conducción, convección y/o radiación), se obtiene un gran sistema de variables interconectadas. Esto genera una gran dificultad para cuantificar el efecto de cada factor de forma individual, por lo que se han desarrollado sistemas de análisis *in-situ* y modelos matemáticos para estudiar algunos de estos fenómenos y parámetros por separado, como, por ejemplo, la interacción entre las partículas de polvo y el láser en función del caudal másico de alimentación y de la velocidad y el tamaño de las partículas [84, 91, 95].

Existen algunos números adimensionales que ayudan a evaluar la relación entre diferentes parámetros de impresión con tal de simplificar o agilizar el proceso de optimización. Estos no fueron desarrollados específicamente para DED, pero se ha demostrado que son aplicables a esta tecnología. Uno de ellos es el número de Marangoni (M_a), que se define como [22]:

$$M_a = \frac{d\sigma}{dT} \frac{dT}{dx} \frac{L^2}{\eta\alpha} \quad (10)$$

Siendo L (mm) = longitud característica (define el área finita o perímetro para el estudio del material fundido), $d\sigma/dT$ (N/m·K) = gradiente de la tensión superficial del material fundido respecto a la temperatura, dT/dx (K/mm) = gradiente de temperatura del material fundido en función de la posición, η (Pa·s) = viscosidad del material fundido y α (cm²/s) = difusividad térmica.

El número de Marangoni es importante porque el gradiente de temperatura del metal fundido crea un gradiente de tensión superficial, lo que supone que el material en estado líquido sufra el efecto Marangoni, es decir, que el líquido fluya de tal forma que se aleje del punto de menor tensión

superficial. Esto causa una penetración irregular del metal fundido y contribuye a la porosidad. Por otro lado, como la AM se basa en la fabricación capa por capa de un objeto, es necesario que la DED sea capaz de crear una unión entre capas. Esta capacidad se denomina dilución (D) y se define como [22]:

$$D = \frac{d}{h+d} \quad (11)$$

Donde d (mm) = profundidad de material fundido por debajo de la superficie y h (mm) = altura de material depositado por encima de la superficie. Un valor de h alto significa una dilución baja y la ausencia de unión entre capas, resultado de un caudal másico alto o un aporte energético bajo. Un alto valor de d se debe a la situación contraria y da lugar a la unión entre capas, pero un valor demasiado alto es contraproducente ya que causa lo que se conoce como keyholing. El keyholing es una penetración del material fundido por el láser debido a un alto flujo de energía térmica, fenómeno que contribuye a la porosidad porque incrementa la posibilidad de que queden gases atrapados dentro del material. Existe un rango óptimo para D , siendo éste entre 0.1 y 0.3. En resumen, y como una simplificación del proceso, los valores más importantes en la técnica DED son el aporte energético por unidad de longitud y el caudal másico, ya que estos gobiernan los demás parámetros. Se definen como [22]:

$$\text{Aporte energético por unidad de longitud} = \frac{P}{v} \quad (12)$$

$$\text{Caudal másico} = \frac{M}{t} \quad (13)$$

Siendo P (W) = potencia de la fuente de energía, v (mm/s) = velocidad de barrido, M (g) = masa total de polvo necesario y t (min) = tiempo de impresión.

Se ha desarrollado un gráfico, recopilando datos de diversos artículos, que representa las zonas óptimas para el procesamiento de diferentes materiales mediante DED en referencia a estos dos parámetros (Fig. 15). En dicho gráfico se pueden apreciar las regiones óptimas de trabajo para cada material en función de los resultados obtenidos en dichos artículos. Además, se distinguen tres zonas en las que no se consiguen buenos resultados.

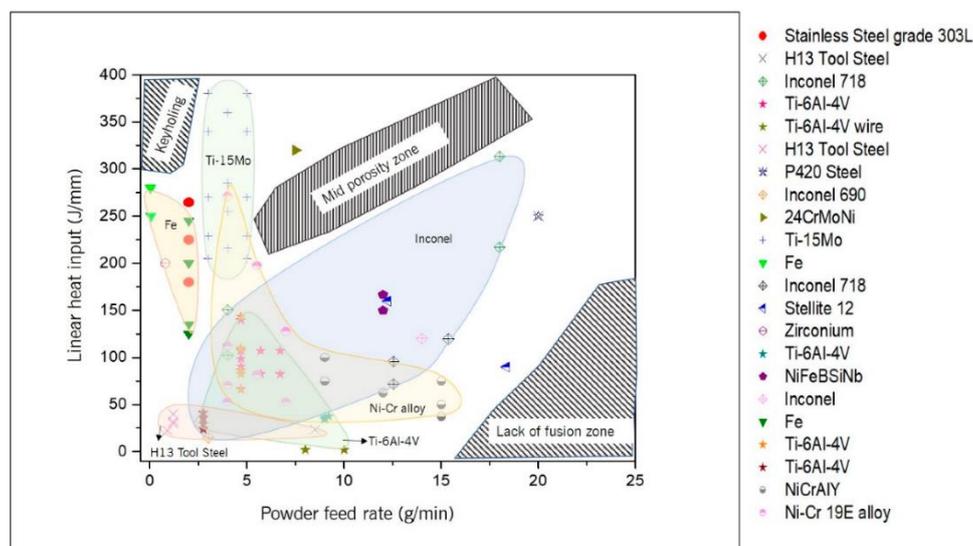


Fig. 15. Condiciones óptimas para el procesamiento de varios materiales mediante DED [22].

Así, queda evidenciado la influencia de los parámetros de impresión sobre la estructura cristalina y las propiedades del objeto impreso. Esto se debe a que, para un material específico, las condiciones principales que definen la microestructura resultante de la solidificación son el gradiente de temperatura en la interfaz sólido-líquido y la velocidad de solidificación. Una vez calculados estos dos factores, gradiente de temperatura (G , definido como $G = |\nabla T|$) y velocidad de solidificación (R), dicha microestructura se puede predecir a partir de “mapas de solidificación” (calibrados en función del material, del equipo y los parámetros de impresión). Siendo R expresada como [23]:

$$R = \frac{1}{G} \frac{\delta T}{\delta t} \quad (14)$$

Donde $\frac{\delta T}{\delta t}$ es la velocidad de enfriamiento. El desarrollo de las expresiones matemáticas que definen G y $\frac{\delta T}{\delta t}$ quedan fuera del alcance de este trabajo (para más información consultar referencia [23]).

El gran potencial de la DED para la fabricación de partes metálicas se ve reflejado en la gran variedad de aleaciones y compuestos que se han producido con esta técnica con tal de optimizar las propiedades de algunos materiales. Algunos ejemplos son: TiC revestido con níquel sobre Inconel 625 (mejores propiedades mecánicas) [71], $\text{TiAl}_4\text{Cr}_2\text{Nb}_2 + \text{TiC}$ (doble de dureza que TiAl_6V_4) [72], TiO_2 sobre la superficie de Ti poroso (incrementa la biocompatibilidad) [73], Ti + SiC (buenas propiedades electroquímicas y buen comportamiento ante la fricción, el desgaste y la lubricación) [74], hidroxiapatita y silicio en una matriz de TiAl_6V_4 (mayor dureza y resistencia al desgaste) [80] y fosfato de calcio sobre Ti (mayor dureza y resistencia al desgaste) [75]. A continuación, en la **Fig. 16**, se muestran algunos objetos fabricados con DED con tal de ilustrar su capacidad para producir piezas con una gran flexibilidad geométrica.

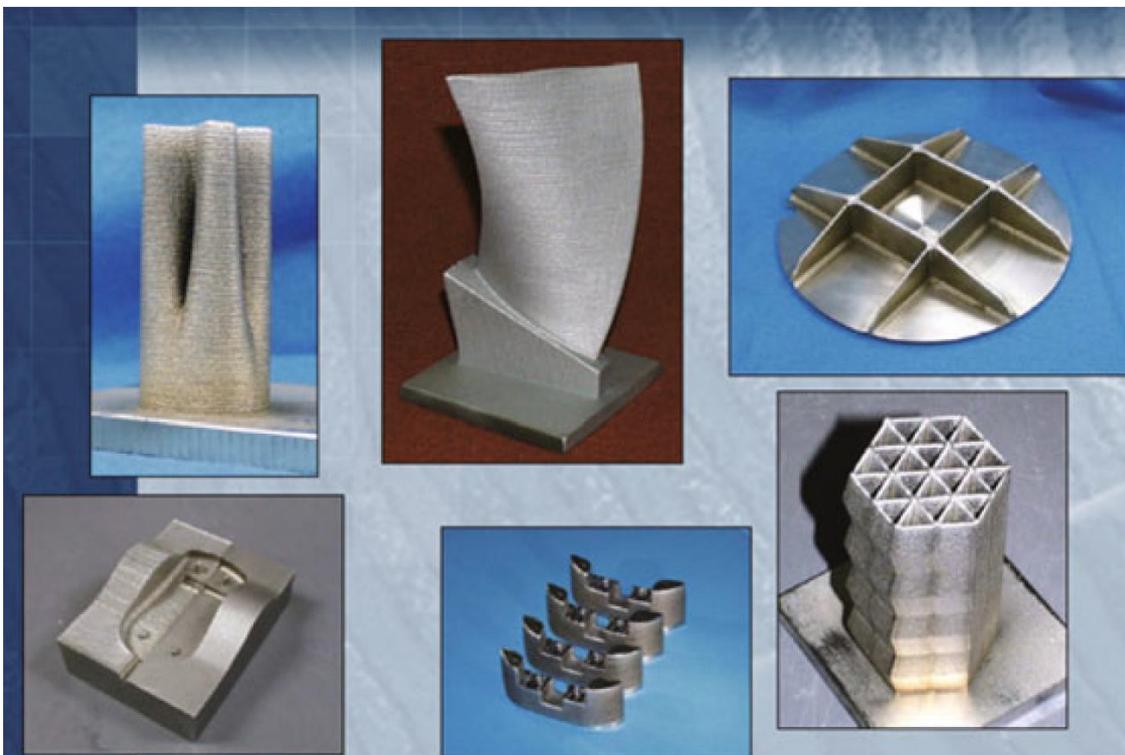


Fig. 16. Ejemplos de objetos fabricados con DED [27].

5.2.3 Material Jetting o Proyección de Material

La proyección de material o inyección de material (MJ, siglas referidas al término en inglés Material Jetting) es un proceso de AM que se basa en la deposición selectiva de gotas de material para llevar a cabo la fabricación de objetos [1]. La MJ se basa en los mismos principios que la impresión con inyección de tinta (IJP, siglas referidas al término en inglés Inkjet Printing), tecnología que utilizan las impresoras convencionales presentes en oficinas, empresas, industrias y hogares. Pero, mientras que la IJP deposita gotas de tinta sobre un sustrato (normalmente papel) para crear una imagen en 2D, la MJ deposita y solidifica gotas de material, capa por capa, sobre una plataforma para crear un objeto en 3D (es común el uso de un nivelador durante el proceso de impresión para asegurar una superficie lisa para la siguiente capa). La comercialización del proceso MJ empieza con el lanzamiento de la tecnología Polyjet (por Objet Geometries Ltd.) en 2001. Poco después, en 2002, 3D Systems entra al mercado con su versión de una impresora de MJ, bautizada como tecnología MultiJet [28].

Cabe decir que muchas veces IJP y MJ se utilizan de forma intercambiable en el ámbito de impresión 3D porque MJ es, en esencia, una nueva aplicación de la tecnología IJP. En este trabajo se utilizará MJ para hacer referencia a la técnica de impresión 3D porque se considera que es más específico y que conlleva menos ambigüedad.

Como se ha indicado anteriormente, las capas se forman depositando y solidificando material en forma de gotas. Este material, compuesto total o parcialmente de polímeros fotosensibles, normalmente se solidifica mediante diferentes medios. Los más prevalentes para lograr esta solidificación son reacciones químicas, inducidas mediante una fuente de luz ultravioleta que incide sobre el material depositado (excitando el material fotosensible y dando lugar a su solidificación), y/o la evaporación de un solvente. Otra opción menos común es el enfriamiento por debajo de la temperatura de solidificación. En la **Fig. 17** se representa, mediante un esquema genérico, el proceso de MJ.

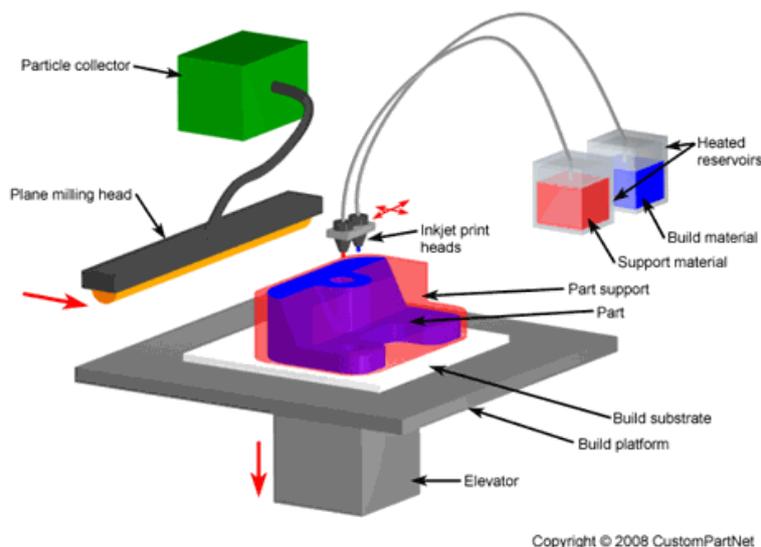


Fig. 17. Esquema genérico MJ [28].

Entre las características del proceso de MJ cabe destacar la posibilidad de utilizar varios materiales en una misma impresión, dando lugar a un alto nivel de libertad creativa, y la necesidad de la impresión de soportes durante la fabricación (al igual que la técnica DED). En MJ la separación de los

soportes al final del proceso se facilita a través del uso de un material diferente al utilizado para la pieza. Los sistemas de MJ suelen contar con un gran número de inyectores (entre cientos y miles) para incrementar la velocidad de impresión, pudiendo, teóricamente, utilizar una enorme variedad de materiales en la producción de una sola pieza [28].

En cuanto a la metodología de inyección, las principales opciones son la inyección continua (CIJ, del término en inglés Continuous Inkjet Printing) y la inyección por demanda (DOD, del término en inglés Drop-On-Demand). Estas técnicas se basan en las propiedades convencionales del flujo de fluidos (viscosidad, densidad, tensión superficial...) para formar las gotas. Como indican sus nombres, la CIJ opera creando un flujo continuo de gotas (eliminando y reciclando las innecesarias tras la impulsión), mientras que la DOD genera solamente las gotas necesarias de forma discontinua. Además, mientras que la CIJ posiciona las gotas utilizando campos eléctricos, la DOD lo hace mecánicamente. La CIJ puede generar gotas a una frecuencia mayor que 50 kHz, frente a los 20 kHz que ofrece la DOD. Aunque la primera ofrezca una impresión más rápida, la segunda es la más adecuada para la impresión 3D debido a la precisión que ofrece. El método DOD genera gotas con volúmenes entre 1 pl y 1 nl y diámetros entre 10 y 100 μ m respectivamente. Este método de operación tiene variantes en función del actuador que da lugar a la formación de las gotas, siendo los más utilizados los actuadores térmicos y los actuadores piezoeléctricos. Los primeros funcionan empujando el líquido con una burbuja de vapor creada a partir del calentamiento localizado del líquido, mientras que los segundos utilizan una señal eléctrica para deformar el material piezoeléctrico y desplazar el líquido. Entre estos dos actuadores el más utilizado en DOD es el piezoeléctrico, principalmente porque este es más accesible en la industria, pero también porque el actuador térmico limita los materiales a aquellos que puedan formar burbujas fácilmente [19, 29].

Como se ha descrito anteriormente, la MJ se basa en la deposición de gotas para la fabricación de un objeto tridimensional. Por ello, es necesario asegurar que el material utilizado (al que se suele referir como tinta) es apropiado para una deposición precisa. Estos requerimientos son análogos a los de BJ, es decir, la tinta debe ser capaz de generar gotas estables y homogéneas. Las gotas creadas deben contar con suficiente energía para salir del inyector y la salpicadura debe minimizarse. De hecho, esta similitud es tan grande que a veces se considera la BJ como una aplicación de la MJ sobre un lecho de polvo (aunque este no sea el caso ya que la BJ surgió una década antes). Así, las ecuaciones 1-6 (que hacen referencia a los números adimensionales de Reynolds, Weber y Ohnesorge), también son aplicables en MJ para seleccionar fluidos y parámetros de impresión. De igual manera, la **Fig. 9** del apartado de BJ, que define gráficamente las propiedades óptimas para la formación de gotas, también se puede utilizar para MJ.

En cuanto a la estabilidad de la gota, es necesario obtener valores de Z entre 1 y 10 para asegurar que una gota pueda generarse sin la formación de gotas satélites. Cabe mencionar que, aunque la gota generada no sea del todo estable y acabe formando gotas satélites, existe la posibilidad de que dichas gotas satélites se reagrupen con la gota principal en el aire. Para aumentar las posibilidades de que esto ocurra, es necesario mantener una determinada distancia (normalmente entre 1 y 3 mm) entre el inyector y la superficie sobre la que se imprime. Esta separación no puede ser demasiado grande ya que, por un lado, las corrientes de aire pueden afectar a la precisión de la situación de la gota en la superficie y, por el otro, el efecto de arrastre del aire sobre la gota supone una reducción de la velocidad de la gota a lo largo de su recorrido. Tanto el primer como el segundo caso incrementan su influencia cuando se disminuye el diámetro de la gota, siendo necesario acortar

la distancia a medida que se reduce el diámetro. Para cada tinta existe un diámetro mínimo de gota a partir del cual la distancia resulta demasiado pequeña y el uso de MJ se vuelve poco práctico. Estos son factores que se deben tener en cuenta cuando se pretende aumentar la definición a través de una reducción del diámetro de gota [19].

En MJ la solidificación ocurre después de la deposición, siendo necesario que las gotas depositadas mantengan una cierta estabilidad para conservar la geometría del diseño. Para comprender el proceso de MJ, es importante definir las interacciones que ocurren entre las gotas y la superficie antes de que tenga lugar la solidificación. La primera de estas interacciones ocurre en el momento de impacto de la gota sobre la superficie, donde las fuerzas de capilaridad, inercia y gravedad (aunque esta última pueda considerarse despreciable) determinan el comportamiento de la gota. Los números de Reynolds, de Weber y de Ohnesorge también influyen en esta interacción. Por ejemplo, se puede definir si el comportamiento de la gota se ve más influido por la capilaridad o por la inercia en función del número de Weber. Las diferentes etapas por las que pasa una gota desde su impacto pueden estudiarse utilizando un término de tiempo adimensional (t^*), que se define como [16, 30]:

$$t^* = t \frac{v}{d_0} \quad (15)$$

Siendo t (μs) = tiempo desde el impacto, v (m/s) = velocidad de impacto de la gota y d_0 (μm) = diámetro esférico de la gota antes del impacto.

Así, hasta $t^* = 0.1$ (equivalente a $< 1 \mu\text{s}$ para las condiciones de MJ) el comportamiento de la gota depende estrictamente de su energía cinética (su velocidad y masa). Tras esto, la gota experimenta oscilaciones, rebotes y una dispersión, que se rigen por las condiciones del impacto. Pasada la anterior etapa, la viscosidad y la tensión superficial causan una retracción de la gota y una reducción en las oscilaciones. Para $t^* \approx 10 - 100$ (0.1 - 1 ms) las fuerzas capilares ganan el dominio sobre el comportamiento y el esparcimiento de la gota, finalmente logrando el equilibrio cuando $t^* > 1000$. En la Fig. 18 se pueden apreciar estas etapas a través de una representación de la evolución del diámetro de la gota frente al tiempo [16].

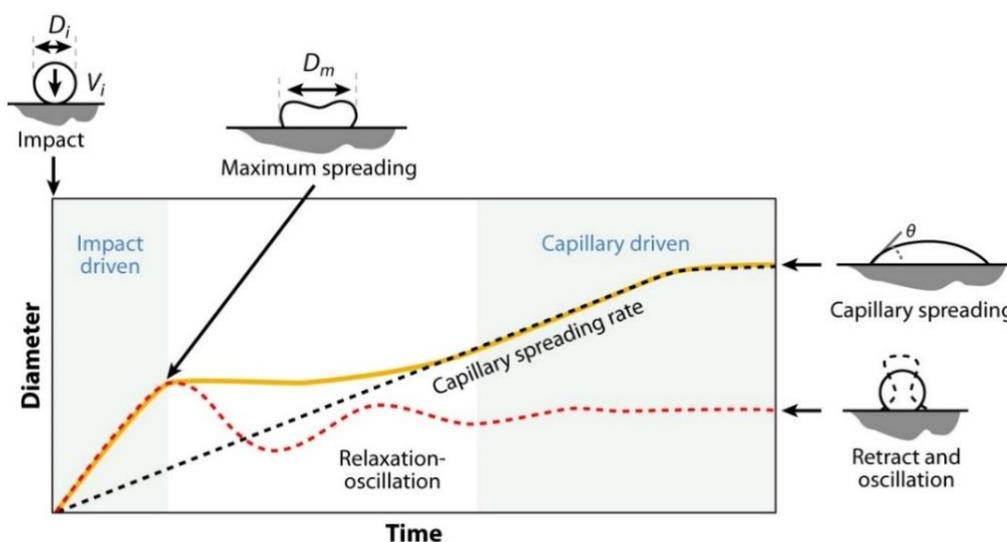


Fig. 18. Ilustración del comportamiento de una gota al impactar con una superficie sólida, siendo θ el ángulo de contacto con la superficie, D_i el diámetro inicial de la gota, D_m el diámetro máximo de la gota durante el impacto y V_i la velocidad de impacto [16].

La dispersión final de la gota tendrá un diámetro de contacto con la superficie (d_{eqm} , μm) determinado por su volumen y el ángulo de contacto en equilibrio (θ_{eqm}). Se expresa como [19]:

$$d_{eqm} = \beta d_0 \quad (16)$$

Siendo β :

$$\beta = 2 \left[\tan \frac{\theta_{eqm}}{2} \left(3 + \left(\tan \frac{\theta_{eqm}}{2} \right)^2 \right) \right]^{-1/3} \quad (17)$$

El valor de d_{eqm} (función lineal respecto a d_0) es el que determina la capacidad de resolución de la impresión, ya que el área que ocupa la gota es la unidad fundamental del proceso. El ángulo de contacto también es muy importante para controlar la precisión geométrica, debido a su influencia en la interacción entre gotas durante el proceso de impresión. Esta interacción es, en esencia, la superposición de las gotas, necesaria para la creación de un trazado uniforme. Una línea debe tener altura y anchura constantes y sus lados deben estar paralelos para que se considere apropiada para el proceso de MJ. Para lograr, a partir de gotas superpuestas, una línea con las características definidas anteriormente, el distanciamiento entre gotas debe establecerse de tal forma que se favorezca la unión entre gotas. Así, para grandes separaciones no se forma una línea sino una serie de gotas discretas (**Fig. 19 a**), mientras que para separaciones ligeramente menores que d_{eqm} sí se consigue una unión entre gotas, pero sin llegar a formar una línea que cumpla las condiciones anteriores (**Fig. 19 b**). Finalmente se consigue una línea adecuada si se disminuye todavía más la separación (**Fig. 19 c**), aunque una reducción excesiva da lugar a bultos (**Fig. 19 d**) [16].

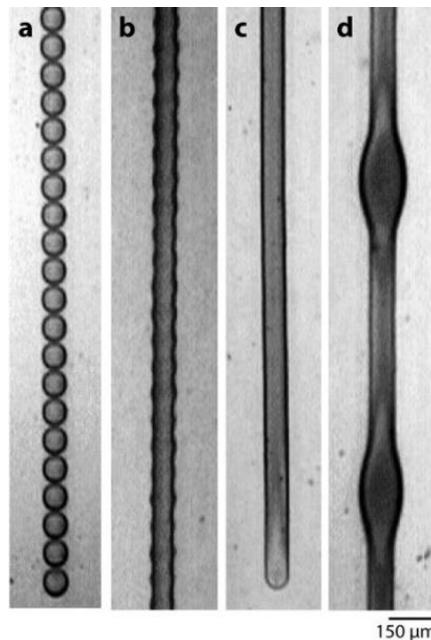


Fig. 19. Fotos de las diferentes disposiciones de las gotas [16].

La anchura de la línea (w) formada por la deposición de gotas, asumiendo que el volumen se conserva, se expresa como [19]:

$$w = \sqrt{2\pi d_0^3 \left(3p \left(\frac{\theta^*}{(\sin \theta^*)^2} - \frac{\cos \theta^*}{\sin \theta^*} \right) \right)^{-1/2}} \quad (18)$$

Siendo p (μm) = espaciado entre gotas y θ^* = ángulo máximo de contacto.

Asimismo, se necesita una superposición efectiva para lograr una línea estable. Esto se consigue cuando se imprime con un espaciado (p) inferior a un espaciado crítico (p_{max}). El espaciado crítico (p_{max}) se expresa como [19]:

$$p_{max} = 2\pi d_0 \left[3\beta^2 \left(\frac{\theta^*}{(\sin \theta^*)^2} - \frac{\cos \theta^*}{\sin \theta^*} \right) \right]^{-1} \quad (19)$$

A parte de determinar los procesos físicos y parámetros que influyen en la calidad de la impresión, cuestiones que se trataron de abordar con los anteriores párrafos, también es importante determinar la rapidez de producción de esta tecnología, ya que esto es un factor clave para su adopción en la industria. Para determinar este factor se debe estudiar la velocidad de deposición de gotas. En esta técnica se pueden establecer como condiciones límite $Re = 144$ y $Z = 10$. Así, la velocidad máxima (v_{max}) se puede expresar como [19]:

$$v_{max} = \frac{144\eta}{D\rho} \quad (20)$$

Siendo ρ (g/cm^3) = densidad del líquido, D (μm) = diámetro de la gota, v (m/s) = velocidad de impacto y η ($\text{mPa}\cdot\text{s}$) = viscosidad del líquido.

Y la máxima frecuencia de deposición (f) se puede calcular como v_{max} entre la distancia entre gotas en el aire (d_f , que suele tomarse como $20D$). Así, el caudal volumétrico máximo (\dot{V}_{max}) por inyector se puede expresar como [19]:

$$\dot{V}_{max} = V \cdot f = \frac{144\eta}{D\rho d_f} \cdot \frac{\pi D^3}{6} = 1.2 \frac{D\pi\eta}{\rho} \quad (21)$$

Asimismo, cabe comentar algunas de las problemáticas de la técnica. En cuanto a la tinta, es importante mencionar que no solo se utilizan polímeros, sino que también se pueden preparar dispersiones de, por ejemplo, cerámicas, con el fin de ampliar el abanico de aplicaciones de la técnica. Es evidente que la creación de estas disoluciones está limitada por los números adimensionales de Reynolds, Weber y Ohnesorge, debiéndose cumplir las condiciones previamente establecidas para que un fluido sea adecuado para MJ. Así, la viscosidad de las tintas está limitada a 20-30 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ y, en consecuencia, la concentración en volumen de solutos está igualmente restringida (20-30% en el caso de cerámicas). Existen otros factores limitantes a la hora de utilizar tintas con partículas suspendidas, relacionados principalmente con la obstrucción del inyector y con la solidificación de las gotas. En cuanto a lo primero, es importante que la solución sea estable y no tenga lugar floculación, ya que esto crea una aglomeración de partículas que puede llegar a atascar el inyector. Además, la floculación afecta a la distribución de las partículas en la disolución, creando inconsistencias en la homogeneidad de la impresión. Respecto a la solidificación, la principal problemática es la contracción. Esto se debe a que estas disoluciones contienen un bajo porcentaje de soluto (material que realmente formará parte del producto). Como estas tintas se solidifican o bien por evaporación del disolvente, o bien por la fotopolimerización del disolvente (debiendo este eliminarse en un proceso posterior), el volumen final de la pieza es notablemente menor que el volumen de material inyectado. Así, se podría decir que el gran desafío de MJ para su expansión y optimización es el desarrollo de tintas compatibles con el proceso. En la siguiente figura (**Fig. 20**) se muestran algunas piezas tras su fabricación mediante MJ [19, 29, 32].

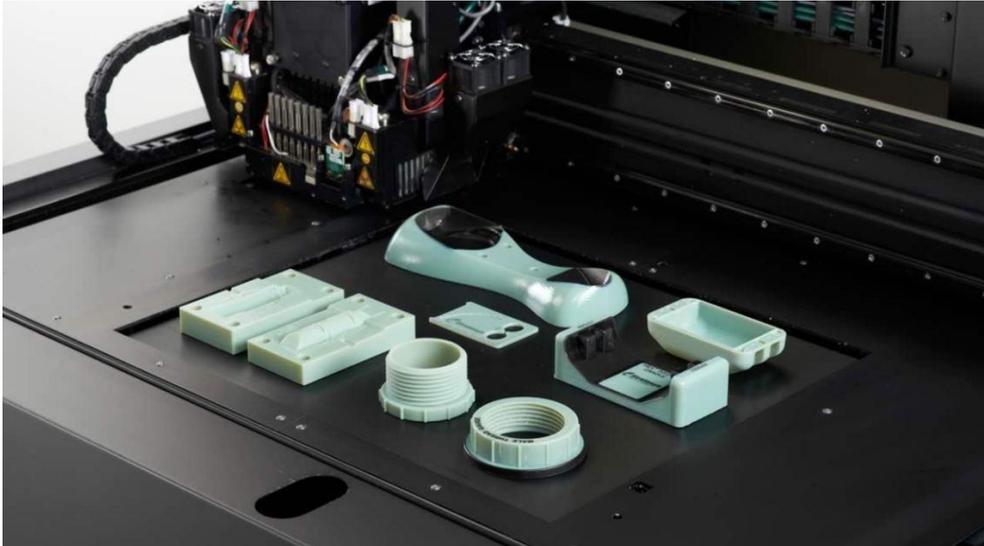


Fig. 20. Piezas fabricadas mediante MJ [66].

5.2.4 Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo

La fusión de lecho en polvo (PBF, siglas referidas al término en inglés Powder Bed fusion) utiliza, de forma similar a la técnica DED, un láser (p.ej. de CO₂ o Nd-YAG) o un haz de electrones para fundir material (metálico, cerámico, polímero o una mezcla) y formar estructuras. Sin embargo, mientras que la DED funde material a la vez que se realiza la alimentación, la PBF funde material previamente depositado en una cama o lecho. Asimismo, con la PBF no se necesita imprimir soportes porque el polvo sin usar sirve como soporte durante el proceso.

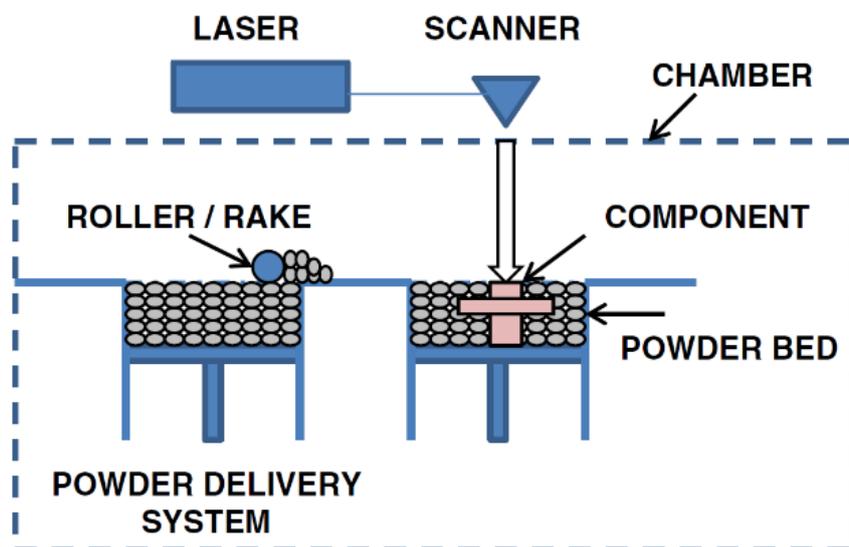


Fig. 21. Diagrama proceso PBF genérico [26].

El proceso de impresión mediante PBF, representado mediante un diagrama en la **Fig. 21**, empieza con el barrido de la superficie del lecho de polvo con el láser, fundiendo el material y creando la unión entre partículas en el formato establecido por el diseño CAD. Al terminar cada sección, el lecho se traslada verticalmente hacia abajo para añadir otra capa de polvo y solidificarla sobre la anterior hasta crear el componente final. La PBF tiene lugar dentro de una cámara de vacío o con una atmósfera inerte, siendo esto especialmente necesario cuando el polvo es metálico (para evitar su

oxidación). Para reducir el requerimiento de potencia del láser, la cámara se mantiene a una temperatura cercana a la de trabajo a través de un sistema de calefacción. Este sistema también permite una temperatura más homogénea a lo largo de la pieza durante la impresión, evitando posibles deformaciones debido a tensiones térmicas. De la misma manera, es necesario un periodo de enfriamiento controlado tras el proceso para lentamente aliviar las tensiones térmicas residuales. Una vez enfriado, la impresión puede retirarse de la cámara. Aunque esta pieza se considere terminada, es necesaria la eliminación de excesos de polvo y, en algunos casos, llevar a cabo postratamientos (principalmente para la reducción de la porosidad) y/o procesos de acabado en función de las especificaciones. En la **Fig. 22** se presenta el resultado obtenido al utilizar prensado isostático en caliente en una pieza fabricada mediante PBF, donde se puede observar una eliminación casi absoluta de la porosidad inicial [31, 86, 90].

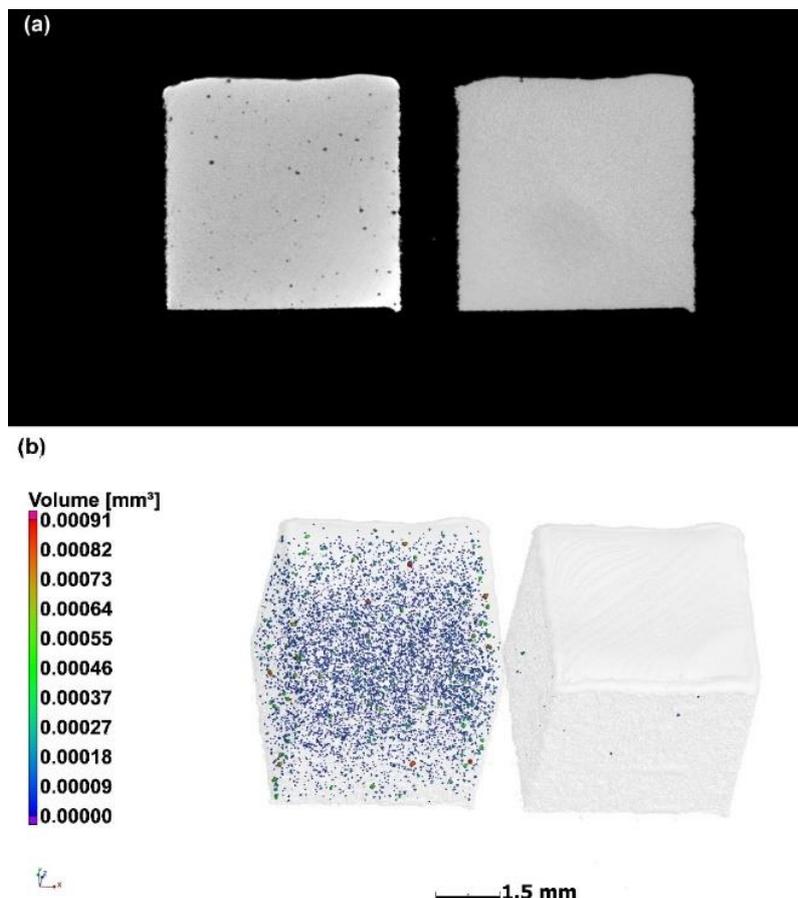


Fig. 22. Poros en una pieza fabricada con PBF antes (izquierda) y después (derecha) del prensado isostático en caliente [86].

El proceso PBF cuenta con diferentes mecanismos para lograr la fusión entre partículas. Estos son el sinterizado en estado sólido, el sinterizado químicamente inducido, el sinterizado líquido y la fusión completa. El primero logra la densificación de las partículas de polvo a una temperatura cercana al punto de fusión del material, no llegando al estado líquido, siendo su fuerza impulsora la minimización de la energía superficial, que es directamente proporcional a la superficie de las partículas. La materia sólida, al ser expuesta a altas temperaturas, minimiza su energía superficial mediante una reducción de su área superficial, lo que resulta en la unión entre partículas (**Fig. 23**). Cabe mencionar que, a medida que el área superficial disminuye, también se reduce la fuerza impulsora, necesiéndose tiempos de procesamiento más largos (o temperaturas más altas) para lograr

una pieza de mayor densidad. Asimismo, como un lecho de partículas más pequeñas resulta en una mayor área superficial por unidad de volumen, es preferible el uso de polvo con pequeños diámetros cuando se utiliza la sinterización en estado sólido como método de unión, ya que se consigue una sinterización más rápida y a menor temperatura. La unión conseguida con este método es suficiente para producir piezas con buenas propiedades mecánicas, pero con una baja densidad, la cual se puede incrementar con postratamientos [31, 32].

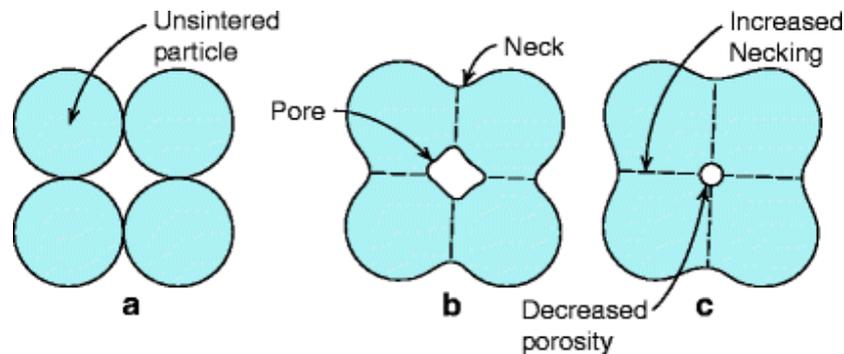


Fig. 23. Sinterizado en estado sólido. (a) Partículas antes del sinterizado. (b) Partículas expuestas a altas temperaturas aglomerándose con tal de minimizar su energía superficial a través de una reducción de su superficie. (c) A medida que avanza el sinterizado, las partículas se aproximan cada vez más y el tamaño del poro disminuye [31].

Por otro lado, el sinterizado químicamente inducido consigue enlazar las partículas de polvo a través de reacciones químicas (activadas mediante un incremento de temperatura). Estas suelen ocurrir entre dos tipos de polvo o entre el polvo y gases presentes en la atmósfera, dependiendo de las características específicas del material empleado. En cuanto a reacciones inducidas entre diferentes tipos de polvo, lo más común es la preparación de una mezcla que, al reaccionar, genere el producto necesario de manera exotérmica. Así, al sumarse el aporte energético de la reacción con el del láser, se consigue no solo sinterizar materiales con altos puntos de fusión, sino también reducir el consumo de energía. Un ejemplo de la interacción entre polvo y gas es el procesado del sistema Cr/Cr₂O₃ (86/14 molar) en presencia de una atmósfera con CH₄, que resulta en la generación de Cr₃C₂. También se han utilizado atmósferas con CO₂ (de hasta un 100% de concentración) para dar lugar a la formación de óxidos en piezas de acero inoxidable, resultando en un aumento de algunas de las propiedades del material en comparación con su fabricación en una atmósfera con argón [81, 102].

El tercer proceso es el sinterizado líquido, que utiliza una mezcla de polvo con diferentes temperaturas de fusión. Así, el material con menor temperatura de fusión se funde completamente y sirve como enlace entre las partículas sólidas del otro material. Se trata de una sinterización indirecta del material que se mantiene sólido, que suele ser el que más aporta a la integridad estructural de la pieza. Este proceso es común al tratar con materiales cerámicos o metálicos (materiales con temperaturas de fusión muy altas), ya que resulta difícil su procesado directo. El material secundario podría tratarse de un polímero, el cual se puede eliminar en un proceso posterior, o simplemente una mezcla de diferentes materiales metálicos y/o cerámicos con diferentes puntos de fusión. Finalmente, la fusión completa recurre a, como indica el nombre, fundir completamente el polvo para lograr la unión entre partículas. El gran aporte energético es suficiente para dar lugar a la fusión entre las sucesivas capas, de tal forma que se obtiene una unión fuerte y una alta densidad [31, 33].

Además, el método para añadir y dispersar las nuevas capas de polvo es determinante para la calidad de la impresión. Existen tres grandes problemas relacionados con la alimentación del polvo, siendo el primero la tendencia del polvo a aglomerarse y el segundo la posibilidad de la generación de chispas durante el proceso (lo que puede dar lugar a que el material arda). El tercero es la tendencia del polvo a flotar en forma de partículas suspendidas, pudiendo, por ejemplo, causar daños a partes mecánicas o cubrir sensores que aportan información al sistema de automatización (p. ej. sensores de temperatura, humedad, composición atmosférica...). Estos problemas se ven incrementados a medida que se disminuye el tamaño de partícula, pero, por otro lado, partículas más pequeñas permiten una mejor calidad de superficie, mayor precisión y capas más finas. Una de las propuestas para hacer frente a las problemáticas relacionadas con el uso de partículas finas es un sistema de alimentación híbrido que utiliza vibraciones ultrasónicas y vibraciones generadas por un mini motor para realizar la alimentación y dispersión de las partículas, ya sean estas esféricas o irregulares. Este sistema es capaz de evitar la aglomeración de partículas, generar flujos de alimentación constantes y grosores de capa uniformes [31, 96].

Las dos técnicas más conocidas bajo la clasificación PBF son la Selective Laser Sintering (SLS) y la Selective Laser Melting (SLM). Estas técnicas comparten el mismo proceso de impresión, pero con diferentes mecanismos de sinterizado y distintas fuentes de energía. La SLS fue la primera tecnología de la categoría PBF, siendo inventada por Carl R. Deckard et al. en Texas, quienes obtuvieron la patente en 1989 [34]. La SLS crea la unión entre las partículas de polvo primordialmente mediante el proceso de sinterizado en estado sólido (normalmente con un láser de CO₂), resultando en piezas con buenas propiedades mecánicas pero alta porosidad (mejorable mediante postratamientos, como el mostrado en la **Fig. 22**). En caso de que el material utilizado tenga un punto de fusión demasiado alto, la SLS no es capaz de procesarlos directamente (p. ej. materiales metálicos o cerámicos puros), pero puede recurrir al sinterizado líquido para procesarlos. Así, la SLS, con las condiciones de trabajo adecuadas, produce piezas de buena calidad con un gasto energético relativamente bajo (principalmente en comparación con técnicas basadas en la fusión completa).

Por otro lado, la SLM fue inventada en Alemania por Wilhelm Meiners et al., patentándose en varios territorios. La primera patente concedida fue la alemana en el año 1998 (DE19649865C1), seguida por la europea y la americana el año 2001 [35]. Se suele referir a la SLM como una variedad de la SLS, siendo éste el caso incluso en la patente americana de la misma donde se refiere a la técnica como "Selective Laser Sintering at Melting Temperature". La SLM utiliza un láser mucho más potente (Nd-YAG o láseres de fibra dopados con iones de tierras raras como el erbio o el iterbio) para dar lugar a un sinterizado por fusión completa, lo que permite un mayor control sobre la estructura cristalina final y piezas más compactas con mejores propiedades mecánicas. La SLM resulta más rápida que la SLS y además produce piezas con la forma y las propiedades deseadas sin necesidad de postratamiento. En definitiva, la SLM tiene la capacidad de producir partes complejas con mayor pureza, densidad y resistencia en menos tiempo que la SLS. Entre los inconvenientes de la técnica están que los grandes gradientes de temperatura, que pueden llegar a generar deformaciones y grietas. Estos problemas pueden ser mitigados con la optimización de los parámetros y un considerable precalentamiento del lecho [32].

La elección del gas protector en SLM, así como las condiciones de su alimentación, influyen de forma significativa en la fusión del material y, como consecuencia, en la precisión geométrica. Por ejemplo, para el acero inoxidable 304, se ha determinado que el uso de helio es más adecuado que el de

argón, ya que en este caso la atmósfera de argón da lugar a una fusión inestable y hace difícil controlar las dimensiones del material fundido, afectando directamente a la precisión. Además, el flujo de gas protector impacta a la porosidad final de la pieza [85, 98].

Otra técnica que ha ganado espacio entre las diferentes alternativas de PBF es la Electron Beam Melting (EBM). Esta técnica recurre a la fusión completa como método de unión entre partículas, al igual que la SLM, pero en vez de utilizar un láser utiliza un haz de electrones. Existen algunas discrepancias muy importantes entre la SLM y la EBM, que se deben a las diferencias físicas entre fotones y electrones. Un ejemplo es que la SLM opera en una atmósfera inerte, mientras que la EBM lo hace en una cámara a vacío. Estas diferentes condiciones atmosféricas son necesarias porque, mientras que los fotones no se ven afectados por una atmósfera gaseosa (siempre que el gas no absorba luz a la longitud de onda de trabajo), los electrones sí se ven afectados ya que interactúan con los átomos del gas, desviándose. Algunas de las desventajas de EBM frente a SLM son una peor calidad de superficie, una menor resolución y el hecho de que EBM se limita a materiales conductores (principalmente metales). Por otra parte, una gran ventaja de EBM es que se dirigen los electrones magnéticamente y no con espejos motorizados (como es el caso de la SLM). Así, EBM consigue una desviación instantánea del haz de electrones, mientras que la desviación de los fotones en SLM está limitada por la potencia de los motores y la masa de los espejos. Esto hace que la velocidad de barrido de EBM sea mucho más rápida, dando lugar a tiempos de impresión muy competitivos [31].

En PBF existen más de 100 de parámetros que afectan la calidad de la impresión. Estos parámetros pueden estar relacionados con la fuente de energía (la potencia y el diámetro del foco), el barrido (la velocidad y el patrón de barrido), el polvo (la geometría, la granulometría y las propiedades del polvo) o con las temperaturas de trabajo (las temperaturas del lecho y de la atmósfera). Evidentemente, existe una interrelación entre todos estos parámetros, siendo necesario ajustar el sistema cada vez que se modifique, por ejemplo, el material de impresión. Así, piezas impresas con materiales metálicos se benefician de cierto nivel de aleatoriedad en el patrón de barrido (se disminuyen las propiedades anisotrópicas y las tensiones térmicas) (Fig. 24), siendo necesario ajustar las condiciones de operación a dichas necesidades [83, 87, 92].

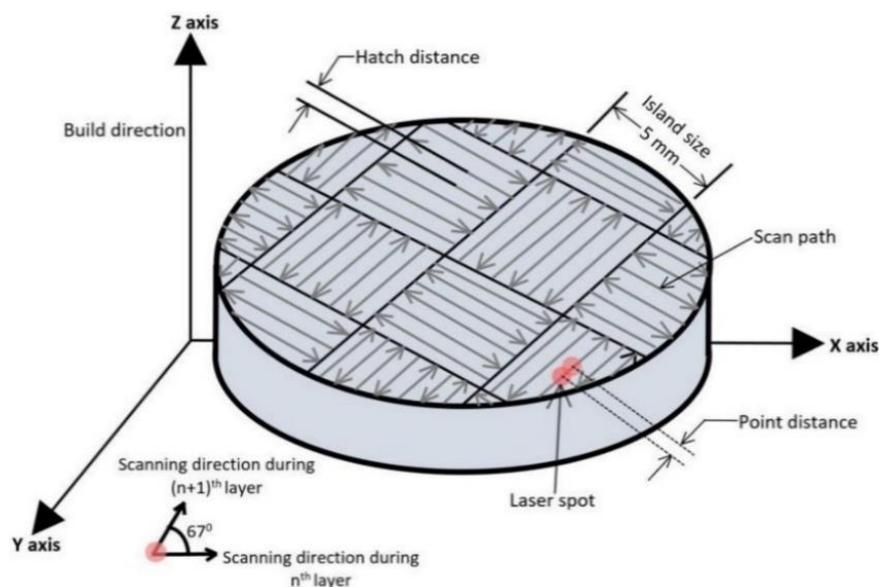


Fig. 24. Patrón de barrido variable [83].

Debido al alto nivel de complejidad descrito, la iteración experimental para determinar los parámetros de impresión adecuados puede resultar tediosa y costosa, teniendo que realizarse una serie de impresiones y ensayos para llegar a los valores apropiados. Una complicación añadida es que, por razones múltiples, no todas las capas requieren de los mismos parámetros. Así, se han desarrollado softwares y sistemas de control para determinar las condiciones óptimas de trabajo para la fabricación mediante PBF. Por ejemplo, ha sido desarrollado un algoritmo para optimizar archivos STL para PBF, alimentado por datos obtenidos de impresiones previas y/o simulaciones. En la **Fig. 25** se aprecia la gran diferencia de calidad para un mismo archivo CAD (**Fig. 25 a**) al utilizar valores constantes sin optimizar (**Fig. 25 b**) y al utilizar valores optimizados para cada capa (**Fig. 25 c**) [92].



Fig. 25. Impresión de un archivo CAD (a) con parámetros de PBF (b) sin optimizar y (c) optimizados [92].

Existen una serie de modelos termodinámicos y de transferencia de energía en forma de calor que pueden aplicarse a PBF para estimar, por ejemplo, la cantidad de energía necesaria para lograr una fusión efectiva (en función de las características del lecho). Como se ha mencionado anteriormente, la PBF y la DED utilizan el mismo método para aplicar energía sobre el material, sufriendo las mismas consecuencias relacionados con el historial térmico del material (p. ej. porosidad debida al keyholing o a la mala fusión entre capas). Así, el modelo presentado para la técnica DED (mediante la ecuación 14) también es aplicable a la PBF. Dicho modelo permite predecir, con la ayuda de los llamados mapas de solidificación y para una combinación de materiales específica, la microestructura de una pieza en función de los parámetros del proceso. Estos factores son, principalmente, la velocidad de barrido, el diámetro del foco, la potencia de la fuente de energía, el gradiente de temperatura entorno al material fundido, la velocidad de enfriado y la velocidad de solidificación. Estos mismos parámetros también pueden variarse para reducir o eliminar la porosidad, las tensiones térmicas residuales y la distorsión geométrica. Así, a partir de la experimentación, se pueden determinar las condiciones de operación óptimas según el material utilizado y la aplicación a la que esté destinada la pieza [23, 97, 99, 101].

De igual manera, específicamente en lo referente a aleaciones, es importante diseñarlas teniendo en mente el proceso de PBF y las rápidas velocidades de solidificación para minimizar la formación de grietas y porosidades, consiguiendo así hacer más eficiente el proceso de adaptación del proceso al material a partir de una adaptación del material al proceso [100].

En las siguientes figuras (**Fig. 26** y **Fig. 27**) se muestran objetos de titanio producidos mediante EBM (**Fig. 26 A**) y SLM (**Fig. 26 B, Fig. 27**). En dichas figuras se pueden observar piezas con estructuras complejas (**Fig. 26 A-a, Fig. 26 A-b, Fig. 26 A-c, Fig. 26 B-a** y **Fig. 27**) para ensayos mecánicos, implantes (**Fig. 26 A-d**), y una réplica de una vértebra humana (**Fig. 26 B-b**). Estos ejemplos demuestran el alto potencial de la PBF para fabricar objetos muy detallados con un alto nivel de precisión y definición, para aplicaciones en el sector de la medicina.

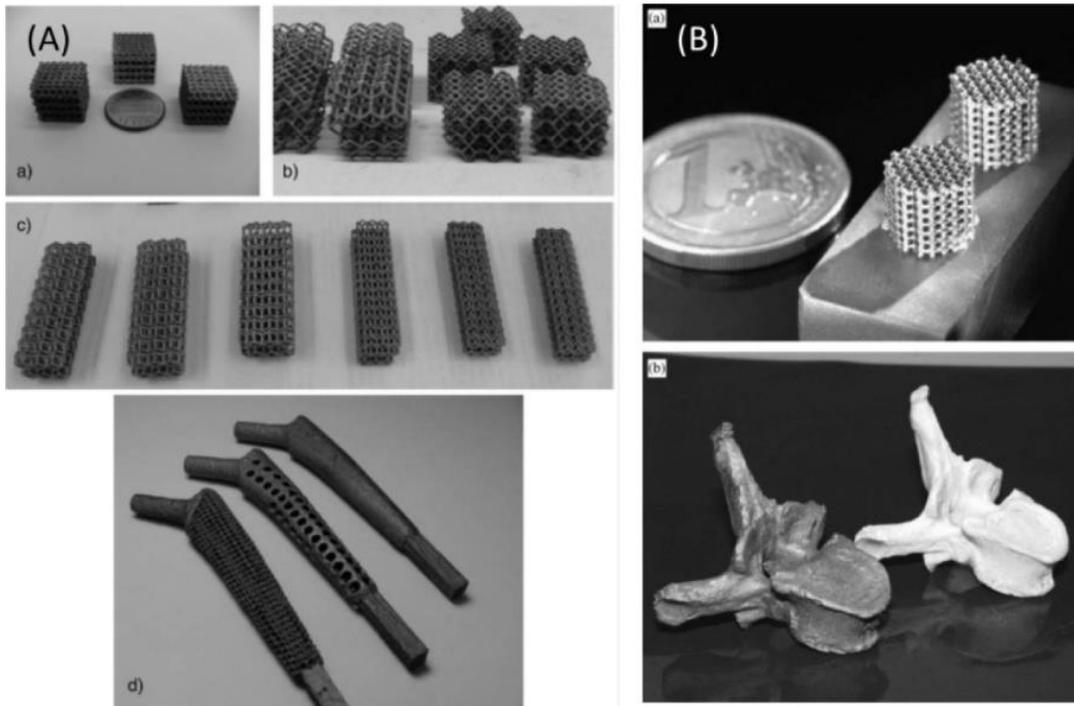


Fig. 26. Ejemplos de objetos fabricados con PBF, específicamente con (A) EBM y (B) SLM [36].

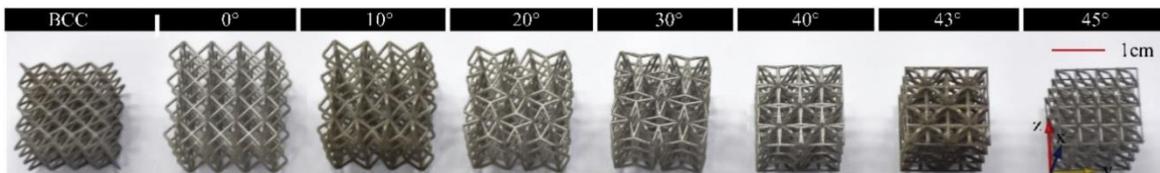


Fig. 27. Objetos enrejados fabricados mediante SLM para ensayos mecánicos [88].

Asimismo, PBF es capaz de fabricar, con geometrías complicadas, estructuras compuestas por aleaciones con propiedades que hacen poco práctica la producción mediante las técnicas tradicionales. En la Fig. 28 se muestran piezas con un alto nivel de detalle fabricadas con la intención de demostrar las capacidades de la técnica SLM para producir estructuras lo suficientemente precisas para reproducir estructuras óseas. En la figura se muestran piezas fabricadas con metales amorfos (o vidrios metálicos), específicamente, a la izquierda (Fig. 28 a) $Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}Ti_5$ y a la derecha (Fig. 28 b) $Ti_{47}Cu_{38}Zr_{7.5}Fe_{2.5}Sn_2Si_1Ag_2$ [103].

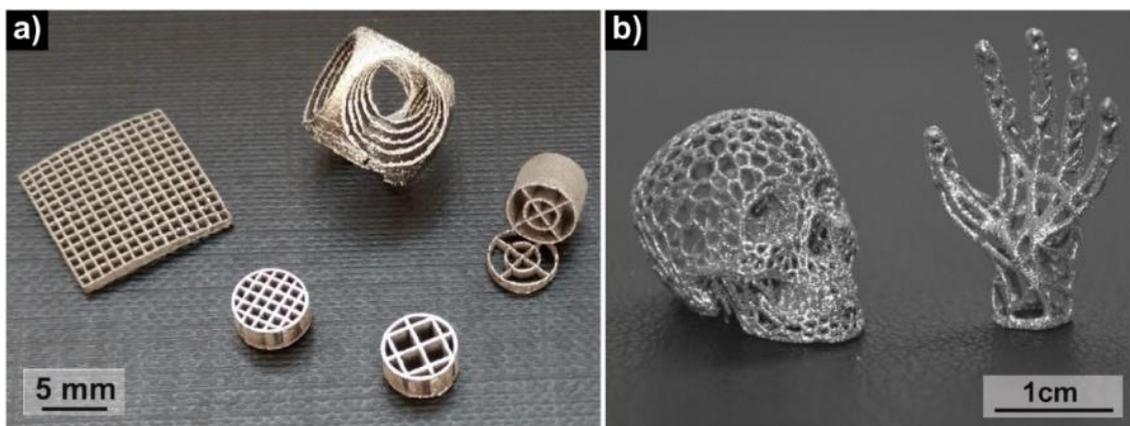


Fig. 28. Estructuras fabricadas mediante SLM con vidrios metálicos [103].

5.2.5 Sheet Lamination o Laminado de Hojas

El laminado de hojas es un proceso de AM que utiliza la superposición de láminas de material para formar objetos tridimensionales según un diseño CAD. La forma de dicho objeto se consigue separando el exceso de material cortándolo mecánicamente o con un láser. En laminado de hojas puede usarse un adherente, un aporte térmico o una fijación mecánica (p.ej. tornillos) para conseguir la unión entre capas [3, 37].

El laminado de hojas con adherente puede abordarse de dos maneras diferentes, cortando las láminas a medida que se unen (Bond-then-Form) o cortando las láminas para luego unir las (Form-then-Bond). El primer tipo de procedimiento típicamente consiste en situar la lámina, adherir la lámina a la superficie y, finalmente, cortar según el diseño. Las principales ventajas de este proceso son menores tensiones térmicas residuales tras el proceso, menor contracción y una gran variedad de materiales, que a su vez son fáciles de manejar, no tóxicos, estables y baratos. En 1987, Michael Feygin patenta en Estados Unidos el primer proceso de laminado de hojas, denominado Laminated Object Manufacturing (LOM), que pertenece a la categoría Bond-then-Form. Por su extensión, se describirá el laminado de hojas mediante Bond-then-Form utilizando el proceso LOM como referencia [3, 37].

En la **Fig. 29** se muestra un diagrama genérico del proceso LOM y sus componentes, que son, en general, una plataforma (**Fig. 29 a**), una alimentación de material (**Fig. 29 b**), un recolector de material sobrante (**Fig. 29 c**), un láser de CO₂ (**Fig. 29 d**), un mecanismo óptico para direccionar el láser según el diseño (**Fig. 29 e**) y un rodillo caliente para reducir el espesor de las capas (**Fig. 29 f**).

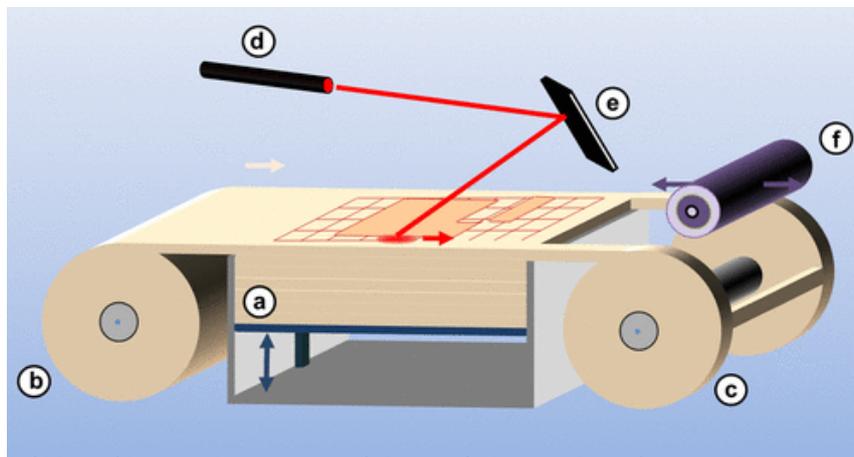


Fig. 29. LOM: Diagrama del proceso con láser [3].

El proceso LOM empieza con la alimentación de hojas de material y su laminación (deformación plástica) utilizando un rodillo caliente. Una vez laminada la hoja, se procede a cortarla, con un láser o con una herramienta afilada, de acuerdo con el diseño. En este paso es común que el material alrededor de la pieza se corte en pequeños fragmentos para facilitar su separación. Terminado el proceso de corte, la plataforma se desplaza hacia abajo y se alimenta una nueva capa de material. Los pasos anteriores se repiten hasta que se finaliza la pieza. Cabe mencionar que el material entorno a la pieza sirve como soporte estructural (no necesitando imprimir soportes), y que las hojas de material utilizadas en este método están recubiertas con un adhesivo, que cumple la función de agente enlazante entre las diferentes capas. Estos adhesivos suelen ser polímeros como, por ejemplo, el butiral de polivinilo [3].

Este proceso es especialmente atractivo para la producción de grandes estructuras (quizás el más atractivo para esta aplicación entre las técnicas AM), ya que capaz de producir objetos con rapidez y bajo coste. Sin embargo, el proceso de eliminación del material excedente conlleva mucho tiempo, y esto se ve acentuado a medida que se incrementa la complejidad de la pieza, resultando en un límite de complejidad geométrica de las piezas que se pretendan producir mediante LOM. El nivel de detalle de esta técnica está limitado por la precisión de corte y el grosor de las láminas. Las piezas producidas por LOM suelen necesitar un postratamiento y sus propiedades mecánicas dependerán en gran parte del adhesivo utilizado para enlazar las capas [3].

Por otro lado, en el proceso Form-then-Bond las láminas se cortan antes de unir las. Esta variante permite la fabricación de piezas con canales en su interior, cosa que es imposible con el método Bond-then-Form, ya que el material excedente quedaría atrapado en el interior de la pieza. Otras ventajas de este método frente al Bond-then-Form son que no existe el riesgo de cortar capas inferiores y que no es necesario el tedioso proceso de separación de material excedente. Sin embargo, se necesitan soportes durante el proceso y el posicionado de cada capa debe ser extremadamente preciso. Finalmente, el laminado de hojas con enlace térmico necesita utilizar uno de los procesos anteriores (Form-then-Bond o Bond-then-Form) para situar y cortar las láminas. Ha sido considerablemente estudiado para la fabricación de partes metálicas [67, 68], mostrando ser un método efectivo para la fabricación de objetos metálicos relativamente complejos. Sin embargo, este método no ha ganado mucha atención en el mercado, principalmente por las desventajas asociadas a los procesos Form-then-Bond y Bond-then-Form. En cuanto al enlace mecánico, este tiene su aplicación para la fabricación de piezas sencillas, eliminando la necesidad de un adherente o un aporte energético. Es un proceso rápido y barato que permite el desmontaje de la pieza para su reparación [37].

Los métodos expuestos anteriormente han ido perdiendo atención de la comunidad científica y del mercado a lo largo de los últimos años, ya que sus desventajas no permiten una producción competitiva (salvo algunas excepciones para aplicaciones muy específicas). Existe otra técnica más de laminado de hojas, comercializada en Estados Unidos en el año 2000, denominada soldadura ultrasónica (UC, siglas referidas al término en inglés Ultrasonic Consolidation). Esta técnica ha captado la atención de la industria debido a su capacidad de producir piezas con circuitos electrónicos integrados. Este método fabrica piezas depositando hojas de material (con 100-150 μm de grosor cada una) hasta formar una capa de las dimensiones necesarias. Cada capa suele componerse de cuatro hojas depositadas verticalmente una sobre una. Una vez depositada una capa, se elimina mecánicamente el material excedente en función del diseño. Esta adición y eliminación de material se repite hasta finalizar el objeto [37].

La deposición de material en UC se hace sobre una plataforma de impresión que se mantiene a una temperatura entre la temperatura ambiente y 200 $^{\circ}\text{C}$. La unión entre las hojas metálicas se lleva a cabo con un sonotrodo giratorio, que se desplaza sobre la superficie del material emitiendo una onda ultrasónica sobre el mismo y presionándolo contra la plataforma (o la capa anterior). La presión y la onda ultrasónica inducen una deformación plástica en el material, dando lugar a la fusión entre capas. La onda ultrasónica en este proceso suele trabajar a una frecuencia de 20 kHz. Este método de fusión supone una ventaja importante a la hora de trabajar con metales, ya que se consigue crear una fuerte unión entre capas sin la necesidad de exponer el material a altas temperaturas, lo que supone una menor deformación relacionada con tensiones térmicas [37].

Además de la fusión a baja temperatura, el mecanizado también supone ciertas ventajas. La más interesante es que la precisión y la calidad de la superficie dejan de depender del grosor de las capas, pasando a depender del método de mecanizado utilizado. Así, UC se diferencia de los demás procesos de AM al no depender intrínsecamente del grosor de capa para fabricar objetos con alta calidad superficial. La técnica UC tiene la capacidad de fabricar piezas geométricamente complejas, pudiendo utilizar múltiples materiales en la misma impresión y, además, permitiendo integrar circuitos electrónicos en los objetos durante su fabricación [37].

5.2.6 VAT Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba

La técnica de fotopolimerización en cuba (VP, siglas referidas al término en inglés VAT Photopolymerization) se basa en proyectar una luz (ya sea esta una luz ultravioleta, una luz visible o una luz digital de alta definición) sobre una resina fotosensible con el fin de solidificarla, cosa que es posible gracias a la excitación que causa la luz sobre este tipo de materiales. Al solidificarse cada capa el componente se aleja mecánicamente del foco de luz para que la resina sin curar se pueda procesar y formar así, capa por capa, una estructura tridimensional. La excitación de estos materiales se conoce como fotopolimerización, que consiste en la generación de polímeros a través de reacciones químicas iniciadas por la interacción entre especies fotosensibles y el foco de luz (a una longitud de onda adecuada para el material). Es común utilizar una mezcla de materiales activados a diferentes longitudes de onda para maximizar el aprovechamiento de la radiación. Las cinéticas de estas reacciones son complejas y, para conseguir las propiedades mecánicas deseadas, se requieren procesos de posttratamiento (como curados térmicos) que también conllevan cierta complejidad a la hora de optimizarlos. La VP permite una gran precisión (hasta 10 μm), pero la velocidad de producción está limitada por las velocidades de reacción durante la impresión y por los posttratamientos necesarios [25, 38].

Entre las técnicas de VP más utilizadas está la Estereolitografía (SLA, siglas referidas al término en inglés Stereolithography), el primer tipo de AM comercializado, siendo patentada en Estados Unidos por Charles W. Hull en 1984. En las figuras **Fig. 30** y **Fig. 31** se muestran dos configuraciones genéricas de un sistema SLA. La SLA genera el objeto tridimensional realizando un escaneo punto por punto de la superficie del tanque (ya sea la inferior o la superior). Otra técnica extendida es el Procesado por Luz Digital (DLP, siglas referidas al término en inglés Digital Light Processing), que se diferencia de la SLA en el método de proyección. En DLP la luz se proyecta formando la imagen 2D completa mediante un dispositivo digital de micro espejos (DMD), generando cada capa de una sola vez, en contraste con el sistema punto por punto de la SLA. Para ambas técnicas, el grosor de capa y, como consecuencia, la exactitud en el plano perpendicular al tanque de resina, dependen de la penetración de la luz (factor que puede ajustarse con aditivos como el pireno, $\text{C}_{16}\text{H}_{10}$) [3].

En cuanto a los sistemas de SLA, existen dos posibles configuraciones, de arriba hacia abajo (top-down) o de abajo hacia arriba (bottom-up). Éstas se diferencian fundamentalmente en la posición de la fuente de luz respecto al tanque, factor que, a su vez, genera una serie de discrepancias entre el modo de operación de los dos sistemas. En un sistema top-down (**Fig. 30**), el láser se encuentra posicionado por encima del tanque, generándose la pieza a la vez que ésta se sumerge progresivamente en la cuba. El mecanismo que soporta y traslada la plataforma de impresión se desplaza hacia abajo al curarse cada capa. Dicho desplazamiento se hace de tal forma que la pieza esté cubierta por líquido suficiente para la preparación de la siguiente capa. El gran inconveniente de esta configuración surge del movimiento de la plataforma, que causa una perturbación en la

superficie de la resina. Esto hace necesario, tras cada movimiento de la plataforma, pausar la fabricación para que la superficie se recupere, generando un gran incremento en el tiempo total de producción. Para asegurar la homogeneidad de la superficie y optimizar la precisión geométrica, los sistemas top-down deben incluir un mecanismo para nivelar la superficie (se recomiendan resinas poco viscosas para facilitar este tipo de procedimiento) [106].

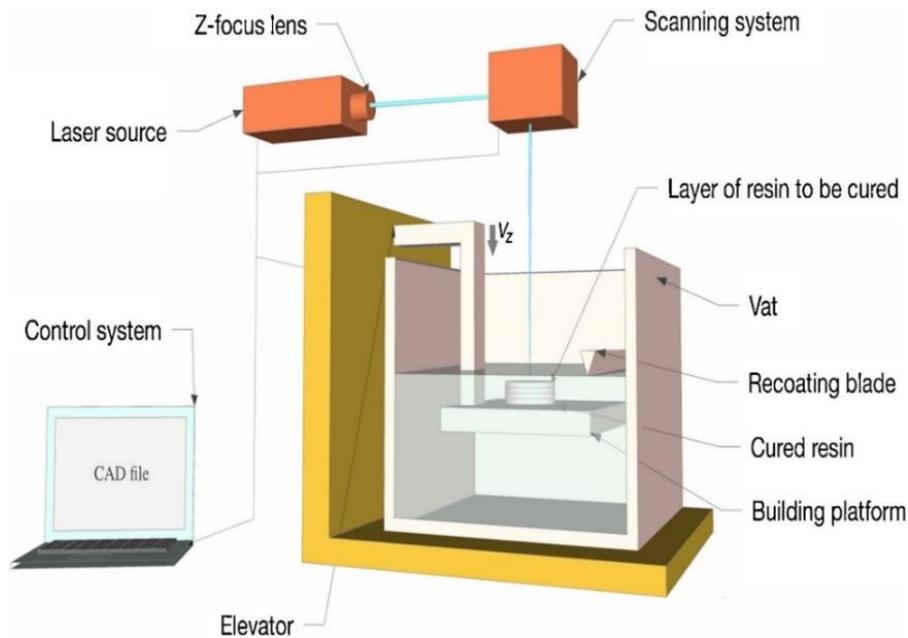


Fig. 30. Diagrama genérico del proceso SLA (top-down) [106].

La configuración bottom-up (Fig. 31) elimina gran parte de estas problemáticas, ofreciendo mejores resoluciones y superficies de mejor calidad que la top-down. Este tipo de sistema SLA expone la resina al láser desde abajo, a través de una superficie transparente. Al curarse la resina presente en el fondo de la cuba se descartan las dificultades y los tiempos muertos relacionados con la perturbación de la superficie. Además, se consigue una mayor conversión debido a la ausencia de oxígeno atmosférico, que inhibe la fotopolimerización de algunos monómeros. Entre la superficie transparente y la plataforma (o la anterior capa) se cura el material, por lo que es necesario que el fondo del tanque sea poco adherente y permita que la resina curada se separe fácilmente al moverse la plataforma. Lograr esta separación de forma consistente es el mayor inconveniente de estos sistemas [106].

Los materiales utilizados en VP tienen, como se ha mencionado anteriormente, la capacidad peculiar de solidificarse al interactuar con una radiación lumínica de una determinada longitud de onda (que varía en función del material). Estos materiales surgen por primera vez en los años 60, pero las resinas destinadas a VP aparecen a finales de los años 80, siendo más comunes las resinas de acrilatos y las de epóxidos. Las resinas de acrilatos forman piezas con un alto grado de contracciones y deformaciones tras el curado, mientras que las de epóxidos resultan en piezas más fuertes, con menos problemas de contracción y mejor definición. Sin embargo, las resinas de epóxidos tardan más en curarse y las piezas resultan más frágiles. Así, las formulaciones más comunes de resinas en el mercado son híbridas, combinando las ventajas de ambas y reduciendo sus características contraproducentes [104, 107].

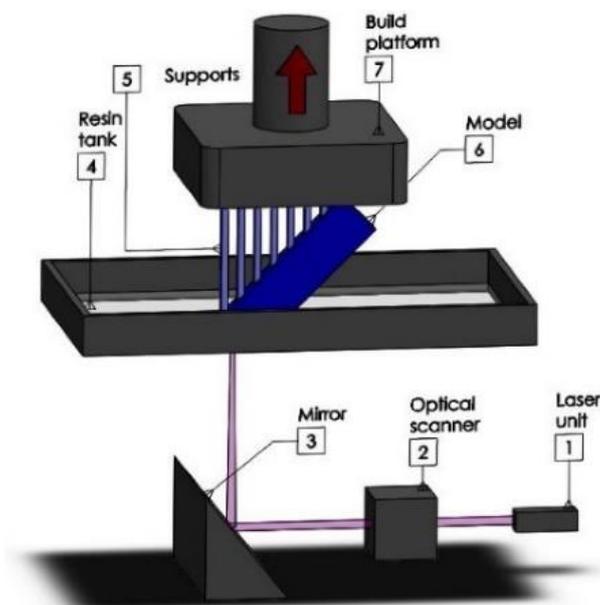


Fig. 31. Diagrama genérico del proceso SLA (bottom-up) [65].

Una resina fotosensible contiene una serie de compuestos para favorecer la reacción de fotopolimerización, siendo los principales ingredientes los fotoiniciadores, que actúan como catalizadores, y los monómeros, que forman el polímero. Además, una resina incluye una serie de aditivos para reforzar las propiedades del material, aumentar la conversión de las reacciones de polimerización y favorecer la generación de los productos deseados. En cuanto a los fotoiniciadores, estos son los que posibilitan la incitación de la polimerización a través de la exposición de la resina a la luz. Al ser expuestos a una determinada radiación, los fotoiniciadores se descomponen, liberando cationes (p. ej. SpeedCure 976s de Lambson) o generando radicales libres (p. ej. Irgacure® 2959). Dichos cationes o radicales libres inician la polimerización al reaccionar con un monómero y, una vez iniciada la reacción, ésta se propaga hasta que no queden especies reactivas disponibles (o hasta que éstas se desactiven) [104].

Cabe decir que la polimerización tiene lugar de tal forma que se generan cadenas largas y rectas de polímeros, que generalmente son demasiado frágiles para resistir los esfuerzos mecánicos involucrados en el proceso. Por este motivo, es de interés incitar, a través de un exceso de energía, el enlace entre múltiples cadenas para reforzar las propiedades mecánicas del material. Para facilitar la formación de esta red de enlaces entre cadenas es común añadir monómeros con grupos funcionales que promuevan la formación de dichos enlaces secundarios. Siendo la precisión la ventaja estrella de la VP, también se añaden a las resinas aditivos para disminuir la profundidad de penetración del láser, ya que la profundidad de penetración es la que define la resolución en el eje vertical (de manera análoga al grosor de capa en las demás técnicas de AM) [3, 107].

La eficacia de la iniciación y propagación de la reacción de polimerización depende directamente de la capacidad de absorción de la resina en la longitud de onda emitida por el láser. En función de la compatibilidad de la resina con la radiación, el tiempo de exposición necesario para generar una buena conversión varía. Por ejemplo, el fotoiniciador catiónico SpeedCure 976s nombrado anteriormente opera de manera óptima cuando es expuesto a longitudes de onda sobre 280-290 nm. Además, como la radiación se dispersa de manera diferente en función del material, la profundidad y la anchura que obtiene el material fotopolimerizado depende de las características de

la resina (esto afecta directamente a la precisión geométrica). Así, para unas mismas condiciones de trabajo, diferentes resinas generan impresiones de distinta calidad. Asimismo, se ha comprobado que parámetros de impresión como la potencia del láser, la velocidad de escaneado y el tiempo de exposición también afectan de forma notable el tiempo de curado, la precisión geométrica y la calidad de la impresión [104, 105].

En SLA existen varios factores relacionados con la interacción de la luz con la resina. Algunos de estos son manipulables mediante parámetros de impresión, como la potencia del láser y la velocidad de escaneado, pero otros dependen únicamente de características intrínsecas de la resina. Uno de estos factores intrínsecos es la energía crítica (E_c , J/cm²), energía mínima necesaria para lograr la solidificación. Como la penetración de la luz está limitada por la dispersión y absorción de esta, se deduce que la radiación pierde energía en el proceso de penetración. Así, la luz tiene su pico energético (E_{max} , J/cm²) en la superficie de contacto. Cuando su energía se reduce a un valor por debajo de E_c la luz pierde la capacidad de solidificar la resina, llegando a la profundidad máxima de curado (C_d) [106].

La profundidad máxima de curado (C_d , μm) se expresa como [107]:

$$C_d = D_p \ln \left(\frac{E_{max}}{E_c} \right) \quad (22)$$

Siendo D_p (μm) = profundidad a la que la luz pierde un 37% de su intensidad (factor que depende exclusivamente de la resina).

Y E_{max} se expresa como [107]:

$$E_{max} = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \right) (P / B v_s) \quad (23)$$

Siendo B (μm) = radio del foco, v_s (cm/s) = velocidad de escaneado y P (W) = potencia del láser.

Combinando las ecuaciones 22 y 23 se concluye que, para una resina determinada, C_d se puede controlar mediante la variación de la intensidad de exposición a la luz a la que se somete la resina. Esto es importante porque, como se ha mencionado anteriormente, la profundidad de penetración es la que define la resolución en el eje vertical. Además, este parámetro limita el grosor de capa y define la fuerza del enlace entre capas, ya que la penetración debe ser siempre mayor que el grosor de la capa (en un 10-35%) para asegurar la integridad de la pieza. Por otro lado, la resolución en el eje horizontal la determina la máxima anchura de curado (L_w , μm). En SLA es importante que L_w sea suficiente para que las líneas de curado se superpongan, con tal de minimizar la cantidad de material insuficientemente curado [106].

La máxima anchura de curado (L_w , μm) se expresa como [107]:

$$L_w = B \left(\sqrt{\frac{C_d}{2D_p}} \right) \quad (24)$$

Se concluye que, mediante la selección adecuada de la resina y de los parámetros mencionados, es posible optimizar la fabricación de piezas mediante SLA. En cuanto a las demás técnicas VP, éstas se rigen por factores similares, pero aplican la luz de forma diferente. Así, la optimización de las demás técnicas también es posible a través de una adaptación de las expresiones presentadas.

Las resinas, sin embargo, no tienen por qué contener solamente materiales orgánicos. Con tal de ampliar el rango de materiales y el abanico de aplicaciones de la técnica, se pueden preparar disoluciones con suspensiones de diferentes materiales. De manera similar a MJ, las técnicas de VP son capaces de fabricar materiales cerámicos mediante la adición de partículas cerámicas a la resina, de tal forma que las partículas suspendidas se queden atrapadas durante el proceso de polimerización. Posteriormente, es necesario tratar la pieza a altas temperaturas para eliminar los componentes orgánicos, aunque esto debe hacerse de manera progresiva y controlada para evitar altas tensiones térmicas y agrietamientos. La preparación de estas suspensiones debe hacerse teniendo en cuenta el aumento de la viscosidad de la resina, la homogeneidad de la disolución y la dispersión de la luz debido a las partículas cerámicas, ya que estos factores tienen un efecto negativo sobre la unión entre capas y la precisión geométrica. Aun así, como la VP no conlleva la utilización de inyectores, hay menos limitaciones a la hora de preparar disoluciones que en MJ. Por ejemplo, con VP es posible utilizar disoluciones con hasta un 50% de concentración másica en material cerámico, mientras que con MJ solo son viables suspensiones de hasta un 20-30% [3, 25].

Como se ha establecido anteriormente, la impresión 3D o AM es una técnica de fabricación que proporciona un alto grado de flexibilidad, personalización y complejidad. Entre las técnicas AM, los procesos de estereolitografía destacan por su precisión. Para reflejar esta superioridad se presentan, en las siguientes figuras, ejemplos de objetos fabricados mediante estereolitografía con un alto nivel de detalle y dimensiones especialmente pequeñas. En la Fig. 32 se muestran tres estructuras cerámicas impresas mediante SLA, con suspensiones de BaTiO₃ (40% de concentración en volumen). Por otro lado, en la Fig. 33 se presentan tres ejemplos de estructuras biodegradables con aplicación en la ingeniería de tejidos, una con poros hexagonales (Fig. 33 a, siendo la Fig. 33 c una ampliación), una con poros cúbicos (Fig. 33 b, siendo la Fig. 33 d una ampliación) y una con una compleja red de poros interconectados (Fig. 33 A y sus respectivas ampliaciones).

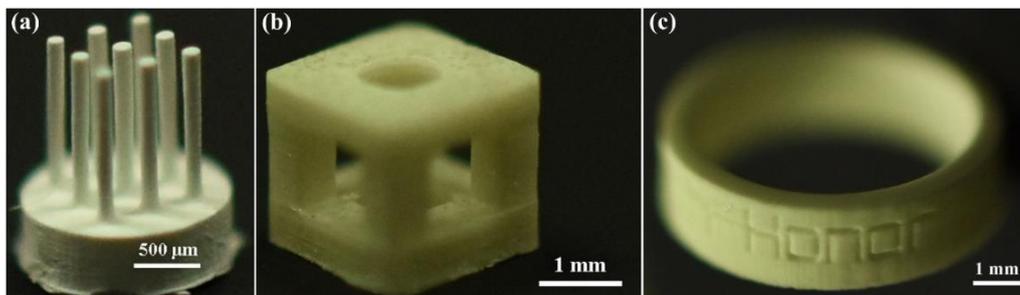


Fig. 32. Piezas cerámicas fabricadas mediante SLA [108].

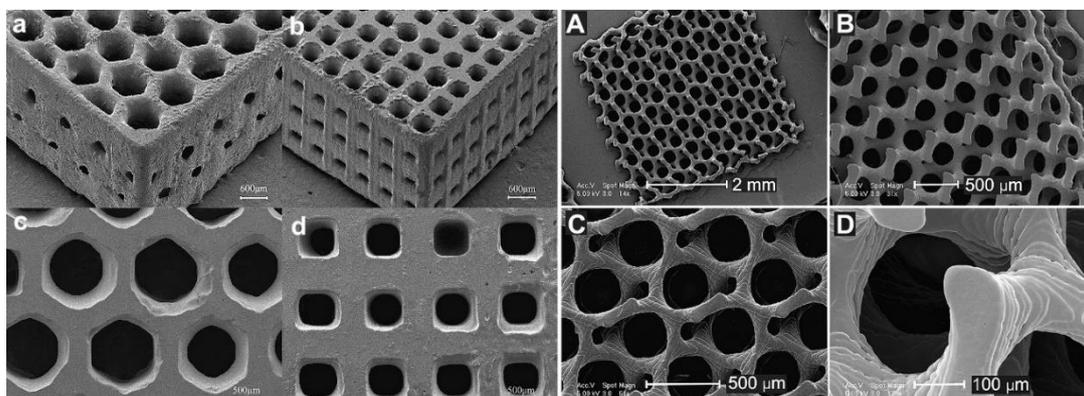


Fig. 33. Estructuras biodegradables fabricadas mediante estereolitografía [109].

5.2.7 Material Extrusion o Extrusión de Material

La extrusión de material (ME, siglas referidas al término en inglés Material Extrusion) es la categoría de AM que mayor crecimiento ha experimentado en los últimos años. La ME comparte con las otras técnicas de AM la libertad geométrica y la capacidad de personalización, así como la minimización de la necesidad de montajes. Por ello, el bajo coste del equipo de ME es una ventaja añadida y hace que esta técnica tenga un alto potencial para producción en escala, siendo de interés optimizar las propiedades mecánicas de las impresiones para ampliar su abanico de aplicaciones.

La técnica más difundida entre las variantes de ME es el modelado por deposición fundida (FDM, siglas referidas al término en inglés Fused Deposition Modelling) o Fabricación por Filamento Fundido (FFF, siglas referidas al término en inglés Fused Filament Fabrication). Esto se debe en gran parte al bajo coste del equipo en comparación con las otras técnicas y también por el hecho de que esta tecnología no conlleva temperaturas excesivamente altas, permitiendo un uso extendido de estas máquinas en casas y oficinas. Como las otras técnicas de AM, la ME utiliza un diseño tridimensional matemático para formar un G-code. En el caso de la FDM, dicho G-Code contiene los parámetros preestablecidos y la secuencia de coordenadas que conforman el camino por el cual se deposita el material fundido en forma de finas líneas hasta formar una capa y, finalmente, el objeto completo. Cabe mencionar que en FDM es necesaria la impresión de soportes para apoyar los elementos que no puedan imprimirse directamente sobre la anterior capa (p. ej. protuberancias).

En la **Fig. 34** se representa la técnica FDM mediante un diagrama genérico. En general, los equipos de FDM cuentan con una plataforma de impresión y un extrusor. Lo que se conoce como extrusor es la combinación de una cámara de fusión y un inyector, elementos que se encargan de llevar a cabo la fusión y la deposición del material. Así, el proceso de impresión se lleva a cabo alimentando el material (en forma de un hilo o filamento) a una velocidad constante al extrusor, donde dicho material se funde a una temperatura establecida por el usuario. Una vez fundido, el material sale por el inyector y se deposita sobre la cama de impresión. El posicionamiento del filamento fundido sobre la plataforma se lleva a cabo mediante el desplazamiento, o bien del extrusor, o bien de la plataforma, en los ejes X e Y. Al ser finalizada cada capa, el extrusor se eleva a lo largo del eje Z para empezar la producción de la siguiente capa. Este procedimiento se repite hasta finalizar la fabricación del objeto.

Los materiales utilizados en FDM suelen ser termoplásticos, principalmente debido a sus bajas temperaturas de fusión, siendo los materiales más básicos el ácido poliláctico (PLA, siglas referidas al término en inglés polylactic acid) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, siglas referidas al término en inglés acrylonitrile butadiene styrene). Además, con FDM es posible utilizar materiales como el polipropileno (PP), el nailon y el tereftalato de polietileno (PET, siglas referidas al término en inglés polyethylene terephthalate). Es importante, a la hora de establecer la temperatura del extrusor, tener en cuenta la velocidad de alimentación de filamento, de tal forma que el aporte energético en forma de calor realizado en el extrusor sea suficiente para fundir el material completamente.

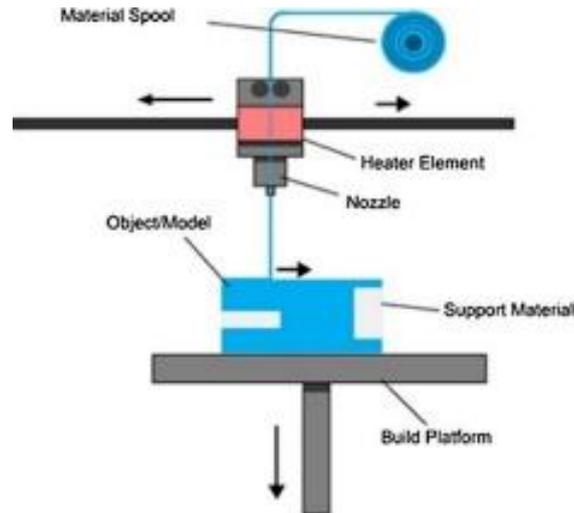


Fig. 34. Proceso FDM [39].

Los resultados obtenidos al fabricar con FDM dependen en gran medida de los valores de una serie de parámetros de impresión. La temperatura de extrusión, el grosor de capa, la densidad de relleno, el patrón de impresión, la velocidad de impresión y la posición y orientación de la pieza respecto a la plataforma son solo algunos ejemplos de factores que afectan directamente a la calidad de la impresión. Esta relación entre las condiciones de operación y las características relacionadas con la calidad de la impresión es compleja y depende de una interrelación entre múltiples variables. Por ejemplo, se sabe que la velocidad de la impresión influye en las propiedades mecánicas de la pieza, pero dicho efecto varía en función de la temperatura de extrusión. En la Fig. 35 se muestran algunos parámetros importantes como la orientación de la pieza (Fig. 35 a), que puede ser plana, en el filo o vertical, y el grosor de capa, el diámetro del inyector y el patrón de barrido (Fig. 35 b) [110].

La relación proceso-calidad ha sido extensamente estudiada con tal de hallar las condiciones de operación que resultan en mejores propiedades mecánicas y en una mejor resolución. Además de los factores nombrados anteriormente, la influencia del material y de la impresora utilizada también es significativa en cuanto a la calidad final del producto. Algunos de los aspectos relacionados con la calidad afectados por dichos factores son la rugosidad de la superficie, la resistencia a la tracción (y a la flexión), el módulo de Young, a la dureza y la fatiga [110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123].

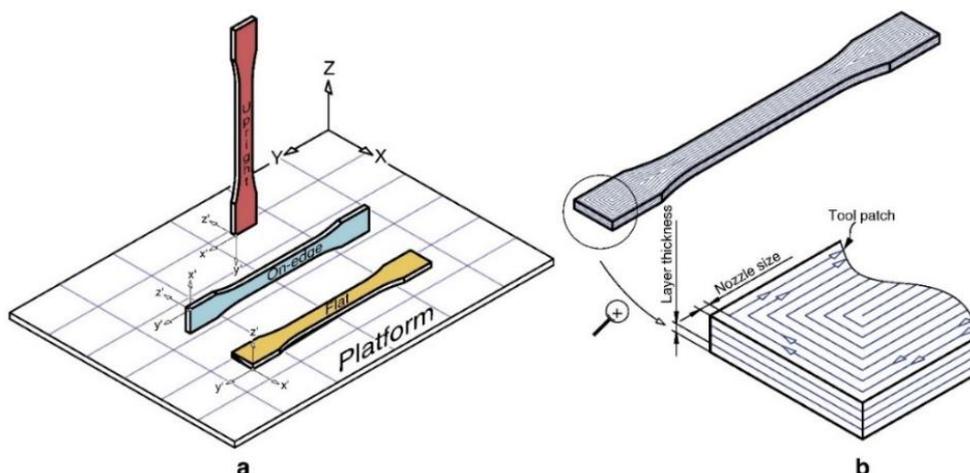


Fig. 35. (a) Posibles orientaciones en la plataforma; (b) grosor de capa, tamaño del inyector y patrón de escaneo [111].

Por ejemplo, se ha determinado que la orientación respecto a la plataforma durante la impresión tiene un gran impacto en las propiedades del material, siendo aconsejada la orientación en el filo para mayor fuerza, dureza y ductilidad. La gran influencia de la orientación se debe a que las propiedades de las piezas fabricadas mediante FDM varían dependiendo de si la dirección del esfuerzo es paralela o perpendicular al filamento. Este comportamiento se conoce como anisotropía y es efecto común en piezas fabricadas mediante múltiples técnicas de AM. Este fenómeno se observa también al variar el patrón de impresión. En la **Fig. 36** se muestran algunos de los diferentes patrones de impresión posibles, siendo la **Fig. 36 a** orientada a 45° , la **Fig. 36 b** a $\pm 45^\circ$ de forma alternada, la **Fig. 36 c** a 0° y la **Fig. 36 d** a 90° . Entre dichas opciones la orientación en 0° (**Fig. 36 c**) resulta en propiedades mecánicas notablemente superiores. Específicamente, la pieza impresa con un patrón de 0° presenta un mayor módulo de Young y mayor resistencia a la tracción. [111, 112, 113, 120, 122, 123].

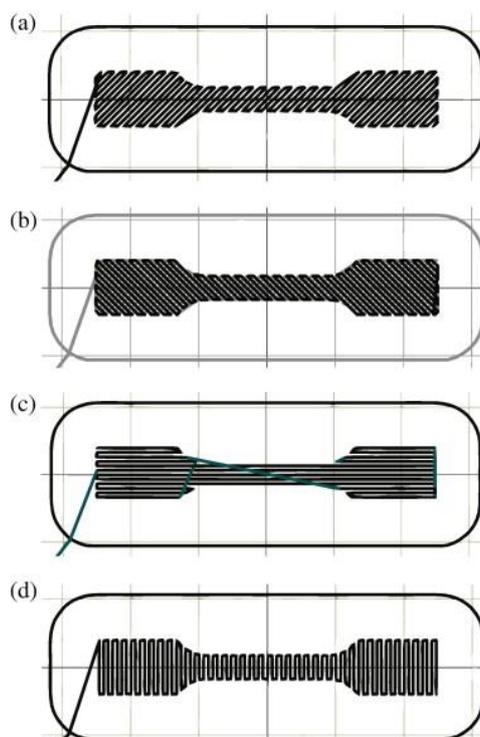


Fig. 36. Diferentes patrones de impresión [113].

La velocidad de impresión y el grosor de capa también varían las mismas propiedades que la orientación y el patrón de impresión, pero en menor medida. Además, la influencia de la velocidad de impresión y el grosor de capa varía en función de la orientación y el patrón de impresión. Así, para una impresión realizada de forma vertical, el grosor de capa resulta en un notable incremento de las propiedades mecánicas del material, pero para una impresión plana o en el filo el incremento es despreciable. Esto también está relacionado con la anisotropía que presentan los materiales fabricados mediante FDM [111].

En FDM todo el material a ser depositado debe pasar por el inyector. Así, el diámetro del inyector es un factor determinante de la velocidad de flujo admisible, de la precisión y de la definición. Piezas producidas mediante FDM no pueden incluir elementos de menor tamaño que el diámetro del inyector, siendo aconsejable que dichos elementos sean considerablemente mayores que el inyector para poder reproducirlos de manera satisfactoria. De igual manera, un inyector demasiado pequeño

a altas temperaturas de extrusión puede conllevar la degradación del material debido a una acumulación de energía. Por el otro lado, una velocidad de flujo demasiado alta puede significar que el material no llegue a fundirse adecuadamente, dando lugar a obstrucciones [124, 125].

La técnica FDM tiene la limitación de que solamente puede operar con materiales que tengan temperaturas de fusión relativamente bajas (a no ser que se modifique el equipo). Pero, es posible ampliar el abanico de materiales disponibles para FDM mediante la fabricación de filamentos de materiales compuestos. La motivación de este aumento de la variedad de materiales disponibles para FDM es, principalmente, extender las posibles aplicaciones de la técnica a través del desarrollo de materiales procesables mediante FDM con mejores propiedades mecánicas. Así, se han fabricado una gran variedad de filamentos para FDM. Entre ellos se encuentran filamentos de ABS reforzados con fibras de vidrio, filamentos de ABS reforzados con fibra de carbono, filamentos de PLA reforzados con fibra de vidrio, filamentos de PLA reforzados con fibra de carbono y filamentos de nailon reforzados con kevlar. Filamentos de ABS con cierta concentración en CaCO_3 , así como filamentos de ABS con SiO_2 también han sido desarrollados. Como regla general, los materiales reforzados han mostrado propiedades mecánicas superiores a las que presentan los materiales sin reforzar. Por otro lado, también se han desarrollado filamentos de PLA/Mg (que presentan una alta bioactividad y biocompatibilidad) para aplicaciones en el campo de la ingeniería de tejidos. Un filamento de PLA con corcho reciclado también ha sido desarrollado con buenos resultados (**Fig. 37**), mostrando propiedades interesantes [126, 127, 128, 129, 130, 131].



Fig. 37. Ejemplos de piezas impresas con el filamento de PLA/corcho [130].

En la **Fig. 38** se muestran algunos ejemplos de piezas fabricadas mediante FDM, siendo la **Fig. 38 a** el segmento de un cráneo, la **Fig. 38 b** un comprimido y la **Fig. 38 c** un modelo de una dentadura. Asimismo, en la **Fig. 39** se muestra una réplica de la vértebra torácica impresa con la intención de demostrar la utilidad de la FDM para ayudar en la formación de médicos.



Fig. 38. Ejemplos de piezas impresas mediante FDM [65].

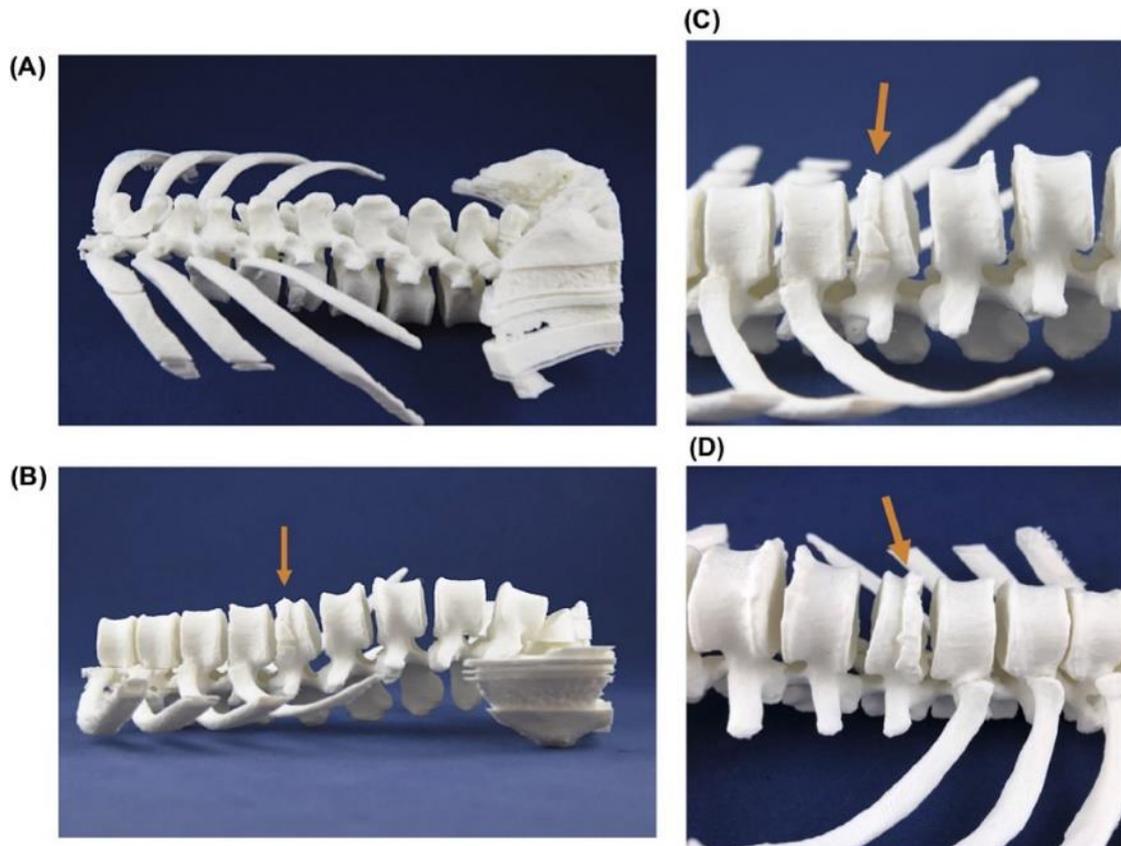


Fig. 39. Modelo FDM de una vértebra torácica (50% del tamaño real) [133].

6. MATERIALES

La elección del material es una parte clave del proceso de desarrollo de un producto. Un material debe cumplir una serie de requisitos para que se considere apto para una determinada aplicación. Tener las propiedades adecuadas no es suficiente, siendo la viabilidad económica, tanto de la materia prima como del proceso de producción, el factor más importante a la hora de seleccionar un material. Las técnicas de AM, al proporcionar nuevos métodos de producción, abren nuevas posibles aplicaciones a una gran variedad de materiales.

Es decir, las técnicas AM viabilizan la fabricación de productos que antes, con las técnicas tradicionales, eran inviables. Dicha inviabilidad puede estar asociada con un alto coste inicial (como la producción de moldes para moldeo por inyección), un material demasiado caro (el deshecho relacionado con el mecanizado incrementa rápidamente el coste de producción), una alta complejidad geométrica (con las técnicas tradicionales el coste de producción está directamente relacionado con la complejidad), entre otros motivos.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, existe una gran variedad de técnicas de AM, siendo importante estudiar la compatibilidad de cada tipo de material con las diferentes técnicas. A lo largo de la descripción de las técnicas ya se ha hablado de varios materiales. No obstante, en los siguientes apartados se describen algunos de los materiales más importantes utilizados en AM, así como los obstáculos más frecuentemente encontrados a la hora de utilizar diferentes técnicas de AM.

6.1 METALES

Las técnicas tradicionales de fabricación imponen altas limitaciones a la complejidad de piezas metálicas debido a la relación directa entre coste y complejidad. Así, con las técnicas tradicionales, una serie de aplicaciones donde las propiedades características de ciertos metales son de gran interés resultan económicamente inviables debido a los costes de producción. La AM crea la oportunidad para producir piezas metálicas de alta complejidad de manera viable, lo que ha captado la atención de algunas de las industrias más sofisticadas como la medicina, la automotriz y la aeroespacial [21, 36, 46, 47].

Las técnicas de AM más utilizadas para la fabricación de prototipos metálicos son la PBF (SLS, SLM y EBM) y la DED (LENS y EBAM), aunque la BJ, la SLA, la FDM y la LOM también son capaces de fabricar piezas metálicas. La fabricación de metales mediante AM puede llevarse a cabo de forma directa o indirecta, diferenciándose en el medio utilizado para lograr la aglomeración entre partículas metálicas. Mientras que los métodos directos recurren a la fusión de las partículas metálicas para lograr su unión, los métodos indirectos utilizan materiales secundarios para inducir dicha unión.

Entre las técnicas de AM que utilizan métodos indirectos para fabricar piezas metálicas se encuentran la SLS, la BJ, la SLA, la FDM y la LOM. Estos métodos indirectos nacen con el objetivo de ampliar la cantidad de materiales disponibles para cada técnica. Así, la SLS utiliza los mecanismos de sinterizado químicamente inducido y/o sinterizado líquido para lograr la unión entre partículas de materiales con altos puntos de fusión. De manera similar, la BJ consigue la unión entre polvos metálicos mediante un líquido aglutinante, la SLA logra la unión entre partículas metálicas suspendidas mediante la solidificación de un diluyente fotosensible, la FDM mediante la adición de partículas metálicas a los filamentos y, finalmente, la LOM lo hace mediante capas adhesivas. Algunos de los obstáculos

encontrados al utilizar estos métodos son la porosidad resultante de la eliminación de dichos materiales secundarios, la contracción y la pérdida de precisión geométrica resultante de dicho proceso de eliminación, la dificultad para conseguir una distribución homogénea de partículas metálicas (especialmente en SLA y FDM) y un enlace menos fuerte entre partículas en comparación con los métodos directos.

Por otro lado, las técnicas de AM que procesan materiales metálicos de manera directa son la SLM, la EBM, la LENS y la EBAM. Estas técnicas recurren a la fusión completa del material para dar lugar a la unión entre partículas. Debido a la íntima unión entre partículas resultante de la fusión completa, las piezas fabricadas mediante este método presentan una muy baja porosidad y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, estas técnicas también tienen obstáculos que superar. Uno de éstos es el complejo perfil térmico de estos procesos, que se debe principalmente a las altas cantidades de energía aplicadas sobre el material y también a la alta velocidad de enfriamiento. Sin un control riguroso de temperatura una misma capa puede pasar por varios cambios de fase consecutivos, posiblemente afectando la integridad de la microestructura del material (**Fig. 40**). Además, las variaciones drásticas de temperatura dan lugar a fuerzas de tracción y compresión residuales, generando deformaciones. Por estas razones un alto control de la temperatura es necesario para optimizar la calidad de las piezas fabricadas con estos métodos [21, 25, 26].

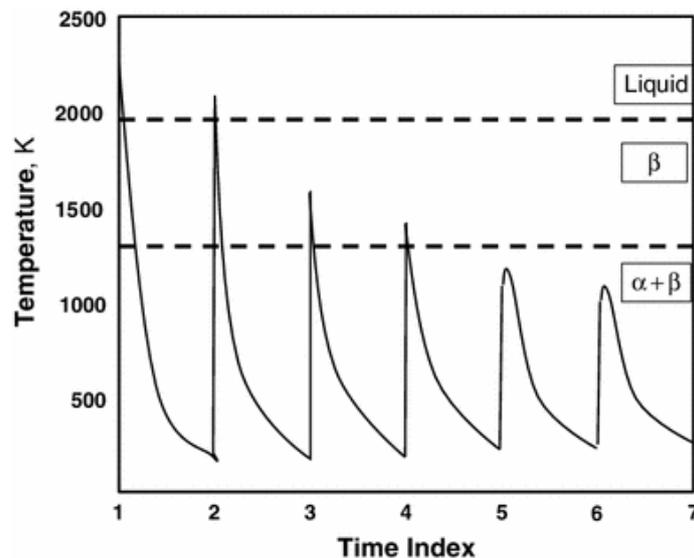


Fig. 40. Perfil térmico en una capa de Ti-6Al-4V durante el proceso de AM [26].

Con el estudio de prototipos metálicos fabricados de forma directa, se ha determinado que presentan cierta porosidad. Dicha porosidad se atribuye normalmente al fenómeno conocido como keyholing, a gases atrapados y a una insuficiente fusión. Además, como efecto de los bruscos gradientes de temperatura, estos metales muestran una estructura granular alargada y orientada según el movimiento de la fuente de energía, características que afectan la integridad del material y dan lugar a propiedades anisotrópicas. Otros defectos asociados a los grandes gradientes de temperatura que conllevan los procesos directos son delaminaciones y agrietamientos. Con un ajuste de diferentes parámetros de impresión, como la velocidad de barrido y el aporte energético, se pueden minimizar estos efectos negativos. Un adecuado tratamiento térmico tras la impresión, así como una adecuada selección de la temperatura de precalentamiento de la cámara de impresión, han demostrado la capacidad de minimizar, e incluso eliminar, una gran parte de estos defectos [55, 134, 135].

Aceros, aleaciones de aluminio, aleaciones de níquel y el titanio con sus aleaciones son algunos de los metales que son utilizados en AM. Para aplicaciones más específicas, principalmente médicas, también se encuentran aleaciones de magnesio, oro y cobalto. El titanio y sus aleaciones son materiales de alto rendimiento muy utilizados (especialmente $TiAl_6V_4$), pero a la vez son conocidos como materiales caros y difíciles de procesar. La AM minimiza el deshecho de material y mecanizado, por lo que su uso para fabricar piezas de titanio está en aumento. Una situación similar ocurre con algunos aceros, pero, por otro lado, el uso de AM para fabricar aluminios no ofrece tantas ventajas debido a que es fácil de procesar y barato [25, 27, 46].

Estos procesos permiten, mediante variaciones de las características de la materia prima y de las condiciones de operación (principalmente de la temperatura y del aporte energético), una manipulación de la composición y la microestructura de los materiales fabricados. Esto crea una oportunidad para fabricar piezas de metales puros, aleaciones y materiales compuestos con un alto nivel de control sobre la composición. Así, la fabricación de piezas metálicas mediante AM (principalmente con el método directo) facilita la investigación de nuevos materiales. Además, se consiguen fabricar estructuras geoméricamente complejas, lo que es especialmente interesante a la hora de procesar materiales que, al ser demasiado duros (o demasiado frágiles), no puedan procesarse adecuadamente mediante el mecanizado. Como se ha mencionado anteriormente, esta libertad geométrica permite explorar nuevas aplicaciones que estaban restringidas por motivos económicos.

La variedad de materiales metálicos que puede fabricarse con los métodos directos es muy extensa. Esto se debe a que estos sistemas utilizan polvo como materia prima, permitiendo un alto grado de personalización de la composición. Entre las piezas metálicas que pueden fabricarse mediante estas técnicas se encuentran piezas de aceros inoxidables (p. ej. SS316 [136], SS316L [137]), de aleaciones de aluminio y magnesio (p. ej. Al 5754 [138]), de aleaciones de aluminio y magnesio modificadas (p. ej. AlMgScZr [139], AlSiMgTi/TiC [140]), de metales amorfos (p. ej. ZrCuNiAlTi [50], FeCoBSiNb [51]), de aleaciones de media entropía (p. ej. CoCrNi [141]), de aleaciones de alta entropía (p. ej. AlCrFeCoNi [52], CoCrFeNiMn [53]) e incluso modificaciones de éstas con nano partículas de TiN (TiNp/CoCrFeNiMn [53]) o de carbono (1%C-CoCrFeMnNi [54]).

Todos los materiales mencionados son de alto interés en diversas industrias debido a sus propiedades, mostrando el alto potencial de la AM de metales para proporcionar valor a la sociedad. La AM con metales está avanzando rápidamente por su capacidad para fabricar productos metálicos de alta calidad con una reducción de la necesidad de mecanizado, un aumento en la libertad en el diseño y la minimización de ensamblajes. Con un aumento del abanico de aleaciones compatibles, una reducción de costes y un aumento de la velocidad de producción esta tecnología tiene el potencial de redefinir los límites de los materiales metálicos.

6.2 CERÁMICOS

Los materiales cerámicos tienen muchas aplicaciones en la industria química, electrónica, aeroespacial y médica por su versatilidad. Propiedades como la resistencia mecánica, térmica y química, así como propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas hacen los materiales cerámicos extremadamente versátiles. Estos materiales se producen con unas composiciones y porosidades específicas debido a la naturaleza de sus aplicaciones y, por lo general, su sinterizado y postratamiento son largos y costosos cuando se producen con técnicas tradicionales. Dichas técnicas suelen incluir moldes, lo que resulta en una limitación la geometría de la pieza y, como consecuencia, de sus aplicaciones.

La impresión 3D con materiales cerámicos se lleva a cabo con una amplia gama de técnicas, utilizando cada una diferentes medios para solidificar las partículas cerámicas. Asimismo, las partículas de cerámica utilizadas como materia prima se pueden encontrar en suspensiones, polvos, láminas y filamentos. Todos estos deben prepararse previamente con tal de lograr la composición y las propiedades deseadas. La mayor dificultad para fabricar cerámicas con técnicas de AM se encuentra en la preparación de la materia prima, ya que sus características darán lugar a una mayor o menor desviación sobre las especificaciones de diseño. Así, por ejemplo, es importante lograr una distribución homogénea de partículas cerámicas en las suspensiones y en los filamentos, lo que no siempre es una tarea simple debido a las fuerzas de atracción entre las partículas.

6.2.1 Impresión 3D de cerámicas a partir de suspensiones.

En las técnicas que utilizan suspensiones las partículas cerámicas se encuentran dispersas en mayor o menor concentración en un líquido. Entre estas técnicas se encuentran algunas variantes de AM, principalmente la VP y la MJ. De forma similar a los materiales metálicos, la fabricación de piezas cerámicas a partir de estas técnicas se puede considerar un método indirecto. Esto se debe a que la solidificación se realiza mediante materiales secundarios que, posteriormente, pueden eliminarse.

En el caso de las técnicas de la VP y la MJ, la unión entre las partículas cerámicas se consigue a través de la fotopolimerización del diluyente que contiene las partículas en suspensión. Así, la solidificación de la materia orgánica atrapa las partículas de cerámica, formando eventualmente una pieza compuesta de polímeros y del material cerámico. Este proceso es necesario porque los materiales cerámicos no son fotosensibles. Algunos de los materiales cerámicos que se pueden utilizar en VP y MJ son SiO_2 , SiCN , Al_2O_3 , CaO , ZrO_2 , SiC , TiC , TiO_2 , BaTiO_3 , la hidroxiapatita (HA, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), entre otros. Cabe mencionar que tras el proceso de impresión es necesario tratar la pieza a altas temperaturas para eliminar los componentes orgánicos y aumentar el factor de empaquetamiento atómico (FEA) [32, 144].

La preparación de una suspensión estable y homogénea es de gran importancia para la obtención de piezas conformes con los requerimientos de diseño, debiendo encontrarse un equilibrio entre concentración de partículas y viscosidad con tal de maximizar las propiedades mecánicas de la pieza final y minimizar la inestabilidad de la mezcla. Asimismo, se ha de tener en cuenta que las partículas de cerámica dan lugar a una dispersión de la luz, disminuyendo la precisión geométrica y la unión entre capas debido a un aumento del área de curado y una menor penetración del láser en la suspensión.

Uno de los problemas más destacados a la hora de fabricar piezas cerámicas con estas técnicas es la contracción experimentada al eliminar el material orgánico. Este problema nace del hecho de que las concentraciones de material cerámico están limitadas por la viscosidad y la capacidad de la suspensión para absorber la luz. En la **Fig. 41** se muestran algunas piezas de SiC fabricadas con SLA, mostrándose, en la parte inferior de la figura, la gran contracción (35-50%) que conlleva el tratamiento térmico para la eliminación de la materia orgánica. Además, en el caso de la MJ, el tamaño de las partículas está limitado por el tamaño del inyector, siendo necesario tomar medidas para que no tenga lugar la aglomeración de partículas. Cabe recordar que, para MJ, es necesario que la tinta tenga un comportamiento adecuado ante la formación de gotas, determinado por los números de Reynolds, de Weber y o de Ohnesorge (como ya se explicó en el apartado 5.2).



Fig. 41. Piezas de SiC fabricadas mediante SLA [142].

6.2.2 Impresión 3D de cerámicas a partir de polvo.

Una de las opciones para la AM a partir de polvo cerámico es la BJ, que cuenta con un amplio abanico de materiales cerámicos compatibles, y tiene la capacidad de producir grandes estructuras. No necesita soportes durante la impresión y resulta más barato que otras opciones basadas en polvo como la SLS o SLM. Con BJ, las propiedades reológicas del fluido enlazante y el tamaño de las partículas de polvo son importantes para optimizar la calidad del producto final. Algunos de los polvos utilizados en BJ para producir piezas cerámicas son los óxidos SiO_2 , ZnO , SrO , MgO , el sulfato de calcio (CaSO_4), el fosfato tricálcico (TCP, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y el fosfato tetracálcico (TTCP, $\text{Ca}_4\text{O}(\text{PO}_4)_2$). Los agentes aglutinantes más utilizados para este tipo de materiales son ácidos como el ácido fosfórico, el ácido tartárico o el ácido cítrico [14, 36].

De manera similar a los métodos basados en suspensiones, es necesario sinterizar la pieza para reforzar el enlace entre partículas, aumentar el empaquetamiento y remover el fluido enlazante. Así, fabricar piezas cerámicas mediante BJ también implica una contracción (de hasta un 30%) debido al proceso de eliminación del líquido aglutinante. Sin embargo, como dicha contracción es un factor calculable, se puede contrarrestar mediante un sobredimensionado del diseño. Teniendo en cuenta la contracción, el proceso de BJ es capaz de producir piezas cerámicas con una precisión geométrica de hasta $100 \mu\text{m}$ [14, 36].

La naturaleza porosa inherente a las piezas fabricadas con inyección aglutinante limita notablemente la resolución, la calidad de la superficie y las propiedades mecánicas. Además, es posible que se queden atrapadas partículas de polvo en el cuerpo, dificultando el proceso de limpieza debido al débil enlace entre partículas antes de la sinterización (se puede dañar la delicada superficie de la pieza). Por otro lado, la BJ ofrece la posibilidad de imprimir estructuras cerámicas con libertad geométrica, poros interconectados y una permeabilidad controlada. Estas características, al utilizarse materiales cerámicos biocompatibles como la HA y el TCP, son óptimas para la producción

estructuras destinadas al cultivo de células utilizados en la ingeniería de tejido, normalmente denominadas andamios (scaffolds). La utilización de HA y TCP para la fabricación de andamios no es novedosa, pero la fabricación de dichas estructuras con BJ introduce la posibilidad de fabricar piezas complejas y altamente personalizables. En la **Fig. 42** se muestra un andamio de fosfato de calcio fabricado con BJ [14, 32, 57, 58].

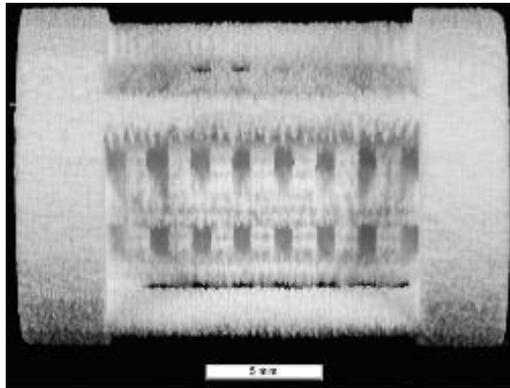


Fig. 42. Soporte o andamio de fosfato de calcio impreso con BJ [14].

En caso de necesitar mayor densidad, mejor definición y superiores propiedades mecánicas, es conveniente utilizar técnicas como la SLS o la SLM frente a la BJ. Como se ha expuesto anteriormente, la SLS es una técnica de AM que pretende aglomerar partículas de polvo por debajo de su temperatura de fusión (sinterizado en estado sólido). Como los materiales cerámicos presentan altas temperaturas de fusión resulta difícil su procesamiento directo mediante SLS. Por lo tanto, es necesario preparar una mezcla con otros materiales con puntos de fusión menores para hacer posible dicho procesamiento, de tal forma que la fusión de dichos materiales sirva como un medio para enlazar las partículas cerámicas (sinterizado líquido). En el postratamiento dichos materiales secundarios se eliminan (en el caso de ser orgánicos) o forman una fase secundaria (si fueran inorgánicos), dando lugar a la pieza finalizada. El sinterizado químicamente inducido también es una opción para fabricar piezas cerámicas con SLS.

La contracción y la porosidad, así como la posibilidad de que queden partículas de polvo virgen atrapadas en el cuerpo, son características que resultan en una pérdida de precisión dimensional y un empeoramiento de las propiedades mecánicas de las piezas cerámicas fabricadas con SLS. En cuanto a la porosidad, su minimización es posible mediante técnicas como el prensado isostático y la infiltración. Al igual que la inyección aglutinante y por los mismos motivos, la SLS se ha adoptado como una técnica para la fabricación de andamios biocompatibles para aplicaciones médicas. Así, los materiales cerámicos más comúnmente utilizados en SLS son biocerámicas como la HA y el TCP. Polvos de materiales como SiC, SiOC, Al₂O₃ y ZrO₂ también son comúnmente utilizados en SLS, tanto para producir cerámicas puras como para producir materiales compuestos (p. ej. con polímeros como el PP, el ABS o el PLA) [32, 57, 59].

Por otro lado, la SLM utiliza un láser de potencia mucho mayor que la SLS, lo que permite fundir el polvo cerámico completamente sin necesitar materiales secundarios, produciendo así piezas homogéneas de alta densidad con propiedades mecánicas superiores a las obtenidas mediante SLS. Sin embargo, la SLM fue desarrollada para fabricar metales y aleaciones, y su aplicación con materiales cerámicos es más difícil y ha visto menos avances. La principal complicación a la hora de utilizar la SLM para fabricar partes cerámicas es que dichos materiales no soportan los drásticos

gradientes de temperatura que se producen durante el proceso de fabricación, causando grietas y grandes pérdidas en la precisión y definición. Las opciones más prometedoras para mitigar el efecto de los gradientes de temperatura son el precalentamiento del lecho y el uso de suspensiones en vez de lechos secos. A pesar de que estas opciones mejoren los resultados, se necesitan más avances para incrementar la viabilidad de la SLM como una técnica de fabricación de piezas cerámicas debido a que en ocasiones se generan superficies defectuosas, resultando en una menor precisión [32].

6.2.3 Impresión 3D de cerámicas a partir de láminas y filamentos.

La técnica LOM hace posible la fabricación de piezas cerámicas de forma automatizada y rápida a partir de largas láminas de cerámica, aunque con limitaciones a la complejidad y con dimensiones preferiblemente por encima de un centímetro. Una de sus ventajas es que las deformaciones térmicas se eliminan al no necesitar grandes aportes energéticos. Sin embargo, se obtienen piezas con propiedades anisotrópicas debido al débil enlace entre capas, que además da lugar a la formación de porosidades en las interfaces y delaminaciones. Esto hace difícil el uso de LOM para fabricar piezas cerámicas, sobre todo cuando se tiene en cuenta que actualmente el interés en cuanto a piezas cerámicas se centra en estructuras milimétricas de geometría compleja para aplicaciones médicas. No obstante, la técnica LOM ha sido capaz de producir satisfactoriamente piezas de SiC, Si/SiC, ZrO₂, ZrO₂/Al₂O₃ e incluso de HA, aunque con las limitaciones geométricas descritas anteriormente [32].

La FDM también es una técnica de AM que permite imprimir con materiales cerámicos, pero debido a la naturaleza frágil del material es necesario preparar filamentos compuestos por termoplásticos como el PLA o el ABS rellenos con partículas cerámicas (sobre un 50% en volumen). Así, el plástico sirve como un medio para transportar el material cerámico. Dicho filamento debe tener una concentración y dispersión de partículas cerámicas que garanticen la flexibilidad necesaria para que no se rompa durante el proceso de extrusión. De igual manera, la dispersión de partículas cerámicas debe ser homogénea en el filamento para asegurar un flujo constante de material cerámico. Esto es un factor clave para dar lugar a una concentración homogénea de cerámica a lo largo del volumen de la pieza. Al utilizar materiales cerámicos en FDM, si se desea una pieza de cerámica pura, es necesario remover los compuestos poliméricos mediante tratamientos térmicos para obtener el producto final, por lo que es necesario que dichos compuestos sean relativamente fáciles de eliminar. También, existe la posibilidad de no eliminar el polímero, obteniendo materiales compuestos de polímeros y cerámicas. Estos materiales presentan propiedades interesantes como, por ejemplo, la combinación de propiedades eléctricas conductoras y aislantes. En la **Fig. 43** se muestra un ejemplo de filamento compuesto por ABS y titanato de bario (BT) [145].



Fig. 43. (a) Mezcla de ABS y BT y (b) filamento de ABS-BT [143].

6.3 POLÍMEROS

Entre los materiales utilizados en AM, los polímeros son los más versátiles, pudiendo fabricarse mediante FDM, SLS, BJ, MJ, VP, entre otras técnicas. Algunos de los materiales más comunes son el PLA, el ABS, el PP, el PET y el nailon. Otros materiales disponibles comercialmente son el policarbonato (PC, siglas referidas al término en inglés polycarbonate), la polieter-eter-cetona (PEEK, siglas referidas al término en inglés polyether-ether-ketone), la polieter-cetona-cetona (PEKK, siglas referidas al término en inglés polyether-ketone-ketone), la polieter-cetona (PEK, siglas referidas al término en inglés polyether-ketone), el polietileno (PE, siglas referidas al término en inglés polyethylene), el poliuretano (PU, siglas referidas al término en inglés polyurethane), el poliuretano termoplástico (TPU, siglas referidas al término en inglés thermoplastic polyurethane), el poliestireno (PS, siglas referidas al término en inglés polystyrene) y el policloruro de vinilo (PVC, siglas referidas al término en inglés polyvinyl chloride). Todos estos materiales son de alto interés debido a sus aplicaciones en múltiples industrias [39, 65, 113, 146, 147, 148].

La materia prima utilizada en la AM para producir piezas poliméricas puede encontrarse en forma de pellets, filamentos, hojas o disoluciones. Como mencionado a lo largo de este documento, existen varios métodos para tratar la materia prima con tal de conseguir la unión entre partículas mediante técnicas de AM. La producción con plásticos no es una excepción. En el caso de la FDM se funden los filamentos de material completamente, obteniendo una difusión entre las capas a medida que se deposita el material y consiguiendo formar una pieza sólida. En el caso de la SLS se sinterizan los pellets poliméricos ligeramente por debajo de su temperatura de fusión (sinterizado en estado sólido). Por otro lado, en BJ se utilizan líquidos aglutinantes para lograr la unión entre pellets. Finalmente, la MJ y la VP logran la solidificación de disoluciones poliméricas mediante la exposición a la luz (normalmente ultravioleta).

Entre las técnicas capaces de fabricar piezas poliméricas la FDM es la más extendida. Esto se debe principalmente a que los equipos son más baratos y también a que la tecnología es más intuitiva y sencilla de utilizar. A raíz de esto, muchas personas han adquirido equipos de FDM para aprovechar la posibilidad de poder transformar sus diseños en objetos. Como consecuencia, ha surgido una gran comunidad en internet para compartir modelos y consejos, conocida como Maker Community, donde se discuten cuestiones como los mejores productores de filamentos y los mejores parámetros de impresión en función de las características del diseño.

Materiales como el PLA, el ABS, el PP y el nailon, debido a su bajo punto de fusión, son procesables mediante diversas técnicas, pudiendo seleccionarse la más interesante en función de los costes de producción y la precisión deseada. Para materiales con altas temperaturas de fusión, como el PEEK, el PEKK y el PEK, su fabricación mediante SLS es más apropiada, aunque existen sistemas de FDM modificados capaces de procesar dichos materiales. Sin un adecuado control de temperatura, los polímeros fácilmente sufren deformaciones debido a los gradientes térmicos. Así, a la hora de fabricar piezas plásticas, la principal dificultad que tienen las técnicas AM que conllevan un gran aporte de energía en forma de calor es la optimización de los parámetros. Mantener temperaturas adecuadas a lo largo de todo el volumen de impresión durante el proceso es clave para obtener las mejores propiedades posibles y conservar la precisión. Un control insuficiente de la temperatura puede llevar a deformaciones, a una débil unión entre capas o a una degradación del material, entre otros defectos [146, 147].

En cuanto a las técnicas de MJ y VP, estas no se basan en un aporte térmico para fabricar materiales poliméricos. Así, ofrecen una mayor precisión geométrica debido a que no tiene lugar una deformación térmica. Además, el método de solidificación utilizado en estas técnicas es más fácil de controlar, sumando a la superior precisión geométrica. Por estos motivos estas técnicas basadas en la fotopolimerización son las más apropiadas para la fabricación de piezas con un alto grado de complejidad, aunque la velocidad de impresión las hace poco adecuadas para piezas de grandes dimensiones.

La mayor dificultad en MJ y VP se encuentra en la preparación de disoluciones adecuadas para el proceso, teniendo que cumplir una serie de requisitos ya comentados en los apartados 5.2.3 y 5.2.6. En general, cada proveedor de sistemas de MJ y VP ofrece una amplia gama de resinas optimizadas para las características de sus equipos. Algunas de las que ofrece Stratasys para sus sistemas de SLA son VeroWhitePlus, Digital ABS, Fullcure RGD 720 y Rigur RGD 450; algunas de las que ofrece 3D Systems son Accura Amethyst, Accura CastPro, Accura Phoenix y Accura Xtreme; algunas de las que ofrece Formlabs son Clear Resin, Durable Resin y High Temp Resin y DSM ofrece Somos Bioclear, Somos Element, Somos GP Plus 14122, entre muchas otras. Cada una de estas resinas presenta diferentes propiedades, dando lugar a múltiples aplicaciones, entre las que se encuentran la fabricación de moldes, de prototipos y de artículos artísticos. Además, existen resinas específicas para el campo de la medicina [131, 148, 149].

7. APLICACIONES

La impresión 3D tiene un gran potencial, siendo utilizada en varios sectores debido a su flexibilidad inigualable tanto en materiales soportados como en complejidad geométrica. Esta versatilidad se ve reflejada en la **Fig. 44**, donde se representa, mediante un diagrama de barras, la distribución de la AM entre múltiples sectores. Asimismo, en la **Fig. 45** se muestran las diferentes razones que han llevado a la adopción de la AM por este amplio abanico de sectores, siendo el prototipado, el desarrollo de productos y la innovación los más destacados. En este apartado, con el objetivo de ilustrar el potencial de la tecnología, se presentan algunas de las aplicaciones de la AM en algunos de los sectores más importantes del mundo.

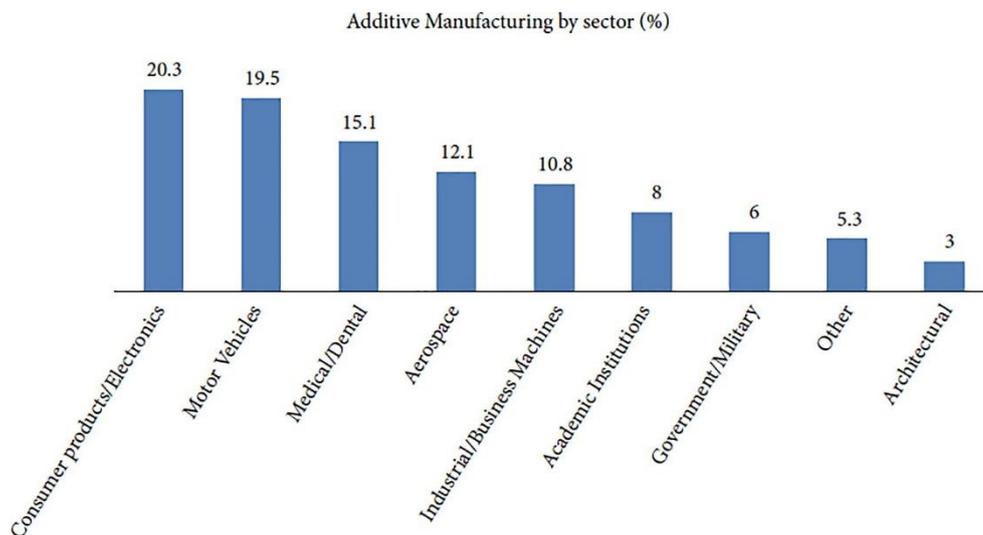


Fig. 44. Reparto de la AM entre diferentes sectores [66].

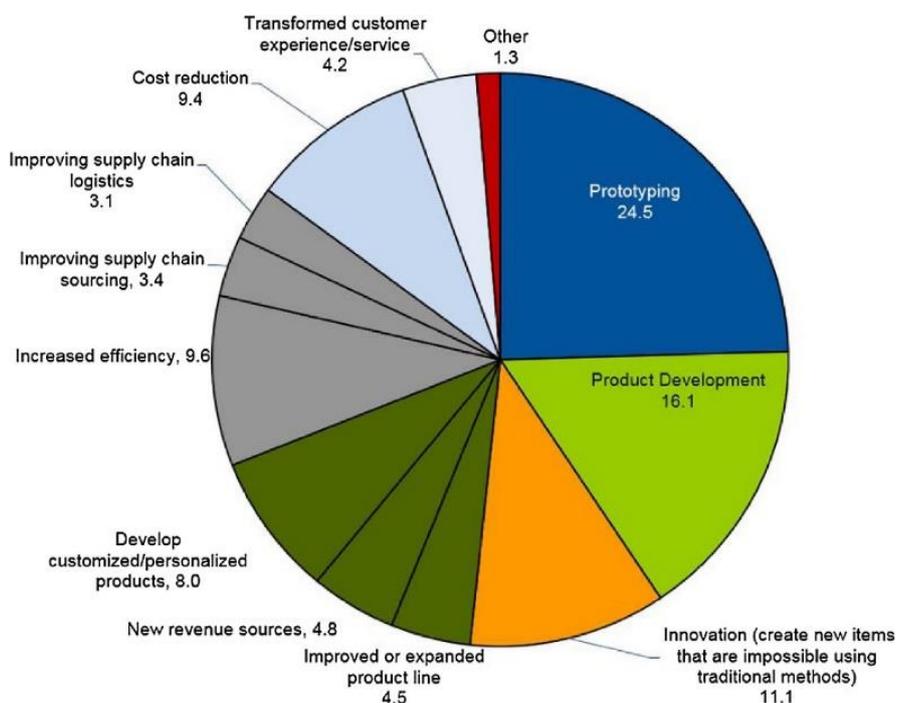


Fig. 45. Motivaciones principales para la inversión en AM [39].

7.1 EDUCACIÓN

La impresión 3D y su rápida adopción por la industria genera una necesidad de formar a personas con las habilidades adecuadas para hacer frente a los avances tecnológicos. Por ello, enseñar tanto al profesorado como al alumnado sobre la impresión 3D es un paso necesario para evitar que la falta de personal cualificado frene el desarrollo industrial [60].

Además, la impresión 3D se puede utilizar como una herramienta de apoyo a la enseñanza, facilitando el aprendizaje, mejorando la participación por parte del alumnado, promoviendo la creatividad y aumentando el interés por la rama STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*). Siendo la ingeniería la aplicación de conocimientos científicos y matemáticos, la utilización de la tecnología 3D (fruto de la ingeniería) hace posible entender conceptos abstractos de forma práctica y visual. Por esto, actualmente la AM es parte del programa escolar de muchos colegios, institutos y universidades, principalmente como un esfuerzo para aumentar la calidad de la enseñanza en tópicos relacionados con las matemáticas, la química y la física, pero también con el fin de familiarizar a los estudiantes con esta nueva tecnología con la que probablemente vuelvan a encontrarse en su vida profesional [61, 62].

En colegios e institutos la implementación de la impresión 3D en proyectos de clase posibilita que los alumnos aprendan sobre ingeniería mientras transforman sus ideas en objetos utilizando el feedback virtual y físico. Esto da lugar a que el alumnado no sólo sea capaz de mejorar sus diseños, sino también mejorar su comprensión de los conceptos involucrados. Asimismo, en universidades la utilización de esta tecnología emergente permite al alumnado ver, tocar y probar sus ideas sin límites a su creatividad, haciendo que se vuelvan más responsables, motivados e implicados. Esto favorece el aprendizaje para cada estudiante y sus diferentes formas de aprender (activa, reflexiva, teórica o pragmática) [62, 63].

7.2 MEDICINA

La escasez de donantes sigue siendo un problema global para todas las lesiones y condiciones clínicas que requieran de trasplantes y, a pesar de que la implantación de órganos artificiales y prótesis suele dar resultados positivos y mejorar la calidad de vida de los pacientes, los métodos tradicionales de implantes presentan una serie de problemas y limitaciones. Estos incluyen limitaciones en los materiales, la geometría (principalmente debido al coste directamente relacionado con la complejidad geométrica) y la biocompatibilidad, lo que en muchos casos puede resultar en complicaciones que requieran cirugías de revisión. Frente a esto, la AM es una tecnología con el potencial de resolver los inconvenientes inevitablemente encontrados al usar los métodos tradicionales. Esto se debe a que la AM aporta la posibilidad de construir tejido humano y órganos de forma personalizada. La reciente reducción de coste de los equipos de AM, en conjunto con la mejora de la precisión y los tiempos de impresión, ha permitido grandes avances médicos. Actualmente, la investigación de la tecnología de impresión 3D para aplicaciones médicas se centra principalmente en cuatro campos, que se enumeran a continuación [40].

- Investigación de la producción de modelos de órganos enfermos para asistir la planificación preoperatoria y el análisis de tratamientos quirúrgicos.
- Investigación de la producción de prótesis personalizadas biológicamente inertes.

- Investigación sobre la fabricación de andamios (*scaffolds*) biodegradables y biológicamente activos.
- Investigación sobre la impresión directa de tejidos y órganos con todas las funciones vitales.

En cuanto al primero, la impresión 3D permite fabricar modelos personalizados de forma más barata y rápida que las técnicas convencionales. Algunas de las posibilidades que presenta el uso de modelos 3D son simular tumores para estudiar su comportamiento, diseñar prótesis, crear réplicas fiables de órganos para estudiarlas y entrenar técnicas mediante simulaciones. Por ejemplo, las sociedades de neumólogos y de anestesiólogos recomiendan el uso de simulaciones con modelos para practicar el procedimiento de broncoscopia, ya que dicho entrenamiento supone una mejora en los resultados y una reducción en los tiempos del procedimiento. La reducción de los costes en dichos modelos hace este tipo de entrenamiento para procedimientos quirúrgicos más asequibles, mejorando la formación del personal médico. En la **Fig. 46** se muestra un modelo de nailon para la simulación del procedimiento de broncoscopia, fabricado mediante la técnica SLS por un coste total de 80 euros. Asimismo, en la figura **Fig. 47** se muestra una réplica de vértebras para la ayudar en la preparación de una estrategia quirúrgica (**Fig. 47 A-D**) y el resultado tras la operación exitosa (**Fig. 47 E-F**) [42, 132].



Fig. 46. Simulador para broncoscopia impreso mediante SLS con nailon [42].

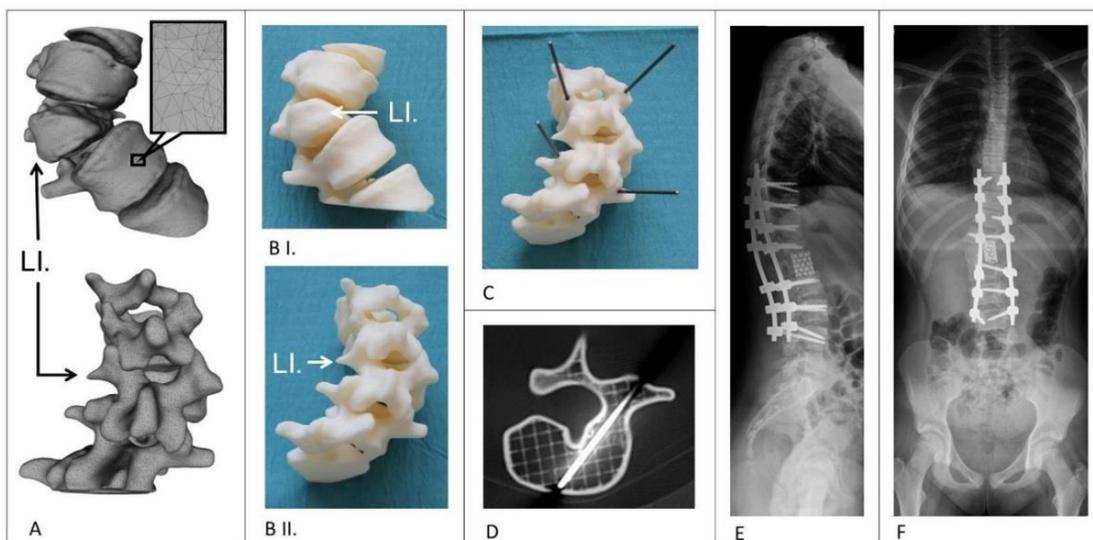


Fig. 47. Modelos FDM utilizados para planear una operación [132].

Respecto al segundo, las prótesis permanentes son habitualmente utilizadas en odontología y ortopedia. Dichas prótesis suelen producirse con aleaciones de Ti o CoCr, ya que presentan la durabilidad, la fuerza, la resistencia a la corrosión y la baja respuesta inmune necesarias para esta aplicación. Sin embargo, estos materiales acaban desgastándose o desgastando a las articulaciones y a los huesos cercanos. La AM, en especial la técnica LENS™ (que pertenece a la categoría DED), ha sido extensamente utilizada para investigar nuevos materiales para la producción de prótesis metálicas con mejores propiedades, con el objetivo de alargar la vida útil de las prótesis, minimizar las complicaciones y evitar la necesidad de cirugías de revisión. Específicamente se pretende fabricar materiales con una mayor resistencia al desgaste, una mayor dureza y un menor coeficiente de fricción cuando está en contacto con huesos y articulaciones. Alguno de los materiales estudiados que han generado buenos resultados son materiales compuestos basados en Ti_6Al_4V como, por ejemplo, el $Ti_6Al_4V/Si-HA$ y el $Ti_6Al_4V/Ti-TiO_2$ [73, 75, 80, 103].

Este tipo de implantes suele producirse mediante técnicas tradicionales como el mecanizado. Sin embargo, en los últimos años ha crecido notablemente el interés de utilizar la AM como método de fabricación. El uso de técnicas de AM como la PBF y la DED es especialmente prometedor para prótesis altamente personalizadas, debido a que, por naturaleza, estas prótesis no pueden fabricarse en masa y, por lo tanto, su producción mediante técnicas tradicionales es excesivamente costosa. Uno de estos casos es el tratamiento de tumores óseos donde la anatomía del paciente se ve altamente alterada. En la **Fig. 48 a y b izq.** se muestran prótesis personalizadas de una clavícula y de una escápula en comparación con los tumores. En la **Fig. 48 a y b dcha.** se muestran las prótesis implantadas. La utilización de AM para fabricar implantes también resulta interesante para casos donde las prótesis convencionales resultan en una reducción de la movilidad del paciente. En la **Fig. 48 c** se puede apreciar una prótesis tibial, ejemplo de prótesis fabricada mediante AM que resulta en menores restricciones para el paciente que la opción convencional [41, 103].

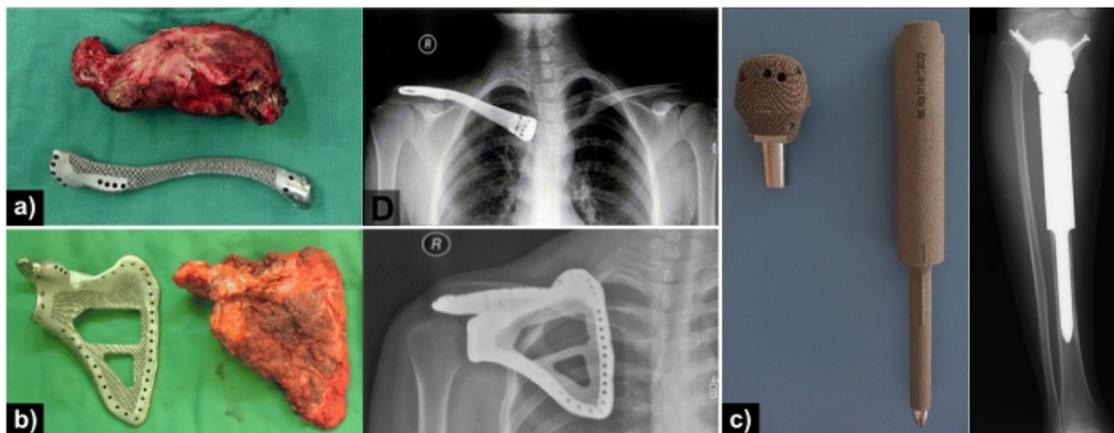


Fig. 48. (a) clavícula; (b) escápula; (c) prótesis tibial [103].

En cuanto al tercero, la AM tiene la capacidad de fabricar andamios, estructuras microscópicamente complejas utilizadas en ingeniería de tejidos como soporte para cultivos celulares. Tienen como función estimular respuestas celulares, suministrar moléculas activas y proporcionar soporte estructural para tejidos en desarrollo. Las técnicas de AM permiten un mayor control sobre la fabricación de los andamios frente a las técnicas tradicionales, abriendo puertas a nuevas posibles aplicaciones médicas. La alta flexibilidad geométrica, característica de la AM, permite la fabricación de andamios con estructuras personalizables a escala micro y macro. Esto hace posible la formación de

poros interconectados, factor importante para permitir, por ejemplo, la imitación de la estructura ósea. Una de las aplicaciones para estas estructuras es promover el desarrollo de tejido dentro y alrededor de una prótesis, favoreciendo la regeneración. Eventualmente, el andamio se consume por el organismo, siendo sustituido por el tejido regenerado. En la **Fig. 49** se muestran diferentes andamios metálicos biodegradables fabricados con SLM utilizando aleaciones de magnesio (**Fig. 49 a-c**), Fe puro (**Fig. 49 d-f**) y Mg puro (**Fig. 49 g-i**) [40, 43, 44, 48].

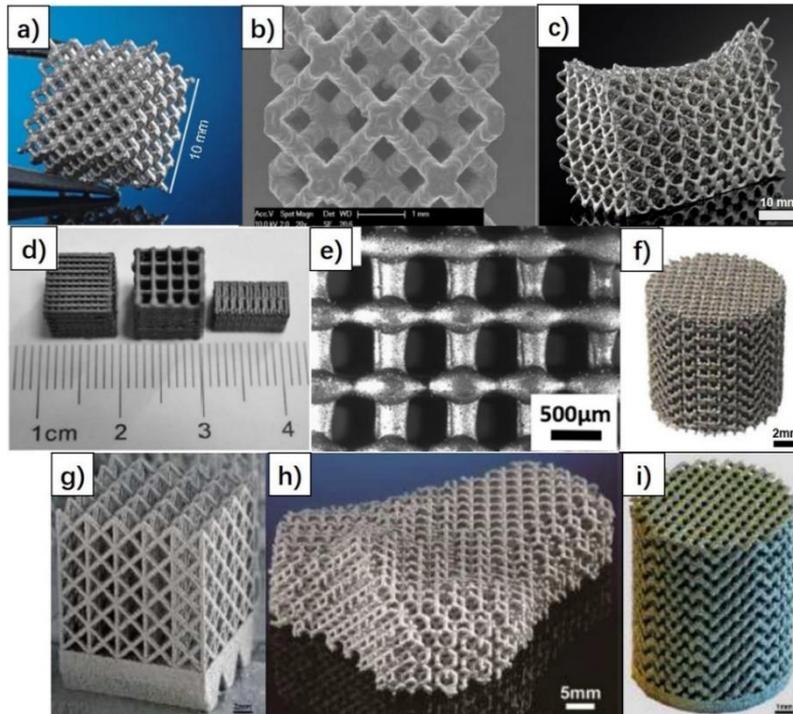


Fig. 49. Andamios metálicos biodegradables fabricados con SLM [48].

Finalmente, el cuarto punto, y el más técnicamente complejo, permite aplicaciones como la impresión de una oreja biónica con mejores capacidades que la oreja humana (**Fig. 50**). No obstante, todavía existen muchas barreras entre el estado actual de la tecnología y la capacidad de imprimir tejidos y órganos trasplantables. Un órgano es muy complejo, al igual que su funcionamiento químico y mecánico. Imprimir un órgano funcional supone reproducir una estructura celular enormemente compleja, lo que hace necesario imitar de forma extremadamente específica la proliferación y diferenciación de las células. A pesar de que este campo haya experimentado un gran crecimiento en las últimas dos décadas, para hacer la impresión de órganos y tejidos funcionales una realidad tangible todavía es necesario grandes avances en múltiples disciplinas [45, 49].

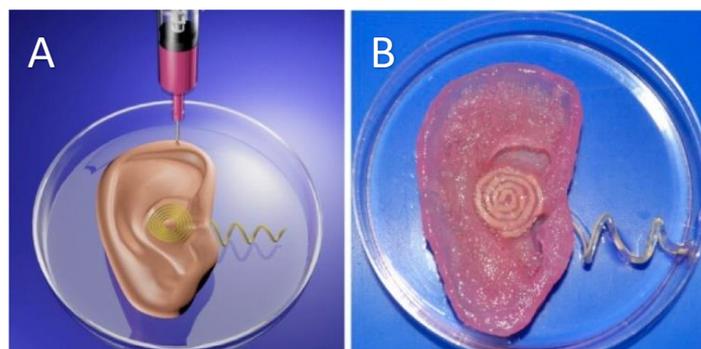


Fig. 50. (A) Ilustración 3D de la oreja biónica; (B) foto de la oreja biónica impresa [45].

7.3 AUTOMOCIÓN E INDUSTRIA AEROESPACIAL

Debido a la naturaleza de sus productos, las industrias de automoción y aeroespacial están continuamente en busca de nuevas tecnologías para la reducción de sus tiempos y costes de producción. La rápida adopción de la AM por estas dos industrias tiene su raíz en la gran libertad geométrica, que hace posible la fabricación de piezas con formas complejas, abriendo puertas a una mejor optimización de la funcionalidad de la pieza respecto a la cantidad de material utilizado, el peso total de la pieza y el tiempo de producción. La reducción de peso es un factor muy importante en la industria aeroespacial y en la automoción, ya que se reduce los requerimientos para impulsar el vehículo y también el consumo de combustible. En la **Fig. 51** se pueden observar dos casos de la aplicación de esta posibilidad en piezas del Airbus A320 (**Fig. 51 izq.**) y del Airbus A380 (**Fig. 51 dcha.**) fabricadas mediante SLS. Además, en la **Fig. 52** se muestra el potencial de la AM para impulsar la innovación. En la **Fig. 52 a** se puede ver un neumático biodegradable fabricado mediante AM y en la **Fig. 52 b** una llanta metálica [21,66, 149].



Fig. 51. Piezas antes y después de su optimización: pieza del Airbus A320 (izq.) y una pieza del Airbus A380 (dcha.) [149].

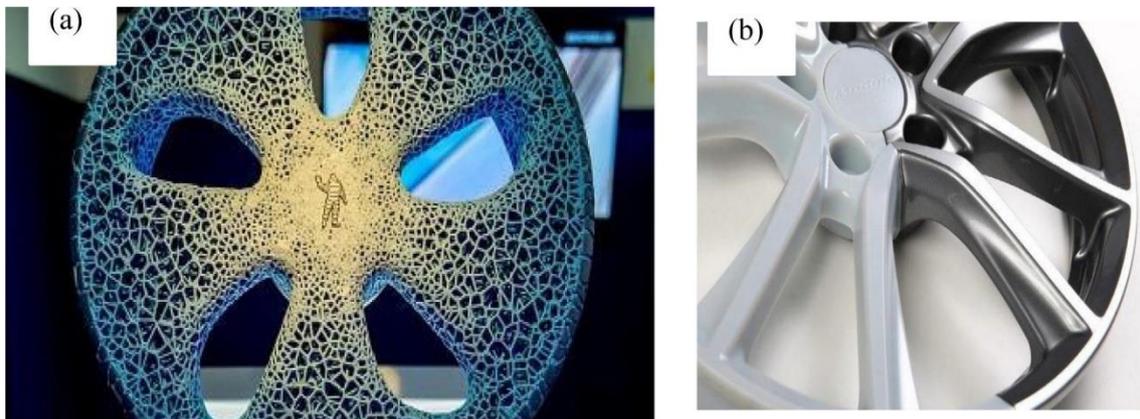


Fig. 52. Artículos producidos mediante AM (a) Neumático biodegradable fabricado por Michelin (b) Llanta metálica [66].

Además, la libertad de diseño que posibilita la AM hace viable producir piezas extremadamente complejas que, con técnicas convencionales, tendrían que fabricarse por partes. Por ejemplo, el inyector de combustible de GE Aviation pasó de conformar 18 piezas a ser fabricado como una unidad (**Fig. 53**). Además, el inyector vio su peso reducido en un 25% y su vida útil se multiplicó por cinco, causando una gran demanda de los motores con este inyector [21].



Fig. 53. Inyector de combustible producido con fabricación aditiva [21].

Algunas otras aplicaciones comerciales de la AM en estas industrias incluyen la fabricación de componentes de alta complejidad para satélites, helicópteros y motores de reacción, así como cajas de cambio, tubos de escape y motores para coches. Diferentes piezas para turbinas y motores fabricadas mediante AM se muestran en la Fig. 54. Los métodos de AM utilizados para cada pieza fueron LENS™ (Fig. 54 a), EBM (Fig. 54 b), SLM (Fig. 54 c, Fig. 54 d y Fig. 54 f) y BJ (Fig. 54 e). Además de producir este tipo de componentes, la técnica LENS™ también se utiliza para reparar motores, alargando la vida útil de las piezas dañadas y reduciendo costes [27].

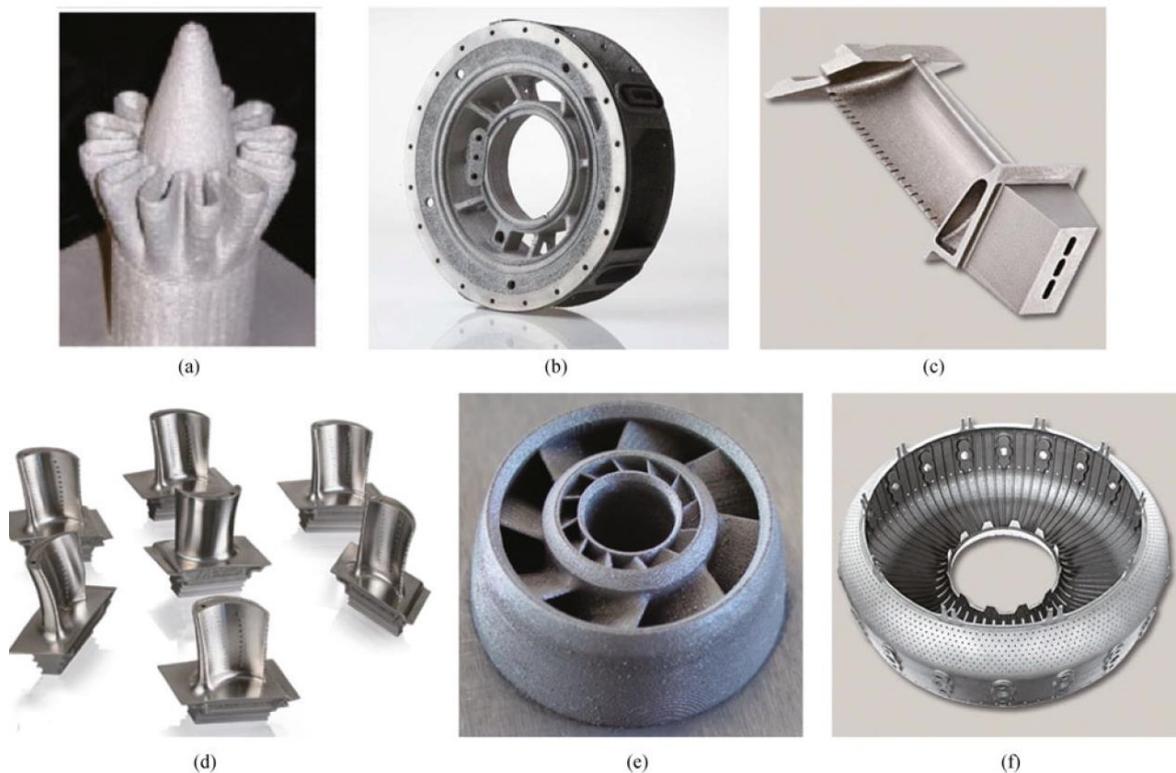


Fig. 54. Piezas para turbinas y motores fabricadas mediante múltiples técnicas de AM [27].

7.4 CONSTRUCCIÓN

Las tecnologías de AM han traído a la industria médica, automotriz y aeroespacial una serie de beneficios, como los expuestos anteriormente, que han dado lugar a una evolución contundente de estas industrias, especialmente la médica. Estas industrias van por delante del sector de la construcción en cuanto a la adopción de la AM, pero el impacto de esta tecnología en la industria de la construcción tiene el potencial de ser similar a los anteriormente mencionados, tanto en el proceso de construcción como en la fabricación de piezas. Algunas de las ventajas que trae consigo esta tecnología a este campo son la reducción de los tiempos de construcción, la capacidad de utilizar geometrías más complejas y, por lo tanto, una mayor libertad creativa, la reducción del desperdicio de materiales, la reducción de mano de obra, más seguridad durante la construcción y una reducción general de costes. Con todas sus ventajas, la AM trae consigo retos como la necesidad de ingenieros mejor formados en las herramientas digitales involucradas y el hecho de que el diseño CAD no puede tener errores (debido al menor nivel de implicación humana en el proceso de producción), lo que aumenta el número de decisiones a ser tomadas desde la fase de diseño. Entre las limitaciones estaría la falta de regularización, estandarización y confianza por parte de las autoridades, así como la amenaza a muchos de los puestos de trabajo del sector [21, 64].

Se han llevado a cabo una serie de experimentos alrededor del concepto de construir con impresión 3D, entre los que se encuentra la técnica Batiprint3D™, que se basa en realizar un encofrado con dos paredes paralelas de espuma de PU y rellenarlo con hormigón utilizando un brazo robótico. Esta técnica tiene la ventaja de que el PU sirve, no sólo como molde para el hormigón fresco, sino también como aislante térmico y acústico. La técnica Batiprint3D™ se ha utilizado para construir Yhnova™ (Fig. 55), una casa de 95m² localizada en Nantes (Francia), para demostrar las capacidades de la tecnología. Algunas otras tecnologías para construcción con AM disponibles en el mercado son WinSun, Constructions-3D, Apis Cor y XtreetE [64].



Fig. 55. Yhnova™ sin revestimientos (arriba); Yhnova™ terminada (abajo) [64].

En la **Fig. 56** se pueden apreciar otros ejemplos de estructuras de grandes dimensiones fabricadas mediante AM. Estos ejemplos representan el enorme potencial de la fabricación aditiva, mostrando que es posible fabricar mediante AM casas (**Fig. 56 b**, **Fig. 56 d**, **Fig. 56 h**, **Fig. 56 j** y **Fig. 56 l**), puentes (**Fig. 56 f**), edificios (**Fig. 56 c**), oficinas (**Fig. 56 e** y **Fig. 56 g**) y esculturas de gran escala (**Fig. 56 a** y **Fig. 56 i**). Las **Fig. 56 b-e** fueron fabricadas por Winsun, una gran empresa de construcción con AM establecida en China que utiliza materiales de construcción reciclados en sus proyectos. Esta empresa ha sido capaz de fabricar 10 casas de 200 m² en menos de 24 horas (una de las casas se muestra en la **Fig. 56 b**). La oficina mostrada en la **Fig. 56 e** (también fabricada por Winsun) se realizó con un coste de construcción y mano de obra 80% y 60% menor, respectivamente. Además, se generó 60% menos residuos en comparación con una oficina equivalente fabricada con técnicas tradicionales [21, 150].

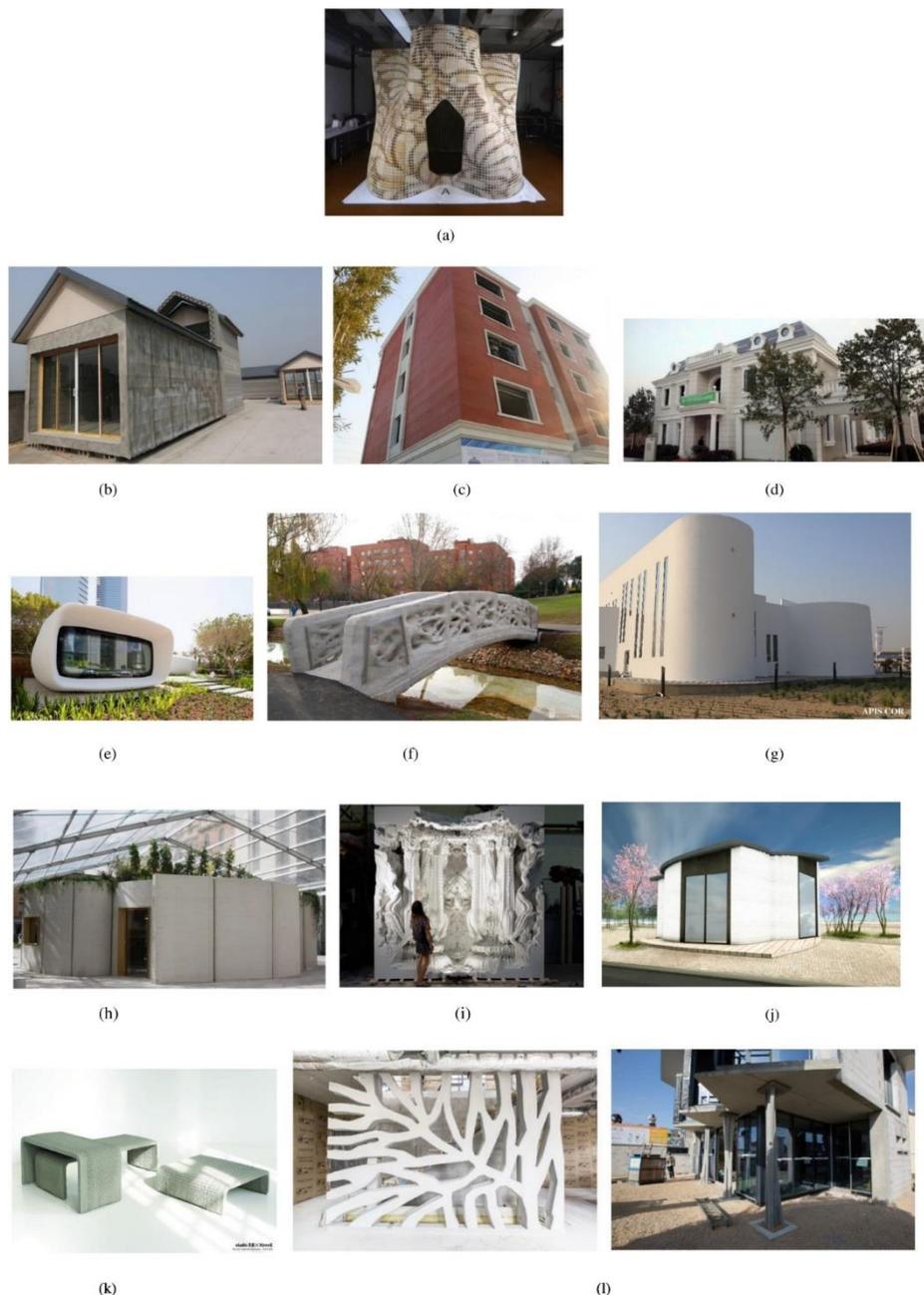


Fig. 56. Estructuras de grandes dimensiones impresas en 3D (a) Bloom Pavilion; (b) Casas, Winsun; (c) Edificio de varios pisos, Winsun; (d) Mansión, Winsun; (e) Primera oficina fabricada con AM, Winsun; (f) Puente; (g) Edificio administrativo de dos plantas, Apis Cor; (h) Casa; (i) Escultura llamada Digital Grotesque, (j) Primer edificio impreso en 3D en Europa (The BOD); (k) Bancos de cemento, XtreeE; (l) Casa conceptual Yrys, XtreeE [150].

8. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Grado se trataba inicialmente de realizar ensayos mecánicos sobre probetas de PLA fabricadas mediante FDM con diferentes parámetros de impresión, con la finalidad de definir empíricamente las condiciones de operación óptimas para producir PLA con esta técnica. Sin embargo, debido a la situación actual que vivimos con la pandemia del virus COVID19, ha sido inviable acceder a las instalaciones para realizar las impresiones y los ensayos necesarios. Como alternativa, se ha elegido realizar una revisión bibliográfica sobre las técnicas de AM, con tal de centralizar la información disponible y facilitar la introducción a este campo a aquellas personas interesadas, al tratarse de una tecnología prometedora y relativamente nueva.

Así, en este trabajo se han presentado los principios fundamentales de operación de las siete categorías de AM y sus principales fortalezas y obstáculos, así como los diferentes materiales disponibles. Por otro lado, se ha expuesto, a través de ejemplos, el gran potencial que tiene la AM para revolucionar algunas de las industrias más importantes del mundo. Las características más destacadas a lo largo de este trabajo han sido la gran flexibilidad geométrica y la capacidad para fabricar nuevos materiales que ofrece la AM. La combinación de estos dos factores genera la posibilidad de disminuir las barreras económicas que, hasta el momento, han limitado el rango de aplicaciones de muchos materiales, creando una oportunidad para redefinir los límites de diversos materiales (especialmente materiales metálicos). Esto es, en gran medida, lo que ha generado la innovación vista en industrias como la industria médica y la industria aeroespacial. No obstante, el menor deshecho de material y el menor gasto energético de la AM en comparación con las técnicas tradicionales es un factor que puede acelerar notablemente la adopción de la AM, principalmente cuando se tiene en cuenta que la concienciación de la sociedad y las medidas medioambientales impuestas por las autoridades están en constante aumento.

Sin embargo, la AM todavía debe superar una serie de obstáculos para atraer una mayor porción del mercado. Entre estos se encuentra la necesidad de un mayor control sobre la calidad de los productos fabricados. Como se ha discutido a lo largo de este documento, los resultados obtenidos mediante técnicas de AM varían drásticamente respecto a las condiciones de operación. Es necesario estudiar con más profundidad la relación entre calidad y los parámetros, con el objetivo de establecer procedimientos de fabricación estándar para la industria de la AM. Esta estandarización aceleraría enormemente la penetración de la AM en industrias con altos requerimientos de seguridad y repetibilidad. Además, para hacerse más competitiva, la AM necesita una reducción de los tiempos y costes de producción.

Como conclusión, es evidente que la AM aporta nuevos materiales, nuevos productos y nuevas aplicaciones que tienen el potencial de revolucionar múltiples industrias. Es importante continuar la investigación y el desarrollo de esta tecnología y sus aplicaciones, así como preparar a los futuros profesionales con los conocimientos y las herramientas necesarias para trabajar con esta nueva tecnología. Sin embargo, hay que matizar que no se trata de que la AM sea una sustitución de las técnicas de fabricación tradicionales. Cada tecnología aporta valor en diferentes áreas y situaciones. El escenario donde se consigue el mayor aumento de productividad es aquel donde las técnicas de AM y las técnicas convencionales trabajan de manera sinérgica, optimizando sus puntos fuertes, minimizando sus debilidades, y generando el mayor valor posible para los fabricantes, los consumidores y, principalmente, la sociedad.

9. CONCLUSIONS

The initial intention with this Degree Final Project was to perform mechanical tests on PLA specimens fabricates by FDM with different printing parameters, with the objective of empirically defining the optimal operation conditions to produce PLA with this technique. However, due to the current situation we live in because of the COVID19 virus pandemic, it has not been viable to access the installations needed for the printing and testing of the specimens. As an alternative, a literature review on AM was carried out, with the goal of centralizing the available information and easing the introduction to this field to those interested, since this is a promising and relatively new technology.

Hence, in this work the fundamental principles of the seven AM categories, their strengths and obstacles, as well as the different materials available have been presented. On the other hand, the great potential that AM has to revolutionize some of the most important industries in the world is presented through examples. The most highlighted characteristics in this work have been the great geometrical flexibility and the capacity of fabricating new materials that AM offers. The combination of these two factors generate the possibility of decreasing the economic barriers that, until now, have limited the range of applications of many materials, creating an opportunity to redefine the limits of a lot of materials (especially metallic materials). This is, to a large extent, what has generated the innovation seen in industries such as the medical industry and the aerospace industry. However, the less waste of material and the lower energy consumption of AM compared to traditional techniques is a factor that can significantly accelerate the adoption of AM, especially when taking into account that the awareness of society and the environmental measures imposed by the authorities are constantly increasing.

However, AM still must overcome several obstacles in order to attract a larger share of the market. Among these is the need for greater control over the quality of manufactured products. Throughout this document, the results obtained by the AM techniques vary drastically with respect to operating conditions has been discussed. It is necessary to carry out a more in-depth study of the relationship between quality and the parameters in order to establish standard manufacturing procedures for the industry of AM. This standardization would greatly accelerate the penetration of AM in industries with high requirements for security and repeatability. In addition, to become more competitive, AM needs a reduction in production times and costs.

In conclusion, it is clear that AM brings new materials, new products and new applications that have the potential to revolutionize multiple industries. It is important to continue the research and development of this technology and its applications, as well as to prepare future professionals with the knowledge and tools necessary to work with this new technology. However, it must be clarified that it is not about AM replacing traditional manufacturing techniques. Each technology adds value in different areas and situations. The scenario where the greatest increase in productivity is achieved is one where AM techniques and conventional techniques work synergistically, optimizing their strengths, minimizing their weaknesses, and generating the highest possible value for manufacturers, consumers and, more importantly, society.

10. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Andamios (scaffolds)

Estructuras, normalmente biodegradables, utilizadas en el campo de ingeniería de tejidos. Tienen como función estimular respuestas celulares, suministrar moléculas activas y proporcionar soporte estructural para tejidos en desarrollo.

Aleación de alta entropía

Aleación con 5 o más elementos principales (con un 5-35% de concentración cada uno), pudiendo contener también elementos secundarios con concentraciones <5%.

Anisotropía

Se dice que un material tiene anisotropía cuando propiedades varían según la dirección en que son examinadas u observadas.

Bond-then-Form

Metodología empleada en algunos procesos de laminado de hojas que opera de tal forma que las láminas de material primero se sitúan, luego se adhieren y, finalmente, se cortan.

Catión

Ión con carga neta positiva.

Cerámico

Material compuesto por elementos metálicos y no metálicos.

Conversión

Fracción de productos deseados generados mediante una reacción química.

Deposición Directa de Energía (Directed Energy Deposition, DED)

Método de fabricación aditiva basado en la fusión de la materia prima a la vez que esta se deposita, donde el material fundido forma, progresivamente, el objeto deseado.

Diseño Asistido por Ordenador (Computer Aided Design, CAD)

Software que tiene como finalidad servir como herramienta de apoyo durante el proceso de diseño.

Electron Beam Melting, EBM

Técnica de Fusión de Lecho en Polvo que utiliza un haz de electrones para lograr la unión entre partículas a una temperatura igual o mayor que la de fusión del material.

Estado de equilibrio

Cuando las variables que determinan un proceso se mantienen constantes en el tiempo.

Estereolitografía (Stereolithography, SLA)

Técnica de Fotopolimerización en cuba que utiliza un láser para fotopolimerizar, punto por punto, una resina.

Extrusión de Material (Material Extrusion, ME)

Método de fabricación aditiva basado en la fusión y extrusión de un filamento.

Fabricación Aditiva (Additive manufacturing, AM)

Producción automatizada que se realiza mediante la agregación ordenada de materia prima según un modelo matemático que reproduce las características geométricas del objeto.

Fabricación Asistida por Ordenador (Computer Aided Manufacturing, CAM)

Software dedicado al control automático de herramientas para la fabricación de productos.

Floculación

Unión entre partículas suspendidas en un fluido.

Fluido newtoniano

Fluido cuya viscosidad puede suponerse constante.

Formato STL

Tipo de archivo que traduce las características geométricas de un diseño generado con un software CAD en triángulos, conservando solamente la superficie del diseño.

Form-then-Bond

Metodología empleada en algunos procesos de Laminado de Hojas que opera de tal forma que las láminas de material primero se cortan, luego se sitúan y, finalmente, se adhieren.

Fotoiniciador

Compuesto químico que, al ser expuesto a la luz, funciona como un catalizador para la polimerización. Es el responsable de que la fotopolimerización sea posible.

Fotopolimerización en cuba (VAT Photopolymerization)

Método de fabricación aditiva basado en la polimerización de una resina fotosensible en el interior de un tanque. Dicha polimerización se incita mediante la exposición de la resina a una fuente de luz.

Fotopolimerización

Se dice de un proceso de polimerización inducido por la luz.

Fotosensible

Se dice de aquel material que sufre cambios en su estructura o en sus propiedades al ser expuesto a la luz (normalmente a una longitud de onda determinada).

Fusión completa

Método que logra la unión entre partículas a una temperatura igual o mayor que la de fusión del material.

Fusión de Lecho en Polvo (Powder Bed Fusion, PBF)

Método de fabricación aditiva basado en el sinterizado de la materia prima situada en un lecho, donde el material sinterizado forma, progresivamente, el objeto deseado.

G-code

Archivo que contiene la información generada por el Slicer.

Gota satélite

Pequeña gota que se separa la gota principal tras la inyección.

Gradiente

Variación de una característica a lo largo de una distancia, una superficie o un volumen.

Gráfica empírica de calibrado

Representación gráfica resultante de la experimentación que tiene como objetivo determinar una relación causa-efecto entre dos o más variables.

Grupo funcional

Átomo, o conjunto de átomos, responsables de la reactividad de un compuesto orgánico.

Impacto medioambiental

Efecto de una actividad sobre el medio ambiente.

Impresión 3D

Término coloquial que hace referencia a la fabricación aditiva.

Inyección Aglutinante (Binder Jetting, BJ)

Método de fabricación aditiva basado en la unión, mediante un agente aglutinante, de partículas depositadas en un lecho.

Inyección continua (Continuous Inkjet Printing, CIJ)

Método de inyección de tinta en el cual la alimentación de tinta se realiza de forma continua, eliminando el exceso de material antes de que este contacte con el sustrato. La situación de las gotas en el sustrato se lleva a cabo con campos eléctricos.

Inyección de tinta (Inkjet Printing, IJP)

Método para la creación de imágenes en 2D a partir de la deposición de gotas de tinta sobre un sustrato (normalmente papel).

Inyección por demanda (Drop-On-Demand, DOD)

Método de inyección de tinta en el cual la alimentación de tinta se realiza de manera discontinua en función de la necesidad. La situación de las gotas en el sustrato se lleva a cabo mecánicamente.

Ión

Átomo, o molécula, que no presenta una carga neutra.

Keyholing

Fenómeno que ocurre durante la fusión localizada de un material cuando el aporte energético es demasiado grande, que resulta en una perforación de la superficie del material.

Laminado de Hojas (Sheet Lamination)

Método de fabricación aditiva que utiliza la superposición de láminas de material y el corte de estas para formar objetos tridimensionales.

Laminated Object Manufacturing, LOM

Técnica de Laminado de Hojas que opera según la metodología Bond-then-Form.

Laser Engineered Net Shaping, LENS™

Técnica de Deposición Directa de Energía que utiliza un láser como fuente de energía (marca registrada de Optomec).

Material con función gradiente (Functionally Graded Material, FGM)

Es un material con diferentes propiedades a lo largo de su volumen debido a un gradiente en su composición y en su estructura interna.

Mecanizado

Método de fabricación que parte de un bloque de material sólido y progresivamente consigue la forma deseada retirando pequeños fragmentos de material.

Metal

Elementos químicos buenos conductores del calor y de la electricidad, sólidos a temperatura estándar (con excepción del mercurio) y con un brillo característico.

Metal amorfo

Aleación basada en metales que no presenta una estructura cristalina. También se conoce como vidrio metálico.

Moldeo

Método de fabricación que produce objetos mediante la solidificación de materia en un espacio restringido (molde).

Piezoeléctrico

Se dice de aquellos materiales capaces de generar una carga eléctrica cuando se les aplica una tensión mecánica o que genera tensiones mecánicas internas al recibir una carga eléctrica.

Polimerización

Es la agrupación química de varias moléculas pequeñas (monómeros) para formar grandes cadenas (polímeros).

Polímero

Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas (monómeros).

Postratamiento

Etapa de fabricación que tiene como finalidad eliminar imperfecciones y/o cambiar propiedades del producto.

Presión capilar

Presión en la interfaz entre dos fluidos inmiscibles, consecuencia de la interacción entre éstos y un conducto sólido, que sirve como fuerza impulsora para el desplazamiento de uno de los dos fluidos por el interior del conducto.

Procesado por Luz Digital (Digital Light Processing, DLP)

Técnica de Fotopolimerización en cuba que utiliza una luz digital para fotopolimerizar, capa por capa, una resina.

Prototipo

Ejemplar fabricado con el fin de verificar el diseño, la funcionalidad y la viabilidad de una idea.

Proyección de Material (Material Jetting, MJ)

Método de fabricación aditiva basado en la deposición selectiva de gotas de material para llevar a cabo la producción de objetos.

Radical

Compuesto inestable y con gran reactividad.

Selective Laser Melting, SLM

Técnica de Fusión de Lecho en Polvo que utiliza un láser para lograr la unión entre partículas a una temperatura igual o mayor que la de fusión del material.

Selective Laser Sintering, SLS

Técnica de Fusión de Lecho en Polvo que utiliza un láser para lograr la unión entre partículas por debajo de la temperatura de fusión del material.

Sinterizado en estado sólido

Sinterizado realizado por debajo de la temperatura de fusión de un material.

Sinterizado Líquido

Sinterizado que funde un material secundario (con menor punto de fusión) para lograr la unión entre las partículas de un material con un punto de fusión muy alto.

Sinterizado químicamente inducido

Sinterizado que tiene lugar como resultado de una reacción química.

Sinterizar

Proceso que consiste en exponer un producto a variaciones de presión y/o temperatura con la finalidad de aumentar su densidad y mejorar sus propiedades físicas.

Slicer

Software que genera, a partir de un archivo STL y de información introducida por el usuario, un modelo matemático que detalla todas las condiciones de trabajo para la fabricación de un objeto mediante fabricación aditiva.

Soldadura Ultrasónica (Ultrasonic Consolidation, UC)

Técnica de Laminado de Hojas que utiliza ondas ultrasónicas para unir finas láminas de material, eliminando los excesos mediante un proceso de mecanizado para dar lugar a un objeto.

Sonotrodo

Aparato utilizado en Soldadura Ultrasónica para emitir las ondas ultrasónicas.

Tensión térmica

Tensión mecánica causada por cambios de temperatura, resultando en una dilatación o una contracción.

Termoplásticos

Polímeros capaces de fundirse y solidificarse de forma reversible.

Vida útil

Periodo de tiempo durante el cual un objeto es adecuado para realizar la función para la que ha sido creado.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-EN ISO/ASTM 52900:2015. Fabricación Aditiva. Principios Generales. Terminología.
- [2] M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business Horizons*, Volume 60 (2017), pp. 677-688, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
- [3] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt, Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing, *Chemical Reviews*, Volume 117 (2017), pp. 10212-10290, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
- [4] T. Grimm, User's guide to rapid prototyping, Society of Manufacturing Engineers (2004).
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Development of Additive Manufacturing Technology, *Additive Manufacturing Technologies* (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_2.
- [6] K. Rajaguru, T. Karthikeyan, V. Vijayan, Additive manufacturing – State of art, *Materials Today: Proceedings*, Volume 21 (2020), Part 1, pp. 628-633, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.728>.
- [7] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, C. Charitidis, Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *Materials Today*, Volume 21 (2018), pp. 22-37, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- [8] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. L. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, P. D. Zavattieri, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, Volume 69 (2015), pp. 65-89, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [9] E.M. Sachs, J.S. Haggerty, M.J. Cima, P.A. Williams. Three-dimensional printing techniques, Google Patents (1993).
- [10] M. Ziaee, N. B. Crane, Binder jetting: A review of process, materials, and methods, *Additive Manufacturing*, Volume 28 (2019), pp. 781-801, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
- [11] F. Dini, S. A. Ghaffari, J. Jafar, R. Hamidreza, S. Marjan, A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition, *Metal Powder Report*, Volume 75 (2020), pp. 95-100, <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.05.001>.
- [12] K. Lu, M. Hiser, W. Wu, Effect of particle size on three dimensional printed mesh structures, *Powder Technology*, Volume 192 (2009), pp. 178-183, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.12.011>.
- [13] Y. Bai, G. Wagner, C. B. Williams, Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals, *ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 139 (2017), 081019, <https://doi.org/10.1115/1.4036640>.
- [14] A. Butscher, M. Bohner, S. Hofmann, L. Gauckler, R. Müller, Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder-based three-dimensional printing, *Acta Biomaterialia*, Volume 7 (2011), pp. 907-920, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.09.039>.

- [15] H. Miyanaji, S. Zhang, L. Yang, A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 124 (2018), pp. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.09.001>.
- [16] B. Derby, Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution, *Annual Review of Materials Research*, Volume 40 (2010), pp. 395-414, <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104502>.
- [17] R. Noguera, M. Lejeune, T. Chartier, 3D fine scale ceramic components formed by ink-jet prototyping process, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 25 (2005), pp. 2055-2059, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.223>.
- [18] K. Range, F. Feuillebois, Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 203 (1998), pp. 16-30, <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5518>.
- [19] B. Derby, Additive Manufacture of Ceramics Components by Inkjet Printing, *Engineering*, Volume 1 (2015), pp. 113-123, <https://doi.org/10.15302/J-ENG-2015014>.
- [20] H. Miyanaji, N. Momenzadeh, L. Yang, Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process, *Additive Manufacturing*, Volume 20 (2018), pp. 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.008>.
- [21] C. Buchanan, L. Gardner, Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges, *Engineering Structures*, Volume 180 (2019), pp. 332-348, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>.
- [22] A. Dass, A. Moridi, State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design, *Coatings*, Volume 9 (2019), <https://dx.doi.org/10.3390/coatings9070418>.
- [23] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Beam Deposition Processes*, Additive Manufacturing Technologies (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_9.
- [24] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, A. Yadollahi, An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Additive Manufacturing*, Volume 8 (2015), pp. 36-62, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001>.
- [25] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, Volume 143 (2018), pp. 172-196, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [26] W. E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 23 (2014), pp. 1917–1928, <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- [27] N. Guo, M. C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Volume 8 (2013), pp. 215–243, <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>.
- [28] F. Esteve, D. Olivier, Q. Hu, M. Baumanners, *Micro-additive Manufacturing Technology, Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications*, Springer Tracts in Mechanical Engineering (2017), https://doi.org/10.1007/978-3-319-39651-4_3.

- [29] S. K. Eshkalak, A. Chinnappan, W.A.D.M. Jayathilaka, M. Khatibzadeh, E. Kowsari, S. Ramakrishna, A review on inkjet printing of CNT composites for smart applications, *Applied Materials Today*, Volume 9 (2017), pp. 372-386, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.09.003>.
- [30] R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea, Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces, *Experiments in Fluids*, Volume 33 (2002), pp. 112–124, <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0431-x>.
- [31] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Powder Bed Fusion Processes, *Additive Manufacturing Technologies* (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_5.
- [32] Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Liu, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, Y. He, 3D printing of ceramics: A review, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 39 (2019), pp. 661-687, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.
- [33] N. Ahmed, Direct metal fabrication in rapid prototyping: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 42 (2019), pp. 167-191, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.001>.
- [34] C.R. Deckard. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, Google Patents (1989).
- [35] W. Meiners, K. Wissenbach, A. Gasser. Selective laser sintering at melting temperature, Google Patents (2001).
- [36] S. Bose, D. Ke, H. Sahasrabudhe, A. Bandyopadhyay, Additive manufacturing of biomaterials, *Progress in Materials Science*, Volume 93 (2018), pp. 45-111, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>.
- [37] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Sheet Lamination Processes, *Additive Manufacturing Technologies* (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_8.
- [38] L. Wang, Y. Luo, Z. Yang, W. Dai, X. Liu, J. Yang, B. Lu, L. Chen, Accelerated refilling speed in rapid stereolithography based on nano-textured functional release film, *Additive Manufacturing*, Volume 29 (2019), 100791, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100791>.
- [39] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, R. C. Advincula, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Additive Manufacturing*, Volume 20 (2018), pp. 44-67, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
- [40] Q. Yan, H. Dong, J. Su, J. Han, B. Song, Q. Wei, Y. Shi, A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications, *Engineering*, Volume 4 (2018), pp. 729-742, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>.
- [41] H. Fan, J. Fu, X. Li, Y. Pei, X. Li, G. Pei, Z. Guo, Implantation of customized 3-D printed titanium prosthesis in limb salvage surgery: a case series and review of the literature, *World Journal of Surgical Oncology*, Volume 13 (2015), 308, <https://doi.org/10.1186/s12957-015-0723-2>.
- [42] M. Osswald, A. Wegmann, R. Greif, L. Theiler, T. H. Pedersen, Facilitation of bronchoscopy teaching with easily accessible low-cost 3D-printing, *Trends in Anaesthesia and Critical Care*, Volume 15 (2017), pp. 37-41, <https://doi.org/10.1016/j.tacc.2017.07.001>.

- [43] P. Cools, C. Mota, I. Lorenzo-Moldero, R. Ghobeira, N. D. Geyter, L. Moroni, R. Morent, Acrylic Acid Plasma Coated 3D Scaffolds for Cartilage tissue engineering applications, *Scientific Reports*, Volume 8 (2018), 3830, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22301-0>.
- [44] A. Mumith, V. S. Cheong, P. Fromme, M. J. Coathup, G. W. Blunn, The effect of strontium and silicon substituted hydroxyapatite electrochemical coatings on bone ingrowth and osseointegration of selective laser sintered porous metal implants, *PLoS ONE*, Volume 15 (2020), e0227232, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227232>.
- [45] M. S. Mannoor, Z. Jiang, T. James, Y. L. Kong, K. A. Malatesta, W. O. Soboyejo, N. Verma, D. H. Gracias, M. C. McAlpine, 3D Printed Bionic Ears, *Nano Letters*, Volume 13 (2013), pp. 2634-2639, <https://doi.org/10.1021/nl4007744>.
- [46] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, A. V. Borille, Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components, *Procedia CIRP*, Volume 35 (2015), pp. 55-60, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.061>.
- [47] L. E. Murr, Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 32 (2016), pp. 987-995, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.011>.
- [48] Y. Qin, P. Wen, H. Guo, D. Xia, Y. Zheng, L. Jauer, R. Poprawe, M. Voshage, J. H. Schleifenbaum, Additive manufacturing of biodegradable metals: Current research status and future perspectives, *Acta Biomaterialia*, Volume 98 (2019), pp. 3-22, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.04.046>.
- [49] W. L. Ng, C. K. Chua, Y.-F. Shen, Print Me An Organ! Why We Are Not There Yet, *Progress in Polymer Science*, Volume 97 (2019), 101145, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101145>.
- [50] L. Deng, A. Gebert, L. Zhang, H.Y. Chen, D.D. Gu, U. Kühn, M. Zimmermann, K. Kosiba, S. Pauly, Mechanical performance and corrosion behaviour of Zr-based bulk metallic glass produced by selective laser melting, *Materials & Design*, Volume 189 (2020), 108532, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108532>.
- [51] N. Luo, C. Scheitler, N. Ciftci, F. Galgon, Z. Fu, V. Uhlenwinkel, M. Schmidt, C. Körner, Preparation of Fe-Co-B-Si-Nb bulk metallic glasses by laser powder bed fusion: Microstructure and properties, *Materials Characterization*, Volume 162 (2020), 110206, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110206>.
- [52] S. Yang, Z. Liu, J. Pi, Microstructure and wear behavior of the AlCrFeCoNi high-entropy alloy fabricated by additive manufacturing, *Materials Letters*, Volume 261 (2020), 127004, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127004>.
- [53] B. Li, L. Zhang, Y. Xu, Z. Liu, B. Qian, F. Xuan, Selective laser melting of CoCrFeNiMn high entropy alloy powder modified with nano-TiN particles for additive manufacturing and strength enhancement: Process, particle behavior and effects, *Powder Technology*, Volume 360 (2020), pp. 509-521, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.068>.

- [54] J. M. Park, J. Choe, J. G. Kim, J. W. Bae, J. Moon, S. Yang, K. T. Kim, J.-H. Yu, H. S. Kim, Superior tensile properties of 1%C-CoCrFeMnNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting, *Materials Research Letters*, Volume 8 (2020), pp. 1-7, <https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1638844>.
- [55] Y. Zhang, L. Wu, X. Guo, S. Kane, J. Zhang, Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 27 (2018), pp. 1–13, <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>.
- [56] E. N. Udofia, W. Zhou, Microextrusion based 3D printing - A review, *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2018*, pp. 2033-2060.
- [57] H. Qu, Additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds, *Materials Today Communications*, Volume 24 (2020), 101024, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101024>.
- [58] Z. Kang, B. Yu, S. Fu, D. Li, X. Zhang, Z. Qian, Z. Zhong, B. Yu, H. Ding, Y. Zhu, J. Huang, Three-dimensional printing of CaTiO₃ incorporated porous β -Ca₂SiO₄ composite scaffolds for bone regeneration, *Applied Materials Today*, Volume 16(2019), pp. 132-140, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.05.005>.
- [59] E.-H. Kim, H.-H. Choi, Y.-G. Jung, Fabrication of a ceramic core for an impeller blade using a 3D printing technique and inorganic binder, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 53 (2020), pp. 43-47, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.055>.
- [60] S. Ford, T. Minshall, Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education, *Additive Manufacturing*, Volume 25 (2019), pp. 131-150, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>.
- [61] R. Q. Berry, G. Bull, C. Browning, C. D. Thomas, G. Starkweather, J. Aylor, Use of digital fabrication to incorporate engineering design principles in elementary mathematics education, *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, Volume 10 (2010), 167-172.
- [62] G. Bull, J. Chiu, R. Berry, H. Lipson, C. Xie, Advancing children’s engineering through desktop manufacturing, *Handbook of Research on Educational Communications and Technology 4th edition* (2014), pp. 675-688, <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5>.
- [63] S.C.F. Fernandes, R. Simoes, Collaborative use of different learning styles through 3D printing, *2016 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education* (2016), <https://doi.org/10.1109/CISPEE.2016.7777742>.
- [64] B. Furet, P. Poullain, S. Garnier, 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete, *Additive Manufacturing*, Volume 28 (2019), pp. 58-64, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>.
- [65] P. Szymczyk-Ziółkowska, M. B. Łabowska, J. Detyna, I. Michalak, P. Gruber, A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, Volume 40 (2020), pp. 624-638, <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2020.01.015>.

- [66] R. Singh, A. Gupta, O. Tripathi, S. Srivastava, B. Singh, A. Awasthi, S.K. Rajput, P. Sonia, P. Singhal, K. K. Saxena, Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview, *Materials Today: Proceedings*, Volume 26 (2020), pp. 3058-3070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>.
- [67] D. I. Wimpenny, B. Bryden, I. R. Pashby, Rapid laminated tooling, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 138 (2003), pp. 214-218, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00074-8).
- [68] S. Yi, F. Liu, J. Zhang, S. Xiong, Study of the key technologies of LOM for functional metal parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 150 (2004), pp. 175-181, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.035>.
- [69] D.-K. Kim, W. Woo, E.-Y. Kim, S.-H. Choi, Microstructure and mechanical characteristics of multi-layered materials composed of 316L stainless steel and ferritic steel produced by direct energy deposition, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 774 (2019), pp. 896-907, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.390>.
- [70] T. Hauser, P. P. Breese, T. Kamps, C. Heinze, J. Volpp, A. F.H. Kaplan, Material transitions within multi-material laser deposited intermetallic iron aluminides, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101242, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101242>.
- [71] B. Zheng, T. Topping, J. E. Smugeresky, Y. Zhou, A. Biswas, D. Baker, E. J. Lavernia, The Influence of Ni-Coated TiC on Laser-Deposited IN625 Metal Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 41A (2010), 568–573, <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0126-5>.
- [72] W. Liu, J. N. DuPont, Fabrication of carbide-particle-reinforced titanium aluminide-matrix composites by laser-engineered net shaping, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 35 (2004), pp. 1133–1140, <https://doi.org/10.1007/s11661-004-1016-5>.
- [73] V. K. Balla, P. D. DeVasConCellos, W. Xue, S. Bose, A. Bandyopadhyay, Fabrication of compositionally and structurally graded Ti–TiO₂ structures using laser engineered net shaping (LENS), *Acta Biomaterialia*, Volume 5 (2009), pp. 1831-1837, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.01.011>.
- [74] B. Heer, A. Bandyopadhyay, Silica coated titanium using Laser Engineered Net Shaping for enhanced wear resistance, *Additive Manufacturing*, Volume 23 (2018), pp. 303-311, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.022>.
- [75] A. Bandyopadhyay, S. Dittrick, T. Gualtieri, J. Wu, S. Bose, Calcium phosphate–titanium composites for articulating surfaces of load-bearing implants, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 57 (2016), pp. 280-288, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.022>.
- [76] D.-S. Shim, G.-Y. Baek, J.-S. Seo, G.-Y. Shin, K.-P. Kim, K.-Y. Lee, Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process, *Optics & Laser Technology*, Volume 86 (2016), pp. 69-78, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.001>.
- [77] T. Wang, Y.Y. Zhu, S.Q. Zhang, H.B. Tang, H.M. Wang, Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 632 (2015), pp. 505-513, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.256>.

- [78] X.X. Yao, P. Ge, J.Y. Li, Y.F. Wang, T. Li, W.W. Liu, Z. Zhang, Controlling the solidification process parameters of direct energy deposition additive manufacturing considering laser and powder properties, *Computational Materials Science*, Volume 182 (2020), 109788, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109788>.
- [79] P. Guo, B. Zou, C. Huang, H. Gao, Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 240 (2017), pp. 12-22, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005>.
- [80] J. D. Avila, Z. Alrawahi, S. Bose, A. Bandyopadhyay, Additively Manufactured Ti6Al4V-Si-Hydroxyapatite composites for articulating surfaces of load-bearing implants, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101241, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101241>.
- [81] A. B. Peters, A. Hernandez, D. Zhang, M. C. Brupbacher, D. C. Nagle, P. M. McGuiggan, T. Mueller, J. B. Spicer, A Reaction Synthesis Approach to Additively Manufacture Net-Shape Chromium Carbide and Non-Oxide Refractory Ceramics, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101186, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101186>.
- [82] S. Li, L.-J. Zhang, J. Ning, X. Wang, G.-F. Zhang, J.-X. Zhang, S.-J. Na, B. Fatemeh, Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101206, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101206>.
- [83] N. S. Al-Mamun, K. M. Deen, W. Haider, E. Asselin, I. Shabib, Corrosion behavior and biocompatibility of additively manufactured 316L stainless steel in a physiological environment: the effect of citrate ions, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101237, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101237>.
- [84] Z. Zhang, P. Ge, T. Li, L.-E. Lindgren, W.W. Liu, G.Z. Zhao, X. Guo, Electromagnetic wave-based analysis of laser-particle interactions in directed energy deposition additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101284, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101284>.
- [85] A. Caballero, W. Suder, X. Chen, G. Pardal, S. Williams, Effect of shielding conditions on bead profile and melting behaviour in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101342, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101342>.
- [86] A. du Plessis, E. Macdonald, Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101191, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101191>.
- [87] K. Riener, N. Albrecht, S. Ziegelmeier, R. Ramakrishnan, L. Haferkamp, A. B. Spierings, G. J. Leichtfried, Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF), *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101286, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101286>.
- [88] L. Bai, J. Zhang, Y. Xiong, X. Chen, Y. Sun, C. Gong, H. Pu, X. Wu, J. Luo, Influence of unit cell pose on the mechanical properties of Ti6Al4V lattice structures manufactured by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101222, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101222>.

- [89] K. D. Traxel, A. Bandyopadhyay, Naturally architected microstructures in structural materials via additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101243, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101243>.
- [90] B. B. Babamiri, J. Indeck, G. Demeneghi, J. Cuadra, K. Hazeli, Quantification of porosity and microstructure and their effect on quasi-static and dynamic behavior of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101380, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101380>.
- [91] H.L. Wei, F.Q. Liu, W.H. Liao, T.T. Liu, Prediction of spatiotemporal variations of deposit profiles and inter-track voids during laser directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101219, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101219>.
- [92] C.L. Druzgalski, A. Ashby, G. Guss, W. E. King, T. T. Roehling, M. J. Matthews, Process optimization of complex geometries using feed forward control for laser powder bed fusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101169, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101169>.
- [93] A. Aversa, A. Saboori, E. Librera, M. de Chirico, S. Biamino, M. Lombardi, P. Fino, The role of Directed Energy Deposition atmosphere mode on the microstructure and mechanical properties of 316L samples, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101274, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101274>.
- [94] L. Yan, Y. Chen, F. Liou, Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition, *Additive Manufacturing*, Volume 31 (2020), 100901, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100901>.
- [95] Z. Sun, W. Guo, L. Li, Numerical modelling of heat transfer, mass transport and microstructure formation in a high deposition rate laser directed energy deposition process, *Additive Manufacturing*, Volume 33 (2020), 101175, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101175>.
- [96] C. Wei, H. Gu, X. Zhang, Y.-H. Chueh, L. Li, Hybrid ultrasonic and mini-motor vibration-induced irregularly shaped powder delivery for multiple materials additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 33 (2020), 101138, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101138>.
- [97] N. H. Paulson, B. Gould, S. J. Wolff, M. Stan, A. C. Greco, Correlations between thermal history and keyhole porosity in laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101213, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101213>.
- [98] J. Reijonen, A. Revuelta, T. Riipinen, K. Ruusuvoori, P. Puukko, On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 32 (2020), 101030, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101030>.
- [99] E. B. Fonseca, A. H. G. Gabriel, L. C. Araújo, P. L. L. Santos, K. N. Campo, E. S. N. Lopes, Assessment of laser power and scan speed influence on microstructural features and consolidation of AISI H13 tool steel processed by additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101250, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101250>.

- [100] H. E. Sabzi, S. Maeng, X. Liang, M. Simonelli, N. T. Aboulkhair, P. E. J. Rivera-Díaz-del-Castillo, Controlling crack formation and porosity in laser powder bed fusion: Alloy design and process optimisation, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101360, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101360>.
- [101] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, J. Ma, Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing, *Materials & Design*, Volume 193 (2020), 108762, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108762>.
- [102] M. P. Haines, N. J. Peter, S. S. Babu, E. A. Jägle, In-situ synthesis of oxides by reactive process atmospheres during L-PBF of stainless steel, *Additive Manufacturing*, Volume 33 (2020), 101178, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101178>.
- [103] M. Lowther, S. Louth, A. Davey, A. Hussain, P. Ginestra, L. Carter, N. Eisenstein, L. Grover, S. Cox, Clinical, industrial, and research perspectives on powder bed fusion additively manufactured metal implants, *Additive Manufacturing*, Volume 28 (2019), Pages 565-584, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.033>.
- [104] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Photopolymerization Processes, *Additive Manufacturing Technologies* (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_4.
- [105] E. A. Garcia, C. Ayranci, A. J. Qureshi, Material Property-Manufacturing Process Optimization for Form 2 Vat-Photo Polymerization 3D Printers, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Volume 4 (2020), 12, <https://doi.org/10.3390/jmmp4010012>.
- [106] S. Zakeri, M. Vippola, E. Levänen, A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography, *Additive Manufacturing*, Volume 35 (2020), 101177, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>.
- [107] F. J. Davis, G. R. Mitchell, *Polymeric Materials for Rapid Manufacturing, Stereolithography* (2011), Springer, https://doi.org/10.1007/978-0-387-92904-0_5.
- [108] W. Wang, J. Sun, B. Guo, X. Chen, K. P. Ananth, J. Bai, Fabrication of piezoelectric nano-ceramics via stereolithography of low viscous and non-aqueous suspensions, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 40 (2020), pp. 682-688, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.033>.
- [109] F. P. W. Melchels, J. Feijen, D. W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*, Volume 31 (2010), pp. 6121-6130, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>.
- [110] D. J. Braconnier, R. E. Jensen, A. M. Peterson, Processing parameter correlations in material extrusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 31 (2020), 100924, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100924>.
- [111] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, Volume 124 (2017), pp. 143-157, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

- [112] S. Hassanifard, S. M. Hashemi, On the strain-life fatigue parameters of additive manufactured plastic materials through fused filament fabrication process, *Additive Manufacturing*, Volume 32 (2020), 100973, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100973>.
- [113] O. S. Carneiro, A. F. Silva, R. Gomes, Fused deposition modeling with polypropylene, *Materials & Design*, Volume 83 (2015), pp. 768-776, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>.
- [114] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51 (2018), pp. 152-157, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.250>.
- [115] A. D. Maso, F. Cosmi, Mechanical characterization of 3D-printed objects, *Materials Today: Proceedings*, Volume 5 (2018), pp. 26739-26746, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.145>.
- [116] J. Allum, A. Moetazedian, A. Gleadall, V. V. Silberschmidt, Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101297, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101297>.
- [117] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, J. Lluma-Fuentes, Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens, *Materials & Design*, Volume 140 (2018), pp. 278-285, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>.
- [118] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, A.M. Camacho, The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, *Materials*, Volume 11 (2018), 1333. <https://doi.org/10.3390/ma11081333>.
- [119] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Materials & Design*, Volume 31 (2010), pp. 287-295, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>.
- [120] W. M. H. Verbeeten, M. Lorenzo-Bañuelos, P. J. Arribas-Subiñas, Anisotropic rate-dependent mechanical behavior of Poly(Lactic Acid) processed by Material Extrusion Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 31 (2020), 100968, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100968>.
- [121] T. W. Kerekes, H. Lim, W. Y. Joe, G. J. Yun, Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens, *Additive Manufacturing*, Volume 25 (2019), pp. 532-544, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.008>.
- [122] C. Koch, L. V. Hulle, N. Rudolph, Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation, *Additive Manufacturing*, Volume 16 (2017), pp. 138-145, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.003>.
- [123] X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, T. A. Osswald, Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling, *Polymers for Advanced Technologies*, Volume 30 (2019), pp. 2122– 2135, <https://doi.org/10.1002/pat.4645>.
- [124] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Extrusion-Based Systems*, *Additive Manufacturing Technologies* (2010), Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_6.

- [125] C. Luo, X. Wang, K. B. Migler, J. E. Seppala, Upper bound of feed rates in thermoplastic material extrusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 32 (2020), 101019, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101019>.
- [126] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, D. Bürger, Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers, *Composites Part B: Engineering*, Volume 124 (2017), pp. 88-100, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>.
- [127] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, J. P. Carey, Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures, *Composite Structures*, Volume 153 (2016), pp. 866-875, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.
- [128] S. Barone, P. Neri, S. Orsi, A. Paoli, A. V. Razionale, F. Tamburrino, Two coatings that enhance mechanical properties of fused filament-fabricated carbon-fiber reinforced composites, *Additive Manufacturing*, Volume 32 (2020), 101105, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101105>.
- [129] A. Ferrández-Montero, M. Lieblich, R. Benavente, J. L. González-Carrasco, B. Ferrari, Study of the matrix-filler interface in PLA/Mg composites manufactured by Material Extrusion using a colloidal feedstock, *Additive Manufacturing*, Volume 33 (2020), 101142, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101142>.
- [130] S. P. M. Silva, T. Antunes, M. E. V. Costa, J. M. Oliveira, Cork-like filaments for Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101229, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101229>.
- [131] H. Wu, W. P. Fahy, S. Kim, H. Kim, N. Zhao, L. Pilato, A. Kafi, S. Bateman, J. H. Koo, Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing, *Progress in Materials Science*, Volume 111 (2020), 100638, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100638>.
- [132] P. E. Eltes, L. Kiss, M. Bartos, Z. M. Gyorgy, T. Csakany, F. Bereczki, V. Lesko, M. Puhl, P. Pal Varga, A. Lazary, Geometrical accuracy evaluation of an affordable 3D printing technology for spine physical models, *Journal of Clinical Neuroscience*, Volume 72 (2020), pp. 438-446, <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.12.027>.
- [133] Y. Tong, D. J. Kaplan, J. M. Spivak, J. A. Bendo, Three-dimensional printing in spine surgery: a review of current applications, *The Spine Journal*, Volume 20 (2020), pp. 833-846, <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.11.004>.
- [134] I. Polozov, V. Sufiiarov, A. Kantyukov, N. Razumov, I. Goncharov, T. Makhmutov, A. Silin, A. Kim, K. Starikov, A. Shamshurin, A. Popovich, Microstructure, densification, and mechanical properties of titanium intermetallic alloy manufactured by laser powder bed fusion additive manufacturing with high-temperature preheating using gas atomized and mechanically alloyed plasma spheroidized powders, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101374, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101374>.
- [135] D. Wei, A. Anniyaer, Y. Koizumi, K. Aoyagi, M. Nagasako, H. Kato, A. Chiba, On microstructural homogenization and mechanical properties optimization of biomedical Co-Cr-Mo alloy additively manufactured by using electron beam melting, *Additive Manufacturing*, Volume 28 (2019), pp. 215-227, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.010>.

- [136] K. Zhang, S. Wang, W. Liu, X. Shang, Characterization of stainless steel parts by Laser Metal Deposition Shaping, *Materials & Design*, Volume 55 (2014), pp. 104-119, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.006>.
- [137] M. Ziętała, T. Durejko, M. Polański, I. Kunce, T. Płociński, W. Zieliński, M. Łazińska, W. Stępniewski, T. Czujko, K. J. Kurzydłowski, Z. Bojar, The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 677 (2016), pp. 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.028>.
- [138] D. Svetlizky, B. Zheng, T. Buta, Y. Zhou, O. Golan, U. Breiman, R. Haj-Ali, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, N. Eliaz, Directed energy deposition of Al 5xxx alloy using Laser Engineered Net Shaping (LENS®), *Materials & Design*, Volume 192 (2020), 108763, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108763>.
- [139] Z. Wang, X. Lin, N. Kang, Y. Hu, J. Chen, W. Huang, Strength-ductility synergy of selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr alloy with a heterogeneous grain structure, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101260, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101260>.
- [140] X. Li, S. Shi, S. Han, X. Hu, Q. Zhu, H. Lu, W. Li, Y. Shi, H. Ding, Microstructure, solidification behavior and mechanical properties of Al-Si-Mg-Ti/TiC fabricated by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101326, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101326>.
- [141] F. Weng, Y. Chew, Z. Zhu, X. Yao, L. Wang, F. L. Ng, S. Liu, G. Bi, Excellent combination of strength and ductility of CoCrNi medium entropy alloy fabricated by laser aided additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101202, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101202>.
- [142] Y. Hazan, D. Penner, SiC and SiOC ceramic articles produced by stereolithography of acrylate modified polycarbosilane systems, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 37 (2017), pp. 5205-5212, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.021>.
- [143] B. Khatri, K. Lappe, M. Habedank, T. Mueller, C. Megnin, T. Hanemann, Fused deposition modeling of ABS-barium titanate composites: A simple route towards tailored dielectric devices, *Polymers*, Volume 10 (2018), 666, <https://doi.org/10.3390/polym10060666>.
- [144] C. Feng, K. Zhang, R. He, G. Ding, M. Xia, X. Jin, C. Xie, Additive manufacturing of hydroxyapatite bioceramic scaffolds: Dispersion, digital light processing, sintering, mechanical properties, and biocompatibility, *Journal of Advanced Ceramics*, Volume 9 (2020), pp. 360–373, <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0375-8>.
- [145] S. Cano, J. Gonzalez-Gutierrez, J. Sapkota, M. Spoerk, F. Arbeiter, S. Schuschnigg, C. Holzer, C. Kukla, Additive manufacturing of zirconia parts by fused filament fabrication and solvent debinding: Selection of binder formulation, *Additive Manufacturing*, Volume 26 (2019), pp. 117-128, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.001>.
- [146] A. Das, C. A. Chatham, J. J. Fallon, C. E. Zawaski, E. L. Gilmer, C. B. Williams, M. J. Bortner, Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers, *Additive Manufacturing*, Volume 34 (2020), 101218, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>.

[147] C. A. Chatham, T. E. Long, C. B. Williams, A review of the process physics and material screening methods for polymer powder bed fusion additive manufacturing, *Progress in Polymer Science*, Volume 93 (2019), pp. 68-95, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.003>.

[148] J.-Y. Lee, J. An, C. K. Chua, Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, *Applied Materials Today*, Volume 7 (2017), pp. 120-133, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.

[149] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals*, Volume 65 (2016), pp. 737-760, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.

[150] A. A. Rashid, S. A. Khan, S. G. Al-Ghamdi, M. Koç, Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment, *Automation in Construction*, Volume 118 (2020), 103268, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>.