



Lámpsakos
ISSN: 2145-4086

Universidad Católica Luis Amigó

Balbás Calvo, Alexandra; Espinosa, María del Mar; Domínguez Somonte, Manuel
Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos
Lámpsakos, núm. 19, 2018, Enero-Junio, pp. 47-54
Universidad Católica Luis Amigó

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2365>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=613964506005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos

Latest advances in additive manufacturing with metallic materials

Alexandra Balbás Calvo, Ing.

Universidad Nacional de Educación a Distancia
España

abalbas7@alumno.uned.es

María del Mar Espinosa, PhD.

Universidad Nacional de Educación a Distancia
España

mespinosa@ind.uned.es

Manuel Domínguez Somonte, PhD.

Universidad Nacional de Educación a Distancia
España

mdominguez@ind.uned.es

(Recibido el 19-05-2017, Aprobado el 29-09-2017, Publicado el 16-01-2018)

Estilo de Citación de Artículo:

A. Balbás, M. Espinosa, M. Dominguez, "Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos", Lámpsakos, no. 19, pp 47-54, 2018

DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2365>

Resumen – La aparición de la fabricación aditiva ha sido y es una de las grandes revoluciones industriales de las últimas décadas. Las diversas tecnologías de fabricación aditiva permiten la creación de piezas con formas muy complejas, muy difíciles de fabricar antaño, en las que además el desperdicio de material es prácticamente inexistente. La fabricación aditiva no solo sirve para la creación de maquetas, si no que se pueden crear piezas perfectamente funcionales, para ello, se suelen emplear materiales metálicos. Este artículo explora la evolución de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva con materiales metálicos. Está dividido en cuatro secciones principales en las que se define la fabricación aditiva, se exponen los hitos más importantes de su reciente historia, se definen las tecnologías y materiales más característicos y se comentan los retos y las perspectivas de futuro de la misma.

Palabras clave: Impresión 3D, fabricación aditiva, metal

Abstract – The appearance of additive manufacturing has been and it is one of the greatest industrial revolutions in the last decades. The variety of additive manufacturing technologies allows the creation of very complex shape parts almost impossible to manufacture long ago in which the waste of material is practically non-existent. Additive manufacturing not only serves to create models but also serves to create functional parts in which metal is one of the most used materials. This paper explores the evolution of the different metal additive manufacturing technologies. It is divided in four sections in which additive manufacturing is

defined, the most significant milestones of its brief history are shown along with the most characteristic technologies and materials. To conclude, an analysis of the challenges and future perspectives is presented.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, metal

1 INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva se presenta como una de las grandes revoluciones de finales del siglo XX. Comienza el 9 de marzo de 1983 con la invención de la estereolitografía (SL) de la mano de Charles Hull. En apenas 30 años se han desarrollado numerosas métodos y tecnologías que permiten la impresión de diferentes piezas de diversos tamaños materiales y formas, con unas grandes precisiones dimensionales y cualidades mecánicas. Hod Lipson, investigador en la universidad de Cornell afirma que la fabricación aditiva generará cambios de gran alcance, a escala económica y social y en varios modelos de negocio. Por ejemplo, un cambio en la cadena de distribución podría consistir en que, quizás dentro de 20 años, un cliente pueda seleccionar un futuro diseño de smartphone, descargarlo e imprimirlo en una tienda local, lo que eliminaría la fabricación, el montaje y la logística tradicionales.

La fabricación aditiva presenta una serie de ventajas frente a la fabricación tradicional. En primer lugar, el desperdicio de material es considerablemente menor. Además, permite la obtención de geometrías muy complejas y el coste del proceso no se ve afectado por ello. El hecho de poder crear piezas diferentes en una misma serie de manera independiente del volumen de la misma, la convierte en una muy buena alternativa para la obtención de objetos personalizados fabricados en series cortas ya que tampoco encarece el proceso.

Otra gran ventaja de la fabricación aditiva es su gran versatilidad en comparación con la fabricación sustractiva en la que una pieza puede necesitar varias operaciones en diferentes máquinas especializadas y costosas.

Estas ventajas, son especialmente interesantes para las industrias bélica y aeroespacial ya que les permite obtener rápidamente casi cualquier tipo de pieza en lugares remotos o de difícil acceso sin la necesidad de almacenar piezas de sustitución que ocupan espacio y pueden quedar obsoletas [1]. La fabricación aditiva en la industria médica se centra, principalmente, en la producción de piezas personalizadas para cada individuo (prótesis, modelos que permitan pre-visualizar una operación, etc.) [2]. En cuanto a la industria de la construcción, la fabricación aditiva es clave en la creación de estructuras que armonicen la integración paisajística o la sostenibilidad de las construcciones debido a la limitación de los residuos generados.

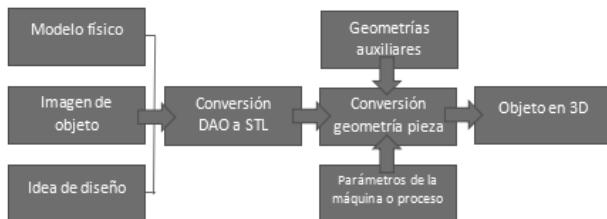


Fig. 1 Flujo de información en fabricación aditiva

La fabricación aditiva ha evolucionado en todos estos sectores para adaptarse a sus necesidades. Han aparecido nuevas tecnologías, y cada día nuevos materiales son susceptibles de ser empleados. La Fig.1 muestra una gráfica proporcionada por Senvol, una de las mayores y más robustas bases de datos relacionadas con la fabricación aditiva. En esta gráfica se observa que el número de materiales metálicos disponibles es el segundo mayor después de los materiales poliméricos en fabricación aditiva. Se adjunta Tabla

1, en la que se incluyen las siglas empleadas a lo largo del texto.

Tabla 1. NOMENCLATURA. SIGLAS MÁS UTILIZADAS EN IMPRESIÓN 3D
 AM, Fabricación aditiva.

DAO, Diseño asistido por ordenador
EBM, Fusión por haz de electrones
LAM, Fabricación aditiva por láser
LENS, Fabricación por láser de conformación de red
LOM, Fabricación laminada
NPJ, Haz de nanopartículas
SL, Estereolitografía
SLM, Fusión selectiva por láser.
SLS, Sinterizado selectivo por láser
STL, Estereolitografía. Archivo digital de diseño
UC, Consolidación ultrasónica.
WAAM, Fabricación aditiva por soldadura

Tipos de materiales en fabricación aditiva

■ Polímeros ■ Metales ■ Arena ■ Cera ■ Cerámica ■ Composite

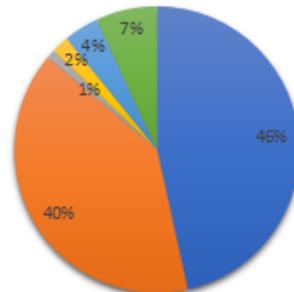


Fig. 2 Tipos de materiales en fabricación aditiva

2 DEFINICIÓN DE FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva se define, según la norma ASTM F2792-10: "El proceso de unión de materiales para crear objetos desde un modelo 3D, la unión se produce usualmente capa tras capa, en contraposición a las tecnologías de fabricación sustractiva". La Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D (ADDIMAT) la define como "Grupo de procesos que se basan en añadir material de forma selectiva, formando un objeto mediante la superposición de capas sucesivas de material a partir de un modelo digital."

La fabricación aditiva parte de un modelo físico, imágenes o una idea que es transferido a un modelo DAO 3D. Este modelo se convierte a formato STL, en él se recogen las superficies de las piezas y se mallan. Para definir la conversión de la geometría de la pieza final, además del archivo STL, es necesario

tener en cuenta las posibles geometrías auxiliares y los parámetros de la máquina y el proceso. Una vez se obtiene esta geometría final, se puede proceder a la construcción de la pieza. Este flujo de información está reflejado en la Fig.2.

3 EVOLUCIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA CON METALES

En 1971 Ujiie (Mitsubishi) fabrica un recipiente a presión mediante soldaduras SAW y TIG, en 1983 Kussmaul emplea esta técnica para fabricar componentes de acero para aplicaciones nucleares. Este tipo de fabricación aditiva se conoce como WAAW (Wire + Arc Additive Manufacturing) y se basa en las técnicas de soldadura tradicionales en las cuales se usa un arco eléctrico como fuente de calor que funde el metal y lo deposita en capas superpuestas, Fig.3. [3]



Fig. 3 Pieza de acero fabricada mediante tecnología WAAM

La segunda técnica desarrollada en la fabricación aditiva de metales conocida como SLS (Selective Laser Sintering) es presentada en 1986 de la mano de Deckard & Beaman y finalmente se publica la patente en 1990 [4]. La fuente de calor es un láser de CO₂ y el metal se encuentra en forma de polvo. El mismo año que se publica la patente, Manriquez-Frayre y Boureli imprimen la primera pieza metálica mediante esta técnica. La pieza, Fig.4, ha sido realizada en 72 capas de material compuesto en gran medida por cobre. [5]

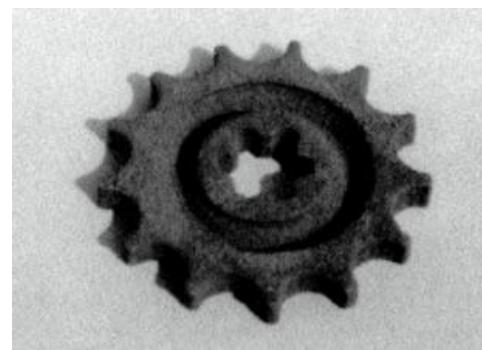


Fig. 4 Primera pieza metálica impresa en 3D mediante SLS
Al año siguiente, Helisys comercializa por primera vez la tecnología de fabricación aditiva que puede trabajar con metales llamada LOM (Laminated Object Manufacturing) que consiste en un láser que une y corta láminas de metal u otros materiales, Fig.5. [6]



Fig. 5. Pieza fabricada mediante la técnica LOM

La técnica de SLM (Selective Laser Melting) aparece en 1995 en un proyecto de investigación en el Fraunhofer Institute ILT in Aachen, Alemania. El material base es un metal en estado de polvo que se va fundiendo con un láser de alta energía, a diferencia de SLM, el polvo se funde completamente y crea una pieza homogénea.

En 1997 se funda AeroMet. Esta compañía desarrolla un proceso llamado LAM (Laser Additive Manufacturing) que emplea láseres de alta energía para la fusión de polvos de aleaciones titanio-aluminio. Con esta técnica se crearon piezas que fueron usadas en el sector aeroespacial, Fig.6. [6]



Fig. 6 Pieza fabricada con tecnología LAM

Ese mismo año, la empresa Optomec presenta la tecnología LENS (Laser Engineered Net Shaping), consiste en un láser que funde una fina capa de la pieza seguido por una boquilla que libera polvos metálicos que se adhieren a esa capa. [7]

En el año 2000 Dawn White se presenta la patente para el método de UC (Ultrasonic Consolidation) [8]. Esta técnica permite la unión de diferentes tipos de metales a baja temperatura mediante la creación de capas intersticiales de óxido por efecto de vibraciones ultrasónicas.

Durante los siguientes diez años, varias compañías se centran en la comercialización de diferentes máquinas de fabricación aditiva de metales. Los precios iniciales fueron muy elevados, pero se fueron mejorando las prestaciones de las máquinas (en cuanto a espacio, velocidad...etc.) y aparecen nuevos materiales con mejores propiedades.

A comienzos del 2009 se funda el ASTM Comitee F42 on Additive Manufacturing Techonlogies, este comité se crea para producir estándares en los ensayos, los procesos, los materiales, los diseños y la terminología.

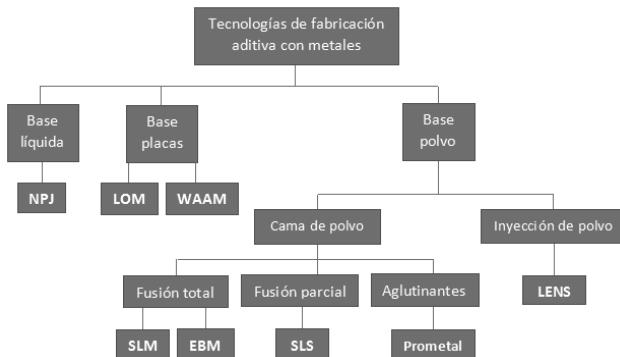


Fig. 7. Esquema basado en los trabajos de V.W Kaufui et al [10], Company 3DHubs [11], B. Schoinochoritis et al [12]

4. TECNOLOGÍAS EN LA FABRICACIÓN ADITIVA CON METALES

Las dos partes principales de un proceso de fabricación aditiva son el tipo de materia prima y la fuente de energía que se emplea para consolidar las piezas [9]. En cuanto a las materias primas, podemos encontrarlas en forma líquida o sólida.

La Fig.7 muestra un esquema basado en los artículos de V.W Kaufui et al [10], Company 3DHubs [11], B. Schoinochoritis et al [12]. La clasificación de las tecnologías se realiza en función del estado de los metales empleados como materia prima.

En el apartado de aporte de metal en forma líquida se encuentra la tecnología NPJ (Nano Particles Jet), presentada por Xjet a finales de noviembre de 2016. Consiste en la deposición de tinta metálica de forma controlada. La tinta está formada por partículas de polvo de tamaño sub-micrométrico y de un agente líquido. A medida que la tinta se deposita el agente líquido se evapora y las partículas metálicas se fusionan gracias al elemento calefactor que pasa sobre ellas. El grosor mínimo de capa puede alcanzar una micra, no necesita post-procesado [13]. Además de NPJ, se están desarrollando otras tecnologías con aporte de metal en estado líquido como presentan en [14], aunque aún se encuentra en sus primeras fases de desarrollo.

La LOM (Laminated Object Manufacturing) [15] consiste en un flujo continuo de una lámina sólida de metal (u otros materiales) que es cortada por un láser y pegada mediante adhesivos sensibles al calor a las demás láminas creando formas tridimensionales.

La precisión depende del espesor de la lámina y es menor en comparación a otras técnicas como SLS (Selective Laser Sintering). El ratio de construcción con

LOM es elevado y permite la creación de grandes piezas, estas piezas no son funcionales ni necesitan tratamientos posteriores, por lo que uno de sus usos principales es la construcción de modelos a escala, prototipos conceptuales de análisis de viabilidad o modelos de organización y planificación del trabajo, como se muestra [16]. La tecnología WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) es muy similar a la soldadura, el metal se aporta en forma de hilo, y un arco eléctrico lo funde. Las ventajas de esta técnica son los grandes ratios de deposición de material, haciendo que su principal uso sea la creación de piezas de grandes dimensiones. La precisión dimensional es baja y necesita tratamiento térmico de postprocesado para eliminar las tensiones internas generadas. Los tratamientos postprocesado no tienen fines únicamente funcionales, muchos de los tratamientos que se aplican, como el lijado, sirven para mejorar la calidad superficial con fines estéticos. [17].

El metal en base polvo es la materia prima más utilizada por la mayoría de las tecnologías. En él, se distinguen dos grupos principales, las tecnologías que emplean cama de polvo, y las que lo inyectan directamente sobre la pieza. En este último grupo se encuentra la tecnología LENS (Laser Engineered Net Shaping). Esta tecnología consiste en un cabezal de impresión que añade el polvo y se mueve en los tres ejes y un láser enfocado hacia él. El polvo es sinterizado mientras abandona el cabezal y alcanza la

pieza. El espesor de capa oscila entre los 130-180 micrómetros y posee una precisión dimensional media (comparado con las demás tecnologías) del orden de 0,05 a 0,35 milímetros. Precisa postprocesado y su principal uso es la reparación de piezas aeronáuticas.

En el segundo grupo, las piezas se fabrican en una cama de polvo que las rodea, la ventaja frente al primer grupo es que no se necesitan geometrías de apoyo ya que la propia cama soporta la pieza. La desventaja es la cantidad de material necesaria para crear la cama y su reciclado. Dentro de este grupo hay tres categorías que distinguen la forma de unión del polvo. En la primera categoría el polvo se funde completamente en una pieza homogénea; en la segunda categoría, la energía aplicada es inferior a la energía de fusión del metal, y las partículas se unen a nivel molecular, por lo que es aplicable a aleaciones. En la última categoría el polvo se une a través de sustancias aglutinantes.

En la Fig.7 se presentan, en la categoría de fusión completa de polvo, las tecnologías SLM (Selective Laser Melting) y EBM (Electron Beam Melting). Estas dos tecnologías son muy similares, consisten en una cama de polvo y una fuente de energía funde el polvo en unas áreas determinadas creando así la pieza. Las principales diferencias son las fuentes de energía; un láser en el caso de SLM y un haz de electrones en el caso de EBM. Para poder trabajar con el láser es necesario trabajar con un gas inerte, generalmente argón o nitrógeno. En el caso de EBM es necesario trabajar en vacío a unos niveles de 10-3 Pa. El espesor de capa para EBM oscila entre los 45-100 micrómetros y para el SLM 20-100 micrómetros. En cuanto a resultados, la precisión dimensional en ambos es alta, en torno a los 0.004 milímetros. Las piezas realizadas por la técnica EBM poseen mayor densidad. [18]

La segunda categoría presenta la tecnología SLS (Selective Laser Sintering) esta tecnología es muy similar a la SLM, la diferencia está en la temperatura que alcanza el polvo metálico que es menor y no llega a fundirse. La ventaja de esta técnica es que permite el empleo de aleaciones metálicas. El tamaño de las partículas metálicas oscila entre los 30-45 micrómetros.

Por último, el tercer grupo engloba las tecnologías que emplean sustancias aglutinantes para unir el polvo. Encontramos Prometal, una tecnología que emplea acero inoxidable como materia prima. El proceso es como todos los demás que tienen cama de polvo. Un mecanismo con pistones desciende la cama una vez se completa una capa y añade material por encima. Esta tecnología precisa de postprocesado (sinterizado, acabados superficiales) si las piezas que se crean son funcionales. [10]

Las características de cada tecnología de fabricación aditiva son diferentes, las más representativas son el tamaño del haz, el espesor de capa, el ratio de deposición, el acabado superficial o el estrés residual de la pieza.

4 EL POLVO COMO MATERIA PRIMA

Las propiedades del polvo metálico son fundamentales para determinar la eficiencia y calidad del proceso y las piezas. Las principales características del polvo de metal son su densidad o compresibilidad, su tamaño o distribución de tamaños y su capacidad de llenar huecos. Las fuerzas que influyen en su comportamiento son las fuerzas de cohesión, de van der Waals y electroestáticas. Todas ellas, en un entorno multidimensional y multivariable.

En la Tabla 2 se observan los principales metales empleados en forma de polvo metálico en fabricación aditiva

Tabla 2. LISTA DE METALES MÁS COMUNES EMPLEADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA [19]

Denominación	Material
Aleaciones de Aluminio	AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi12
Aleaciones de Cobalto	ASTM F75 CoCrWC
Aceros herramienta	AISI 420 Marage 300 H13 AISI D2 AISI A2 AISI S7
Aleaciones de Níquel	Inconel 718 Inconel 625 Inconel 713 Inconel 738 Hastelloy X
Aceros Inoxidables	SS 304 SS 316 L SS 410 15-5 PH
Aleaciones de Titanio	Titanium Grade 2 Ti6Al4V Ti6Al4V ELI TiAl6Nb7
Aleaciones de metales preciosos	Oro de joyería Plata
Aleaciones de Cobre	CC 480 K

5 RETOS Y PERSPECTIVAS DE FUTURO DE LA FABRICACIÓN ADITIVA CON METALES

La fabricación aditiva con metales debe dar respuesta a múltiples problemas que van surgiendo, algunos de ellos son:

5.1 La forma de pensar del ser humano.

El ser humano está acostumbrado a diseñar según los tipos de fabricación que ya conoce; la fabricación aditiva permite la creación de geometrías antes impensables y es necesario reorganizar la forma de crear soluciones.

5.2 Transformación del diseño DAO a la geometría final que se va a fabricar.

Una vez se ha diseñado la geometría deseada (Fig. 2). Esta se transforma en un fichero tipo STL, la conversión a STL consiste en transformar la superficie pieza diseñada en una malla hecha con triángulos. Esta conversión puede ser optimizada, y se está trabajando en ello.

Para obtener la geometría final de la pieza que se va a fabricar es esencial conocer su posicionamiento, que dependerá, entre otros factores, de la/s cara/s en las que se precise un mejor acabado o las dimensiones de la misma. En algunas tecnologías de fabricación aditiva, como la LENS, puede ser necesaria la creación de soportes. Estos soportes evitan hundimientos de la pieza. Su colocación y dimensiones están siendo estudiados y serán optimizados ya que son un gasto de tiempo, energía y material.

5.3 Conocimiento del comportamiento de los materiales metálicos.

Es necesario conocer el comportamiento de los mismos, independientemente de la escala o aleaciones con las que se use. Es necesario desarrollar modelos computacionales más avanzados, capaces de representar la realidad de la forma más acertada posible.

Para poder crear estos modelos computacionales es necesario el estudio experimental de las estructuras metálicas como proponen Lawrence E.Murr et al.[20], que analizan las diferentes microestructuras de diferentes metales sometidos a diferentes tecnologías como EBM o SLM. Estas microestructuras presentan direccionalidad, lo que hace que las características de la pieza final varíen según el ángulo en el que se miden. Esto ayuda a definir la estrategia óptima a la

hora de construir una pieza según las cualidades que se deseen.

5.4 Mejora del control de las tecnologías de fabricación

Para poder aplicar la mejor estrategia de construcción de una pieza, es importante realizar un seguimiento de la misma durante su fase de construcción. Es necesario controlar varios parámetros que afecten a su calidad, como puede ser su temperatura o forma, y para ello hay que diseñar e implantar sistemas de control.

5.5 Mejorar los modelos computacionales ya existentes.

La mejora de los modelos computacionales, permitirá analizar y minimizar los defectos en la construcción de piezas. Uno de estos defectos en la fabricación aditiva de metales en cama de polvo es la porosidad que presentan las piezas, la presencia de aire ocluido en la pieza reduce las propiedades físicas y mecánicas y es necesario un post tratamiento, como puede ocurrir con SLS. En tecnologías como WAAM y similares el reto es disminuir la distorsión provocada en las piezas debido a las tensiones internas de fabricación [21].

5.6 Facilitar el uso de las herramientas computacionales y el desarrollo de interfaces.

Las herramientas computacionales han evolucionado muy rápidamente, pero aún siguen siendo complicadas de manejar y se requiere un entrenamiento previo. Algunos autores proponen otras alternativas como el modelado de objetos mediante gestos mediante el empleo de cámaras. [22]

5.7 Análisis del impacto medioambiental.

A priori, la fabricación aditiva parece más benigna que la tradicional, ya que se reduce la contaminación por transporte y se optimizan los materiales. Pero es necesario estudiar el ciclo de vida de las piezas, ya que se desconocen los efectos del empleo de solventes químicos, la producción/manipulación del polvo metálico o los efectos de los gases liberados en los procesos. [20]

Adicionalmente otros factores son los problemas legales como la propiedad intelectual.

6 CONCLUSIONES

La fabricación aditiva con metales, ha evolucionado rápidamente en los últimos años, pese a ser una tecnología joven, tiene mucho potencial. Los metales son un tipo de material muy atractivo a nivel industrial debido a sus diversas propiedades mecánicas, eléctricas, químicas, etc. Y eso hace que sean el segundo grupo de materiales disponibles para fabricación aditiva más numeroso después de los polímeros.

Mediante fabricación aditiva se consiguen diseños y formas que con la fabricación tradicional serían impensables, como la construcción de implantes médicos réplica de las geometrías originales o los canales de refrigeración internos de los álabes de una turbina.

La fabricación aditiva encaja con las necesidades de un gran número de industrias como la aeroespacial, dónde permite la reparación/construcción de piezas muy caras e inaccesibles, la joyería, en la que permite una gran personalización o la construcción, dónde el ahorro de material es importante.

Existen varias tecnologías de fabricación aditiva que emplean metal como materia prima. La diferencia entre unas y otras está en el tamaño máximo y mínimo de piezas que puede construir, la velocidad de construcción, la precisión de la pieza o la calidad superficial, los tratamientos de post proceso o el coste.

A medida que avanzan los años siguen apareciendo nuevas tecnologías como NPJ, (2016) que permite la construcción de piezas muy pequeñas con una precisión de hasta una micra. O se mejoran otras ya existentes mediante el uso de sensores o de técnicas de construcción diferentes.

El futuro de la fabricación aditiva con metales pasa por entender las estructuras de los mismos y su evolución durante los procesos de fabricación. Ello permitirá crear modelos computacionales que ayuden a mejorar los procesos de fabricación y disminuyan los defectos, haciendo la tecnología aún más competitiva. Es importante también la concienciación social respecto a sus posibilidades y el análisis del impacto medioambiental de todos sus agentes.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. de la Torre, MM. Espinosa "Producción de piezas de repuesto en lugares aislados" Directora: MM. Espinosa, UNED, 2016. Disponible en: <https://comunidades.cursosvirtuales.uned.es/dotlrn/clu>

[bs/etsiiingenieradeldiseo\(blocks-view](http://etsiiingenieradeldiseo.blocks-view)

- [2] R. Domínguez, MM. Espinosa, L. Romero, M. Domínguez "Impresión 3D en ingeniería médica" VI Encuentro de investigación - IMIENS, 2016. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311653415_Impresion_3D_en_ingenieria_medica
- [3] S. Williams, F. Martina, A. Addison, J. Ding, J. Pardal, P. Colegrove "Wire +Arc Additive Manufacturing", *Materials Science and Technology*, 2015. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073
- [4] J. Beaman, C. Deckard, "Selective laser sintering with assisted powder handling" *US4938816 A*, Jul,3, 1990.
- [5] J. A Manriquez-Frayre, D.L. Bourell, "Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder" *Center for Materials Science and Engineering*, University of Texas, 1990. Disponible en: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/.../1990/1990-09-Frayre.pdf>
- [6] Wohlers Report, 2014. Disponible en: <https://www.wohlersassociates.com/2014report.htm>
- [7] Optomec, LENS process. www.optomec.com, Feb 2017
- [8] D.White "Ultrasonic object consolidation" *US6519500 B1*, Feb,11,2003.
- [9] E. Herderick, "Additive Manufacturing of Metals: A Review" *Materials, Science and Technology*, Oct 2011. Disponible en: <http://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstpc1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a>
- [10] V. W Kaufui, A. Hernandez "A Review of Additive Manufacturing" *ISRN Mechanical Engineering*, Article ID 208760, vol 2012, 2012. DOI: 10.5402/2012/208760
- [11] Company 3DHubs. www.3DHubs.com, 2016
- [12] B. Schoinochoritis, D. Chantzis, K. Saloniatis "Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2015. DOI: 10.1177/0954405414567522
- [13] Company XJet. www.xjet3d.com, Nov 2016
- [14] L. Wang, J. Liu "Liquid Phase 3D printing for Quickly Manufacturing Metal objects with Low Melting Point Alloy Ink" *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no 9, p. 1721-1728, 2014. Disponible en <https://arxiv.org/abs/1405.0199>
- [15] M. Feygin, A. Shkolnik, M. Diamond, E. Dvorskiy "Laminated object manufacturing system" *US5730817A*, Mar,24,1998.

- [16] I. A. Domínguez, L. Romero, MM. Espinosa, M. Domínguez, "Impresión 3D de maquetas y prototipos en arquitectura y construcción" *Revista de la Construcción* vol 2, 2013. DOI: 10.4067/S0718-915X2013000200004
- [17] J. A. Oriozabala, MM. Espinosa, "From rapid prototyping to Additive Manufacturing" *Proceedings of the XXV international conference on graphics engineering*, June 2015. Disponible en https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&souce=web&cd=1&ved=0ahUKEwjqgfnq4_nTAhUBOhoKHWNDAhUQFggiMAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.uned.es%2Fegi%2Fpublicaciones%2Fcongresos%2FFrom_rapid_prototyping_to_additive_fabrication.pdf&usg=AFQjCNFEcE66c19adq1ilUoOJClF01VBRA&cad=rja
- [18] L. Loeber, S. Biamino, U. Ackelid, S. Sabbadini, P. Epicoco, P. Fino, J. Eckert "Comparison on selective laser and electron beam melted titanium aluminides", *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, pp. 8-10, 2011. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/280573199>
- [19] Metal Additive Manufacturing Magazine. www.metal-am.com
- [20] L.E. Murr, E. Martinez "Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science" *jmr&t*, vol 1, pp 42-54, April-June 2012. DOI: 10.1016/S2238-7854(12)70009-1
- [21] W. J Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff & S. S. Babu, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing" *International Materials Reviews*, 2016. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649
- [22] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. Williams, C. Wang, Y. Shin, S. Zhang, P. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing" *Engineering, Computer-Aided Design*, vol 69, pp 65-89, December 2015. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001