



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Estudio Comparativo de los Métodos de Fabricación Aditiva para el Titanio y sus Aleaciones

Memoria

Proyecto Final de Carrera: **Ingeniero Industrial**

Autor:
Director:
Convocatoria:

Sergio Romero Fuentes
Antonio Manuel Mateo
Septiembre 2017 (pla 94)

RESUMEN

El tema del proyecto que se plantea es el proceso de producción industrial de objetos conocido como fabricación aditiva o “Additive manufacturing”. Concretamente, se estudiará su aplicación a la fabricación de piezas de aleaciones de titanio. El proyecto recogerá los orígenes y evolución de la fabricación aditiva, dando una visión global de las distintas tecnologías y métodos aplicados a los distintos materiales. También revelará de forma general el estado del arte actual de la fabricación aditiva. Se realizará un estudio más particular de las distintas tecnologías de fabricación aditiva aplicadas exclusivamente a metales. Dentro de este campo, el objetivo es estudiar de forma precisa las tecnologías utilizadas para producir objetos de titanio y de sus aleaciones, fundamentalmente con destino a su empleo en el sector aeronáutico. Se analizarán las distintas variables que intervienen en cada proceso, revelando su influencia en las propiedades del producto final, así como posibles defectos, de tal manera que se pueda realizar finalmente un estudio comparativo de las distintas tecnologías según las propiedades del producto final, y considerando también otras variables asociadas al proceso, como las económicas y medioambientales.



SUMARIO

RESUMEN	1
1. Introducción	5
1.1. Objetivos del proyecto	5
1.2. Alcance del proyecto	5
2. Introducción a la fabricación aditiva	6
3. Tecnologías de fabricación aditiva	8
3.1. Binder Jetting	8
3.1.1. Descripción	8
3.1.2. Materiales	9
3.1.3. Ventajas e inconvenientes	10
3.2. Directed Energy Deposition	10
3.2.1. Descripción	10
3.2.2. Materiales	12
3.2.3. Ventajas e inconvenientes	12
3.3. Material Extrusion	12
3.3.1. Descripción	12
3.3.2. Materiales	13
3.3.3. Ventajas e inconvenientes	14
3.4. Material Jetting	14
3.4.1. Descripción	14
3.4.2. Materiales	15
3.4.3. Ventajas e inconvenientes	15
3.5. Powder Bed Fusion	15
3.5.1. Descripción	15
3.5.2. Materiales	16
3.5.3. Ventajas e inconvenientes	16
3.6. Sheet Lamination	17
3.6.1. Descripción	17
3.6.2. Materiales	18
3.6.3. Ventajas e inconvenientes	18
3.7. Vat Photopolimerization	19

3.7.1.	Descripción	19
3.7.2.	Materiales	20
3.7.3.	Ventajas e inconvenientes	20
4.	Historia de la fabricación aditiva	21
4.1.	Influencias	21
4.2.	Evolución histórica de la fabricación aditiva	24
4.3.	Tendencias	28
5.	Titanio en la fabricación aditiva	32
5.1.	Descripción	32
5.2.	Obtención del material base	33
5.3.	Tecnologías de procesado de titanio	39
5.4.	Propiedades	39
5.5.	Aplicaciones	41
5.6.	Impacto	45
5.6.1.	Impacto ambiental	48
6.	Presupuesto	51
7.	Conclusiones	53
8.	Bibliografía	54

1. Introducción

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es analizar el estado actual del uso del titanio mediante tecnologías de fabricación aditiva. En primer lugar se pretende describir la evolución de esta tecnología, que cada vez tiene mayor impacto en la vida humana. El análisis de la evolución histórica de la fabricación aditiva junto con una descripción de sus procesos sentaran las bases para desarrollar una revisión del estado actual del uso del titanio con estas tecnologías y su posterior aplicación e impacto. También resulta de interés recoger la bibliografía relacionada con varios de los temas que se van a trabajar para poder sentar las bases para futuras investigaciones más detalladas.

1.2. Alcance del proyecto

El proyecto abarca desde una visión global de la fabricación aditiva hasta un nivel más detallado centrado en las aleaciones de titanio. La fabricación aditiva está en constante crecimiento, por ello aún hay campos en estadios muy primarios de desarrollo e investigación y esto provoca la carencia de ciertos datos e información. Debido a la variedad de procesos y variables inherentes a la fabricación aditiva, existen muchas investigaciones particulares de un proceso u aplicación, esto amplía notablemente el campo de trabajo posible y puede hacer perder el foco y resultar confuso. La intención es describir y analizar aquellos datos que se pueden considerar generales o como mínimo, de una importancia elevada aunque solo pertenezcan a un caso en concreto. Mediante la bibliografía asociada se pretende abrir las puertas a investigaciones más detalladas.

2. Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva (*additive manufacturing*), conocida comúnmente por sus siglas en inglés *AM*, es el sistema de producción de productos o componentes que consiste en la generación de un objeto en tres dimensiones a partir de la superposición de capas de material. A partir de un modelo en forma de datos se procesa el material a escala micrométrica para, capa a capa, generar el modelo real en tres dimensiones.

El desarrollo de esta tecnología ha permitido generar objetos de distintos materiales, como plástico, metal o compuestos. La Figura 1 muestra dos objetos, uno es un modelo de una turbina de aeronave impreso en material polimérico, el otro es un rotor metálico.

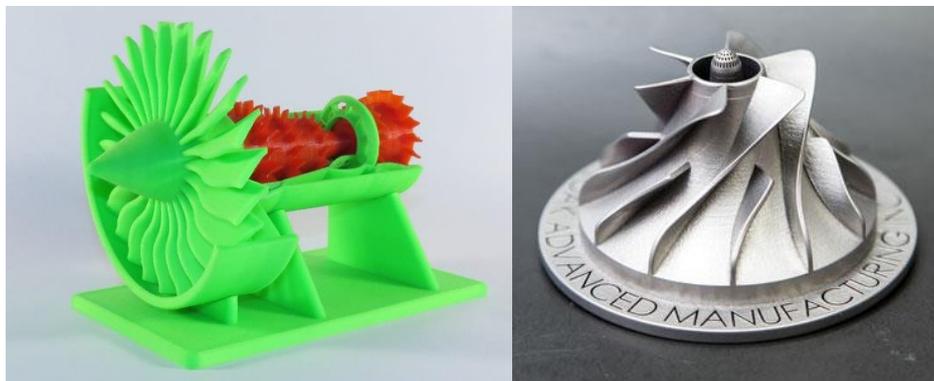


Figura 1: Detalle de dos rotores de turbinas. El de la izquierda en plástico y el de la derecha en metal.

Esta tecnología va de la mano de la creciente digitalización de la vida en últimas décadas, donde los grandes cambios en los sectores de la comunicación, la medicina e incluso el ocio, también se han presentado en el sector industrial. El uso de computadoras ha sustituido prácticamente por completo los antiguos procesos de las oficinas técnicas, donde los sistemas de dibujo asistido (*CAD*) han reemplazado el uso de planos dibujados a mano. La utilización de sistemas de simulación ingenieril (*CAE*) ha renovado los procesos de innovación y control de calidad. Incluso los sistemas de control de procesos de producción, han permitido optimizar la producción por encima de los límites considerados anteriormente.

Esta creciente digitalización de la industria, donde no solo aumenta el volumen de datos procesados sino que también lo hace la precisión y fiabilidad de los mismos; queda limitada a las restricciones físicas de los procesos de fabricación convencionales de objetos (conformado en caliente o en frío, por arranque de viruta, fundición y moldeo...) que aunque también han sufrido grandes avances con el transcurso de los años, las limitaciones que aún comportan, reducen las posibilidades de desarrollo de nuevos productos que las herramientas digitales

permiten proyectar. Limitaciones como los ángulos de desmolde para piezas fundidas, interferencias entre utillajes en el desarrollo de geometrías complejas, taladros con direcciones curvas, entre otras, hacen necesaria una tecnología de producción que case con las posibilidades que ofrecen los sistemas de diseño CAD.

La fabricación aditiva resuelve los conflictos diseño-producción descritos anteriormente y suma otros valores, que han hecho que muchas empresas se centren en el desarrollo de esta tecnología.

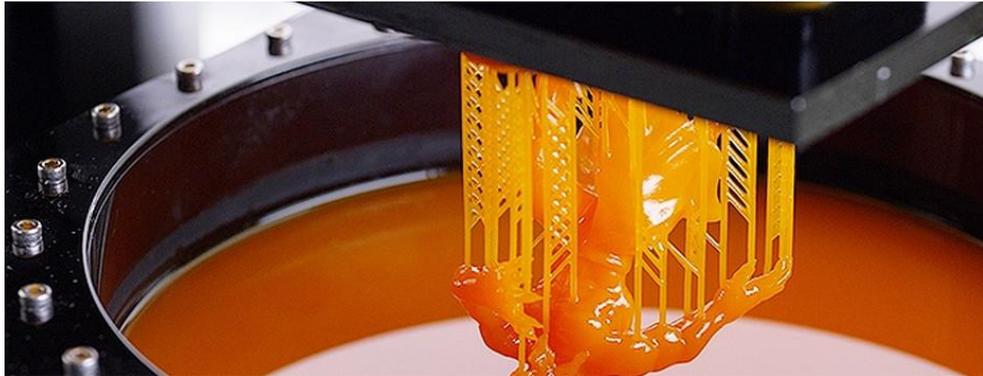


Figura 2: Detalle del proceso de fabricación aditiva conocido como estereolitografía

3. Tecnologías de fabricación aditiva

Como se verá en apartados posteriores, sobre todo a los dedicados a la descripción de la evolución histórica de la fabricación aditiva, existen múltiples procesos que forman todo el abanico de posibilidades dentro de la fabricación aditiva. Todos esos procesos tienen un nombre asociado que describe el proceso y crea una marca asociada a una empresa. Por eso, dependiendo de la compañía dedicada al campo de la fabricación a aditiva se pueden ver muchos nombres como *LENS*, *EBM*, *SLA*, *SLS*, etc. Muchos de estos nombres han cobrado relevancia por el hecho de ser comercializados por empresas punteras del sector o por haber sido desarrollados antes que otros, hecho que los convirtió en el primer proceso de un tipo concreto y que por tanto, su nombre comercial dio nombre al proceso a falta de un consenso para nombrar las tecnologías de fabricación aditiva. Este hecho es común tanto en la industria, por ejemplo en el caso del *Nylon* de la empresa *DuPont*, como en el día a día de las personas, donde nombramos productos con el nombre comercial. Como en todas las ramas de la ciencia y la industria. A medida que se desarrolla y crece, se hace necesario un consenso, una estandarización de ciertos parámetros que faciliten la aplicación y desarrollo de la técnica en cuestión. Por ello, las principales organizaciones de estandarización, lideradas por la *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*) generaron varias normas y estándares sobre la fabricación aditiva. Uno de ellos es el que se refiere a la nomenclatura [1]. Esta norma da nombre a las tecnologías existentes de fabricación a aditiva. Según las características principales de cada tecnología, se concluyó que se podían agrupar en siete categorías. Estas categorías se describen a continuación. Estas nuevas categorías agrupan tecnologías que a priori eran distintas, como por ejemplo las denominadas comercialmente *EBM* y *DMLS*, que aunque tienen diferencias importantes se basan un mismo principio, aplicación de calor a un lecho de polvo. Los nombres que reciben estas categorías y que describen resumidamente sus características son: Inyección de aglomerante (*binder jetting*), extrusión de material (*material extrusión*), inyección de material (*material jetting*), fusión de lecho de polvo (*PBF powder bed fusion*), deposición directa de energía (*DED directed energy deposition*), fotopolimerización (*vat photopolimerization*) y laminación de hojas (*sheet lamination*)

3.1. Binder Jetting

3.1.1. Descripción

Los procesos de tipo inyección de aglutinante, Figura 3, son una mezcla entre la inyección de material y la fusión de lecho de polvo. Un cabezal aplica un líquido aglutinante de forma selectiva

sobre una capa de polvo de tal manera que se consigue un aglomerado de líquido curado y polvo con la forma de la sección transversal de la pieza. Terminada una capa, la máquina extiende una nueva capa de polvo y se repite el proceso. Con este tipo de tecnología se puede trabajar con una gran variedad de materiales, además de producir piezas de colores. En el caso de los metales, es necesario un trabajo posterior para darle propiedades mecánicas, ya que la pieza formada por polvo aglomerado es frágil debido a la cantidad de poros en su interior. Lo más común es infiltrar otro material que rellene esos poros y que haga aumentar la resistencia de la pieza. En el caso del plástico, la necesidad de trabajo posterior es más reducida, ya que en la mayoría de casos solo es necesario, además de la limpieza del polvo sobrante, una capa protectora (de laca por ejemplo) que fortalezca la superficie. [2]

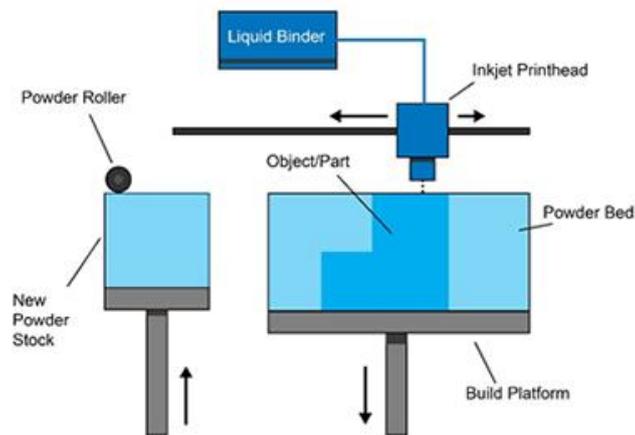


Figura 3: Proceso de inyección de aglutinante. Binder Jetting [3].

3.1.2. Materiales

Se puede utilizar una amplia gama de materiales, según la aplicación que le vayamos a dar. Generalmente, el agente aglutinante es del tipo resina, con propiedades adhesivas o curable ante alguna fuente de energía (luz, calor...). Como material base se puede utilizar polvo polimérico, para el desarrollo de modelos, prototipos, etc. También se trabaja con metales, pudiendo obtener piezas de aleaciones férreas y no-férreas, también para prototipado u ornamentos incluso. Se fabrican también moldes de arena para colada, utilizando arena junto con el aglutinante para conformar el molde.

3.1.3. Ventajas e inconvenientes

Las ventajas más evidentes de este tipo de tecnología son la velocidad de fabricación, de las más rápidas dentro de la fabricación aditiva y junto con la fusión de lecho de polvo, la que puede conseguir geometrías de mayor complejidad. Otro de sus puntos fuertes es que puede trabajar con casi cualquier material en forma de polvo, ya que al aglutinarse mediante otro material adhesivo no necesita tener en cuenta propiedades como el punto de fusión porque no es necesario, por ejemplo, el uso de ninguna fuente de energía para procesar el material.

El principal problema de las piezas obtenidas por este método es que en esencia, son polvo pegado, sin ningún tipo de transformación física o química. Esto hace que las piezas no tengan propiedades mecánicas útiles, lo que hace necesario un proceso posterior sobre el componente fabricado para darle algún tipo de propiedad.

3.2. Directed Energy Deposition

3.2.1. Descripción

La deposición directa de energía (*DED Directed Energy Deposition*), Figura 4, consiste en aplicar un haz de energía sobre la pieza de forma localizada, de tal manera que se forme un baño de material fundido, a la vez, se aplica nuevo material, que en contacto con el haz de energía se funde antes de depositarse sobre ese baño. Mediante una boquilla, se aplica conjuntamente el haz de energía, que puede ser láser o haz de electrones, y el material de aporte fundido, que puede estar inicialmente en forma de polvo o en hilo. De esta manera, la boquilla se desplaza de forma programada sobre la superficie de trabajo generando un pequeño baño sobre el que aporta nuevo material, cuando la boquilla se desplaza, el líquido que deja atrás solidifica creando una nueva capa al finalizar el recorrido. Tras una capa, la boquilla repite el proceso generando otra, y así de forma sucesiva.

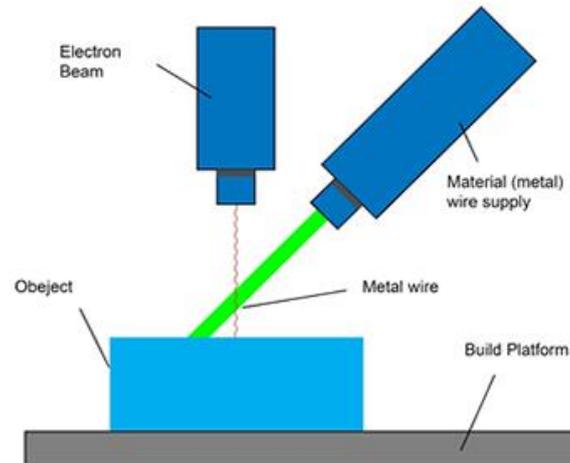


Figura 4: Proceso de deposición directa de energía. Directed energy deposition

Esta tecnología, en general se utiliza con tres finalidades distintas; al igual que los demás procesos de fabricación aditiva, se utiliza para generar objetos, aunque también se utiliza para reparar piezas dañadas y añadir partes o modificar una parte de un objeto ya existente; esto se debe a que generalmente todos los procesos *DED* permiten el movimiento libre de la boquilla con 4 o 5 ejes, de tal manera que pueden proyectar material sobre cualquier dirección.

Existen varios procesos categorizados como *DED*. Según el tipo de material de aporte, el tipo de energía aplicada u otros factores como el nombre comercial que la empresa que lo comercializa decide darle.

Por ejemplo los procesos *DMD* (*Direct Metal Deposition*) de la empresa *POM*, *LENS* (*Laser Engineered Net Shaping*) de la empresa *Optomec*, mostrado en la Figura 5 o *EBFFF* (*Electron Beam Freeform Fabrication*) de la empresa *Sciaky* están basados en deposición directa de energía.



Figura 5: Detalle del cabezal durante el proceso LENS.

3.2.2. Materiales

Existen procesos que trabajan distintos materiales por *DED*, desde polímeros termoplásticos hasta metales o cerámicos, aunque generalmente se trabaja sobre metales. El rango de aleaciones metálicas utilizadas con este proceso abarca desde las aleaciones de acero (inoxidable y de herramientas), aleaciones de aluminio y de níquel. Al poder trabajar bajo atmósferas protectoras, también se producen piezas de titanio y aleaciones de este y aleaciones de cobalto.

3.2.3. Ventajas e inconvenientes

Las principales ventajas de la deposición directa de energía frente de sus tecnologías competidoras, en el caso de procesamiento de metales, las tecnologías basadas en *PBF* (*Powder Bed Fusion*), fusión de lecho de polvo, son un mayor tiempo de deposición de material y la posibilidad de generar piezas de mayor tamaño que las que se obtendrían por *PBF*. Como se ha descrito con anterioridad, los procesos *DED* son idóneos para las reparaciones o modificaciones de piezas ya construidas. En el caso de materiales sensibles al aire, es necesario trabajar bajo una atmosfera adecuada; En este caso las tecnologías *DED* también aventajan a las *PDF*, ya que estas necesitan que toda la cámara de trabajo se encuentre en la atmosfera adecuada, mientras que algunas tecnologías *DED* añaden a la boquilla canales de gas que proyectan una atmosfera protectora solo sobre el baño de material (como una soldadura *TIG*), de esta manera solo se protege la parte necesaria evitando la necesidad de tener una máquina para soportar dichas atmosferas.

Las principales desventajas del *DED*, están en su acabado superficial, más vasto que el generado por *PBF*, necesitando un mecanizado posterior. También presenta ciertas limitaciones con algunas geometrías complejas, sobre todo con partes huecas. [4]

3.3. Material Extrusion

3.3.1. Descripción

Los procesos de fabricación aditiva por extrusión de material, como se muestra en la Figura 6, consisten en extrudir material fundido, depositándolo selectivamente según el desplazamiento programado del cabezal generando capas con la forma de la sección transversal del objeto a construir. Este proceso parte de material en forma de hilo que se funde a través de una boquilla antes de ser depositado y posteriormente solidifica en la superficie de trabajo adhiriéndose al material contiguo. Inicialmente esta tecnología se conocía por el nombre de *FDM* (*Fused Deposition Modeling*), modelado por deposición fundida, ya que era el nombre que le dio la empresa que comercializó este proceso, *Stratasys*.

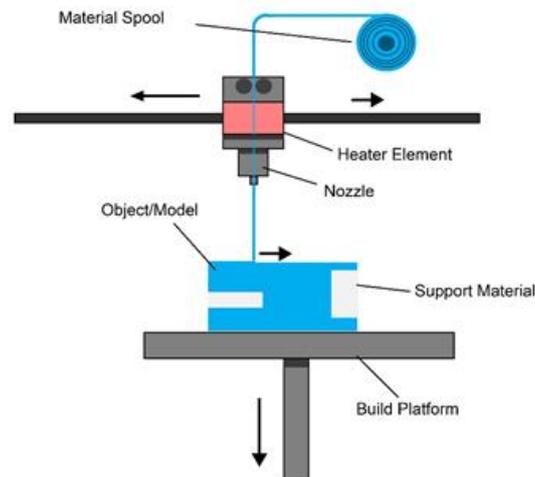


Figura 6: Proceso de extrusión de material. Material extrusion.

Esta tecnología es la que tiene mayor popularidad fuera del ámbito puramente industrial debido a la comercialización de pequeñas impresoras, como la de la Figura 7, que permiten su adaptación al ámbito del pequeño comercio, oficina e incluso doméstico. En el campo industrial, las impresoras basadas en este proceso son las que tienen menor coste.



Figura 7: Impresora basada en extrusión de material para uso doméstico. Modelo HEPHESTOS 2 de BQ.

3.3.2. Materiales

Los termoplásticos son los materiales más utilizados para extrusión de material, aunque se ha investigado para adaptar el proceso a cerámicos y metales en forma de pasta. Los polímeros más comunes son el PLA, PC y ABS. Muchas impresoras permiten trabajar con un segundo material de apoyo, que se encarga de cubrir las zonas del área de trabajo donde se necesita una superficie sobre la que imprimir una nueva capa de material. Estos materiales de apoyo acostumbran a ser solubles en algún medio para su eliminación posterior, aunque en las

impresoras más humildes el material de apoyo es el mismo que el de la pieza, por tanto se necesitan operaciones de mecanizado posterior para eliminar dicho material.

3.3.3. Ventajas e inconvenientes

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la capacidad de realizar figuras de geometrías complejas apoyándose en material de soporte, ya sea soluble o del mismo material. Al trabajar con materiales poliméricos, su post-proceso es más sencillo. Es la tecnología de fabricación aditiva más económica, debido a la sencillez del mecanismo en comparación con otros procesos y la disponibilidad y bajo coste del material base.

Por el contrario, la resolución en el eje z (eje que forman la sucesión de las capas) es pobre comparado con otras tecnologías, haciendo necesario un trabajo de acabado si la pieza requiere una calidad superficial determinada, aumentando el tiempo y el coste del proceso.

3.4. Material Jetting

3.4.1. Descripción

Es un proceso con un funcionamiento similar a las impresoras de tinta sobre papel, que depositan tinta gota a gota sobre el papel. En este caso, un cabezal deposita material fluido gota a gota sobre una superficie, normalmente cera o polímeros fotosensibles, Figura 8. Una vez depositado el material, se polimeriza o cura mediante una fuente de calor o luz. Al ser un proceso basado en la deposición gota a gota, es difícil utilizar materiales cerámicos o metales aunque existen investigaciones en esa línea.

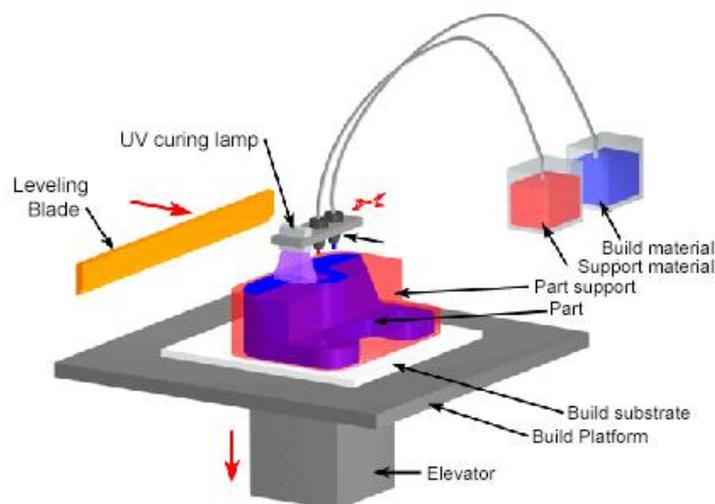


Figura 8: Proceso de inyección de material. Material jetting.

La inyección de material permite impresiones con más de un material, ya sea por necesidad de un material de soporte para la construcción de la pieza o para ensamblar durante la impresión dos o más piezas de distintos materiales y así evitar procesos posteriores de ensamblado.

3.4.2. Materiales

Los materiales utilizados para la inyección de material son varios tipos de plásticos y ceras; los más típicos son el HDPE, PP, PMMA, ABS, entre otros.

3.4.3. Ventajas e inconvenientes

Entre las virtudes de este proceso está el alto nivel de acabado superficial de las piezas, haciendo prácticamente innecesarios los trabajos de acabado posteriores. Esta particularidad hace de la inyección de material una tecnología idónea para el desarrollo de moldes para fundición a la cera perdida, ya que se consiguen crear piezas de cera con un alto nivel de exactitud respecto a la pieza final.

Por el contrario, existe poca variedad de materiales que pueden ser utilizados, solo algunos tipos de polímeros y ceras cumplen con los requisitos de las máquinas actuales. Además, debido al proceso y al material, las propiedades mecánicas del producto son algo pobres.

3.5. Powder Bed Fusion

3.5.1. Descripción

Las tecnologías *PBF* [5] están basadas en el mismo principio que las primeras invenciones en el campo de la impresión 3D, un recipiente lleno de materia prima y un sistema de aplicación de energía que crea un sólido en la capa superficial del recipiente, una vez creada una capa de sólido, más materia prima recubre dicha capa y se repite el proceso. En el caso de la fusión de lecho de polvo, y su característica principal, es que la materia prima está en forma de polvo. Las fuentes de aplicación de energía son el láser o el haz de electrones. Un recipiente contiene polvo de un material, mediante una fuente de calor se funden selectivamente ciertas zonas de tal manera que el polvo se vuelve líquido y se une al polvo fundido adyacente, Figura 9; una vez solidificado se obtiene una capa de material sólido, entonces, un mecanismo hace descender la superficie de trabajo y extiende otra capa de polvo virgen sobre la anterior.

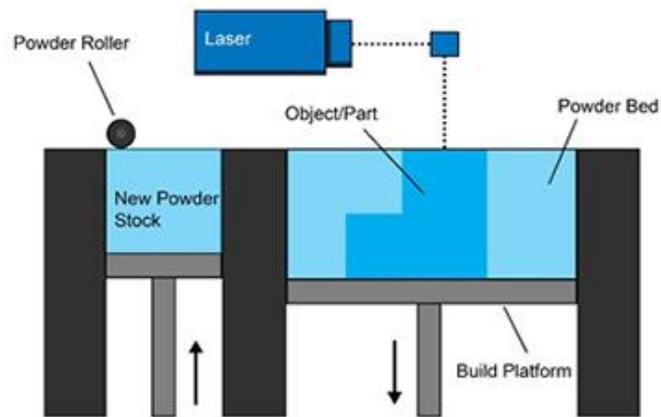


Figura 9: Proceso de fusión de lecho de polvo. Powder bed fusion.

Se repite el proceso hasta que se obtiene el sólido proyectado. Como en los demás tipos de tecnologías de fabricación aditiva, a lo largo de la historia se han desarrollada distintos procesos basados en *PBF*, que han recibido distintos nombres; entre varios procesos encontramos el sinterizado selectivo por láser (*SLS Selective Laser Sintering*) de la empresa *DTM*, donde un láser sinteriza polvo de polímeros termoplásticos. Para metales, existe el proceso *EBM (Electron Beam Melting)* de la empresa *ARCAM*; en este proceso se utiliza un haz de electrones como fuente de calor para polvos metálicos. También está el sinterizado directo de metal por láser (*DMLS Direct Metal Laser Sintering*), desarrollado por la alemana *EOS*, donde el material base son polvos metálicos.

3.5.2. Materiales

Las tecnologías *PBF* permiten trabajar con un amplio rango de materiales, desde polímeros termoplásticos hasta metales. En el campo de los metales es la tecnología más utilizada para el desarrollo de nuevos componentes, por delante de las tecnologías *DED*. La mayoría de máquinas *PBF* están pensadas para trabajar bajo una atmosfera controlada, ya sea en vacío, como en las máquinas *EBM*, o bajo gas inerte; este hecho permite trabajar metales como el acero y metales y aleaciones de procesado más complejo, como las de titanio o cobalto.

3.5.3. Ventajas e inconvenientes

En comparación con otras tecnologías de fabricación aditiva que compiten con el lecho de polvo, esta, permite el desarrollo de componentes de alta complejidad geométrica, debido a que el propio polvo ejerce de material de soporte, de esta manera se facilita la construcción de, por

ejemplo, partes huecas. Las tecnologías *PBF* permiten un gran nivel de acabado y una alta precisión geométrica, Figura 10.

Su punto flaco es básicamente el tamaño de los componentes que se pueden obtener, ya que el tamaño del objeto depende fuertemente del tamaño del recipiente que contiene el polvo; para obtener grandes piezas sería necesario disponer de una máquina de grandes dimensiones, cosa que implicaría un coste muy elevado, mayores complicaciones técnicas y un elevadísimo consumo de polvo. En este aspecto, la tecnología *DED*, sale ventajosa ya que lo único importante es el cabezal, encargado de depositar el material, la energía y, si fuera necesario, la atmosfera controlada. Así que los requerimientos técnicos del sistema para poder generar piezas de grandes dimensiones son muy inferiores a las máquinas de lecho de polvo. Otra carencia es la imposibilidad actual de trabajar con más de un material y la dificultad de utilizar esta tecnología para la adición de partes a componentes ya creados, o para la reparación de piezas. [5,6]

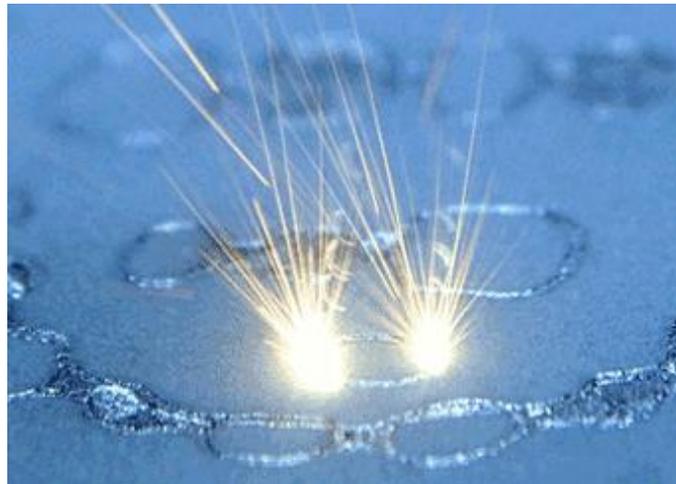


Figura 10: Detalle del proceso DMLS. Aplicación de laser sobre la superficie de polvo.

3.6. Sheet Lamination

3.6.1. Descripción

Los procesos por laminación de hojas se basan en la superposición de materiales en forma de lámina, juntados de varias formas dependiendo del material de las láminas, de tal manera que se obtiene un sólido completo en tres dimensiones. Una de las primeras tecnologías de este tipo fue la impresión por laminación (*LOM Laminated Object Manufacturing*) donde una lámina de papel era cortada por láser con la forma deseada y se pegaba a la capa inferior con un producto adhesivo, Figura 11. Esta tecnología permite también trabajar con metales, donde una chapa metálica, se corta según la sección transversal y se adhiere a la inferior y luego a ala posterior

mediante remaches, adhesivo o por soldadura por ultrasonidos. El trabajo con metales generalmente implica un trabajo de mecanizado posterior para obtener la geometría deseada.

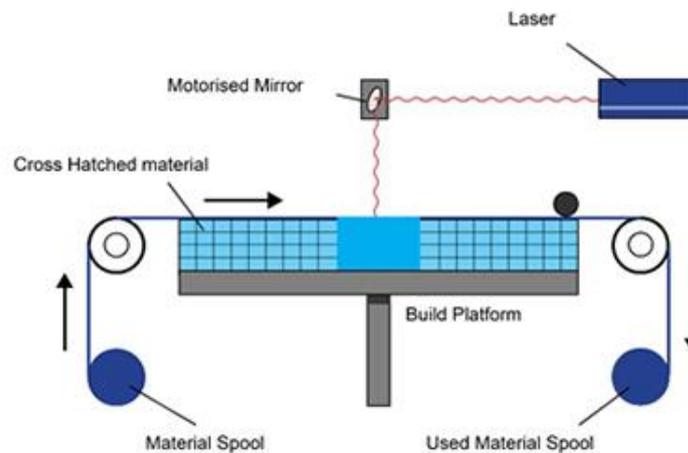


Figura 11: Proceso de laminación por hojas. Sheet lamination.

3.6.2. Materiales

Se pueden obtener distintos de objetos por laminación aditiva de distintos materiales. Generalmente, cualquier material que pueda ser conformado en forma de lámina se puede utilizar con este método. Uno de los más comunes y el primero en ser utilizado fue el papel. También existen máquinas que trabajan con metales, además existe la posibilidad de generar piezas multimaterial, ya que cualquier metal soldable puede ser utilizado, así que se pueden intercalar láminas de distintos materiales según las necesidades.

3.6.3. Ventajas e inconvenientes

Una de las ventajas principales es la velocidad, las capas se obtienen relativamente rápido ya que solo es necesario cortar por el contorno de la sección, si necesidad de recorrer toda la superficie de esta como en las otras tecnologías. En las tecnologías que utilizan papel, sus propiedades mecánicas y físicas en general dependen fuertemente del adhesivo que se utiliza. Los materiales laminados son altamente conocidos y es un técnica existente desde hace muchos años por tanto la obtención de la materia prima es más económica que para otras tecnologías, por ejemplo las de base polvo. La posibilidad de trabajar con más de un material, sobretodo en metales. Además, el tipo de unión utilizado en metales es en estado sólido, por lo tanto se evita llevar el material a estado líquido y posterior solidificación; de esta manera se previenen los posibles defectos de solidificación o de la zona afectada térmicamente.

Su principal desventaja son los acabados, más bastos que en otras tecnologías debido al espesor de las capas. Esto hace necesario un proceso de acabado posterior, que en papel es más sencillo, pero en metales requiere más recursos. En la laminación con metales existe el problema de la porosidad; los posibles defectos superficiales de la lámina y de sus capas superior y/o inferior pueden provocar que la unión entre capas no sea completa, dejando huecos en el interior que podrían afectar a las propiedades finales de la pieza.

3.7. Vat Photopolimerization

3.7.1. Descripción

Dentro de las tecnologías que conforman todo el espectro de la fabricación aditiva, la que es considerada la primera por ser la primera en ser comercializada es la fotopolimerización, más conocida por estereolitografía, el nombre comercial dado al sistema patentado por Charles Hull y comercializado por la empresa *3D Systems*. El proceso consiste en, mediante un haz de energía, generalmente láser o UV, curar o polimerizar selectivamente la superficie de un baño de polímero fotosensible. La Figura 12 esquematiza este proceso. Después, se cubre con polímero líquido la capa solidificada y se repite el proceso.

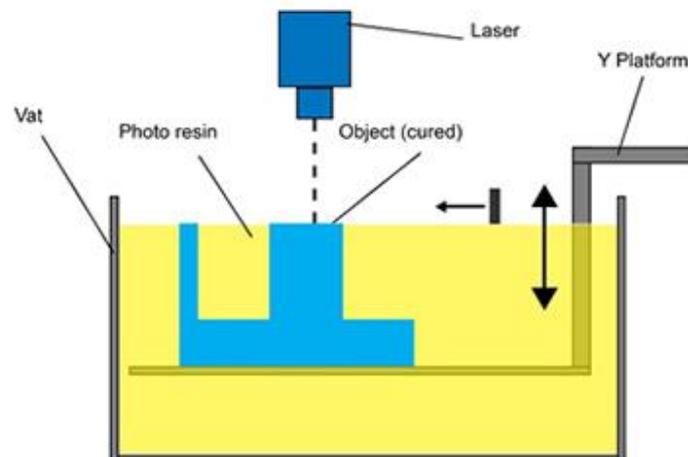


Figura 12: Proceso de fotopolimerización. Vat photopolimerization.

Esta tecnología es utilizada para el desarrollo de prototipos y modelos. También es frecuente su utilización en el desarrollo de moldes para procesos posteriores, ya que las propiedades de la pieza terminada, permiten que sea utilizada como patrón para generar moldes para colada. En el campo de la medicina se utilizan modelos generados por fotopolimerización ya que se pueden generar geometrías personalizadas y se utilizan para estudios de procedimiento antes de operaciones quirúrgicas, por ejemplo.

3.7.2. Materiales

Actualmente, el abanico de materiales que pueden ser procesados mediante fotopolimerización es bastante reducido, y como se puede deducir del nombre de la tecnología, está limitado a los polímeros o resinas fotosensibles.

3.7.3. Ventajas e inconvenientes

Una de sus principales ventajas es la alta calidad del acabado superficial, y la precisión geométrica respecto al diseño. La Figura 13 muestra el acabado de piezas fabricadas por este método. El proceso de impresión relativamente rápido y actualmente hay máquinas que permiten imprimir piezas de tamaño considerable, pudiendo llegar hasta los 200 kg. El mayor inconveniente es el precio del material base y la limitada variedad de estos; actualmente los polímeros y resinas utilizados tienen precios elevados en comparación con los materiales base de otras tecnologías. Otro de los inconvenientes, debido a que el material base es líquido, es que para generar geometrías complejas, es necesario imprimir estructuras de soporte, cosa que en los procesos en base polvo no es necesario, por ejemplo. El trabajo de limpieza posterior es ligeramente alto. Otro inconveniente es que el proceso de polimerización a partir de un líquido puede generar defectos internos como porosidades, que afectan a las propiedades del componente. Muchas veces, es necesario un procesamiento posterior para mejorar las propiedades de la pieza. [7,8]



Figura 13: Detalle de piezas realizadas por estereolitografía.

4. Historia de la fabricación aditiva

Este apartado pretende describir el desarrollo y evolución de las distintas tecnologías que conforman la fabricación aditiva desde sus inicios, teniendo en cuenta las posibles influencias provenientes de otros campos; se describirá cronológicamente el desarrollo y comercialización de cada una de las tecnologías. Como a medida que avanzan los años la fabricación aditiva ha ganado peso en el campo del conformado de objetos, existen numerosas tecnologías con sus innovaciones; de tal manera que abarcar todo el contenido histórico de la fabricación aditiva resultaría demasiado extenso y tedioso, así que este documento recogerá únicamente el desarrollo de una nueva tecnología y una breve descripción de la misma, sin hacer hincapié en los desarrollos posteriores de dicha tecnología a no ser que resulten de especial interés para el devenir del proyecto.

4.1. Influencias

Los inicios de la fabricación aditiva se sitúan entre 1970 y 1990 [9,10] donde se empezó implementar el uso de la tecnología láser hasta desarrollar la tecnología conocida como estereolitografía (*stereolithography*), o por sus siglas en inglés *SLA* o *SL*. Esta tecnología apareció comercialmente en 1987 y se utilizaba para el desarrollo de modelos y prototipos. La estereolitografía se basa en la solidificación por capas de un polímero fotosensible mediante láser.

El principio fundamental de la fabricación aditiva es la generación por capas de un objeto tridimensional, este método de fabricación se puede asociar históricamente con dos ramas, la topografía y la fotoescultura [11]. En el campo de la topografía, en una patente estadounidense de 1892, J. E. Blather [12] ideó la generación de moldes para mapas topográficos proyectando las líneas de contorno topográfico sobre láminas de cera, posteriormente se cortaban las láminas por el contorno dibujado y se apilaban, obteniendo así una representación tridimensional del mapa topográfico y su negativo. Horneando debidamente las capas de cera se obtenía un molde y su negativo sólidos, de tal manera que presionando una lámina de papel entre ellos se lograba un mapa topográfico en tres dimensiones. En la Figura 14 se muestra el esquema del solapamiento ideado por Blather.

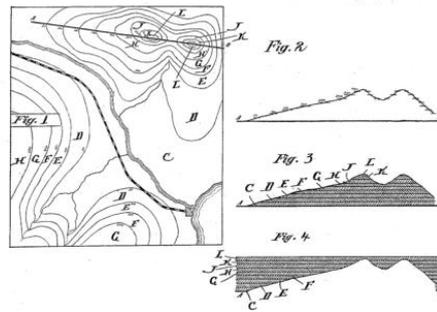


Figura 14: Imágenes de la patente US473901A de J. Blather

Horneando debidamente las capas de cera se obtenía un molde y su negativo sólidos, de tal manera que presionando una lámina de papel entre ellos se lograba un mapa topográfico en tres dimensiones.

Posteriormente, en las décadas posteriores se patentaron métodos similares para la generación de mapas topográficos, hasta que en 1972, en una patente de *Mitsubishi Motors*, se propuso utilizar partículas recubiertas de resina polimérica fotosensible con el objetivo de extender una capa de dichas partículas, calentarlas para formar una lámina y mediante un dispositivo emisor de luz, endurecer selectivamente una región de la capa de partículas hasta obtener una lámina sólida y coherente de dichas partículas con la forma deseada. Eliminando posteriormente las partículas no endurecidas y repitiendo el proceso y apilando capa a capa, se obtenía un molde sólido. Más adelante, en 1976, se observó que estas técnicas se podían utilizar para obtener superficies difíciles de obtener con la tecnología de mecanizado de la época. Así que se propuso generar objetos tridimensionales mediante el apilamiento de láminas metálicas cortadas según la forma de la sección transversal del objeto, Figura 15 [13]. Se puede observar como des del campo de la topografía se ideaban tecnologías que servirían de germen de la fabricación aditiva, desde la utilización de resinas fotosensibles hasta la generación por capas de objetos metálicos.

La fotoescultura, una tecnología pensada para generar réplicas exactas de objetos reales, también personas, emergió y creció en el siglo XIX. En 1860se propuso situar el objeto a representar en el centro de una sala rodeado de 24 cámaras equidistantes formando una circunferencia alrededor del objeto, de tal manera que se tomaba simultáneamente una fotografía con cada cámara y posteriormente se obtenía la silueta del objeto de cada imagen. Seguidamente, un artesano tallaba 1/24 parte de un cilindro con la silueta de cada imagen. De esta manera se conseguía un objeto tridimensional idéntico al modelo. Posteriores trabajos para perfeccionar esta técnica idearon métodos para endurecer polímeros fotosensibles mediante distintos tipos de aplicación de luz sobre el objeto a representar [14,15].

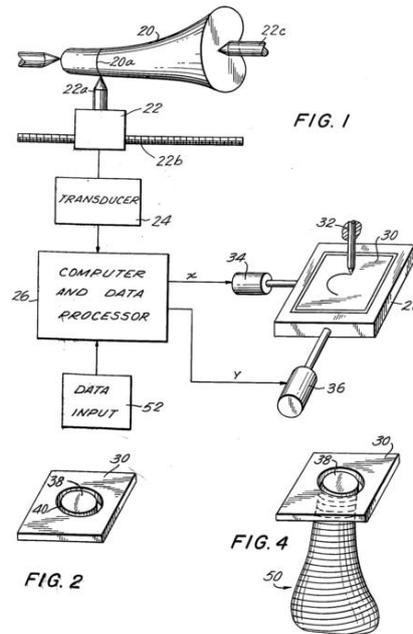


Figura 15: Imagen de la patente US3932923A de DiMatteo.

Uno de los primeros métodos desarrollados que recuerdan a la estereolitografía actual se remonta a 1951, donde Munz [16] ideó un sistema para generar sólidos en tres dimensiones; se aplicaba luz sobre la superficie de un pistón recubierto de una emulsión fotosensible, así se generaba una capa fina de sólido que equivalía a la sección transversal del objeto final. Seguidamente, el pistón descendía y se añadía otra capa de emulsión y de agente fijador generando una capa de líquido sobre la capa sólida antes generada, de esa manera se solidificaba una nueva capa encima de la anterior, generando un objeto tridimensional. En los años posteriores se propusieron nuevos métodos y modificaciones de métodos anteriores para obtener sólidos mediante la polimerización selectiva de fluidos fotosensibles, ninguno resultó aplicable industrialmente. Más adelante, en 1971, se propuso un método que recuerda a los actuales procesos de fabricación aditiva por deposición directa de material. Este método consistía en aplicar continuamente material en forma de polvo sobre una matriz y mediante un haz de energía (láser, haz de electrones...) se fundía de forma localizada provocando la adhesión de las partículas en esa zona. A finales de la década de los 70, se desarrolló una de las descripciones primeras de un proceso de sinterizado de polvo mediante laser; Lo propuso Housholder [17]; consistía en depositar finas capas de polvo y solidificar una parte de forma selectiva, repitiendo el proceso hasta obtener el objeto. En la Figura 16, se muestra el dispositivo de aplicación de polvo y sinterizado ideado por Housholder.

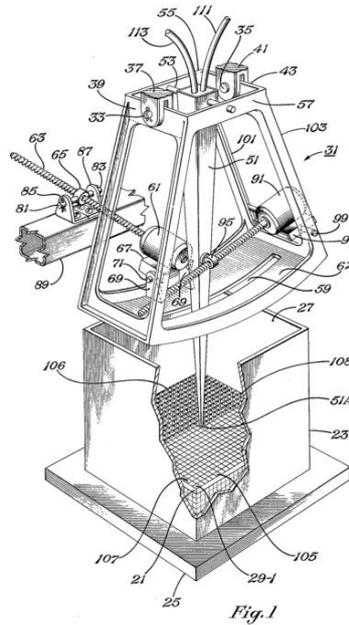


Figura 16: Imagen de la patente US4247508 de R. Housholder.

Como se ha podido observar, la investigación de tecnologías para superar limitaciones en campos distintos, han servido de punto de partida para el desarrollo de la fabricación aditiva, sentando parte de la base de los procesos y permitiendo ver las posibilidades que estos procesos tienen en distintos campos de la fabricación.

4.2. Evolución histórica de la fabricación aditiva

A partir de 1980 el desarrollo de tecnologías para la fabricación aditiva se multiplicó, abarcando cada vez un mayor espectro en el ámbito científico e industrial con el objetivo de resolver las limitaciones que aun presentaba; limitaciones de proceso, materiales, aplicación...

Como se ha comentado en el apartado anterior, se toma comúnmente el inicio de esta tecnología en la comercialización de la estereolitografía de la mano de la empresa estadounidense *3D Systems*. La estereolitografía fue patentada por Charles W. Hull [10] en 1987, quién posteriormente fundaría *3D Systems* para la comercialización de dicha tecnología. La primera impresora de esta tecnología se bautizó como *SLA-1*. La Figura 17 representa el proceso esquemático de estereolitografía ideado por C. Hull. En los años posteriores se desarrollaron mejoras sobre esta tecnología, tanto en nueva maquinaria como en materiales, empresas como *DuPont* o *Loctite* entraron en el mercado de las resinas para SL.

Más adelante países como Japón desarrollarlo y comercializaron su propia versión de SL en empresas como Sony, entre otras. También en Alemania, en 1990, la empresa *EOS (Electro Optical Systems)* saca su primer sistema de estereolitografía.

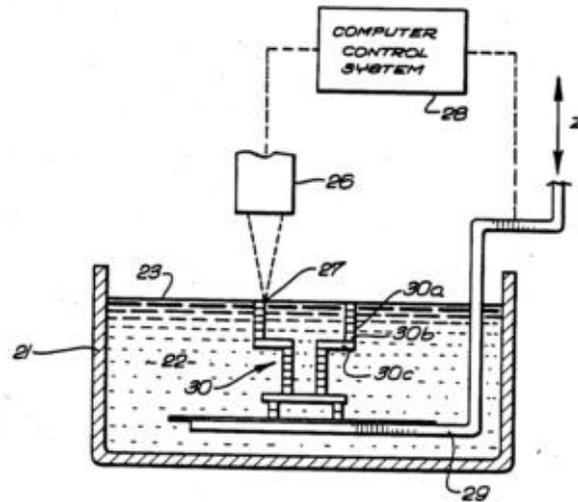


Figura 17: Imagen de a patente US4575330 de C. Hull.

En 1991 aparecen nuevas tecnologías de fabricación aditiva; La empresa *Stratasys* (Estados Unidos) comercializa el modelado por deposición fundida, o como se le conoce en inglés (*FDM Fused Deposition Modeling*). Esta tecnología consiste en fundir un material termoplástico y extrudirlo por capas. La empresa *Helysis* (Estados Unidos) desarrolló la tecnología *LOM* [19], impresión por laminación (*Laminated Object Manufacturing*) que consistía en cortar capas de material laminado mediante láser y pegarlas al objeto. La tecnología de curado de base sólida (*SGC Solid Ground Curing*) la desarrolló la empresa israelí *Cubital*; esta tecnología consiste en solidificar una superficie de resina con la forma de la sección transversal del objeto final; en este caso, se utilizan máscaras con la forma de la sección transversal que dejan pasar únicamente radiación UV a través de dicha forma, solidificando completamente la superficie con la forma deseada. En 1992, la empresa estadounidense *DTM* comercializa el sinterizado selectivo por láser (*SLS Selective Laser Sintering*); este proceso fue desarrollado en la Universidad de Texas [20] e impulsó la creación de la empresa *DTM*. El sinterizado selectivo por láser consiste en aplicar un haz láser sobre un lecho de polvo, de tal manera que sinterice la parte deseada, una vez terminada una capa, se rellena una nueva capa con polvo y se repite el proceso. El año posterior, la empresa estadounidense *Soligen Technologies* comercializó el proceso creado y patentado por el *MIT* (*Massachusetts Institute of Technology*) conocido como proyección aglutinante (*DSPC Direct Shell Production Casting*) [21]; este proceso produce moldes para fundición a la cera perdida aplicando material aglutinante de forma selectiva a un lecho de polvo cerámico comprimido, de tal manera que aglutina polvo por capas según la forma deseada. Una vez obtenida la pieza se utiliza como molde para la fundición a la cera perdida. En 1994, la

empresa *Sanders Prototype* desarrolló un proceso para producir modelos en tres dimensiones mediante inyección de cera (*ModelMaking*) [22].

En 1997 se funda una empresa filial de la estadounidense *MTS Systems Corp.*, una empresa líder en el sector de ensayos y sensores. La nueva empresa, de nombre *AeroMet*; esta compañía desarrolló una tecnología conocida como fabricación aditiva por láser (*LAM Laser Additive Manufacturing*) donde se utilizaba un láser de gran potencia y se trabajaba con aleaciones de titanio en polvo. Hasta 2005, *AeroMet* fue proveedora de componentes de la industria aeroespacial.

En 1998, la empresa *Optomec* comercializa la tecnología del conformado de red de ingeniería láser (*LENS Laser-Engineered Net Shaping*), Figura 18, esta tecnología fue desarrollada por el laboratorio Nacional Sandia en Albuquerque, Estados Unidos, (*Sandia National Labs.*). La tecnología LENS consiste en utilizar un láser que funde polvo metálico depositado localmente en la zona de trabajo junto con el haz láser.



Figura 18: Detalle de la zona de trabajo de una impresora de tecnología LENS de Optomec.

El año siguiente, la empresa alemana *Röders* comercializó la tecnología de acumulación de metales controlada (*CMB Controlled Metal Buildup*) que consistía en aplicar polvo metálico localizado junto con un haz láser y posteriormente fresar la superficie de forma controlada. Esta tecnología fue desarrollada en el Instituto Fraunhofer para las Tecnologías de Producción (*IPT Fraunhofer Institute for Production Technology*).

La empresa *Precision Optical Manufacturing (POM)*, de Estados Unidos, anunció en el año 2000 la deposición directa de material (*DMD Direct Metal Deposition*) un proceso similar al *LENS* que permitía reparar piezas mediante polvo metálico.

En la feria *EuroMold* de 2001, la empresa alemana *Concept Laser* mostró un nuevo sistema que combinaba la tecnología láser para sinterizar, marcar y mecanizar. Mediante un nuevo tipo de láser, producía piezas metálicas totalmente densas.

Al año siguiente, *Arcam*, de Suecia, inició la comercialización de la fusión por haz de electrones (*EBM Electron Beam Melting*), en este proceso, se aplicaba un haz de electrones en lugar del láser, típico en otros procesos parecidos, a un lecho de polvo para fundir la capa superficial de este. La Figura 19 muestra una de las impresoras actuales de la empresa *Arcam* con la tecnología *EBM*.



Figura 19: Impresora de EBM modelo Q10 de Arcam.

La Empresa EOS, alemana, presenta en la feria *Euromold* de 2003 el sinterizado directo de metal por láser (*DMLS Direct Metal Laser Sintering*) una tecnología similar al sinterizado selectivo por láser (*SLS*), desarrollada por la empresa estadounidense DTM en 1992, pero con la diferencia que el *DMLS* permitía trabajar con metales mientras que el *SLS* no.

Años después, en 2007, durante la celebración de la feria *EuroMold* 2007, la empresa israelí *Objet* presenta la primera impresora capaz de utilizar dos materiales, produciendo así un material compuesto directamente desde la impresión.

En 2008 una serie de empresas entre las que se encuentran *Boeing* y *3DSystems*, de Estados Unidos y *EOS* y *Evonik* de Alemania, entre otras, decidieron crear un centro de investigación de fabricación directa vinculado a la universidad de Paderborn en Alemania (*Direct Manufacturing Research Center*).

A principios del siguiente año, la *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*) junto con profesionales del sector se reunieron en las oficinas centrales de la *ASTM* en Estados Unidos para establecer el comité F42 de la *ASTM* sobre la fabricación aditiva. La intención del comité era establecer estándares sobre los procesos, ensayos, materiales, diseño y también la terminología asociada a las distintas tecnologías que conformaban la fabricación aditiva.

Fue a finales del mismo año, 2009, cuando la *ASTM* publicó su primera norma sobre la fabricación aditiva. Se trataba de la *ASTM F2792* [1]; esta norma definía la terminología asociada a la fabricación aditiva, agrupando conceptos y clasificando las distintas tecnologías en tipos. De

esta manera se podían agrupar procesos que inicialmente se consideraban distintos pero que en su esencia, se basaban en los mismos principios; por ejemplo la tecnología conocida como *DMLS* de la empresa *EOS*, la tecnología llamada *Metal 3DPrinting* por la empresa *Renishaw* o la tecnología que en *Concept Laser* llaman *LaserCUSING*, entre otras, responden en esencia al mismo proceso: mediante un haz de energía, en este caso el láser, se sinteriza la capa superficial de un lecho de polvo metálico; repitiendo el proceso tras terminar cada capa.

La fabricación directa de piezas de metal despertó significativamente el interés del sector a partir de 2010, ya que la evolución de la tecnología mejoraba las posibilidades de obtener nuevos diseños con las propiedades mecánicas de los metales forjados.

A mediados de 2011 la ASTM publicó la especificación para el formato del nuevo archivo de fabricación aditiva (*AMF Additive Manufacturing File*). Este nuevo tipo de archivo soportaba información de textura, color, propiedades del material, triángulos curvos; factores que no existían en el antiguo tipo de archivo, el *STL*.

A finales del mismo año, la ASTM y la Organización Internacional de Normalización (*ISO International Organization for Standardization*) anunciaron un acuerdo de cooperación para sus comités en fabricación aditiva con el objetivo de evitar el esfuerzo duplicado para el desarrollo de normas sobre la fabricación aditiva.

4.3. Tendencias

Uno de los avances más destacados de los últimos años y que permite allanar el camino para futuras investigaciones, es el desarrollo de un nuevo formato de archivo de impresión que supere las limitaciones del antiguo. El primer formato de archivo era el *STL*, que es el paso intermedio entre el archivo de diseño *CAD* y la impresión. El archivo *STL* transforma el modelo en *CAD* en un conjunto de superficies triangulares. Este formato presenta una serie de limitaciones que traban el desarrollo de nuevos procesos; el *STL* no es capaz de incluir textura, material o color en sus datos. Para esto, se han desarrollada la nueva versión de este formato, el *STL 2.0* y el formato desarrollado por la *ASTM*, el *AMF*. Estos nuevos formatos, permiten mayor intercambio de datos; no solo mejoran la precisión a la hora de convertir modelos en superficies triangulares, sino que soportan datos de textura, material, color y composiciones. De esta forma se permite el desarrollo de componentes de alta complejidad geométrica, el uso de distintos materiales en una sola pieza, el desarrollo de distintas texturas de forma localizada, etc.

En los últimos años, no solo la mejora de los procesos existentes ha sido el centro de estudio en el campo de la fabricación aditiva, también se han dedicado esfuerzos a la implementación de tecnologías aditivas a otros campos. Uno de los sectores donde se investiga el uso de la impresión 3D es la medicina. Se han cosechado varios éxitos sobretodo en el desarrollo de prótesis, Figura 20, donde la facilidad de generar geometrías complejas ha permitido desarrollar piezas completamente personalizadas para cada paciente.



Figura 20: Modelo de un implante metálico para cráneo humano.

También se ha logrado con éxito la reproducción de modelos idénticos de partes óseas u órganos para ensayos previos a operaciones quirúrgicas. La mejoras de los últimos años han permitido desarrollar replicas para prótesis que junto con el desarrollo de materiales han conseguido generar componentes totalmente compatibles que devuelven las características biomecánicas originales. Un gran campo de investigación creciente en la medicina es la impresión de tejidos, con el objetivo final de generar órganos que permitan solventar el problema de los trasplantes, se conoce como bioimpresión; consiste en la impresión de células junto con geles biocompatibles de tal forma que se forme una tinta biológica que depositada por capas pueda generar un órgano completo plenamente funcional. Existen varios materiales biomateriales como polímeros sintéticos curables, hidrogeles, etc.

Otro campo donde se investiga la utilización de la impresión, es la construcción, Figura 21 . El mayor avance en este sector viene de la mano de la empresa china *Shangai WinSun Decoration Engineering Company*. Una impresora construye estructuras sencillas por capas que luego se ensamblan para formar edificios de mayor complejidad. Esta impresora está basada en la tecnología de la extrusión de material, como la deposición de metal fundido (*FDM*). Este tipo de método de construcción reduce enormemente el tiempo de construcción y por ende, el coste final. El tiempo aproximado de construcción de una casa mediante este método dura menos de

un día y su coste ronda los 3800\$. La empresa *Shangai WinSun Decoration Engineering Company* demostró la capacidad de la máquina levantando 10 casas en 24horas.



Figura 21: Extrusora de hormigón depositándolo por capas.

Una de las principales trabas que encuentra la fabricación aditiva y que es centro de estudio de muchas de las grandes marcas en el campo y de otros investigadores, es su inclusión en la cadena de producción industrial. El reducido tamaño actual de las maquinas industriales de fabricación aditiva junto con los tiempos de carga y descarga de material y la pieza final y la velocidad de fabricación de esta hacen que sea difícil adaptar las impresoras a cadenas de producción, sobre todo las de grandes tiradas de productos. Una de las tendencias de investigación se centra en mejorar la automatización y la conexión de la impresora con los otros procesos de la cadena de acabado. Un ejemplo es la impresora desarrollada en la empresa japonesa *DMG MORI*, que une en una sola máquina, una impresora con la tecnología *DMD (Direct Metal Deposition)* con una máquina de mecanizado por control numérico (*CNC*). De esta manera se unen el proceso de fabricación y el de acabado, reduciendo tiempo efectivo para obtener la pieza acabada.

Otra fuente de investigación pretende optimizar el proceso desde el diseño de la pieza, reduciendo el material manteniendo las propiedades o añadiendo características extras. El uso de la topología permite la optimización del material utilizado mediante aproximaciones matemáticas sobre la geometría del modelo del objeto. En la Figura 22 se observa un diseño optimizado para una pieza metálica, todo el interior eta formado por pequeñas estructuras triangulares.



Figura 22: Diseño de componente con estructura interna optimizada.

De esa manera, se pueden encontrar configuraciones geométricas mejor optimizadas en cuanto a consumo de material y que cumplan los requerimientos necesarios. Junto a la posibilidad de generar piezas de elevada complejidad, gracias a estas aproximaciones, se pueden crear geometrías con estructuras internas que mantengan las propiedades proyectadas, ya sean mecánicas, funcionales u otras, y que optimicen el consumo de material.

Uno de los logros en la inclusión de la fabricación aditiva a la industria se encuentra en la generación de útiles para fabricación posterior. Con la intención de reducir coste y tiempo en la construcción de moldes, se han desarrollado impresoras de sinterizado de polvo capaces de construir moldes que resisten cerca de 1000 ciclos de trabajo. Otras tecnologías de fabricación aditiva generan moldes de arena y otras, que trabajan con cera, imprimen moldes para fundición a la cera perdida. La capacidad del diseño de piezas para fabricación aditiva de proyectar geometrías complejas o con aplicaciones añadidas permite imprimir moldes con insertos para sensores o canales de refrigeración que permiten un mayor control y optimización del proceso de colada posterior.

Como se ha descrito en el apartado anterior, la *ASTM* y la *ISO*, han empezado a desarrollar estándares para normalizar todo lo relativo a la fabricación aditiva. Creando normas de nomenclatura, requerimientos, calibración de máquinas y principios de los procesos que conforman esta tecnología. El objetivo es unificar todo el conocimiento desarrollado a lo largo de los años, estimular y sentar las bases de futuras investigaciones y motivar la implementación de dichas tecnologías. [2,23]

5. Titanio en la fabricación aditiva

5.1. Descripción

El interés del titanio y sus aleaciones nace de sus excelentes propiedades mecánicas específicas (relación entre propiedad mecánica y densidad) así como su excelente resistencia a la corrosión. Dichas propiedades hacen del titanio y sus aleaciones un material excelente para la industria del transporte, especialmente la aeroespacial debido al interés por reducir el peso de sus componentes sin sacrificar propiedades mecánicas. Otro de los campos de aplicación del titanio es la industria biomédica debido a su biocompatibilidad con los tejidos del cuerpo humano.

El principal inconveniente para extender el uso de las aleaciones de titanio es su elevado coste en comparación con otros materiales competitivos en el sector. En la Tabla 1 se hace una comparación entre el precio por unidad de masa de tres metales en diferentes estadios de su producción, desde la obtención de mineral hasta productos laminados.

Tabla 1: Comparativa de precio de diferentes metales. Unidades en \$/lb.

	Acero	Aluminio	Titanio
Mineral	0,02	0,01	0,22
Metal	0,10	1,10	5,44
Lingote	0,15	1,15	9,07
Lámina	0,30-0,60	1,00-5,00	15,00-50,00

El elevado coste de los componentes del titanio parte en primer lugar del coste la obtención de este elemento en forma mineral (rutilo principalmente) y del procesado para conseguir el elemento, que aunque el precio del material base solo supone un porcentaje muy bajo del coste total del componente, comparativamente, está muy por encima de sus principales competidores. Tras la obtención del material base, el procesado para obtener el componente final también tiene un coste muy superior al procesado de los materiales competidores; con lo que finalmente se obtiene un producto con un precio muy superior a sus competidores. Los principales problemas a la hora de manipular el titanio y que dificultan su uso con las técnicas de fabricación tradicionales es su sensibilidad al aire. Por ello es necesario procesarlo al vacío o bajo atmosfera inerte, y esto encarece las tecnologías tradicionales de colada, mecanizado, etc. Con la idea de obtener componentes de aleaciones de titanio reduciendo el coste de procesado se investiga el posible uso de nuevas tecnologías de conformado de menor coste, como son las de origen pulvimetalúrgico, entre ellas, la que atañen al presente documento, la fabricación

aditiva. El uso de este tipo de fabricación presenta muchas ventajas que lo hace idóneo para las aleaciones de base titanio. La fabricación aditiva, no solo reduce el tiempo y coste de producción de componentes de titanio, sino que además permite la obtención de geometrías complejas y cuerpos huecos, generando una optimización del componente final. [24]

5.2. Obtención del material base

Como en la mayoría de tecnologías de procesado de metales por fabricación aditiva, el material de partida acostumbra a estar en forma de polvo. Existen, pero, algunas tecnologías que parten de metal en forma de hilo o laminas. Por ejemplo las tecnologías basadas en la deposición directa de energía (DED) que no usan el material en forma de polvo se conocen comercialmente como: *Direct Manufacturing (DM)*, *Shaped Metal deposition (SMD)* y *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)* que usan hilo como material base y *Ultrasonic Consolidation* que utiliza el metal en forma de lámina.

Las tecnologías en base polvo metálico son las más comunes y dicho polvo tiene una gran influencia en el proceso, no solo en cuanto a impacto económico y ambiental, sino también en el procedimiento y resultado de la pieza. Existen varios métodos de producción de polvo de titanio, con resultados distintos y sus respectivas ventajas e inconvenientes asociados. Cada proceso genera polvo de titanio con diferentes características, como el nivel de oxidación o de inclusión de impurezas o contaminación o también características morfológicas, ya que se produce polvo con forma esférica o irregular. Cada tipo de polvo influirá en el proceso que va a ser utilizado. En general, para fabricación aditiva, el polvo esférico es preferible en frente del irregular debido a su mejor fluidez y apilamiento. Sin embargo, varias tecnologías trabajan el polvo irregular con buenos resultados, que es más económico que el esférico.

El precio del polvo de titanio de forma esférica es elevado debido al coste de los métodos para producirlo, los requisitos de forma y fluidez del polvo son muy exigentes. Esto provoca un ligero obstáculo a la hora de sacar al mercado tecnologías de fabricación aditiva para polvo de titanio. Por ello, existen investigaciones centradas en generar polvo irregular, de bajo coste, que pueda ser utilizado en fabricación aditiva. Actualmente existen varios procesos en desarrollo con potencial para producir polvo irregular de titanio apto para fabricación aditiva a bajo coste.

Como se ha mencionado con anterioridad, la mayoría de procesos de fabricación aditiva de componentes metálicos parten de polvo como material base. Por ello, es importante considerar las propiedades del polvo, que influirán de forma notable en la calidad del componente final. Se pueden dividir estas propiedades o características en dos grupos, las propiedades del polvo, y

las características de manipulación y almacenamiento. Las propiedades del polvo son el tamaño de la partícula, la forma, la densidad y la fluidez.

Según el proceso de producción de polvo, donde el material de partida y las variables utilizadas influyen enormemente en el producto final, se obtendrá polvo con una distribución de tamaños concreta. Esta distribución de tamaños, llevará asociado el tamaño medio, que será clave a la hora de conocer el espesor mínimo de la capa que se podrá generar durante el proceso de fabricación aditiva. La distribución de tamaños implicará la cantidad de partículas superiores e inferiores a la media e influirá en la densidad del polvo apilado, afectando al acabado final de la pieza. Aunque el tamaño de polvo utilizado para cada tecnología depende de la máquina en cuestión, se pueden dar valores típicos de tamaños para las familias de procesos *PBF* y *DED*. Para *DED*, los tamaños típicos de partícula oscilan entre 50 y 150 μm . En las tecnologías de lecho de polvo, *PBF*, los tamaños son menores y su intervalo más estrecho, siendo polvo entre 20 y 45 μm .

Junto con el tamaño del polvo, la morfología de las partículas definirá las siguientes propiedades: densidad y fluidez. Existen varios tipos de formas de partículas de polvo, como pueden ser en aguja, nodulares, irregulares y esféricas entre otras. La forma más utilizada por su influencia en las propiedades comentadas antes es la esférica. La forma afecta directamente a la densidad del lecho de polvo en las tecnologías *PBF*, ya que un polvo con mayor densidad de apilamiento generará menores defectos como porosidades o contracciones. En el caso de las tecnologías *DED*, la densidad es menos importante, pero al ser un proceso con una alimentación de material constante, es necesario un cierto nivel de fluidez para evitar discontinuidades en la deposición del polvo. Por ello, el polvo esférico o de elevada esfericidad es el que mejor proporciona estas propiedades. Un tercer aspecto importante del polvo que afectará al diseño del componente a fabricar es la composición química. La composición de partida del polvo junto a la tecnología de conformado del objeto, marcarán la composición del componente final y sus propiedades. Para las aleaciones de titanio más utilizadas, existen estándares que definen los intervalos de composición del producto final para fabricación aditiva. En varios casos, el propio proceso genera modificaciones en la composición que necesitan ser compensadas. Algunos procesos pueden generar niveles altos de oxígeno o hidrógeno, o por ejemplo, en el caso de los procesos que trabajan en condiciones de vacío se puede generar una pérdida de aluminio en la aleación Ti6Al4V que deberá ser compensada con aluminio adicional.

La fluidez del polvo y la densidad, como se ha comentado anteriormente, dependen de la forma y el tamaño de la partícula. La forma del polvo y sus características superficiales marcarán la capacidad de la máquina para extender o aplicar el polvo de forma continua y homogénea. Para

los procesos *PBF* se requiere un polvo que recubra homogéneamente toda la superficie generando una capa homogénea y consistente; para los procesos basados en *DED* es importante que el polvo pueda ser depositado de forma constante y homogénea. Por ello, el polvo de mayor esfericidad y con menores defectos superficiales son los idóneos para su uso en fabricación aditiva. La densidad del polvo afectará al acabado interno del componente y a sus propiedades finales. Las partículas de polvo huecas pueden generar porosidades en la pieza o atrapamiento de gases. En este caso, las tecnologías de fabricación aditiva en base polvo metálico prefieren el uso de partículas esféricas llenas.

A parte de las propiedades físicas del polvo, la contaminación y humedad pueden ser muy dañinas para el proceso si no se toman ciertas precauciones durante el almacenamiento y la manipulación del material. La humedad puede causar defectos en la pieza final sobretodo porosidades, por ello es necesario almacenar el polvo en ambientes secos y si fuera necesario, aplicar tratamientos de secado antes de utilizar el polvo. La contaminación del polvo puede provocar impurezas en la pieza final, afectando a sus propiedades; es necesario que durante el almacenamiento y manipulación del polvo, ya sea en procedimientos previos o en la carga de la máquina, se tenga especial cuidado y unas condiciones de almacenamiento que eviten la posible contaminación del polvo con partículas no deseadas.

Al margen de las propiedades antes comentadas, para los procesos de lecho de polvo, *PBF*, entra en acción el reciclado de polvo. Las tecnologías *PBF* funcionan solidificando selectivamente una región en una superficie de polvo, esto provoca que de toda la superficie de trabajo solo una zona concreta se utilice para el producto final, generando polvo sobrante que es susceptible de ser utilizado. El polvo sobrante es, generalmente, reutilizable, una de las ventajas de la fabricación aditiva frente a otras tecnologías de producción. Esta reutilización es limitada, ya que aunque se manipule y utilice el polvo de manera adecuada, evitando humedad y contaminación, es inevitable que parte del polvo, sobretodo la más cercana a la parte fundida, esté afectada térmicamente; la reutilización del polvo también produce desgaste de la superficie de la partícula y deformación al arrastrar el polvo para depositar una nueva capa y el apilamiento del polvo durante el proceso. Estudios sobre la reciclabilidad del polvo han constatado ciertos cambios que se producen tras la reutilización del mismo polvo repetidas veces. Se producen cambios morfológicos, el polvo pierde esfericidad y acabado superficial tras cada proceso, esto afecta a la fluidez y la capacidad de apilamiento de los procesos posteriores. A los cambios morfológicos se le unen también cambios químicos, sobre todo en las zonas más afectadas térmicamente. Para la aleación Ti6Al4V en la tecnología de fusión por haz de electrones, *EBM*, se obtienen pérdidas significativas de aluminio tras varios ciclos. El oxígeno se ve afectado sobre

todo por la exposición al aire durante las sucesivas cargas y descargas, habiendo aumentado de 0,07% a 0,18% tras 21 repeticiones en uno de los estudios [25].

Los procesos convencionales de producción de polvo de titanio que están establecidos y utilizados comercialmente son el proceso de electrodo de plasma rotatorio (*PREP Plasma Rotating Electrode Process*), atomización por gas (*GA Gas Atomization*), atomización por plasma (*PA Plasma Atomization*), esferoidización por plasma (*IPS Induction Plasma Spheroidization*), inducción electródica de fundición por atomización con gas (*EIGA Electrode Induction Melting-Gas Atomization*). Para obtener polvo a bajo coste de forma irregular existe el proceso de hidruración-dehidruración (*HDH hydride-Dehydride*).

El proceso *PREP*, Figura 23, consiste en aplicar un haz de plasma de helio generado con un electrodo de tungsteno sobre un extremo de una barra de titanio que gira a alta velocidad, de esa manera se funde la parte central de la barra y las gotas de metal fundido salen despedidas debido a la rotación de la barra. El tamaño de polvo depende de la aleación que se funde, para el Ti6Al4V este proceso crea polvo esférico con tamaño de partícula entre 0 y 100 μm .

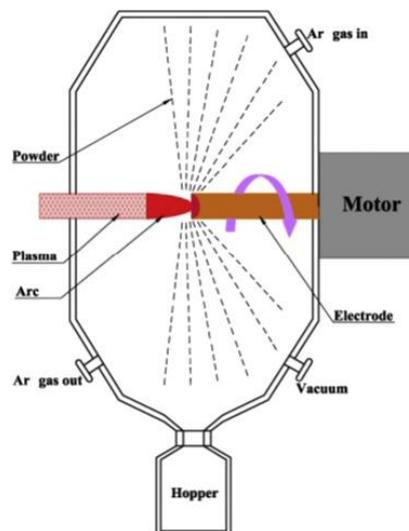


Figura 23: Esquema del proceso PREP.

La atomización por gas forma polvo metálico a partir de metal fundido. Se funde el metal en un crisol en atmosfera inerte y mediante una boquilla calentada se cuela por la parte inferior del crisol, tras salir de la boquilla, se proyecta argón a alta presión sobre el flujo de metal que dispersa el metal en gotas.

Para aleaciones de titanio, la *GA*, esquematizada en la Figura 24, puede producir polvo esférico con tamaños entre 0 y 500 μm con menor desviación para tamaños bajos. El proceso de atomización por plasma aplica plasma, Figura 25, a una alimentación continua de hilo de titanio,

fundiendo el material y dispersando el líquido en forma de gotas. El polvo de titanio obtenido por este método tiene 45 μm de tamaño medio y una distribución de tamaños estrecha.

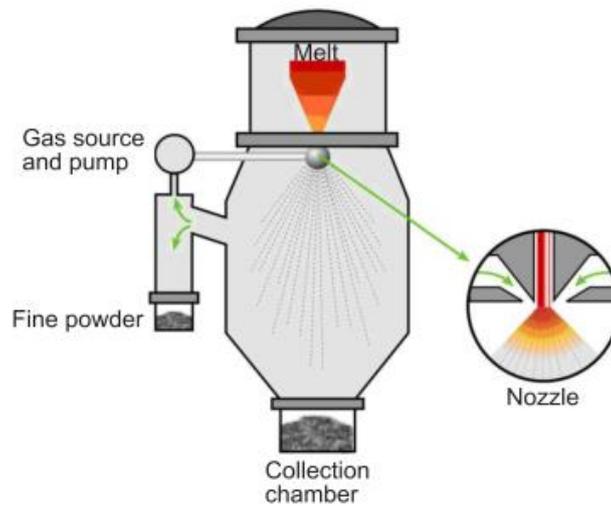


Figura 24: Esquema del proceso de atomización por gas.

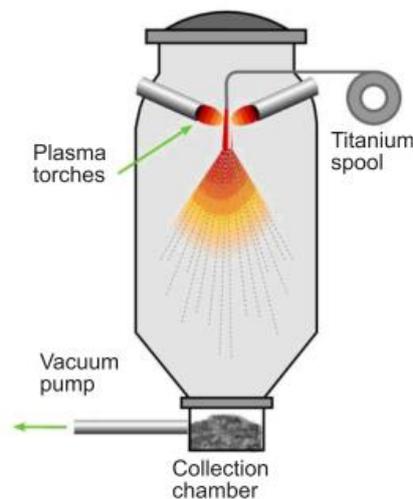


Figura 25: Esquema del proceso de atomización por plasma.

El proceso *EIGA*, al igual que el *PREP*, parte de una barra de material giratoria, esta barra se introduce en una bobina cónica y se calienta por inducción. Al fundir, el líquido cae a través de la bobina y al final de esta, se atomiza mediante argón a alta presión. Como en otros procesos, el tamaño del polvo dependerá de la aleación, la velocidad de rotación y el diámetro de partida de la barra. En la Figura 26, se esquematiza la zona de trabajo del proceso *EIGA*. Para un caso típico para aleaciones de titanio, partiendo de una barra de 45mm de diámetro, se obtiene polvo esférico con tamaños de partícula entre 0 y 500 μm , con un diámetro media de partícula de 50 μm .

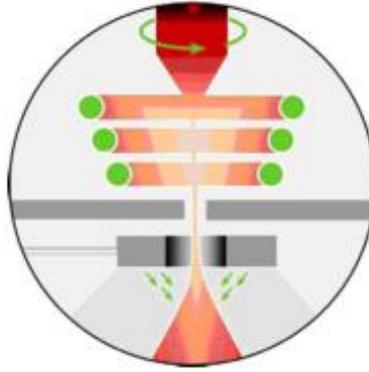


Figura 26: Esquema del proceso EIGA.

La esferoidización por plasma parte de polvo irregular; sobre un flujo de polvo irregular, se aplica plasma de inducción que funde cada partícula individualmente. El líquido resultante adquiere forma de gota, que al solidificar genera una partícula de polvo esférica. La Figura 27 es una comparativa entre el polvo ante y después del proceso *IPS*.

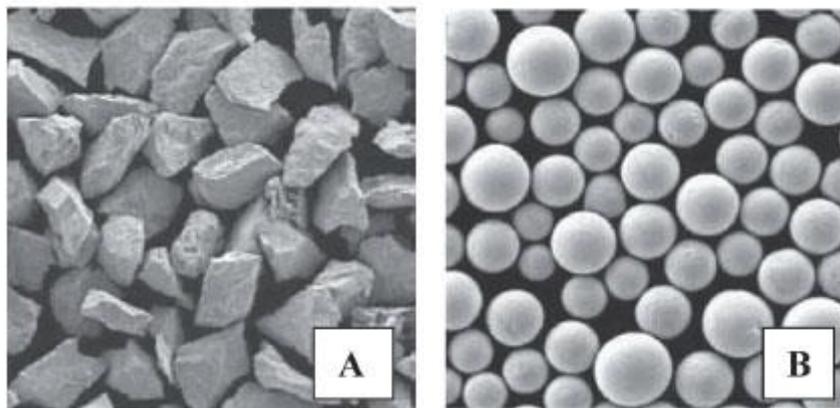


Figura 27: Imágenes de microscopio de polvo. El polvo A antes del proceso *IPS* y el polvo B después del proceso.

Algunos procesos basados en *DED* parten de titanio en forma de hilo. Estos procesos son el *SMD*, *WAAM* y *DM*. Los tres procesos parten de hilo de titanio estandarizado según una norma de la Sociedad Americana de Soldadura (*AWS American Welding Association*). El hilo para *SMD* y *WAAM* tiene un tamaño aproximado de 1,2 mm y el utilizado con el método *DM* tiene un tamaño que oscila entre 0,9 y 4 mm.

La hidruración-deshidruración es un proceso que a diferencia de los anteriores no lleva el metal al estado fundido. En su lugar se encarga de romper y moler trozos de metal hasta producir partículas finas de polvo. Debido a la naturaleza frágil de ciertos metales bajo alguna condición, como el caso del titanio en presencia de hidrogeno. Al exponer titanio a una atmosfera de hidrogeno y calentar, se forman hidruros que aumentan la fragilidad del material y facilitan la molienda. Una vez obtenido el polvo, se somete a un proceso de deshidruración. El polvo

producido con el método *HDH* tiene forma irregular, y puede ser utilizado en las tecnologías de fabricación aditiva que lo requieran o como material base para procesos de atomización, como el *IPS*. [26–29]

5.3. Tecnologías de procesado de titanio

Las diferentes tecnologías mencionadas en apartados anteriores, que son el resultado del esfuerzo de la *ASTM* por normalizar y agrupar los procesos y la nomenclatura existentes para la fabricación aditiva, son siete: Inyección de aglomerante (*binder jetting*), extrusión de material (*material extrusion*), inyección de material (*material jetting*), fusión de lecho de polvo (*PBF powder bed fusion*), deposición directa de energía (*DED directed energy deposition*), fotopolimerización (*vat photopolimerization*) y laminación de hojas (sheet lamination). De estas siete, solo las cuatro siguientes trabajan con metales: *PBF*, *DED*, inyección de aglomerante y laminación de hojas. De estas cuatro solo se utilizan tres de forma comercial para producir componentes de titanio y sus aleaciones: *PBF*, *DED* y laminación de hojas.

Dentro de las tecnologías *PBF*, los procesos basados en lecho de polvo más utilizados junto con sus empresas desarrolladoras son:

- *DMLS Direct metal laser sintering* de la empresa *EOS GmbH* [30]
- *SLS Selective laser sintering* de la empresa *3D Systems Corp.* [31]
- *LaserCUSING* de la empresa *Concept Laser GmbH* [32]
- *LM Laser melting* de la empresa *Renishaw Inc.* [33]
- *SLM Selective laser melting* de la empresa *SLM Solutions* [34]
- *EBM Electron beam melting* de la empresa *Arcam AB* [35]

Los procesos de deposición de material, *DED*, más comunes son:

- *LENS Laser engineered net shaping* de la empresa *Optomec Inc.* [36]
- *DM Direct manufacturing* de la empresa *Sciaky Inc.* [37]
- *DMD Direct metal deposition* de la empresa *DM3D technology* [38]

Los procesos de laminación de hojas para titanio son menos comunes y su tecnología más común es:

- *Ultrasonic Consolidation* de la empresa *Fabrisonic* [39]

5.4. Propiedades

Las propiedades mecánicas de las piezas de titanio producidas por distintas tecnologías de fabricación aditiva han sido estudiadas a lo largo de los años con el objetivo de obtener una

comparación con las piezas fabricadas de forma convencional. Los estudios se han centrado sobre todo en la aleación principal de titanio, Ti6Al4V. Generalmente, las piezas fabricadas por alguna de las distintas tecnologías aditivas, como *DMD*, *LENS*, *EBM* y *DMLS* tienen mayor tensión máxima y menor ductilidad que las piezas fabricadas y tratadas por medios convencionales: fundición, forja, tratamiento térmico etc. La Figura 28 compara las propiedades mecánicas de varias tecnologías de fabricación aditiva con los procesos tradicionales. La ductilidad de las piezas fabricadas de forma aditiva se puede mejorar aplicando tratamientos posteriores como presión isostática en caliente (*HIP Hot Isostatic Pressing*) o tratamiento térmico. En otras aleaciones de titanio, aunque los estudios han sido menos numerosos, se observa un comportamiento similar. En cuanto a la fatiga, los estudios concluyen que el acabado superficial es muy influyente en la vida a fatiga de los componentes aditivos.

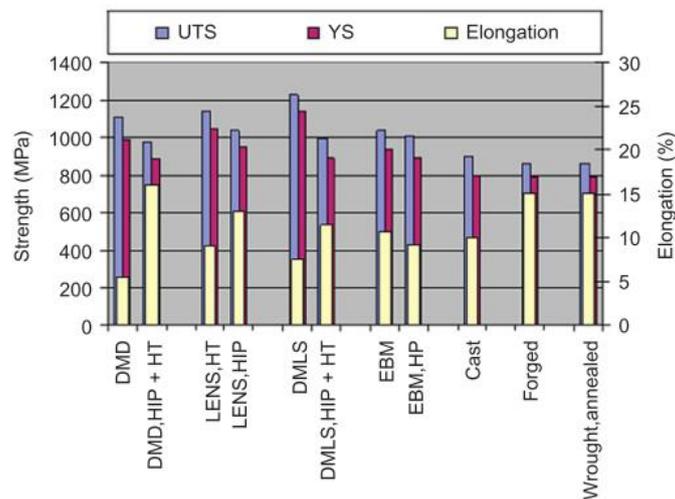


Figura 28: Grafico comparativo de tecnologías aditivas contra tradicionales. HT (Heat Treatment).

Se ha observado que la vida a fatiga de las piezas convencionales es similar a la de las fabricadas aditivamente, pero con un mecanizado superficial posterior para cumplir la normativa de ensayos a fatiga. Los ensayos sobre muestras no mecanizadas tras su impresión tienen una vida a fatiga notablemente menor.

El titanio es un tipo de metal que tiene un comportamiento alotrópico durante el enfriamiento, tiene dos fases en el estado sólido, *BCC* (β) y *HCP* (α), que se transforman durante los intercambios de calor del proceso de fabricación aditiva. Por ese motivo, la microestructura de un componente de fabricación aditiva de titanio es compleja. La microestructura del titanio, concretamente de su aleación principal, Ti6Al4V, bajo procesado por láser se caracteriza por un crecimiento epitaxial o columnar bajo las condiciones de calor localizado de la fabricación aditiva. Los granos columnares de fase β se orientan de forma perpendicular a la superficie de

trabajo, siguiendo la dirección de solapamiento de capas. En los procesos con haz de electrones como fuente de energía, debido a la mayor temperatura del sustrato y la menor capacidad de evacuación de temperatura de una atmósfera al vacío, se genera una estructura α - β . Muchos componentes requieren de tratamientos térmicos posteriores para homogeneizar propiedades o aliviar tensiones internas.

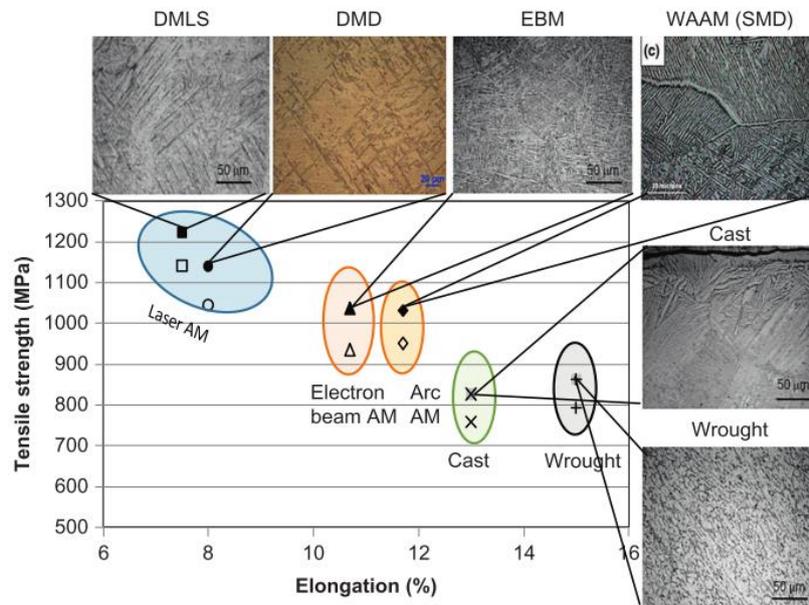


Figura 29: Comparativa entre microestructuras de cada proceso y su efecto sobre las propiedades mecánicas.

Estas microestructuras marcan las propiedades del componente; comparativamente, debido a la formación de fase metaestable α' -martensita en el enfriamiento rápido de los procesos con láser, el componente tiene mayor resistencia y menor elongación. En cambio, para los de haz de electrones, su estructura producida por enfriamiento lento exhibe menor resistencia pero una ductilidad significativamente mayor. La Figura 29 compara las distintas microestructuras según los procesos y muestra la relación de estas con las propiedades mecánicas de la pieza. [40–43]

5.5. Aplicaciones

El procesamiento de titanio mediante fabricación aditiva ha supuesto un empuje significativo en, por una parte, la utilización del titanio de forma industrial y, por otra, en la aplicación de tecnologías aditivas en la fabricación de componentes. Las mejores propiedades específicas del titanio frente de metales convencionales como el acero, unidas a la capacidad de generar geometrías complejas que reduzcan el peso de un componente optimizando las propiedades mecánicas, han hecho que la industria aeroespacial sea una de las principales consumidoras de titanio y de las principales impulsoras del uso de la fabricación aditiva sobre este metal. La otra industria

que se beneficia de la fabricación aditiva del titanio es la médica; a las ventajas que supone esta tecnología sobre la industria aeroespacial se le unen la biocompatibilidad del material y la capacidad de generar piezas 100% personalizables. Existen más industrias donde hay interés por el titanio en fabricación aditiva, en menor grado que las otras dos mencionadas; la industria química es una de ellas.

Uno de los principales focos de desarrollo e investigación de la industria aeroespacial es la reducción de peso de las aeronaves con el objetivo de aumentar el rendimiento económico al reducir el consumo de materiales y coste de proceso durante la fabricación y reducir el consumo de combustible y alargar el tiempo de servicio durante el uso de la aeronave. Por ello, se han centrado los estudios en la sustitución de componentes clásicos por otros rediseñados para titanio y adaptados a las posibilidades de la fabricación aditiva.

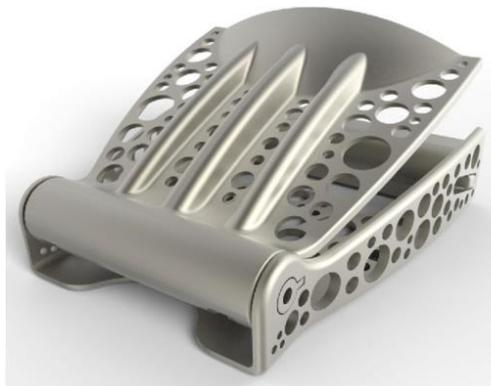


Figura 30: Sujeción de cinturón de seguridad de una aeronave fabricado por fabricación aditiva.

En un inicio, la sustitución por nuevos componentes se realizaba en estructuras pequeñas, como partes de la bancada y sujeción de los motores, más adelante, el objetivo es hacer extensivo este trabajo a partes más exigentes como los alabes de las turbinas e incluso a partes estructurales. Uno de los conceptos que juega un papel determinante es la relación entre el peso de material inicial y el peso del componente final de la aeronave; este concepto se conoce como *buy-to-fly*. Algunos componentes importantes de la industria aeroespacial trabajan con relaciones de 10:1 y 20:1, es decir por cada 10 o 20 kg de material base, se obtiene 1 kg de componente. El objetivo es reducir notablemente el ratio para esos componentes y se estima, según las posibilidades de la fabricación aditiva, que esta relación podría ser cercana al 1:1. Esta reducción de consumo de material iría también ligada a una reducción de tiempo de fabricación y mecanizado sobre todo si se consigue hacer extensiva a grandes componentes.



Figura 31: Comparativa entre una bisagra de puerta de una aeronave y su rediseño optimizado fabricado de forma aditiva.

Las tecnologías basadas en *PBF* están indicadas para la construcción de componentes de menor tamaño con geometrías complejas que permitan optimizar las propiedades frente a la reducción de peso. En la Figura 31 se muestra una bisagra de una puerta de una aeronave rediseñada respecto a la pieza original. Se puede comprobar la nueva geometría, con menos material y mucho más costosa de fabricar por métodos tradicionales. Las tecnologías *DED* permitirían el salto a la fabricación de los mayores componentes, aunque actualmente, su mayor influencia en el sector aeroespacial es su capacidad de trabajar sobre piezas ya construidas, resultando idóneas para la reparación de componentes enfrente de la soldadura tradicional.

La inclusión del titanio en la industria médica se debe a que es un material biológicamente inerte, haciéndolo compatible con los tejidos del cuerpo humano.

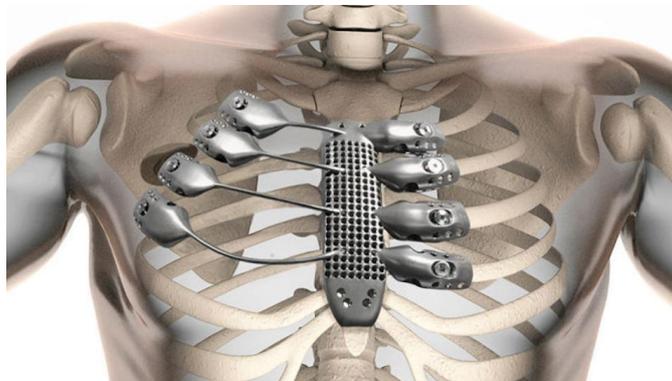


Figura 32: Implante torácico creado por fabricación aditiva.

Esta capacidad, unido a las ventajas de la fabricación aditiva ha producido un crecimiento notable en su utilización como implantes ortopédicos. Las tecnologías de fabricación aditiva, en este caso, sobre todo, las basadas en lecho de polvo, permiten la construcción de geometrías complejas con partes curvas, huecos, taladros, etc. Junto a las herramientas de diseño, permiten obtener modelos adaptados completamente a las necesidades de un paciente. En los últimos años, se han producido exitosas operaciones quirúrgicas de importancia donde la fabricación aditiva de titanio ha jugado un papel vital. Un paciente español, en 2015, enfermo de un cáncer

que obligó a extirpar parte de la caja torácica [44]. Se muestra en la Figura 32. Esta fue reconstruida en titanio mediante impresión 3D e implantada con éxito. En Eslovaquia, la empresa *CEIT Biomedical Engineering*, consiguió mediante escaneado e impresión 3D en titanio, reproducir un implante craneal, como se ve en la Figura 33, concretamente maxilofacial, para un paciente con un 36% del cráneo afectado tras un accidente; la implantación fue exitosa [45].

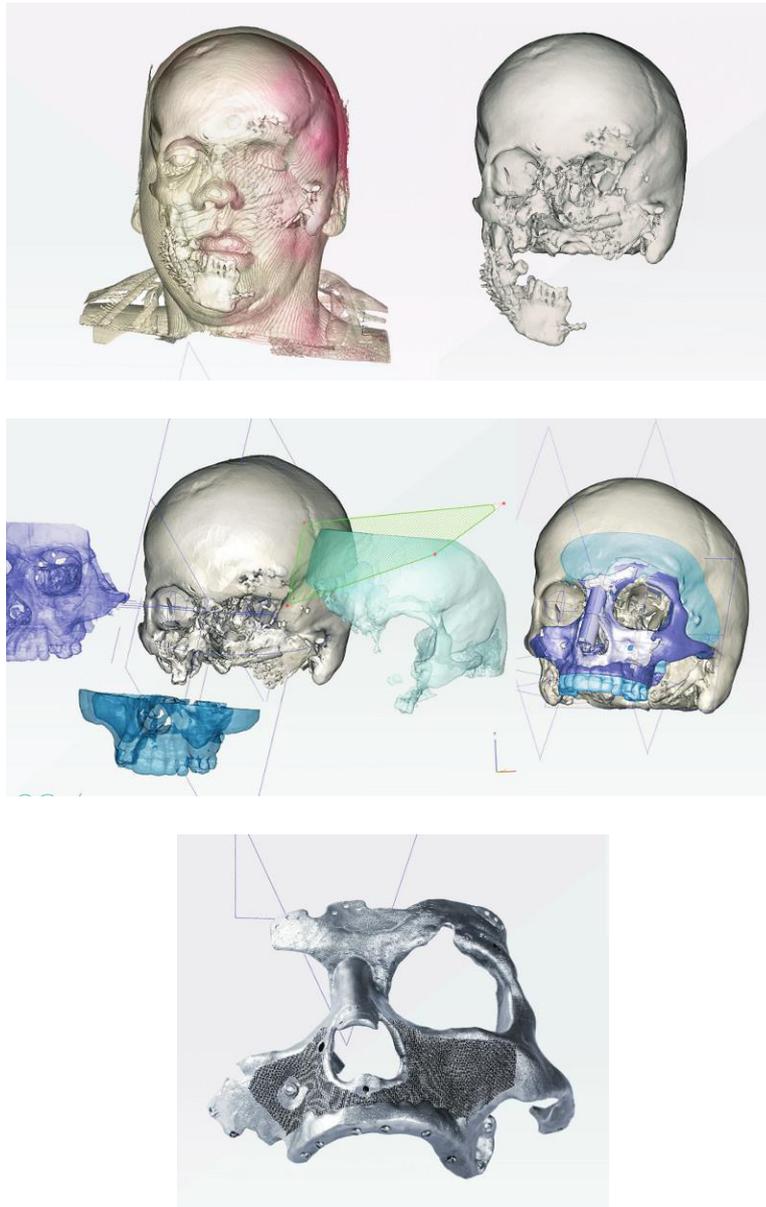


Figura 33: Estudio de desarrollo de un implante craneo-facial y la pieza final.

Es evidente la importancia de la aplicación de la fabricación en la ciencia médica, ya que permite superar los límites existentes antiguamente.

5.6. Impacto

Para analizar el impacto económico de la fabricación aditiva, generando una comparación entre tecnologías es necesario analizar los costes de esta. Estos costes se pueden dividir en dos grupos, los más evidentes y directos, como el coste de material, de procesado, de postproceso, etc. El otro grupo son los costes indirectos, que ganan peso al analizar toda una cadena de producción y el encaje de la fabricación aditiva en ella. Estos costes están relacionados con todo el proceso, desde la obtención del material hasta la entrega a cliente. En este segundo grupo de costes, la fabricación aditiva puede aumentar el grado de optimización de forma significativa.

Uno de los factores que siempre se tiene en cuenta a la hora de determinar el coste de un producto, es el coste del material base. Aunque este coste no es el que más influye en el precio final de un componente, donde el coste de producción acostumbra a ser el de más peso; resulta de importancia hacer un análisis entre las diferencias de costes de materiales para producción tradicional y fabricación aditiva. En el campo de los metales, el coste de del material base para fabricación aditiva es significativamente superior al de las técnicas de fabricación tradicionales. En 2011, un estudio comparó dos piezas fabricadas de forma tradicional y aditiva en aluminio, y el coste del material era aproximadamente diez veces mayor para la fabricación aditiva. Esta diferencia en el precio, se reduce a medida que se desarrolla la tecnología, ya que junto con la fabricación aditiva, crecen y se mejoran los procesos de obtención de material para dicha tecnología.

Otro factor importante que influye en el coste del producto, y que además es clave para la adaptación de la fabricación aditiva en las cadenas de producción, es la capacidad de la máquina; El tamaño máximo de la pieza a construir o el número de piezas posibles a construir en un ciclo influyen el coste del producto final. La eficiencia del proceso y por tanto el coste de procesado por cada producto dependerá de la capacidad de aprovechar el espacio de trabajo al máximo.

El tiempo de procesado de una pieza, representa el tiempo que se necesita desde la primera carga de material hasta la obtención del componente terminado, este tiempo representa un coste importante y está ligado a la capacidad de la maquina comentada anteriormente. El coste asociado al tiempo de proceso viene determinado por varios factores, por tanto, dependerá fuertemente de cada caso en particular. La calidad del producto, es decir, el grosor de capa que se va a utilizar para generar el objeto dependerá de los requerimientos de diseño. A mayor grosor de capa, menor tiempo de proceso y pero acabado superficial. La máquina y el material utilizado marcarán el tiempo de proceso necesario y por tanto parte del coste de proceso.

El factor que más peso supone a la hora de cotizar el producto final es el coste de la máquina. Las máquinas industriales de fabricación aditiva tienen un coste elevado, que aunque va disminuyendo durante el transcurso de los años, aun influye entre el 45-75% del precio del producto final, sobre todo para el procesado de metales.

El consumo de energía es un coste fuertemente asociado al tiempo de producción y a la capacidad de la máquina. Relacionado con los dos aspectos anteriores está el posicionamiento de la pieza; este factor es clave a la hora de conseguir una reducción del consumo de energía. Comparando diferentes posicionamientos de la pieza en varias máquinas distintas se obtenían aumentos de consumo entre el 75% y el 160%. Finalmente, un factor directo en el coste del componente, que se estima que influye entre un 2 y un 3% del precio final, es el coste de trabajo. Este coste incluye la extracción de la pieza terminada y su limpieza y los procesos de carga de material base.

Entre los costes indirectos, encontramos el inventario y transporte durante la producción. El inventario supone un coste añadido de producción de material y trabajo de almacenamiento que consume tiempo y espacio físico; en ese aspecto, la fabricación aditiva con su capacidad de trabajar piezas de forma unitaria, puede trabajar bajo demanda, reduciendo notablemente la necesidad de inventarios y sus costes asociados. El coste de transporte durante la producción aparece cuando es necesario producir un componente mediante ensamblaje de varias partes. Con la tecnología convencional, muchas veces es necesario el transporte y almacenaje de varias partes para ensamblarlas posteriormente. La fabricación aditiva presenta evidentes ventajas en ese aspecto, ya que permite producir diferentes partes en un solo proceso e incluso producir partes ya ensambladas.

El verdadero impacto de la fabricación se da en las ventajas que aporta a las aplicaciones a las que va destinada. Los costes, aunque abren debate sobre si las tecnologías aditivas presentan una ventaja o no en frente de las técnicas convencionales, son transitorios y van ligados al desarrollo de los procesos aditivos. Por ejemplo el mayor coste en el material base respecto a la materia prima para procesos convencionales se reduce a medida que aumenta el uso de la tecnología. Lo mismo sucede con el coste de las máquinas de impresión, a medida que se investiga y aplica la tecnología, las máquinas bajan de precio y un ejemplo claro es en el campo de la impresión de polímeros, donde actualmente existen impresoras de uso doméstico por debajo de los 600€. La capacidad de generar componentes con diseños innovadores que optimicen las propiedades y reduzcan peso y/o volumen; también la capacidad de personalizar cualquier diseño o de obtener productos con más de un material. Todo eso es lo que da valor añadido al uso de la fabricación aditiva. La posibilidad de generar un objeto prescindiendo de

herramientas y su coste y mantenimiento asociados. La posibilidad de producir tiradas cortas de productos sin que caiga el rendimiento del proceso también es un factor importante aunque pone de manifiesto su desventaja en frente de las líneas de producción tradicionales para largas tiradas de productos como muestra la Figura 34, que compara la tecnología de sinterizado directo de metal por láser, *DMLS*, y el proceso de inyección a alta presión (*HPDC High Pressure Die Casting*). Se puede observar como a bajas unidades de producción, la fabricación aditiva es mucho más rentable, pero a partir de un cierto número de unidades, la técnica tradicional, *HPDC*, es más económica.

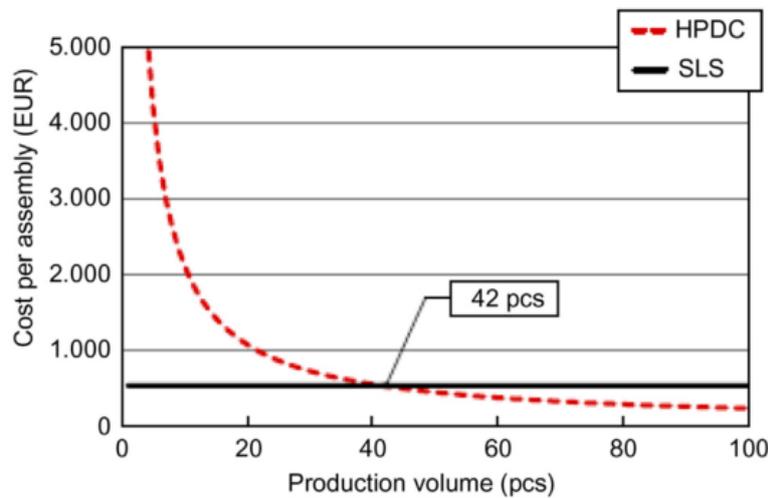


Figura 34: Comparativa de coste de producción entre SLS y HPDC. [46]

Si se analiza la sostenibilidad de los procesos de fabricación aditiva, en el campo ambiental se producen mejoras en el ahorro de consumo de material y energía, así como en la producción de residuos. Además, al facilitar la optimización del producto de cara a su aplicación, esta mejora en la sostenibilidad se extiende al uso del producto, como en el ejemplo de la industria aeroespacial, donde el producto fabricado de forma aditiva no solo ha ahorrado material y energía en su construcción sino que optimizara el tiempo de servicio del componente y reducirá el consumo de combustible de la aeronave. También tiene efecto sobre la vida humana, donde la fabricación aditiva juega un papel importante en la mejora de la calidad de los productos de consumo y sobre todo, debido a su aplicación en la industria médica, una mejora muy significativa en la salud. Los implantes obtenidos por fabricación aditiva, totalmente personalizados a los requerimientos del paciente han aumentado la calidad de las operaciones y el bienestar de las personas. [47–51]

5.6.1. Impacto ambiental

Como se ha puntualizado anteriormente, son muchos los factores que afectan al impacto, tanto social, económico como ambiental; Cada proceso en particular presenta diferencias respecto a otro, obligando a un estudio en particular de cada tecnología para determinar su impacto económico durante su aplicación. Lo que sí se puede analizar, y que entra en relación con el foco de estudio del presente proyecto, es su impacto en relación con las tecnologías tradicionales, las potencialmente sustituibles por la fabricación aditiva. A lo largo de los años, el análisis de impacto ambiental ha despertado el interés de los investigadores, sobre todo para obtener una comparación con las tecnologías de fabricación convencionales y estudiar la viabilidad de una posible adaptación de la industria a la fabricación activa. Un estudio para conocer las posibilidades de la fabricación aditiva sobre la reducción del consumo energético durante la fabricación, definió cinco factores que afectan de forma positiva al impacto ambiental de la aplicación de las tecnologías aditivas [52]. Estos factores son: la optimización del diseño, el proceso de fabricación, la funcionalidad en servicio del componente, la utilización del material y la cadena de servicio.

La optimización del diseño, como se ha remarcado a lo largo del documento, permite la generación de geometrías de alta complejidad sin comprometer el proceso de fabricación. Este aspecto permite la reducción de material, energía y otros recursos enfrente de la fabricación del mismo objeto mediante tecnologías convencionales.

Las ventajas sobre el proceso de fabricación se basan en la sustitución de procesos de alto consumo de energía como la fundición por procesos de consumo menor, mediante láser. También se reduce el uso de ciertos materiales y utillajes durante la fabricación.

La posibilidad de optimizar diseños, de añadir complementos a piezas ya fabricadas o de utilizar la fabricación aditiva para reparar componentes dañados supone una mejora significativa en la vida útil del producto. Un producto que ofrece prestaciones optimizadas a la aplicación para la que ha sido diseñado junto con una mayor vida en servicio reducen notablemente los consumos de materiales y energía.

El consumo de material esta optimizado para aprovechar al máximo su cantidad y propiedades, los procesos aditivos, especialmente los de base polvo, permiten la reutilización del polvo sobrante, minimizando el desperdicio de material.

Una de las ventajas más importantes sobre el impacto ambiental de la fabricación aditiva se presenta sobre la cadena de distribución de materiales y productos. La capacidad de producir de forma unitaria, por tanto, permitiendo la fabricación bajo demanda y la facilidad de acercar las máquinas cerca del área de los clientes, reduce la necesidad de almacenamiento, transportes

de larga distancia, trabajos logísticos, etc. Reduciendo en consecuencia el impacto ambiental, disminuyendo el uso de edificaciones, energía y emisiones.

Actualmente, en pleno desarrollo de las tecnologías aditivas junto con las ramas que derivan de ella o que son un paso previo a la fabricación, como la producción de material base para fabricación aditiva, existen varios estudios que pretenden cuantificar el impacto ambiental de la fabricación aditiva. Los más comunes son los que se basan en el consumo de energía y de material, por separado o a la vez. Un estudio que propone una comparativa entre una tecnología aditiva y su contraparte convencional [53]. En este estudio se utilizó una pieza fabricada con las dos tecnologías para determinar el impacto ambiental que producen. Como se ve en la Figura 35 la tecnología aditiva reduce el impacto ambiental un 75% respecto al impacto de la fabricación de la pieza por mecanizado.

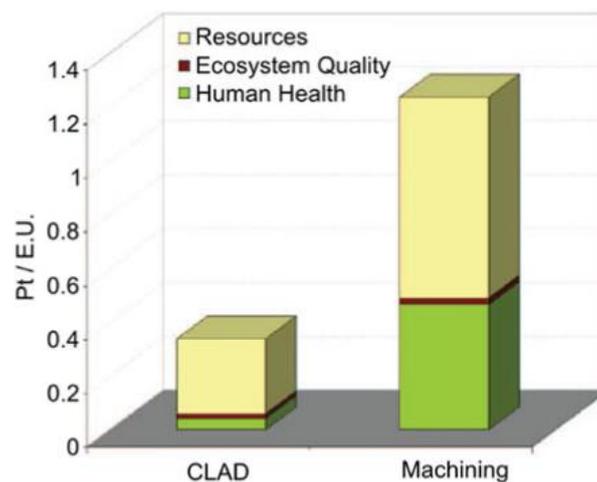


Figura 35: Comparativa de impacto ambiental entre una tecnología aditiva, Cladding y una convencional, mecanizado.

En el estudio solo se trató el impacto de producción de una sola pieza y aunque los datos son reveladores, no se deberían extrapolar al global de la adaptación de la fabricación aditiva en una línea de producción, donde otros aspectos centrados en la cadena de producción deben ser considerados y podrían modificar la diferencia entre las tecnologías.

El ahorro de material es uno de los estándares de la fabricación aditiva a la hora de presentar ventajas frente a las tecnologías convencionales. Aunque a simple vista resulta evidente que el consumo de materia prima es menor, ocurre el mismo caso que para el consumo de energía, en un análisis centrado en la relación impacto/unidad de producto. Si se analiza el proceso al completo y su inserción en una cadena de producción, entran en juego más factores que pueden modificar las conclusiones tomadas a partir del análisis de una sola pieza. Dentro del consumo de material y su potencial ahorro, es necesario determinar la importancia de dicho ahorro para

cada tipo de proceso y su carga de trabajo, además se debe tener en cuenta el paso de producción del material base, con sus respectivos consumos. También influye el consumo de recursos secundarios necesarios para fabricación aditiva de ciertos materiales como puede ser el metal; materiales como refrigerantes, gases para atmosfera inerte también deben ser foco de estudio para obtener el verdadero impacto ambiental de un proceso de fabricación aditiva. Los trabajos que han llegado más lejos en el desarrollo de un modelo para caracterizar el impacto ambiental de un proceso de fabricación aditiva incluyen factores como el acabado superficial y la arquitectura de la máquina a los mencionados anteriormente y crean una interrelación entre ellos que permite determinar con mayor exactitud el verdadero impacto de cada proceso.

Aunque el estudio del impacto ambiental sea inherente a cada proceso y por tanto, su determinación y comparación exija estudios particulares para cada caso, se puede concluir que sus ventajas frente a la fabricación convencional son notables a nivel impacto/producto y las posibilidades de optimización y adaptación que permite la fabricación aditiva pueden provocar ventajas significativas también a nivel de proceso industrial. [54–56]

6. Presupuesto

Para la elaboración del presupuesto, recogido en la Tabla 2 se tendrán en cuenta los factores humanos, en tiempo y coste económico del personal, también los gastos de material inventariable y los gastos asociados a la realización física del proyecto para su entrega. Al ser un proyecto de revisión bibliográfica, quedan al margen los gastos asociados al consumo eléctrico y uso de equipamientos informáticos para su desarrollo.

Los recursos humanos utilizados han sido los de un ingeniero, considerado junior, durante 2 meses a jornada laboral completa. El sueldo medio de un ingeniero junior a jornada completa se estima en 1400 €brutos/mes.

Los datos inventariables son la bibliografía asociada al proyecto, toda la bibliografía asociada al proyecto se ha obtenido a partir de fuentes accesibles sin coste, como la biblioteca de la Univeritat Politècnica de Catalunya. Otras fuentes se hallan de forma libre en la red y algunas han sido cedidas por terceras partes, de tal manera que no se puede asociar un coste real al material bibliográfico. De todas formas, se añadirá una cotización sobre la bibliografía considerando que no se ha podido obtener de forma abierta y que por tanto se deben obtener mediante intercambio económico (Tabla 3). Se calcula que 27 artículos, utilizados finalmente o no, se deberían haber obtenido mediante pago, estos artículos están valorados con una media de 36,65 €/artículo.

Los recursos consumibles utilizados para la realización física del proyecto corresponden a los gastos de impresión, encuadernación y preparación de los soportes digitales.

Tabla 2: Presupuestos reales del proyecto

Presupuesto	Tipo	Cantidad	Precio	Coste
Recursos humanos	Ingeniero Junior	2 meses	1400,00€/mes	2800,00€
Recursos inventariables	-	-	-	-
Recursos Consumibles	Impresión y encuadernación	2 unidades	27,82€/unidad	55,64€
	Soportes digitales	5 unidades	0,97€/unidad	4,85€
			TOTAL	2865,34€

Tabla 3: Presupuesto estimado del proyecto considerando compra de artículos bibliográficos

Presupuesto	Tipo	Cantidad	Precio	Coste
Recursos humanos	Ingeniero Junior	2 meses	1400,00€/mes	2800,00€
Recursos inventariables	Artículos bibliográficos	27 unidades	36,65€/unidad	989,55€
Recursos Consumibles	Impresión y encuadernación	2 unidades	27,82€/unidad	55,64€
	Soportes digitales	5 unidades	0,97€/unidad	4,85€
TOTAL				3854,89€

7. Conclusiones

A lo largo de la historia de la humanidad, grandes desarrollos, normalmente motivados por la necesidad, han hecho superar los límites conocidos hasta ese momento. Muchos de esos cambios, aunque ahora parezcan simples, provocaron un gran avance en la vida humana. Casos tan primarios como el fuego, la agricultura o la ganadería, o posteriores como la penicilina son ejemplos representativos de innovaciones que no solo mejoran lo ya existente, también generan un mundo de posibilidades de desarrollo hasta entonces inalcanzable. La fabricación aditiva tiene mucho en común, parte como solución a una necesidad y a medida que se investiga se descubren potenciales aplicaciones y mejoras que replantean los límites concebidos. La posibilidad de construir un sólido añadiendo material de forma localizada y precisa renueva la visión clásica de conformado de objetos y permite plantearse las nuevas posibilidades de diseño y optimización que ofrece. Las ventajas que aporta la fabricación aditiva, ventajas como optimización del material, geometrías complejas y personalizables, capacidad de trabajar sobre demanda, se hacen extensivas al resto de técnicas o industrias. La adaptación de una empresa a la fabricación a aditiva no solo implica mejoras en el proceso de producción, también abre puertas a nuevos horizontes de crecimiento y desarrollo. El caso del titanio es un buen ejemplo de lo anterior y además, gracias a la fabricación aditiva se superan las limitaciones existentes para ese material. De un material difícilmente procesable con procesos convencionales, que además estaban limitados por su propia naturaleza: utillajes, movimiento, etc.; se pasa a generar una porción de un cráneo humano totalmente personalizada y adaptable. Aunque ya hace décadas que se desarrolla la fabricación aditiva y su adaptación al mercado y la industria crece continuamente, quedan por resolver algunos factores. Uno de ellos, y posiblemente el principal es el encaje de esta tecnología a las líneas de producción continuas. Hasta ahora, las limitaciones de tamaño de algunas máquinas y su forma de trabajar discontinua han hecho que no se pueda encajar de forma eficiente en las líneas de producción convencionales, donde, para largas tiradas de productos es necesario un proceso que permita la producción continua de componentes. Quizás esa es la limitación de esta tecnología, o simplemente exige un replanteamiento del método de producción utilizado hasta ahora. Sea como sea, son muchos los frentes de investigación y desarrollo que ofrece la fabricación aditiva y que posiblemente abran nuevas posibilidades y salven ciertas limitaciones con las que aún hoy convivimos.

8. Bibliografía

- [1] ASTM International: F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. , 2013.
- [2] Julien Gardan: *Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends*, 2015, pp. 1–15.
- [3] Loughborough University. [Accessed: Aug. 12, 2017]
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>.
- [4] B. Dutta, S. Palaniswamy, et al.: *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition*, 2011, pp. 33–36.
- [5] R.J. Hebert: *Viewpoint: Metallurgical Aspects of Powder Bed Metal Additive Manufacturing*, Springer US, 2016, pp. 1165–75.
- [6] Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, et al.: *Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies*, The Chinese Society for Metals, 2012, pp. 1–14.
- [7] E Herderick: *Additive Manufacturing of Metals: A Review*, 2011, pp. 1413–25.
- [8] Edward D. Herderick: *Progress in Additive Manufacturing*, 2015, pp. 580–81.
- [9] Cătălina Cozmei and Florentin Caloian: *Additive Manufacturing Flickering at the Beginning of Existence*, 2012, pp. 457–62.
- [10] Terry Wohlers and Tim Gornet: *History of Additive Manufacturing*, 2014, pp. 1–34.
- [11] David L Di Bourell, Joseph Jb Beaman, et al.: *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*, 2009, pp. 2005–2005.
- [12] J. E. Blather: 473901. , *Manufacture of Contour Relief Maps*. , 1892.
- [13] Paul L. DiMatteo: US3932923. , *Method of Generating and Constructing Three-Dimensional Bodies*. , 1976.
- [14] Carlo Baese: US774549. , *Photographic Process for the Reproduction of Plastic Object*. , 1902.
- [15] F. H. Monteath: US1516199. , *Photomechanical Process for Producing Bas-Reliefs*. , 1924.
- [16] O.J. Munz: US2775758. , *Photo-Glyph Recording*. , 1956.
- [17] Ross F. Housholder: US4247508. , *Molding Process*. , 1981.
- [18] Charles W. Hull: US4575330. , *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. , 1986.
- [19] Michael Feygin, Alexandr Shkolnik, et al.: US5730817. , *Laminated Object Manufacturing System*. , 1997.
- [20] Carl R. Deckard: US4863538. , *Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering*. , 1989.
- [21] Emmanuel M. Sachs, John S. Haggerty, et al.: US5204055. , *Three-Dimensional Printing Techniques*. , 1993.
- [22] Royden C. Sanders Jr., John L. Forsyth, et al.: US5506607. , *3-D Model Maker*. , 1996.
- [23] Justin Scott and Project Leader: *Additive Manufacturing : Status and Opportunities*, 2012.

- [24] B Dutta and Francis H Froes: *The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys*, Elsevier Inc., 2015.
- [25] H. P. Tang, M. Qian, et al.: *Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting*, 2015, pp. 555–63.
- [26] FRIEDMAN GI: *Titanium Powder Metallurgy*, 1970.
- [27] By Jason Dawes and Robert Bowerman: *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain*, 2015, pp. 243–56.
- [28] G. Domizzi, M.I. Luppo, et al.: *Hidruración de Titanio Grado 2*, 2005.
- [29] M. Qian: *Metal Powder for Additive Manufacturing*, 2015, pp. 536–37.
- [30] EOS Electro Optical Systems: Industrial 3D Printing. [Accessed: Aug. 8, 2017] <https://www.eos.info/en>.
- [31] 3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services | 3D Systems. [Accessed: Aug. 5, 2017] <https://www.3dsystems.com/>.
- [32] Concept Laser - Metal 3D printers for parts. [Accessed: Aug. 5, 2017] <https://www.concept-laser.de/en/home.html>.
- [33] Renishaw: enhancing efficiency in manufacturing and healthcare. [Accessed: Sep. 1, 2017] <http://www.renishaw.com/en/1030.aspx>.
- [34] SLM Solutions. [Accessed: Sep. 2, 2017] <https://slm-solutions.com/>.
- [35] Arcam AB - Additive Manufacturing for Implants and Aerospace, EBM. [Accessed: Aug. 5, 2017] <http://www.arcam.com/>.
- [36] 3D Printing Electronics Laser Additive Manufacturing Systems. [Accessed: Sep. 5, 2017] <https://www.optomec.com/>.
- [37] Sciaky, Inc. | Industrial Metal 3D Printing | Arc + EB Welding. [Accessed: Sep. 1, 2017] <http://www.sciaky.com/>.
- [38] DMD3D Technology. [Accessed: Sep. 2, 2017] <http://www.pomgroup.com/>.
- [39] Fabrisonic | Sound 3D Printing Fabrisonic. [Accessed: Sep. 3, 2017] <https://fabrisonic.com/>.
- [40] Edson Santos, F. Abe, et al.: *MECHANICAL PROPERTIES OF PURE TITANIUM MODELS PROCESSED BY SELECTIVE LASER MELTING*, n.d., pp. 180–86.
- [41] B. Dutta and Francis H. Froes: *Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities*, 2016.
- [42] Corinne Charles Murgau: *Microstructure Model for Ti-6Al-4V used in Simulation of Additive Manufacturing*, 2016.
- [43] Srikanth Bontha, Nathan W. Klingbeil, et al.: *Effects of Process Variables and Size-Scale on Solidification Microstructure in Beam-Based Fabrication of Bulky 3D Structures*, 2009, pp. 311–18.

- [44] How Surgeons Implanted 3D-Printed Titanium Ribs In A Cancer Patient. [Accessed: Aug. 5, 2017]
<https://www.forbes.com/sites/amitchowdhry/2015/09/19/how-surgeons-implanted-3d-printed-titanium-ribs-in-a-cancer-patient/#348eedb52a9b>.
- [45] Facial restoration | CEIT. [Accessed: Aug. 5, 2017] <http://www.ceit-ke.sk/facial-restoration/>.
- [46] E. Atzeni and A. Salmi: *Economics of Additive Manufacturing for End-Usable Metal Parts*, 2012, pp. 1147–55.
- [47] Harsha Malshe, Hari Nagarajan, et al.: *Profile of Sustainability in Additive Manufacturing and*, 2016, pp. 1–11.
- [48] R. Sreenivasan, A. Goel, et al.: *Sustainability Issues in Laser-Based Additive Manufacturing*, Elsevier, 2010, pp. 81–90.
- [49] Stephen Mellor, Liang Hao, et al.: *Additive Manufacturing: A Framework for Implementation*, 2014, pp. 194–201.
- [50] Ian D Harris: *Development and Implementation of Metals Additive Manufacturing Current Landscape in Additive Manufacturing*, 2011, pp. 1–14.
- [51] Nourredine Boubekri and Meshari Alqahtani: *Economics of Additive Manufacturing*, 2015, pp. 7–9.
- [52] Liang Hao, D. Raymond, et al.: in *5th Int. Conf. Responsive Manuf. - Green Manuf. (ICRM 2010)*, IET, 2010, pp. 390–95.
- [53] Nicolas Serres, Dorian Tidua, et al.: *Environmental Comparison of MESO-CLAD® Process and Conventional Machining Implementing Life Cycle Assessment*, Elsevier, 2011, pp. 1117–24.
- [54] Karel Kellens, Wim Dewulf, et al.: *Environmental Analysis of SLM and SLS Manufacturing Processes*, 2010.
- [55] Aleksandra Drizo and Joseph Pegna: *Environmental Impacts of Rapid Prototyping: An Overview of Research to Date*, 2006, pp. 64–71.
- [56] Olivier Kerbrat, Florent Le Bourhis, et al.: *Environmental Impact Assessment Studies in Additive Manufacturing*, 2016, pp. 31–63.