

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Fabricación Aditiva en la Industria Aeronáutica

Autor: Daniel Medrán Cartán

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

**Departamento de Ingeniería
Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2014



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeronáutica

Fabricación Aditiva en la Industria Aeronáutica

Autor:

Daniel Medrán Cartán

Tutor:

Carpóforo Vallellano Martín

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer lo conseguido hasta ahora y lo que haré en el futuro a mi familia, especialmente a mis padres, Manuel y Francisca, y a mi abuela Antonia. Sin ellos estoy seguro de que no hubiera conseguido lo que hasta ahora he logrado. También a Elena en el importante tramo final de esta dura carrera y en lo que seguro va a hacer por mí de ahora en adelante (será recíproco).

Además, dar las gracias a mis amigos. Muchos de ellos son como de la familia por haber estado conmigo compartiendo todo nuestro tiempo e importantes momentos, y por las cualidades que me han demostrado.

Asimismo a todos mis profesores, especialmente a Don José Cecilia, Don Olegario, Eva, Aída y Juana, con los que he notado que tras los años he ido evolucionando y han sido la causa. También a Foro, mi tutor en este proyecto, por darme una parte de su gusto por la fabricación, por los consejos que me ha dado (hasta ahora muy valiosos y espero que siga habiendo) y por su ayuda a la hora de elaborar este proyecto.

Dar también las gracias a todas aquellas personas que me han ayudado a realizar este proyecto fin de carrera, Fernando Lasagni y José Manuel Martín-Márquez, que han estado siempre resolviéndome todas las dudas que me han surgido.

Por último, un agradecimiento especial a Laura, que me hizo aprobar cuando más lo necesitaba y me enseñó a estudiar una ingeniería de verdad.

Resumen

En este documento se realiza un estudio del estado del arte de la fabricación aditiva en el sector aeroespacial. En él se analizan varios puntos que tienen en común todas las industrias: su historia, ventajas e inconvenientes y el punto en el que se encuentra para su estandarización, además de las etapas y restricciones (para aplicaciones de alto nivel) que tienen todas las tecnologías de fabricación aditiva, comunes en todas ellas.

También, y enfocado al sector aeroespacial, se exponen los medios de fabricación 3D usados hoy en día y por qué, además de mostrarse algunos ejemplos de estos casos y referenciarlos a las empresas que actualmente los dominan y que en su catálogo web se puede ver lo que son capaces de hacer en esta industria.

Otros dos puntos clave en este sector son la forma de mejorar las características resultantes, medios por los cuales se consiguen unas propiedades muy similares en comparación con, por ejemplo, las aleaciones usadas; y los métodos de ensayo no destructivos que se están llevando a cabo para caracterizar las piezas de impresión 3D (análisis de la porosidad, defectos...).

Por último, se proporcionan datos de la capacidad que tiene esta tecnología en la aeronáutica obtenidos de empresas que investigan día a día la fabricación aditiva y su desarrollo, y se detallan ejemplos de su uso y las etapas explicadas antes reflejadas en un caso real en estudio.

Y para terminar se presenta una conclusión sobre lo expuesto en todo el texto y las intenciones futuras que se quieren aplicar a esta forma de fabricación para hacerla más segura y productiva.

Abstract

In this document there is an additive manufacturing's study of the state-of-art in the aerospace sector performed. Several points that are common to all industries are discussed: its history, advantages and disadvantages and its current standardization, and also the general steps and restrictions (for high-level applications) in additive manufacturing technologies (common to all of them).

Furthermore, and focused on the aerospace sector, all the manufacturing methods based on 3D printing will be shown so far and why they are used here. Some examples of these cases and their references to the currently companies that apply them are presented. In their websites there are catalogues with a huge amount of data and the goals that they can and expect to reach in this specific industry.

Two other key points discussed are how to improve the resulting properties getting similar characteristics compared with, for example, the alloys used; and the methods of non destructive testing being carried out to characterize the 3D printing parts (analysis of porosity, defects...).

In addition, a number of aerospace examples will be presented and the manufacturing steps mentioned before are described in detail in these real case of study.

Finally, some conclusions about the current stage and the future trend in the application of this technology and the way of making it safer and more productive are drawn.

Índice

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Índice	8
Índice de tablas	9
Índice de Ilustraciones	10
Notación	13
Prefacio	15
Contenido del proyecto	16
Capítulo 1. Introducción a la fabricación aditiva	17
1.1. Reseña histórica	19
1.2. Ventajas e inconvenientes	22
1.3. Punto actual donde se encuentra	28
Capítulo 2. Etapas del proceso de fabricación aditiva	47
Capítulo 3. Fundamentos de las técnicas	55
3.1. Clasificación y selección de la tecnología	55
3.2. Para la fabricación de piezas metálicas	57
3.2.1. Deposición directa de metal/Laser Engineered Net Shaping	58
3.2.2. Fundido selectivo por láser/sinterizado metálico directo por láser	59
3.2.3. Fundido por haz de electrones	61
3.3. Para la fabricación de plásticos	64
3.3.1. Estereolitografía	64
3.3.2. Modelado por deposición fundida	66
3.3.3. Sinterizado selectivo por láser	69
3.4. Otros métodos	70
3.4.1. Fabricación por superposición de capas (LOM)	70
3.4.2. Laser cladding	72
3.5. Fabricación híbrida	73
Capítulo 4. Restricciones en la fabricación	77
Capítulo 5. Formas de mejorar las características resultantes	81
Capítulo 6. Métodos de ensayo de las piezas producidas	83
Capítulo 7. Capacidades y aplicaciones aeronáuticas	89
Capítulo 8. Conclusiones. Tendencias futuras	99
Anexos (Anexo 1)	103
Bibliografía	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Tópicos generales y retos principales de ellos (cortesía SASAM).....	36
Tabla 2. Tópicos técnicos y retos principales de ellos (cortesía SASAM).....	38
Tabla 3. Clasificación de los métodos que se usan hoy en día en la industria aeronáutica (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space).....	56
Tabla 4. Procesos a complementar con la fabricación aditiva.....	74
Tabla 5. Propiedades mecánicas de aleaciones aeronáuticas (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space).....	89
Tabla 6. Propiedades mecánicas para la aleación Ti6Al4V (cortesía Ranishaw).....	90
Tabla 7. Datos del proceso de fabricación de las piezas de la ilustración 40 (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space y CATEC).....	97

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Filosofía de la impresión 3D</i>	18
<i>Ilustración 2. Campos votados para su estandarización urgente (cortesía SASAM)</i>	32
<i>Ilustración 3. Asuntos de primordial estandarización en metales (cortesía SASAM)</i>	33
<i>Ilustración 4. Asuntos de primordial estandarización en polímeros (cortesía SASAM)</i>	33
<i>Ilustración 5. Asuntos de primordial estandarización en cerámicos (cortesía SASAM)</i>	34
<i>Ilustración 6. Otros asuntos a estandarizar (cortesía SASAM)</i>	34
<i>Ilustración 7. Hoja de Ruta del proyecto SASAM para la estandarización de la FA (cortesía SASAM)</i>	35
<i>Ilustración 8. Guía de la estructura jerárquica de los estándares (cortesía SASAM)</i>	42
<i>Ilustración 9. Simplificación actual del Mercado de fabricación aditiva incluyendo el material usado (cortesía TWI)</i>	46
<i>Ilustración 10. Ciclo de diseño de los componentes</i>	49
<i>Ilustración 11. Mallado de una esfera de menor a mayor detalle según de izquierda a derecha, lo que implica de menor a mayor tamaño respectivamente del archivo STL</i>	50
<i>Ilustración 12. Fundamento DMD (cortesía VII Workshop tecnológico de operaciones, Airbus Defence & Space)</i>	58
<i>Ilustración 13. LENS (cortesía Optomec)</i>	59
<i>Ilustración 14. SLM (cortesía CustomPartNet)</i>	60
<i>Ilustración 15. Componentes de aeromotores (cortesía EOS GmbH)</i>	61
<i>Ilustración 16. Fundido por haz de electrones (cortesía Popular3DPrinters)</i>	62

<i>Ilustración 17. Álabe de turbina de baja presión (cortesía Avio Aero)</i>	63
<i>Ilustración 18. Ingenieros de la NASA probando el sistema EBM en un vuelo parabólico (cortesía NASA)</i>	64
<i>Ilustración 19. Estereolitografía (cortesía CustomPartNet)</i>	65
<i>Ilustración 20. FDM (cortesía CustomPartNet)</i>	67
<i>Ilustración 21. Interiores con FDM (cortesía de Stratasys)</i>	68
<i>Ilustración 22. Partes del rover fabricadas con FDM (cortesía NASA)</i>	68
<i>Ilustración 23. Componentes del sistema de ventilación con FDM (cortesía de Stratasys)</i>	68
<i>Ilustración 24. SLM (cortesía CustomPartNet)</i>	69
<i>Ilustración 25. LOM (cortesía CustomPartNet)</i>	71
<i>Ilustración 26. Laser cladding en la reparación de un turbocompresor (cortesía industrial-lasers.com)</i>	72
<i>Ilustración 27. Álabe de turbina reparándose con láser cladding (cortesía de industrial-lasers.com)</i>	73
<i>Ilustración 28. Láser Peening (cortesía de LSP Technologies)</i>	82
<i>Ilustración 29. Inspección del material con tomografía computarizada (cortesía de CATEC)</i>	84
<i>Ilustración 30. Placas obtenidas de la tomografía computarizada (cortesía de CATEC)</i>	84
<i>Ilustración 31. Imagen virtual resultado de la tomografía computarizada (cortesía de CATEC)</i>	85
<i>Ilustración 32. Componente analizado por tomografía computarizada (cortesía de CATEC)</i>	85
<i>Ilustración 33. Análisis 2D y 3D de componentes por tomografía computarizada (cortesía de CATEC)</i>	86
<i>Ilustración 34. Tomografía computarizada a las bandas de sujeción del ARIANE 5 (cortesía de CATEC/Astrium)</i>	86

<i>Ilustración 35. Pieza aeronáutica (cortesía de GKN Aerospace)</i>	87
<i>Ilustración 36. Brackets optimizados del A320 realizados con SLS (cortesía de EADS Innovation Works)</i>	87
<i>Ilustración 37. Brackets optimizados del A380 (cortesía de EADS Innovation Works)</i>	87
<i>Ilustración 38. Ensayos no destructivos automáticos (cortesía de TECNATOM S.A.)</i>	88
<i>Ilustración 39. Ensayos no destructivos automáticos (cortesía de CATEC)</i>	88
<i>Ilustración 40. Borde de ataque fabricado por ALM (cortesía de Airbus Defence & Space)</i>	92
<i>Ilustración 41. Diseño original del soporte de conexión (cortesía de CATEC)</i>	92
<i>Ilustración 42. Primera optimización del soporte de conexión (cortesía de CATEC)</i>	93
<i>Ilustración 43. Segunda optimización del soporte de conexión (cortesía de CATEC)</i>	93
<i>Ilustración 44. Los cuatro componentes en uno mediante FA (cortesía de CATEC)</i>	94
<i>Ilustración 45. Primera y segunda optimización con lattices (cortesía de CATEC)</i>	94
<i>Ilustración 46. Posición del componente y soportes (cortesía de CATEC)</i>	95
<i>Ilustración 47. Slicing y simulación de la construcción (cortesía de CATEC)</i>	95
<i>Ilustración 48. Selección de parámetros y posicionamiento en la plataforma (cortesía de CATEC)</i>	96
<i>Ilustración 49. Pieza recién fabricada (cortesía de CATEC)</i>	96
<i>Ilustración 50. Pieza final (cortesía de CATEC)</i>	97

Notación

FA	Fabricación aditiva.
ALM/AM	<i>Additive Layer Manufacturing/Additive Manufacturing.</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización).
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
CAD	Computer-Aided Design, (Diseño Asistido por Ordenador).
STL	<i>Standard Tessellation/Triangulation Language.</i> (Lenguaje Estándar por triangulación). En un principio, para la fabricación aditiva vino de Estereolitografía.
CN	Control numérico.
RP	<i>Rapid prototyping</i> (prototipado rápido).
RM	<i>Rapid Manufacturing</i> (fabricación rápida).
RT	<i>Rapid Tooling</i> (Uillaje rápido).
SLA	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografía).
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelado por Deposición Fundida).
SGC	<i>Solid Ground Curing</i> (Curado del Suelo Sólido)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Fabricación de Objetos Laminados).
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterizado selectivo por láser).
SASAM	<i>Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing</i> (Acción de Soporte para la Estandarización de la Fabricación Aditiva).
DIN	<i>Deutsches Institut Für Normung</i> (Instituto alemán de Normalización).
MEF	Método de Elementos Finitos.
SME	Sociedad de Ingeniería de Fabricación (Orlando).
CEN	<i>European Standards Organization</i> (Organización de Estándares Europeos).
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i> (Fabricación con láser de forma neta).
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Fusión Selectiva por Laser).
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> (Sinterizado Selectivo Directo por Láser).
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> (Fusión por Haz de Electrones).
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Tungsteno Inerte Gas).

HSM	<i>High Speed Machining</i> (Maquinado con Alta Velocidad).
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i> (Test No Destructivo).
NDI	<i>Non-Destructive Inspection</i> (Inspección No Destructiva).
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono).
ELI	<i>Extra Low Interstitial</i> (Bajo Contenido de Partículas Intersticiales).
ACU	Adaptador de Carga Útil.
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterizado Selectivo Laser).
3D	3 Dimensiones.
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> (Fusión por Haz de Electrones).
SLC	<i>Slice Format</i> (Formato de fichero de capeado).

Prefacio

Este documento está pensado para dar nociones básicas sobre la fabricación aditiva en la industria aeronáutica hasta la fecha.

En la actualidad, esta forma de fabricación no desarrolla toda su capacidad en el sector industrial puesto que es un proceso de producción joven que está aun en sus etapas iniciales de maduración, pero ya da una idea de su potencial para fabricar cualquier pieza que se pase por la cabeza, sin restricciones importantes.

Con la fabricación aditiva ya no hay barreras geométricas como las que se encuentran en el resto de procesos convencionales de fabricación, dándose una liberación en las limitaciones que afectan a la geometría (incluso una más pensada podría ocasionar un coste menor incluso si la forma es muchísimo más complicada mientras se acabe usando menos material). De esta forma, los conjuntos se pueden fabricar de una vez en una misma pieza y los diseños tienen mayor valor añadido, pudiéndose usar tanto en prototipos (muy importantes, puesto que se realizan de forma rápida tanto el componente en sí como sus modificaciones de mejora) como componentes finales. Además, las modificaciones son simples y se pueden realizar in situ. Esto es muy importante debido a la tendencia que está tomando la sociedad actual de obtener diseños personalizados.

Otro concepto con el que puede trabajar son las fabricaciones híbridas, de tal forma que se puedan aprovechar al máximo las ventajas que presentan cada método de fabricación, aunándolas todas para dar lugar a unas piezas fabricadas de la forma más óptima posible. Los campos en los que se complementarían bien podrían ser que mientras que con la FA se consiguen componentes con cualquier geometría, con los métodos convencionales se logra mayor rapidez y mejores acabados.

Con este breve resumen expuesto, a mi ver, la fabricación aditiva supondrá una nueva revolución industrial que afectará a todos los sectores, especialmente el aeronáutico, donde el ahorro en material de piezas metálicas mejorará la competitividad actual de los metales. Este ha sido mi impulso para realizar este proyecto fin de carrera.

Contenido del Proyecto

Capítulo 1.

Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA) o *Additive Layer Manufacturing (ALM/AM)* es un proceso de fabricación reciente donde se manipula el material a escala micrométrica y se deposita de forma muy precisa para construir un sólido, es decir, consiste en la sucesiva superposición de capas del orden de micras de espesor de material hasta obtener el objeto deseado [2, 3, 4.3, 7, 8, 9, 10].

El material empleado para la formación de dichas capas suele ser polvo y la consolidación de este en cada una se consigue de forma distinta según el método empleado entre una amplia cantidad.

Además, esta metodología de fabricación se está estandarizando para su posterior certificación por las agencias certificadoras correspondientes en el uso de la industria aeronáutica. Dichas organizaciones son la ISO y la ASTM. Ambas se están encargando de forma cooperativa de ello en estos momentos de tal forma que se consigan unos estándares válidos a nivel internacional. De este punto hablaremos en profundidad en el apartado que trata sobre el estado actual de la fabricación aditiva en el sector aeroespacial.

Como proceso, la fabricación aditiva viene a revolucionar la forma de producir piezas puesto que se diferencia en un concepto clave con respecto a los otros medios de producción: siempre añade material. Con este dato se puede realizar la siguiente clasificación de los procesos de fabricación:

- Tecnologías conformativas: son aquellas en las que la geometría requerida se obtiene por medio de una preforma (matriz con la cavidad de la pieza que se desea obtener). El material de partida se adapta a la forma de la matriz y tras procesarse se extrae de ella.
- Tecnologías sustractivas: son aquellas en las que la geometría requerida se obtiene sustrayendo material de una geometría mayor, es decir, se producen operaciones de arranque selectivo de material hasta llegar a la pieza deseada.
- Tecnologías aditivas: son aquellas en las que la geometría requerida se obtiene añadiendo material a partir de una geometría virtual, sin uso de preformas y sin sustraer material. La pieza se fabrica directamente a partir de un fichero 3D.

De esta manera, las pérdidas de material son aproximadamente nulas puesto que se aplica material solamente donde es necesario (tecnología Lean y “verde”). Así se desperdicia lo mínimo posible.

Tras lo anterior, sumando que con este método...

- se prescinde de herramientas y utillajes de fabricación,
- se puede reproducir cualquier geometría, lo que se traduce en que se tiene libertad para diseñar lo que sea (ya no interfiere el proceso de producción),
- se ofrece una respuesta inmediata a cambios,
- y se cubre la creciente necesidad de la población de tener productos personalizados,

... se refuerza la conclusión de que va a producir una nueva revolución industrial.

Para esclarecer el modus operandi base de este proceso, se expone la siguiente imagen sencilla donde se puede ver grosso modo la técnica:

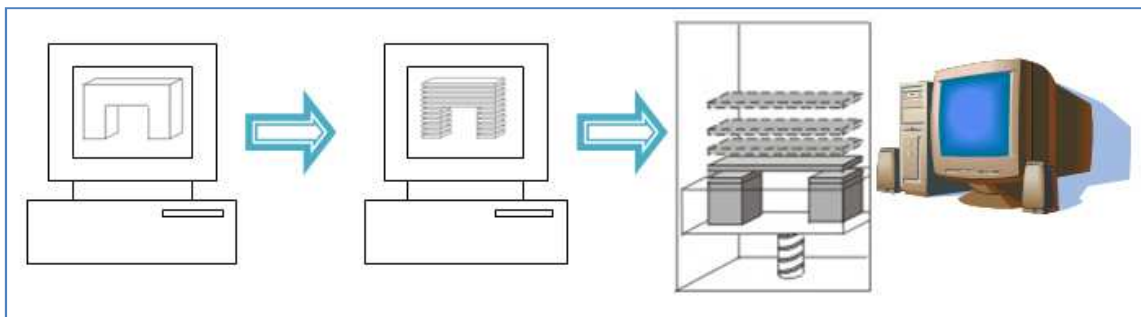


Ilustración 1. Filosofía de la impresión 3D.

Esencialmente, todos los métodos de impresión 3D coinciden en esto. Lo que diferencia unos de otros es el modo de fabricar el componente en la última parte de la imagen *Ilustración 1*. En ella se observa que tras generar una

imagen virtual 3D del componente en un sistema CAD, se convierte a un formato de comunicación estándar de estas tecnologías (STL) y se pasa a un programa especializado según el sistema de “impresión 3D” que lo divide en capas de grosor seleccionados y que calcula por sí mismo, como si se tratase de un programa de CN, los posibles caminos de deposición según los parámetros introducidos y/o las propiedades que se quieran conseguir (a seleccionar por el personal cualificado).

A continuación, se envía esta información al sistema de “impresión 3D” (que realizará una de las muchas técnicas que posee la fabricación aditiva) y la máquina “imprime” la pieza tal y como se ha establecido que se haga resultando el diseño virtual. Por último, esta se extrae de la plataforma, se le quitan los soportes y se procede a realizar los tratamientos que se estimen oportunos tras la fabricación (según el caso).

Esto supone un cambio en el paradigma de la fabricación que se tiene hoy en día y en la forma de pensar porque cambia las ideas preconcebidas de cómo se tienen que producir los componentes. La fabricación aditiva permite dejar volar la imaginación de los diseñadores al no tener ninguna restricción.

Hay que resaltar la idea de que este procedimiento de fabricación no llega para sustituir los que hay ahora, sino para complementarlos y mejorarlos, de tal forma que la fabricación de una pieza determinada se pueda hacer por este método combinado con otros y así llegar a unas propiedades y calidades óptimas de una forma más económica (fabricación híbrida).

1.1. Reseña histórica

Desde la antigüedad, el avance de una civilización y por tanto sus condiciones de vida han estado directamente ligadas a la capacidad de esta para adaptar las riquezas naturales del entorno y convertirlas en productos elaborados. Esto requiere un estudio del consumo de energía y una destreza técnica [2, 3, 4.3, 7, 8, 9, 10].

Estos productos fabricados, hasta bien entrado el siglo XVIII, han sido muy caros debido a la producción artesanal, personalizada y escasa que se tenía, lo que solo hacía accesible estos bienes a los miembros más selectos de la sociedad.

Fue a partir de aquí cuando se desarrollaron una serie de avances tecnológicos que cambiaron la forma de fabricar, consiguiendo reducir costes y habilitando la producción masiva de productos cubriendo la demanda de un mercado mayor.

Este paso anterior describe perfectamente la industrialización que ha existido desde entonces hasta ahora desempeñando un papel crucial en la economía y siendo el motor principal de generación de bienestar de los países que lo implementaban, elemento clave de modernización y aumento de nivel de vida.

Como es bien sabido, el primer país en industrializarse fue Inglaterra con la invención de la máquina de vapor. Con ella se convirtió en la primera potencia económica mundial. A continuación, tras numerosos avances en campos de la energía eléctrica y la producción en cadena le sucedió Estados Unidos de América con emblemas de este proceso como Henry Ford y su cadena de montaje. Todo esto dio un cambio importante en la calidad y forma de vida de su sociedad (edificación vertical, automóviles...).

Posteriormente en los años cincuenta, la capacidad de Japón para recuperar su industria y su particular método de organización de la producción (conocido en Occidente como *Lean Manufacturing*) situaron su economía como una de las primeras del mundo. Como emblema de este desarrollo está Toyota, cuyo logo simboliza en sí mismo el resurgir de la economía nipona sobre sus propias ruinas.

En los últimos veinte años estamos presenciando el nacimiento de China como potencia económica debido a su capacidad de producción (la fábrica del mundo).

Finalmente, en las tres últimas décadas se está asistiendo a una transición hacia lo digital en distintos ámbitos de la vida, tanto personal como profesional. Las fábricas están tomando buena nota de este fenómeno, sobre todo en el último desarrollo en procesos de producción: la fabricación aditiva.

Las técnicas de fabricación aditiva surgen en los años ochenta con el nombre de Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping, RP*) ya que en un primer momento se concibieron con el fin de realizar prototipos. La mejora de estas técnicas dio lugar a un aumento en la precisión, en las potencias de las fuentes de energía y en la resolución, y mejoró los acabados superficiales y las tolerancias de las piezas. Además, al aparecer nuevos materiales se amplió el mercado de esta técnica debido a que se podían ofrecer más posibilidades tanto en materiales como en resoluciones para satisfacer las demandas de más clientes, con lo que se empezó a fabricar piezas, productos y utillajes. Esto originó un cambio de nombre de este proceso según lo que se hiciese: la fabricación rápida (*Rapid Manufacturing, RM*) y el utillaje rápido (*Rapid Tooling, RT*).

Es decir, existen tres grupos de tecnologías con el mismo principio de fabricación que crean capa a capa o prototipos, o piezas, o moldes y utillajes. Estos tres procesos se engloban en la actualidad en el mismo nombre: la

fabricación aditiva (*Additive Manufacturing/Additive Layer Manufacturing*), usado hoy en día internacionalmente. Existen varios documentos de estandarización de esta tecnología que recogen la terminología de estos procesos realizados por las organizaciones ASTM e ISO y que están en continua revisión (por ejemplo, el ASTM F2792-12a). Todavía queda mucho camino en este aspecto.

Para la fabricación aditiva todo comenzó en 1987 con el primer proceso de AM, la estereolitografía (SLA), propiedad de una empresa norteamericana llamada 3D Systems. Este se basa en la solidificación de capas de resina fotosensible por medio de un láser.

Una vez comercializado el primer sistema de prototipado en EE.UU., surgieron empresas japonesas (NTT y Sony/D-MEC) con sus propias máquinas de estereolitografía en los años 1988 (NTT) y 1989 (Sony/D-MEC). En Europa, la idea de la impresión 3D llega más tarde, en 1990, de la mano de la empresa alemana EOS con su sistema "Stereos".

Posteriormente, en 1991, aparecen nuevas técnicas: la deposición de hilo fundido (*Fused Deposition Modeling*, FDM, de la empresa americana Stratasys) en la que se realiza la extrusión de un filamento que se funde en un cabezal de fusión; el curado sólido directo de la capa (*Solid Ground Curing*, SGC, de la empresa israelí Cubital) que trabaja con resina fotosensible pero cada capa solidifica en una sola operación gracias a una máscara de tinta electrostática en un vidrio; y la fabricación de objetos laminados (*Laminated Object Manufacturing*, LOM, de la estadounidense Helisys) donde empezó cortando hojas de papel con un láser (actualmente trabaja con termoplásticos y materiales compuestos).

En 1992 surgen los sistemas de sinterización selectiva láser (*Selective Laser Sintering*, SLS, de la empresa americana DTM), donde se sinteriza polvos metálicos mediante un láser de forma selectiva y es actualmente la que tiene mayor campo de aplicación en el sector aeronáutico.

Hasta la actualidad han surgido numerosas técnicas y las ya existentes se están depurando de forma que se obtengan componentes con unas propiedades similares a las de forja y de mucha más calidad. Además, los sectores de aplicación han ido aumentando, desde aquellos con escasos requerimientos como consumo propio o partes de la industria con baja solicitudes, hasta los que tienen más como el sector aeronáutico, médico, militar, académico, del motor o la arquitectura.

Aunque parece apuntar a ser el proceso de fabricación del futuro, hoy en día su uso no está globalizado por la falta de estandarización. Debido a ello no se está obteniendo el máximo rendimiento que esta técnica puede ofrecer. No hay una regulación sólida que la controle, de tal forma que todo lo que se

estudia no está contribuyendo a avanzar y se están dando rodeos y repitiendo lo que está hecho. Como solución, en la actualidad existen proyectos como el SASAM para estandarizar este proceso de fabricación

Para concluir, el país más desarrollado en este proceso es Estados Unidos de América, donde su uso está muy expandido y estudiado. Esto está pasando de la mano de empresas como Boeing, hoy en día la más comprometida con la estandarización de todo lo relacionado con la fabricación aditiva en la industria aeronáutica.

1.2. Ventajas e inconvenientes

La fabricación aditiva conlleva una serie de numerosas ventajas que mejoran a los procesos de producción convencionales. Estas son:

- ✚ La reducción del tiempo necesario para sacar al mercado productos personalizados. Esto es el llamado “*time to market*”, que es la suma del tiempo de diseño y el de prototipado. Esto es debido a que se fabrica directamente desde un fichero CAD 3D y si es necesaria cualquier modificación, se realiza en dicho archivo. Además, no se necesitan utillajes específicos para el componente, de tal forma que se elimina también el tiempo para diseñarlos y fabricarlos, con lo que tampoco hay necesidad de invertir en ellos. Esto hace que las tecnologías FA sean competitivas en la producción de series cortas y medias. El tamaño de la producción dependerá generalmente del método que se use para producir el componente, el tipo de material usado, la complejidad de la geometría de la pieza y la competitividad de los procesos convencionales para este caso (competencia).
- ✚ La completa libertad y flexibilidad en el diseño de productos. Se puede idear piezas con casi cualquier forma y complejidad, ya que no se tiene ninguna limitación geométrica.
- ✚ La facilidad de manejar los archivos CAD 3D. Estos pueden mandarse por internet y almacenarse de tal forma que se tenga una base de datos de componentes. Además, habilitando la fabricación aditiva en cualquier lugar (tener un sistema de FA), se pueden producir cualquier pieza in situ. Con ello se puede evitar el fin de existencias o el retraso de componentes.
- ✚ El máximo ahorro de material en el proceso de fabricación. Este se añade selectivamente solo en las zonas donde es necesario. Además, más del 95% del material no utilizado puede ser reciclado para volverlo a usar.
- ✚ La innecesaria gestión de los desechos. Este punto viene del anterior puesto que se utiliza solo el material que se necesita para formar la

pieza (no hay procesos sustractivos). En los procesos convencionales con arranque de viruta se deben gestionar los residuos que se producen, lo que supone un coste añadido. Además, en la FA se evita el uso de líquidos refrigerantes, típicos en estos procesos, que contienen componentes tóxicos para el medio ambiente y el personal que los maneja. En general, se evitan desechos catalogados como Residuos Tóxicos y Peligrosos por el Real Decreto 833/1988. La fabricación aditiva es un proceso “limpio” donde se parte de una pequeña cantidad de material superior a la que se necesita, pero solo pasa a ser parte de la pieza la que se agrupa. El resto puede ser reutilizado, ya que sus propiedades siguen siendo prácticamente las mismas.

- ✚ La fabricación automática del producto. Las técnicas de FA construyen de forma automática los productos siguiendo la geometría CAD 3D del archivo de diseño y sin la intervención de operarios, evitando así errores humanos en la producción.
- ✚ La obtención de piezas con densidad muy próxima al 100% (e incluso de este valor) en el caso de las tecnologías de metal. Se fabrican piezas con ninguna o prácticamente ninguna porosidad y con excelentes propiedades mecánicas (a diferencia de los procesos pulvimetalúrgicos convencionales). Hoy en día, estas propiedades son similares a las de los componentes de forja.
- ✚ La fabricación de geometrías muy complejas, imposibles o muy difíciles de realizar para los procesos de producción convencionales. Aumentar la complejidad ya no lleva consigo un aumento de los costes sino que incluso puede suponer un abaratamiento del producto puesto que se puede estar reduciendo el material usado. Algunos ejemplos son la producción de piezas y moldes con canales de circulación con cualquier forma y ramificación, la fabricación de productos huecos o con cavidades internas (vaciado interior), la producción de estructuras porosas diseñadas por CAD, la variación de grosor a lo largo de paredes, geometrías con grandes irregularidades, piezas esbeltas.... Esto permite el rediseño de todo lo concebido porque actualmente todo está determinado bajo las limitaciones de los procesos convencionales y bajo las simplificaciones en las geometrías para abaratar los procesos de fabricación. Se pone en práctica el lema “si se puede dibujar, se puede hacer”. Para ayudar en esto, se dispone de software en continua mejora que optimiza las piezas en tamaño y forma según la aplicación (del que se hablará más adelante).
- ✚ La reducción de peso de los componentes fabricados, que ha sido referenciada de forma leve en el punto anterior. Sin limitaciones geométricas y cumpliendo con los requisitos se puede ahorrar material. Además, al construir los objetos capa a capa se presenta la posibilidad de integrar geometrías internas en las piezas. Se pueden variar componentes macizos con estructuras internas (*lattices*). También está

la posibilidad de crear piezas con densidades diferentes (insertar un gradiente de porosidad en las partes que estén menos solicitadas) y formar distintas distribuciones tridimensionales del material. Habitualmente, la creación de formas huecas se lleva a cabo con técnicas de moldeo donde se requiere una detallada planificación de la disposición del molde y sus partes, colocación de mazarotas y extracción de la pieza finalizada. También se consiguen mediante otros métodos con el inconveniente de que se precisa un posterior ensamblaje de todas las partes que componen el objeto final, lo que requiere de más planificación para todas las piezas, su método de ensamblaje y un cuidado dimensional de las zonas de unión. Estas restricciones se eliminan con la fabricación aditiva (lo único a tener en cuenta son las estructuras de soporte y la colocación de la pieza virtual en el entorno para que el uso dichas estructuras sea el mínimo) pudiendo adaptar los comportamientos del componente según la función de las partes (capilaridad, resistencia...).

- ✚ Los productos multimaterial (no aplicable a todos los procesos de fabricación aditiva). Se trata de fabricar componentes con materiales completamente diferentes. Esto supone una ventaja en primer lugar si se desea fabricar un objeto que debe presentar comportamientos diferentes según partes (similar al punto anterior, salvo la diferencia de que uno es con un material y otro con varios). Además, con la fabricación aditiva, todo se realiza de una vez. Usando procesos convencionales se podría hacer con operaciones de sobremoldeo, aunque es muy difícil de realizar y hay que tener en cuenta muchos aspectos (zonas de unión, geometrías...). En los métodos de fabricación aditiva se aplica en estructuras de soporte (se hacen de otro material para que después puedan ser eliminados de forma más fácil) y para necesidades requeridas en cada caso (conducción eléctrica, resistencia...).
- ✚ La existencia de procesos de digitalización 3D que automáticamente consiguen crear los diseños con mayor ergonomía.
- ✚ La adición de geometrías intrincadas. En procesos convencionales de fabricación esto se traduce en una planificación de fabricación difícil, un mayor número de operaciones, el posible uso de más de una máquina... con lo que con los procesos de FA se obtiene un ahorro de tiempo y dinero.
- ✚ La formación de geometrías fractales (formas geométricas que se repiten a escalas diferentes formando un complejo). Se basan en sistemas biológicos y formas presentes en la naturaleza. Son componentes importantes porque permiten un aligeramiento de la materia a usar y entonces optimiza su funcionalidad.
- ✚ La producción directa de mecanismos. Así se eliminan errores de montaje, se reduce el inventario y la manipulación de piezas pudiendo producir un eje con su cojinete, un rodamiento, etc.

- ✚ La obtención de piezas Near Net Shape. Las tecnologías FA pueden producir piezas con aleaciones complejas y/o costosas de procesar por los métodos de fabricación convencional. Además, lo hacen con geometrías muy cercanas a la final (que después pueden ser acabadas por mecanizado. Un ejemplo son las superaleaciones de base níquel (Inconel) o las de cobalto-cromo.

Además de estas ventajas, el uso de los métodos de fabricación aditiva conlleva una serie de inconvenientes. Estos son:

- ✚ El alto coste de la materia prima puesto que se compra en el formato que requiere el proceso de fabricación. Esta desventaja va disminuyendo con el tiempo debido al creciente uso de las tecnologías de FA, apareciendo más proveedores y aumentando la competencia.
- ✚ La caracterización de las propiedades de los materiales procesados por FA. El proceso de deposición de material es discontinuo, con lo que las propiedades de los materiales obtenidos cambian en función de la dirección de fabricación. Generalmente se comportan como materiales ortótropos con diferentes propiedades si se ensayan en dirección de la aplicación de material o en la dirección perpendicular a ella. Además, esta diferencia también influye según el material, el espesor de la capa, la tecnología usada y los parámetros de este proceso. Hoy en día, a la hora de realizar cálculos estructurales con software especializado, se coge el valor de la característica más desfavorable. Esto parece muy conservativo (y hace un tiempo lo era) pero las características en la dirección de deposición y en la perpendicular no tienen tanta diferencia.
- ✚ La ausencia de un software específico de diseño. La mayoría de los programas de diseño CAD 3D utilizan solo las operaciones básicas de los programas de mecanizado. Esto dificulta el modelado de productos muy complejos que aprovechen las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas. Como solución se están desarrollando software de diseño específicos para esta tarea que integran la llamada optimización topológica de tamaño y forma de los diseños junto con el cálculo de estructuras de forma que se obtenga el mejor diseño (sin limitaciones) que cumpla perfectamente con las solicitudes que va a tener.
- ✚ El escaso desarrollo de nuevos materiales (hay más en los métodos convencionales). Hoy en día requiere una gran inversión obtener nuevos materiales y sus parámetros adecuados para usarlos (porque dependen de la máquina). Esto hace que se produzca un estancamiento en las capacidades de la fabricación aditiva, es decir, no se dispone de un número considerable de materiales para introducir ventajas competitivas en nuevas aplicaciones. Para solucionar este problema las empresas que se dedican a la fabricación de polvo están trabajando en mejorar los

tipos que venden ya existentes mediante nuevos procesos de formación de este.

- ✚ La velocidad de producción. Esta es inversamente proporcional al acabado. También afecta al tiempo del proceso y su coste. En este aspecto existe mucho margen de mejora: se realizan numerosas investigaciones con láseres más potentes o un mayor número de láseres. También, las tecnologías de FA, a día de hoy, no son equiparables en productividad a los procesos tradicionales de grandes cadenas de fabricación que pueden producir grandes lotes.
- ✚ La calidad superficial y la precisión dimensional. Dependiendo de la aplicación y el acabado obtenido puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales que incrementarían el coste del producto. Las soluciones que se están investigando son la reducción del tamaño del foco del laser y del haz de electrones, que conllevaría al mismo tiempo empezar a utilizar polvos esféricos de menor tamaño.
- ✚ La dificultad de post-procesar una pieza para mejorar su acabado debido a las nuevas formas que trae.
- ✚ La restricción del tamaño. Esta restricción se aplica tanto al tamaño máximo como al mínimo. El mayor tamaño está limitado por la dimensión de la plataforma de fabricación y por el método que se use. Así, para fabricar componentes plásticos se tiene un tamaño máximo de un cubo de alrededor 2m de lado y para metales un cubo de 500mm aproximadamente. Para solucionar este problema, se están ideando sistemas que permitan fabricar piezas de grandes dimensiones sin que se necesite para ello una máquina exageradamente grande (pero esto es muy complicado porque se necesita conseguir la condición de sinterizado). Por otra parte, para el menor tamaño existe la limitación del diámetro mínimo del haz de láser. Este está condicionado por:
 - El tamaño del polvo que se va a depositar para que su manipulación sea segura. Si el grano es más grueso, es más manejable puesto que el más fino es más volátil, pero se obtiene una calidad mucho peor.
 - El diámetro del láser, que hace que una máquina no pueda conseguir detalles más pequeños que uno y medio o dos la medida del diámetro del haz.
 - El espesor de la capa.
- ✚ La operación de carga de polvo de material y la limpieza de este de todo el sistema de FA si se quiere usar otro material se hace por medio de un operario.
- ✚ La extracción de las piezas metálicas de su plataforma de apoyo. Esto es porque el material depositado se pega a la placa de soporte y se tiene que separar mediante un serrado de superficie, acción muy laboriosa.

- ✚ El diseño de los soportes. Se retiran mediante procesos de mecanizado o serrado, con lo que tiene que tenerse en cuenta su situación óptima, grosor, inclinación... para que esta tarea sea fácil y el proceso sea lo más rápido y económico posible sin afectar a la pieza en sí. Actualmente, los software de fabricación aditiva dan soporte en este asunto a la hora de fabricar piezas. En otro punto se especificarán las restricciones a la hora de “imprimir” y su solución con esta etapa importante del proceso.
- ✚ La falta de estandarización. Las tecnologías de FA son novedosas y no muy extendidas y se tiene un conocimiento estándar limitado de ellas. Falta aun realizar numerosos estudios y comparativas entre métodos pero para esto hace falta obtener antes repetición en los ensayos. Esta repetición es difícil de conseguir debido a que no se obtiene una misma pieza a partir del mismo material y del mismo proceso si, por ejemplo, la máquina es distinta, con lo que los avances tecnológicos se están consiguiendo poco a poco por medio de proyectos de empresas de forma individual. Partes de estas investigaciones son sobre cosas ya estudiadas puesto que cada compañía tiene sus propias máquinas y todas están partiendo de lo mismo. Debido a esto se debe ahondar en la estandarización, sobre todo de piezas metálicas, para resolver este problema y que los ensayos avancen el conocimiento de esta tecnología de forma rápida. Dentro de este apartado debe conocerse más sobre los efectos térmicos y las propiedades físicas (elasticidad, tensión de rotura, comportamiento a fatiga, dureza...) de los componentes de metal. Tampoco hay una ley básica para la aplicación de soportes aunque el software que incluyen los programas de impresión 3D tenga una ayuda para colocarlos, al final queda en manos del ingeniero posicionarlos de forma final y esto solo lo da la experiencia. Además, no hay un estudio profundo que detalle el comportamiento anisótropo de los materiales que poseen diferentes densidades en su cuerpo. Todas estas lagunas las está tratando de resolver la estandarización de la ALM con proyectos como SASAM, que busca una normalización de la fabricación aditiva en todos los sectores industriales para después dar lugar a una certificación de la técnica en todos los campos requeridos (más adelante se hablará con detalle de este tema).
- ✚ La preparación mental de los diseñadores, que ahora tienen que pensar con una filosofía totalmente distinta a las que tenían establecida. Este proceso en su primera etapa está resultando más sencillo con los programas de optimización topológica, aunque se parte del diseño restrictivo que se tiene hoy en día.
- ✚ El difícil reciclaje de productos multimaterial.
- ✚ El coste de las máquinas de fabricación aditiva es muy alto. En metales valen del orden de un millón de euros (hacia arriba), dependiendo del proceso que implemente y de la calidad con que lo haga. Esto supone

que para tener varias máquinas hay que aportar una inversión bastante significativa además de tener un personal especializado para definir estrategias de fabricación, procesado y post-procesado, y acciones de mantenimiento, sobre todo de cabezales y láseres. También, este hecho encarece el coste de las piezas. Con el tiempo, el comercio de las máquinas 3D crecerá y el precio irá disminuyendo.

- ✚ La difusión de la información (propiedad intelectual). Todas las piezas están en archivos que se pueden manejar fácilmente. Esto ocasionará que se requiera un control.

Como se puede ver, la fabricación aditiva conlleva un gran número de ventajas pero también de inconvenientes [2, 3, 4.3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Estos son en su mayoría por el desconocimiento que se tiene de la técnica debido a la alta inversión que hay que realizar para avanzar en este método de conocimiento.

Con las soluciones que se están llevando a cabo a los contras mostrados, poco a poco la fabricación aditiva se está extendiendo más, con lo que al final será competitivo y podrá ser usado ampliamente por las empresas para todo tipo de componentes.

1.3. Punto actual donde se encuentra

Hoy en día nos encontramos en un punto donde esta tecnología promete mucho pero necesita de una inversión considerable de tiempo y dinero para desarrollarse: está en plena fase de experimentación en cuanto a la industria aeronáutica se refiere [2, 3, 4, 10].

Poco a poco se está retirando el desconocimiento de su dinámica del proceso, sobre todo en piezas metálicas, pero aun se siguen realizando pocos estudios que investiguen la mecánica del proceso aditivo y su evolución en el tiempo. Por esta razón, todos los parámetros que afectan al proceso así como la relación profunda entre todos ellos (diferentes ambas cosas según el proceso e incluso la máquina) no se controlan suficientemente bien, de manera que se determinen con repetición las tensiones residuales y las deformaciones que se dan y podamos fabricar componentes útiles de forma segura y repetitiva (aunque hoy en día, numerosas empresas están consiguiendo acotar los datos que obtienen de sus ensayos, hecho muy importante y primordial en el sector que nos compete).

La industria aeronáutica está haciendo el esfuerzo de saber más de esta forma de fabricación (la FA) por la capacidad que esta tiene para acortar tiempos de desarrollo de fabricación de prototipos funcionales. Otras aplicaciones son usarla como herramienta en reparaciones, en la fabricación de

repuestos evitando el mantenimiento de útiles y realizando piezas que supongan un ahorro de material y peso.

Para que esto ocurra, hay que centrarse en una serie de puntos:

- Nuevos materiales para obtener mejores características con un ajuste de los parámetros que intervienen en el proceso.
- Estabilización de los parámetros con independencia de la máquina empleada (estandarización).
- Investigar en la mejora de las características mediante post-procesado y tratamientos superficiales.
- Certificación del material y del proceso. Este punto es muy difícil de conseguir debido a que actualmente aun se está estandarizando esta tecnología. Las empresas están invirtiendo mucho dinero en estudiar con sus propias máquinas y esto supone un problema si no se introducen los resultados en una fuente común o si no existe un organismo que lo regule debido a que esas mismas investigaciones pueden estar hechas por otras compañías con sus propias impresoras. En este aspecto, existen varios programas, como el SASAM que está estandarizando todo lo relacionado con la fabricación aditiva con la ayuda de 102 *stakeholders*, uno de ellos Boeing. La empresa americana está instalando en sus aviones piezas fabricadas con impresión 3D y está estudiando el resultado, ayudando así a este proyecto en la estandarización especial sobre la industria aeroespacial. El procedimiento que está usando se basa en crear las piezas, validarlas una por una con un exhaustivo proceso de ensayos y tras la aceptación, montarlas en las aeronaves y estudiar su comportamiento. Tras lo que se observa, realizar un plan de actuación sobre ellas e implementarlo. Así se irá ganando conocimiento con el tiempo de tal forma que se dé una mejor estandarización de todo lo relacionado con la FA y tras ello se consiga cumplir con los requisitos de certificación aeronáuticos. En resumen, está realizando un ciclo similar al de Deming: *plan, do, check, act*. Esto es muy importante que ocurra debido a que con la fabricación aditiva estandarizada y normalizada se puede conseguir:
 - Un desarrollo de la industria europea en cuanto a costes y eficiencia en el uso de las fuentes de energía.
 - Innovación y mejora de la competitividad laboral en Europa.
 - Una economía globalizada.
 - Una producción personalizada.
 - El desarrollo de avanzados sistemas de fabricación.
 - Una estimación de un beneficio de 3,7 billones de dólares americanos en 2015 según *Wohlers, 2012*.

- Y tras la estandarización, la certificación y aprobación por la autoridad competente en ese caso (por ejemplo, la AIA), su consiguiente explotación.
- Desarrollar nuevas técnicas de diseño y establecer criterios de adecuación de la parte de fabricación (según el nivel de estudio se da lugar a lo que es adecuado o inadecuado, y al final se escriben estos criterios basados en el cumplimiento de ciertas normas y principios).

Un factor muy importante es la propiedad de anisotropía que tienen los componentes producidos, es decir, las propiedades de la pieza dependen de la dirección de deposición de las capas. Esto es crucial a la hora de usar un programa de simulación del comportamiento puesto que la mayoría usan la suposición de propiedades homogéneas del material y esto en el caso que se trabaja en este documento no es cierto. Además, con esta tecnología se puede elegir dar distintas densidades a la pieza mediante construcción con gradientes de material, lo que hace que los programas tengan que estar mucho más especializados.

El párrafo anterior pone de manifiesto que no solo hay que realizar ensayos, sino también apoyarlos con un software que sea capaz de simular la realidad de estas piezas. Hoy en día se está tratando de solucionar este problema usando programas de optimización de formas y tamaños de componentes que según las solicitudes genera un nuevo diseño que a continuación tiene que ser estudiado por el ingeniero cualificado en un programa de cálculo de estructuras y de ahí, tras un método iterativo, encontrar la mejor pieza posible para esa aplicación. También, se está dando el desarrollo de nuevo software de cálculo y optimización de estructuras, todo en uno, basados en el MEF que aplican y quitan material de donde calcula necesario y donde después, por supuesto, tiene que ir la conveniente revisión del profesional especializado.

Con respecto a la certificación, esta no se consigue si no se establece antes una buena norma de estandarización del método.

Los inicios de ella se remontan de manera oficial al año 2008 con la reunión de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (SME) en Orlando, Florida, donde el comité de tecnologías de FA decidió buscar a la organización de desarrollo de estándares que mejor pudiera llevar a cabo esta tarea, seleccionándose a ASTM. Se realizó un primer contacto con esta organización en julio de ese mismo año y posteriormente se eligió por unanimidad para llevar a cabo dicha tarea el 3 de noviembre del 2008.

En dicha reunión se estableció de manera general el alcance del trabajo y se definieron cuatro áreas prioritarias de estandarización:

- Terminología.

- Ensayos.
- Materiales.
- Especificaciones de procesos específicos.

La primera reunión del comité ya creado llamada, *New ASTM International Activity on Additive Manufacturing Technologies*, <http://www.astm.org/COMMIT/COMMITTEE/F42.htm>, tuvo lugar los días 13 y 14 de enero del 2009 en las instalaciones de ASTM. A ella asistieron 70 representantes de las principales compañías y organizaciones punteras de las tecnologías de FA a nivel mundial en esos momentos. El objetivo de dicha reunión era, por una parte, llegar a un consenso sobre las necesidades de estandarización y, por otra, identificar las áreas específicas para su puesta en marcha.

Este grupo eligió el término *Additive Manufacturing* para hacer referencia a este tipo de tecnologías y se ha generado un documento que recoge la terminología estándar para la fabricación aditiva (ASTM F2792 - 10E1 «*Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*», <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>).

En paralelo, DIN presentó el 20 de septiembre de 2010 una propuesta de normalización equivalente (ISO/TS/P 215 «*Additive Manufacturing - Rapid Technologies (Rapid Prototyping) - Fundamentals, terms and definitions, quality parameters, supply agreements*»).

El resultado de esto es un proceso de estandarización separado y desigual, que puede trabajar sobre lo ya trabajado dándose una redundancia en los documentos que elaboran y en los ensayos que realizan.

Para evitar esto, en la actualidad existe un proyecto muy sólido que actualiza de forma constante y periódica una «Hoja de Ruta» de actuación y de estructuración de los estándares que sirvan como base para la eficaz normalización en el ámbito Europeo e internacional de la fabricación aditiva en la industria en general (aquí se incluye a la aeronáutica) [3]. Este proyecto comenzó en Septiembre del año 2012 y se llama *Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing-SASAM NMP-CSA-2012-319267*.

Como se ha dicho, está realizando una norma de carácter general y no aeronáutica expresamente, aunque se le da mucha prioridad a los temas de estandarización especial como son los aplicados a la industria aeroespacial y médica. Con respecto a lo que nos atañe, Boeing es un activo ayudante de este proyecto proporcionando información y asistiendo a las reuniones que se convocan para establecer los requerimientos de normalización que necesita la industria de su sector.

El primer paso que dio SASAM es el mismo que la experiencia ha dicho que es útil para la normalización y certificación: empezar a informar a las partes interesadas de la existencia de lo que se va a llevar a cabo para obtener su cooperación y establecer con dichas partes sus necesidades y requerimientos en la fabricación aditiva. Esta tarea se realizó por medio de un cuestionario que sirve como base a la normalización efectiva de la fabricación aditiva (participaron empresas de todas las índoles, no solo aeronáuticas). A continuación, se hacen reuniones con los *stakeholders* para obtener una realimentación y actualizarse de forma periódica y continua.

En las siguientes gráficas se exponen la información general elegida por las empresas interesadas (con su centro de masas en Europa) para ser estandarizada así como su importancia (en escala del 0 al 5, este último de mayor importancia):

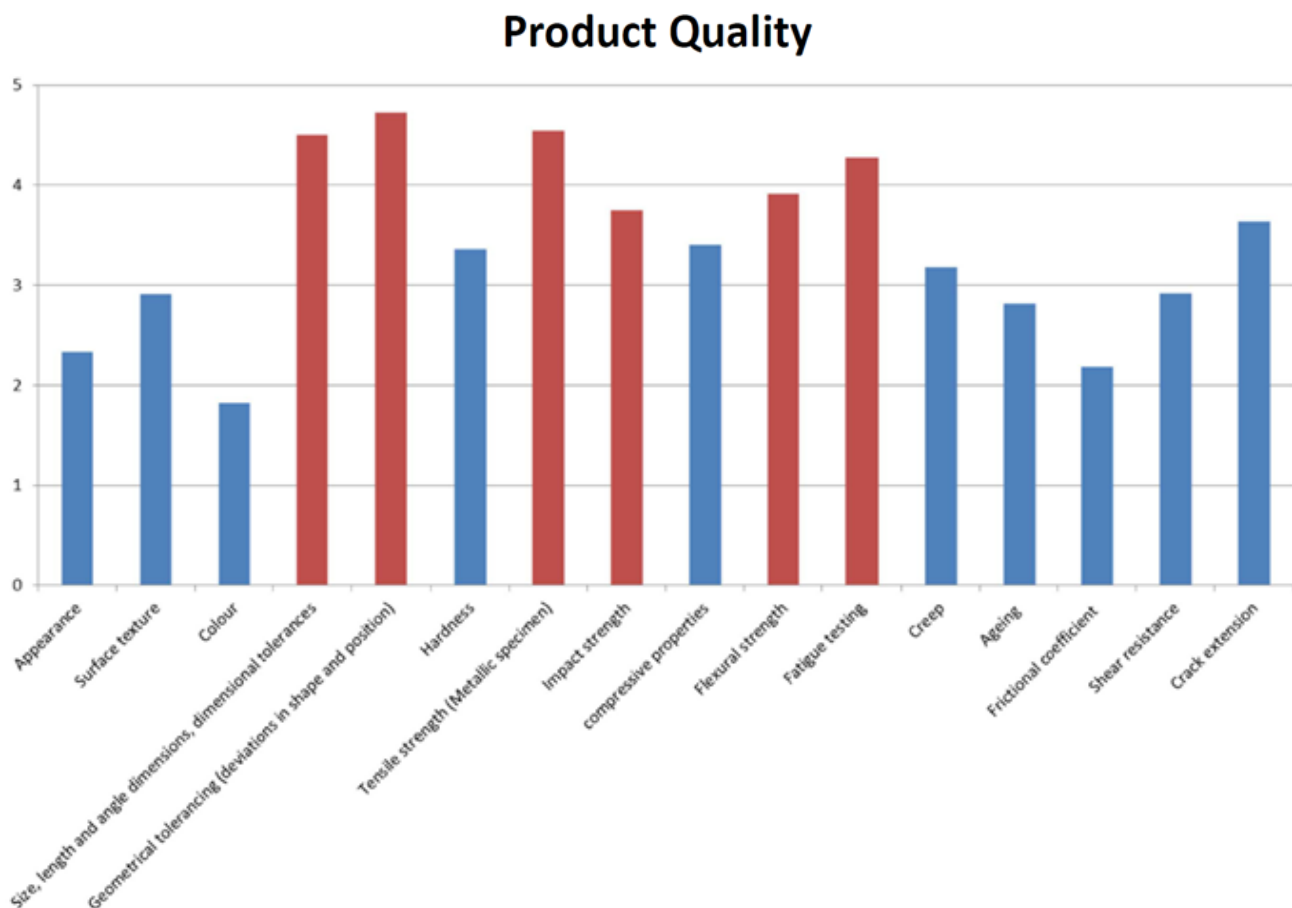


Ilustración 2. Campos votados para su estandarización urgente (cortesía SASAM).

Además, para cada tipo de material se realizó también un cuestionario para que se eligiesen los puntos dentro de ellos de urgencia para su estandarización. Estos materiales fueron metálicos, cerámicos y polímeros, especificando además su campo de aplicación. Estas son las gráficas:

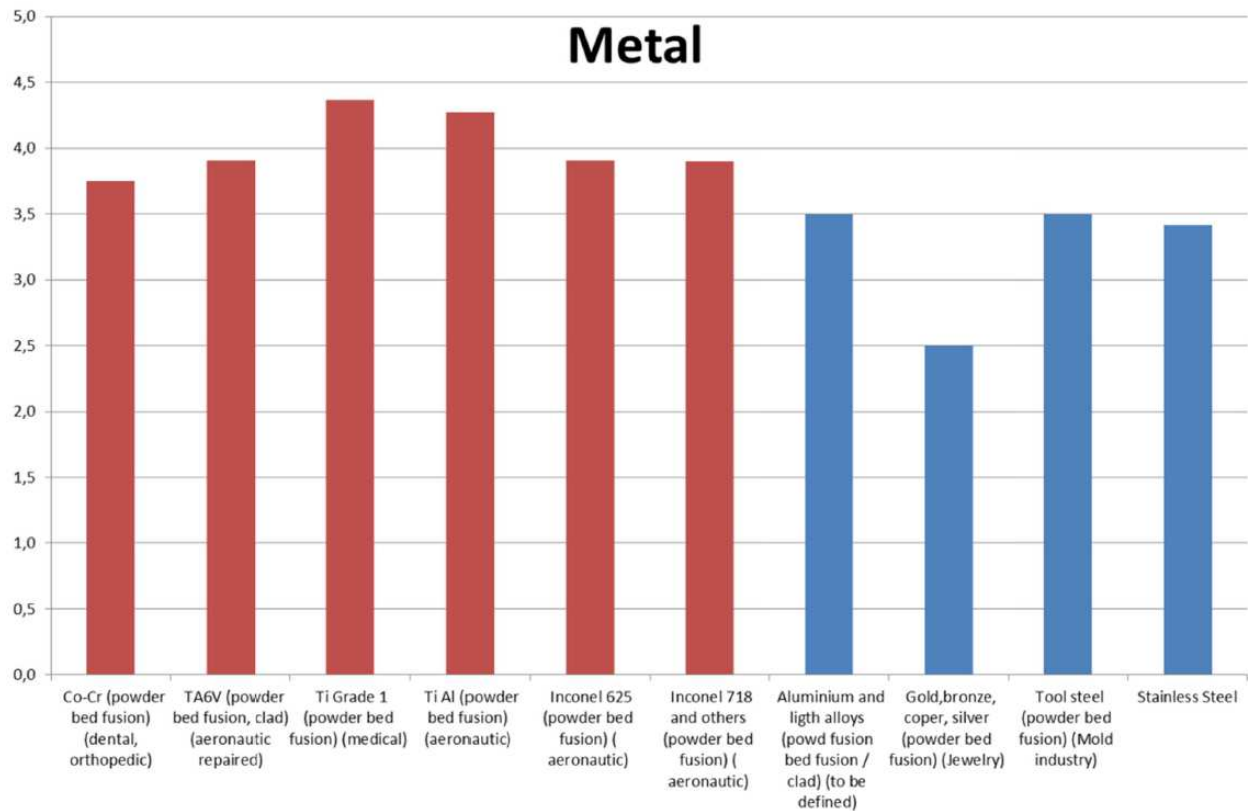


Ilustración 3. Asuntos de primordial estandarización en metales (cortesía SASAM).

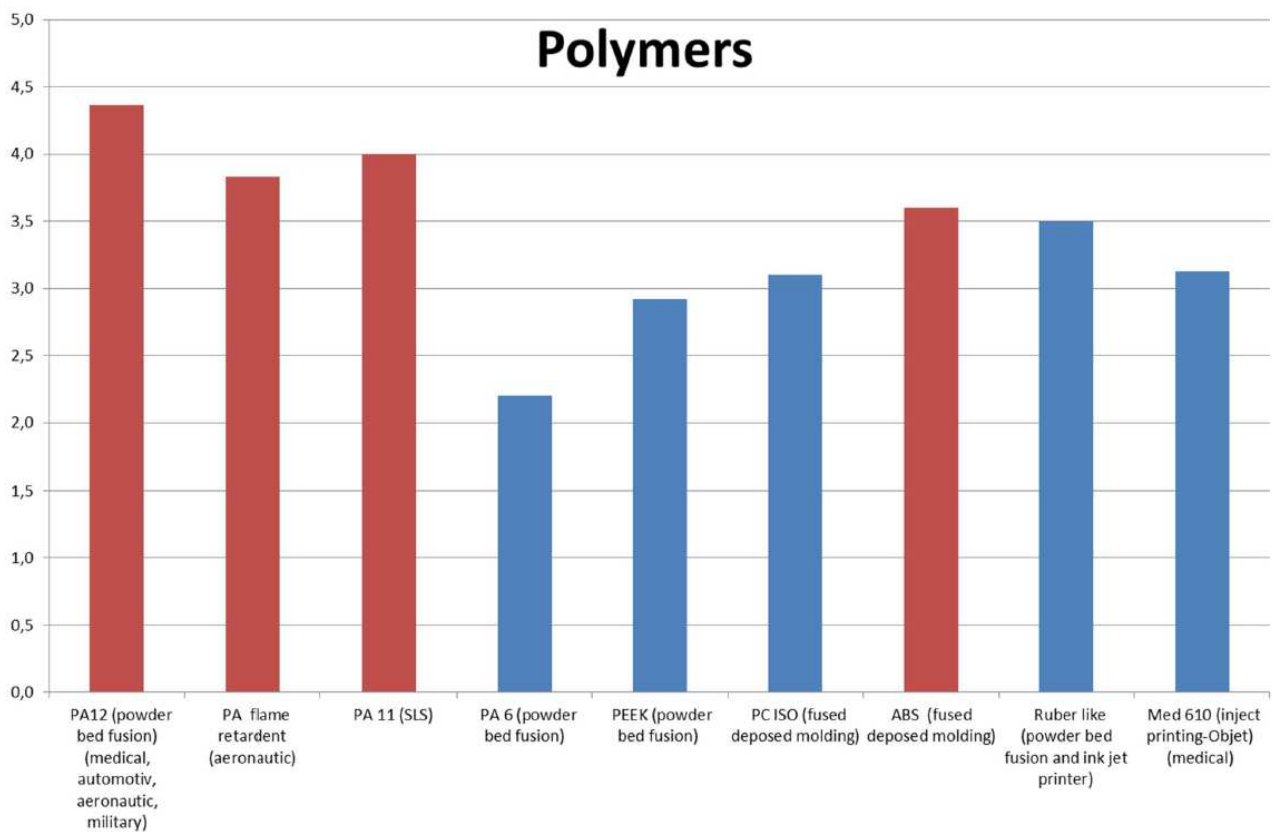


Ilustración 4. Asuntos de primordial estandarización en polímeros (cortesía SASAM).

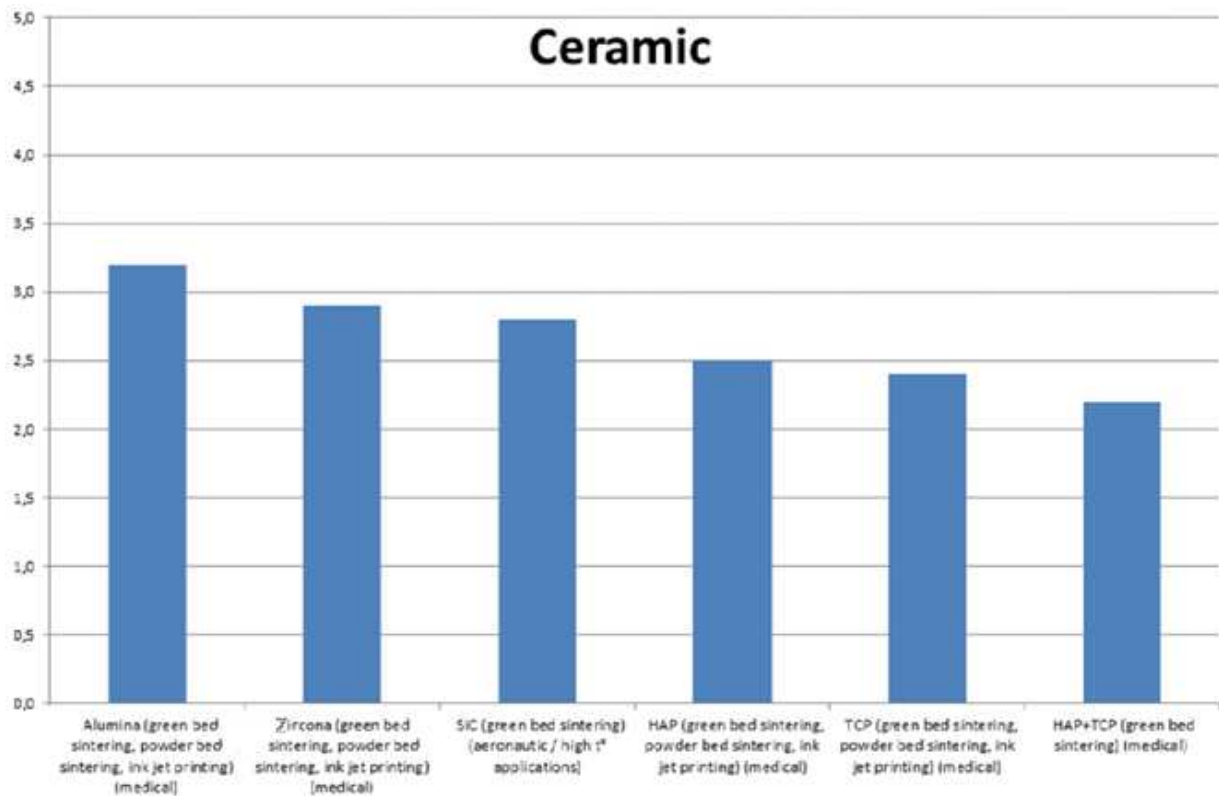


Ilustración 5. Asuntos de primordial estandarización en cerámicos (cortesía SASAM).

Y por último, otros aspectos que no tienen que ver con los expuestos en las anteriores gráficas:

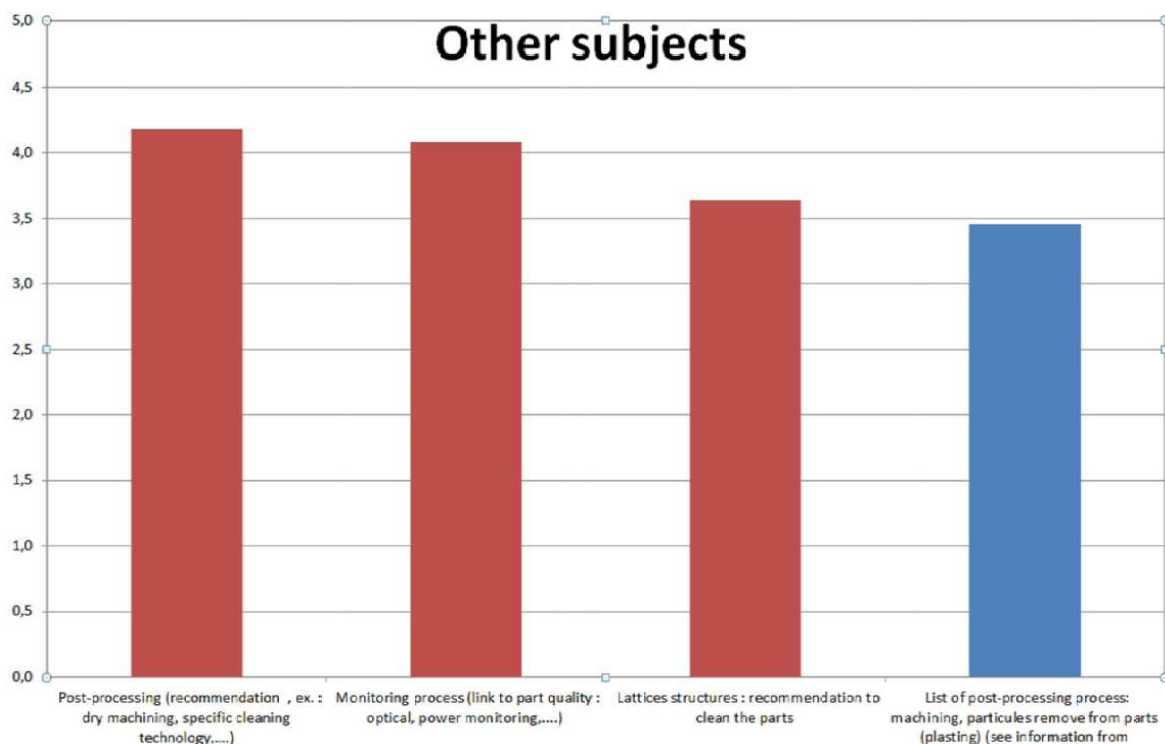


Ilustración 6. Otros asuntos a estandarizar (cortesía SASAM).

En la tercera reunión que SASAM organizó en 2013, esta mostró su principal interés por la industria aeronáutica preguntando por los requisitos de estandarización para tomar nota para la realización de una en el caso de que surgiera una necesidad urgente de normalización. Para ello, asistió Scott Johnston, miembro de *Boeing Research & Technology* en *Direct Digital Manufacturing* que dejó patente dicha necesidad en esta tecnología y dio la visión que la empresa americana tiene sobre la necesidad de cooperación conjugada en el desarrollo normativo entre las distintas organizaciones de normalización (ASTM, ISO, VDI, etc.) puesto que la falta de regulación dificulta la implementación generalizada de las tecnologías de fabricación aditiva como técnica de fabricación usual.

De los pasos anteriores se obtuvieron varias hojas de rutas que fueron analizadas de forma profunda considerando los aspectos más relevantes. Estas, junto con los requerimientos y necesidades en normalización, se han conjugado y trasladado a una única Hoja de Ruta (mapa tecnológico del proyecto), ya disponible:

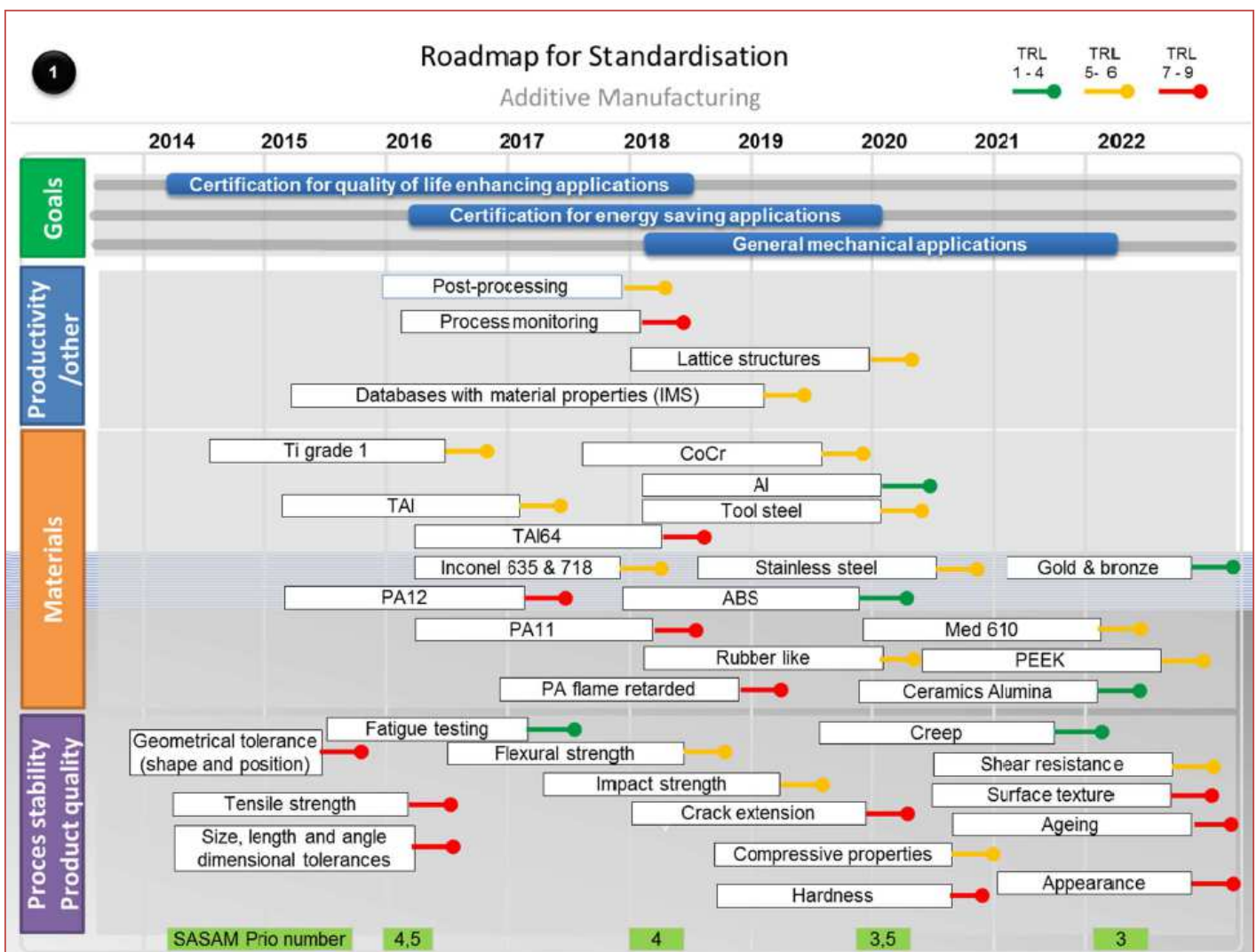


Ilustración 7. Hoja de Ruta del proyecto SASAM para la estandarización de la FA (cortesía SASAM).

Esta, junto con información sobre otros planes de trabajo relacionados con ella, son documentos abiertos que se muestran cada año para ser públicamente consensuados en los distintos eventos organizados por el consorcio para obtener una retroalimentación (lo ya mencionado que ha hecho *Boeing*).

La *European Standards Organization* (CEN) apoya activamente este proyecto con más reuniones donde los interesados discuten sus necesidades en estandarización de la FA. Actualmente no existe ningún CEN/TC sobre la fabricación aditiva. Si se requiere, el proyecto SASAM será evaluado.

Actualmente, este proyecto trata dos grupos importantes a desarrollar: área general y técnica. La general cuenta con formación y educación, estandarización y certificación, medioambiente, definición de la industria, responsabilidad y otros. La técnica cuenta con terminología, diseño, ensayos, procesos (calidad, productividad y estabilidad), materiales, productos (calidad e información), coste y el procesamiento de la información. También, se le está dando una gran prioridad de estandarización al proceso híbrido (una combinación de la FA y los métodos convencionales para obtener unos resultados mucho mejores) y a la integración de la fabricación aditiva a las líneas de producción puesto que es lo que apunta a tener mayor potencial en la industria aeroespacial. Todo esto se detalla a continuación:

Tabla 1. Tópicos generales y retos principales de ellos (cortesía SASAM)

Tópicos generales	Retos principales
Formación y educación	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar módulos de formación específicos para el diseño/modelado, procesos, materiales y aplicaciones. • Programas de extensión no técnicas de gestión y nuevos modelos de negocio para personal de negocios, de logística y de <i>lean manufacturing</i>. • Cursos en universidades y escuelas técnicas sobre materiales a distintos niveles de planes de estudio. • Eventos basados en casos específicos industriales en estudio, tecnologías de transferencia de apoyo y asistencia a la cadena de suministros. • Programas de certificación por organismos profesionales para profesionales de la industria. Más recursos educativos dedicados a incrementar el conocimiento de las tecnologías de FA, sus materiales y sus aplicaciones.

<p>Medioambiente</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar las fuentes de calor utilizados (por ejemplo, láseres eléctricos más eficientes). • Mejorar la productividad de los procesos para reducir el uso de recursos incluyendo las pérdidas en proceso. • Validación y estandarización del reciclaje lote a lote de materiales. • Desarrollar estrategias para el reciclaje de material después de que las piezas hayan terminado su vida de uso (por ejemplo, la fusión de las piezas utilizadas, el seguimiento y control de la química de los materiales y la atomización del material para crear materia prima de nuevo para los sistemas de FA).
<p>Estandarización y certificación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar procesos para incrementar la certificación de la FA avanzando en la inspección durante la fabricación y en las técnicas de control de calidad. • Gran compromiso de la industria con los ISO/TC261, CEN y ASTM F42 trabajando en grupos sobre el desarrollo de los estándares. • Desarrollar metodologías para prevenir o corregir defectos en productos. • ISO y ASTM han identificado como una prioridad los siguientes temas: métodos de calificación y certificación, diseño de directrices, métodos de prueba para las características de las materias primas, directrices de reciclado de materiales, protocolos estándar para el test <i>round robin</i> (es un test que se basa en medidas, análisis y experimentos desarrollados por participantes independientes. Básicamente es usar el mismo método pero con diferentes equipos o medios. El propósito es determinar la repetición de un proceso o test y la verificación de un nuevo método de análisis), medios para los test de estandarización, los requisitos los productos de la FA, la armonización de la terminología existente de estandarización ISO / ASTM y las pruebas en las piezas acabadas.

Definición de la industria	<ul style="list-style-type: none"> • Los requisitos tecnológicos y de investigación necesitan ser categorizados como para adaptarse a la amplia gama de tecnologías de FA, en especial para la normalización, la responsabilidad y la propiedad intelectual. • Un grupo consultivo del sector que se centre en las cadenas de suministro de la FA y las áreas comunes de las capacidades para Europa.
Responsabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar nuevos modelos de negocio que indiquen normas y directrices claras en el suministro de los componentes de FA para no solo asegurar la seguridad de ellos, sino también la responsabilidad en caso de fallo o daños.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • La colaboración mundial en el área de la fabricación aditiva sería beneficiosa particularmente entre la UE y EEUU. • Identificación de aplicaciones y trabajos con los usuarios finales para entender el modelo de negocio para el uso de la FA sobre otras rutas de fabricación. • Mecanismos para llevar un producto a producción, es decir, pasarlos de TRL4 a TRL7-9 por ejemplo (<i>Ilustración 7</i>). • Desarrollo de la cadena de suministros, desde el suministro de materiales a sistemas fiables de post-procesado. • Más atención a la propuesta de valor para la fabricación aditiva, por ejemplo, la información digital.

Tabla 2. Tópicos técnicos y retos principales de ellos (cortesía SASAM)

Tópicos técnicos	Retos principales
Productividad	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar la velocidad de construcción a través de nuevos enfoques para la deposición o las fuentes de energía. • Apoyar un mayor volumen de producción a través de lotes consistentes y metodologías para el suministro de materiales. • Reducir el tiempo de creación de cada capa, el tiempo total entre capa y capa

	<p>y el tiempo de puesta en marcha y parada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar metodologías para la medición de los productos de FA.
Estabilidad del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la capacidad de transformación, la calidad y el rendimiento del material. • Aumentar el control de las tolerancias del proceso. • Mejorar el acabado superficial de las piezas procesadas. • Mejorar el control y el monitoreo de los procesos. • Seguir desarrollando láseres con mayor eficiencia y control. • Reducir las tensiones residuales en productos metálicos. • Desarrollar metodologías para el procesamiento Right-first-time (bien a la primera). • Desarrollar herramientas para una mejor gestión de la temperatura durante el procesamiento. • Mejorar la estabilidad geométrica. • Analizar el consumo de energía y el desarrollo de metodologías para reducirlo. • Desarrollar la fabricación de múltiples materiales para las tecnologías de FA. • Aumentar la utilización de software.
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar el rendimiento, la capacidad ante carga estática y ante fatiga de los materiales empleados en la FA para permitir un nivel del comportamiento demostrable similar o superior a los materiales de fundición y de forja. • Capacidad de intercambiar los parámetros de los proceso entre las distintas máquinas de FA. • Identificación de nuevos polímeros semi-cristalinos y amorfos adaptados a los diferentes mecanismos de AM. • Materiales adaptados para la fabricación aditiva. • Desarrollar la consistencia y repetición de los materiales mediante la fijación de los parámetros del proceso. • Analizar las propiedades de los diferentes materiales y multimateriales

	<p>utilizando técnicas de FA, incluyendo su validación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar y desarrollar nuevos materiales para los procesos de fabricación aditiva: biomateriales, superconductores y nuevos materiales magnéticos, aleaciones metálicas de alto rendimiento, metales amorfos, cerámicos compuestos de ultra alta temperatura, nuevo nano-partículas y materiales nano-fibra.
Calidad de los procesos y los productos	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar metodologías de seguimiento y control y sistemas durante el proceso incluyendo técnicas para reducir los requisitos para las actividades de post-procesamiento (es decir, que se hagan las menores posibles). • Desarrollar un flujo de trabajo ágil para la fabricación híbrida, combinando los procesos de fabricación aditiva para satisfacer los requerimientos geométricos y de acabado. • Desarrollar las características de los materiales y los mecanismos por los cuales los materiales se procesan para mejorar la calidad de las superficies. • Investigar sensores in situ para proporcionar una evaluación no destructiva y permitir la detección precoz de fallos/defectos. • Desarrollar herramientas de diseño y metodologías para potenciar el diseño de los ingenieros para obtener las ventajas de la FA. • Aumentar los conocimientos sobre la manipulación de la potencia del haz de láser/electrones y sus interacciones con el material y los cambios asociados en particular para la producción de partes más pequeñas para aumentar de acabado superficial.
Información de los productos	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar bases de datos para permitir un catálogo de información del rendimiento de materiales para aplicaciones particulares y procesos. • Desarrollar un portal 'online' con información de materiales para la comparación y el intercambio de ellos.

<p>Costes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir los desechos y mejorar la repetición. • Que se den cambios rápidos de tendencia en el manejo de materiales y componentes. • Procesado de materiales facilitados mediante las nuevas fuentes de producción de polvo o las nuevas y mejoradas metodologías para la integración de la cadena de suministros. • Identificación de nuevas oportunidades en la cadena de suministros y el establecimiento de las ya existentes para productos potenciales. • Mejorar la utilización del material.
----------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

La mayoría de las empresas que participan tienen referencia por la organización de estandarización ISO en lugar de la ASTM o VDI, CEN... Aún así se busca la cooperación entre las dos grandes, la europea y la americana para conseguir una normalización internacional.

Gracias a esta estandarización se podrá obtener la necesaria certificación y aprobación para aplicaciones aeronáuticas dando lugar a un incremento de los negocios de AM y a un gran beneficio. Esto será una buena oportunidad para la innovación y el crecimiento económico de la Unión Europea (el centro de masas de este proyecto está ahí), que mejorará la competitividad y creará empleo.

Las empresas interesadas buscan de este proyecto los siguientes puntos:

- Un solo set de estándares de FA para ser usados globalmente.
- Trabajar sobre una sola Hoja de Ruta.
- Elaborar, usar y modificar constantemente los estándares para crecer la eficiencia y la efectividad de la fabricación aditiva.
- Que la ISO TC261 y la ASTM F42 empiecen a trabajar juntos y en la misma dirección para desarrollar los estándares.

De este último aspecto y como ya se ha dicho, SASAM está haciendo lo posible para que los estándares ISO y ASTM trabajen en equipo con la ayuda de los expertos de la UE. Para ello se realizó el Acuerdo de Viena entre estas dos compañías para obtener una estandarización tanto europea como internacional en una única normalización siguiendo una única Hoja de Ruta. Esta colaboración incluye información compartida por ambas organizaciones, definiéndose una estructura de múltiples niveles y jerarquía basada en tres niveles en los que se está trabajando:

- Estándares generales: conceptos específicos generales y requerimientos comunes.
- Estándares categorizados: requerimientos específicos para cada proceso y categorización de materiales.
- Estándares especializados: requerimientos específicos de cada material, proceso y aplicación.

En la siguiente figura se puede observar dicha estructura común para el desarrollo de los estándares:

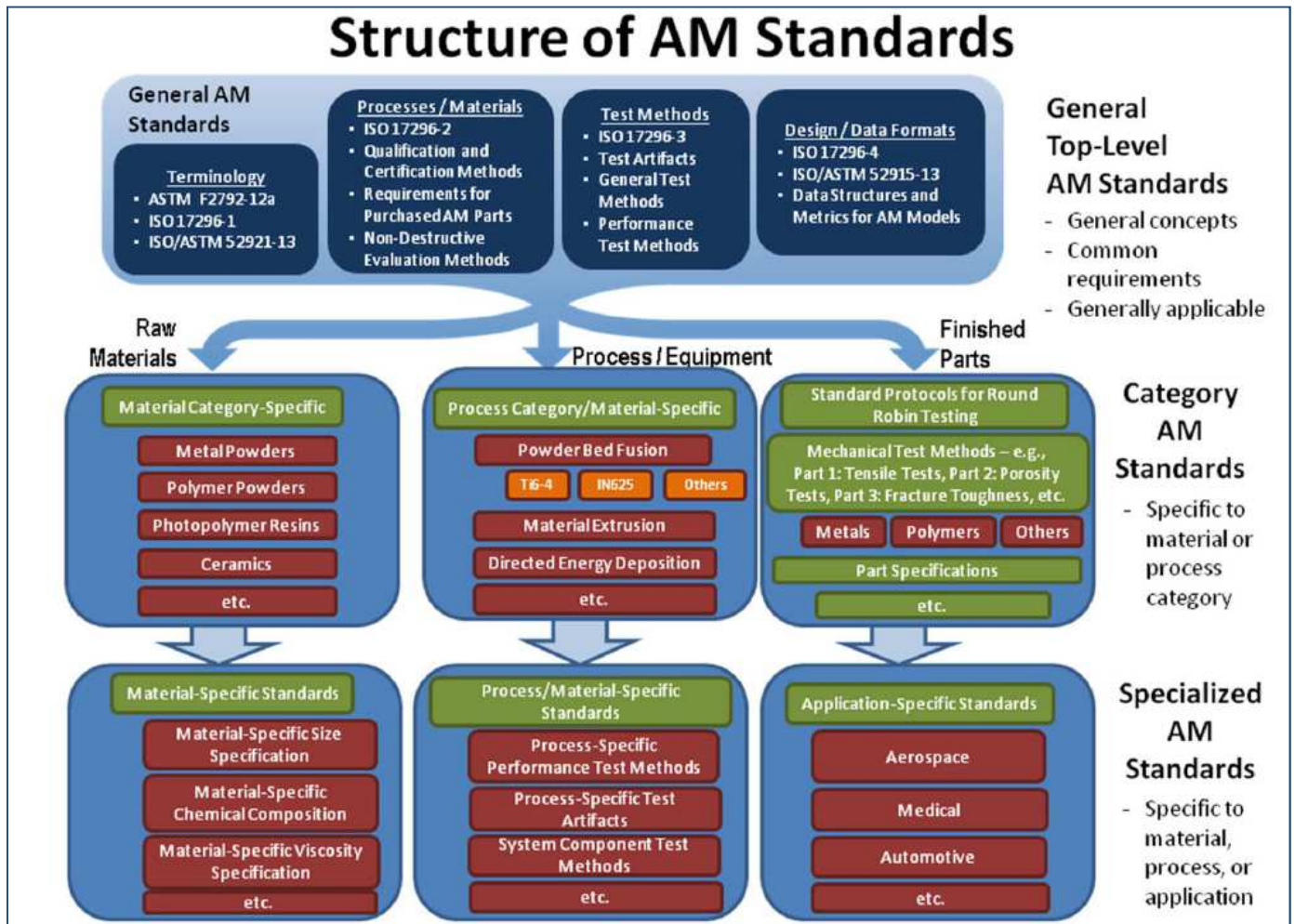


Ilustración 8. Guía de la estructura jerárquica de los estándares (cortesía SASAM).

Se ha establecido el uso de varias directrices de manera que se facilite el uso de esta estructura que:

- Pretende ser una guía. Pueden existir excepciones o circunstancias específicas que no coinciden con ella.
- El color de las viñetas son indicaciones solo para demostrar los tipos de estándares que pueden ser necesarios para la parte jerárquica. Las específicas están aún por determinar.

- Existe una jerarquía de estandarización para reducir la duplicación (trabajar sobre lo ya hecho) dentro de los estándares de la FA:
 1. Relación “primaria-secundaria” entre los niveles.
 2. Las características pasan del nivel primario al secundario.
 3. Los estándares de nivel secundario pueden aumentar o modificar sus características cuando se requiera para usos específicos.
- Para saber en qué nivel jerárquico se tiene que aportar la información, hay que responder si el estándar desarrollado va a especificar o evaluar las materias primas, el proceso, los equipos o los elementos fabricados.

En el proyecto, la ISO TC261 y el ASTM F42 van a desarrollar la estandarización de la siguiente manera:

- Métodos de calificación y certificación.
- Pautas para el diseño (será convocado por ASTM).
- Métodos de ensayo de las propiedades de la materia prima (será convocado por ASTM).
- Métodos de ensayo de las propiedades mecánicas de las piezas finalizadas (será convocado por ASTM).
- Reciclaje de material (directrices).
- Protocolo de test, que permite la comparación entre procesos, materiales y máquinas.
- Requisitos (será convocado por ISO)
- Armonización de lo desarrollado por ISO y ASTM (será convocado por ISO).

Las que van a ser convocadas por una de las organizaciones tiene prioridad, de tal forma que se reduzca el riesgo de duplicación del trabajo.

Este trabajo comenzó en verano del año 2013 y está continuando durante el actual (2014).

Por ahora, uno de sus frutos es la definición de la fabricación aditiva:

“Es un proceso que junta material para realizar un objeto 3D a partir de un modelo virtual, normalmente capa por capa, de manera opuesta a los métodos sustractivos de fabricación.”

ISO 17296-1 & ASTM 2792-12

Y uno de los grandes problemas que se ha encontrado es que los productos producidos pueden mostrar diferentes valores en las propiedades dependiendo de los parámetros usados e incluso de la máquina utilizada debido a la naturaleza de este proceso. Esto hace que la evaluación y calidad de los productos sea complicada.

Como gran avance aeronáutico es que se está consiguiendo un progreso más rápido hacia la estandarización y tiene un gran alcance ya que, por ejemplo, hay 30 componentes fabricados con sinterizado láser instalados en el Boeing 787 y el número de estos está creciendo de forma exponencial con el tiempo. Según estimaciones de la empresa europea Airbus, un avión producido totalmente con fabricación aditiva puede suponer una reducción de peso del 30% y ser un 60% más efectivo hablando de costes que con métodos de fabricación convencionales (aunque se tiene que recalcar la idea de que la fabricación aditiva no viene a sustituir lo que hay ahora, sino a complementarla).

Como complementación, se agrega un listado con los estándares que se están desarrollando en el anexo 1 [3].

De dichos estándares, aquellos que afectan a la industria aeronáutica son:

- ISO/TC 61, plásticos. Es un primer contacto.
- ISO/TC 119, polvo metálico. Es también un primer contacto con el proceso de fabricación del polvo metálico con varios materiales.
- ISO/TC 172/SC 9, sistemas electro-ópticos. Primer contacto con la tecnología láser.
- ISO/TC 184/SC 4, información industrial. Es un primer contacto con el intercambio de datos entre los sistemas CAD y CAM.
- CEN/TC 121: se realiza un estudio de fundido por haz de láser y electrones.
- CEN/TC 138, ensayos no destructivos. Es también un primer contacto.

Además, el proyecto se apoya en documentos relevantes para la estandarización. Un ejemplo es el desarrollado por el *Air Force Research Laboratory* (EEUU) de título *Additive Manufacturing of Aerospace Alloys for Aircraft Structures*.

Otros proyectos relevantes, inclusive SASAM, son:

- 3D-HiPMAS (2012-2015): impresión 3D de alta precisión para plásticos en aplicaciones de comunicación.
- AEROBEAM (2012-2013): uso del arco eléctrico en impresión 3D para las propiedades mecánicas de la aleación de Ti6Al4V en aeronáutica.
- AMAZE (2013-2017): mejorar la eficiencia en la producción de metales de altas propiedades metálicas con desechos nulos. Además, intenta producir de forma rápida componentes grandes metálicos libre de defectos. Intenta disminuir los costes de producción en un 50% en comparación con los métodos convencionales.

- AMCOR (2012-2015): estudio de la corrosión en la técnica de deposición láser.
- CompoLight (2008-2011): dedicada al diseño y la producción de partes metálicas que tienen que aliviar peso.
- HYPROLINE (2012-2015): para conseguir una alta performance en la producción de pequeñas series de componentes metálicos reduciendo el *time-to-market* y el número de rechazos (más precisión en las piezas y la forma de producirlas más verde
- IMPALA (2008-2012): se encargó de demostrar los avances producidos con respecto métodos de fabricación convencional en la fabricación de componentes de turbinas.
- Mansys (2013–2016): sobre decisiones en el método de fabricación aditiva. Combina múltiples formas de hacerlo (láser y haz de electrones), diseño, post-procesado (mecanizado, acabado y tratamientos térmicos) y técnicas de escaneo 3D, automatización, personalización y gestión propia, reduciendo el material usado y los desechos.
- MERLIN (2011-2014): desarrollo de componentes para motores aeronáuticos usando sinterizado selectivo por láser reduciendo el impacto medioambiental.
- SASAM – 2012-2014: da una acción de apoyo para la estandarización de la fabricación aeronáutica.

Para recordar la idea, lo que se busca conseguir con la estandarización es:

- Promover la calidad de los productos procesos y servicios y sus características para satisfacer las necesidades del mercado.
- Promover mejoras en la calidad de vida, seguridad, salud y protección del medioambiente.
- Promover el uso económico de materiales, energía y personas en la producción e intercambio de bienes.
- Promover la clara y no ambigua comunicación entre las partes interesadas en una forma adecuada para la referencia o cita en los documentos jurídicamente vinculantes.
- Promover el mercado internacional para retirar las barreras causadas por las diferentes naciones.
- Promover la eficiencia industrial.

Por último como dato económico, los plásticos son el líder de este mercado con alrededor de 30 000 máquinas dedicadas. El uso de polvo metálico ha crecido bastante, sobre unas 500 máquinas vendidas hasta 2012 según Wohlers, aunque las ventas de ellas se han disparado en estos últimos años.

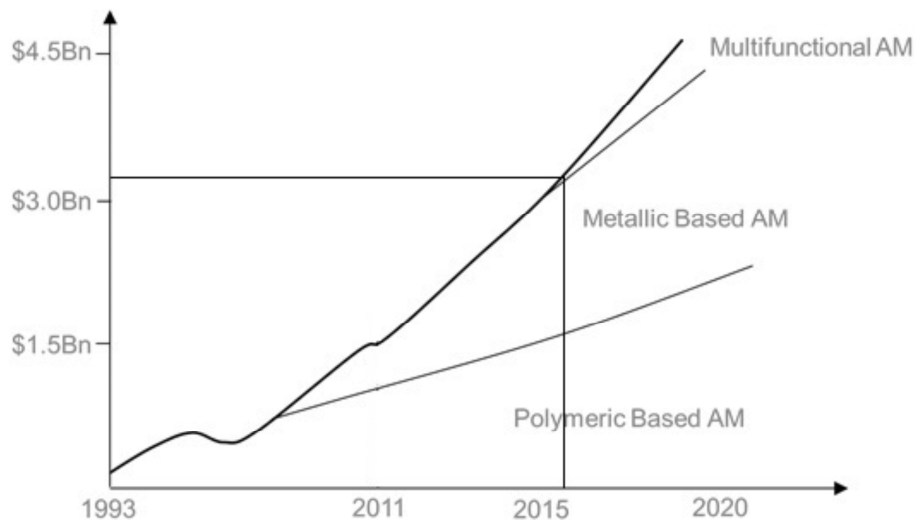


Ilustración 9. Simplificación actual del Mercado de fabricación aditiva incluyendo el material usado (cortesía TWI)

Como se puede ver todavía queda muchísimo trabajo pero las puertas que abrirá cambiarán la forma de fabricación mundial. Como dato aportado en ponencias dadas por Airbus a su personal [4], la empresa europea espera que en 2016 se empiecen a introducir piezas realizadas con procesos aditivos en sus aviones en elementos no estructurales y luego probarlas poco a poco sustituyendo a las piezas de mayor sollicitación.

Por último, para conocer el estado actualizado de esta técnica de fabricación, todos los años se publica el Wohlers Report, que trata sobre la fabricación aditiva en todos los sectores, además de dar una extensa explicación sobre técnicas, datos de máquinas, información de las empresas dedicadas, información sobre materiales usados y descubiertos, datos económicos y de desarrollo de este método en los diferentes países... La de este año (2014) está marcada en la referencia [24]. A continuación, el enlace a su contenido: <http://wohlersassociates.com/2014contents.htm>.

Capítulo 2.

Etapas del proceso de fabricación aditiva

Como se ha comentado en la introducción, aunque existe gran variedad de procesos diferentes (que se aplican en la última etapa de “ejecución”/“impresión”/“fabricación”) en la fabricación aditiva, todos ellos siguen un mismo patrón en cuanto a sus fases previas [2, 4.1, 5, 6, 7, 8, 9, 11]. En una visión rápida se podría dividir el proceso en dos fases fijas y una según el caso de producción:

1. Fase de digitalización: correspondiente a las operaciones realizadas con el fin de conseguir el modelo STL para que se pueda proceder a la comprensión por parte de la máquina de fabricación aditiva de todo el proceso de creación de la pieza en modelo CAD 3D. Es decir, exportar la geometría CAD 3D a formato STL. También se agrupan aquí las tareas de ingeniería inversa (llevar la pieza de forma física a digital, es decir, un escaneado) y métodos topológicos de optimización del tamaño y forma de componentes si se ha requerido (el segundo, cada vez más, de obligada realización para sacar partido a las ventajas de la FA).
2. Fase de fabricación: se correspondería con el proceso en el que la máquina está haciendo físicamente las capas del producto. También se considera parte de esta fase las labores de emplazamiento de la pieza (colocar la pieza de la mejor forma para que el desperdicio sea menor) y, si procede, concepción y fabricación de soportes. Esta fase puede ser directamente la última si la pieza no precisa de una retirada de soportes o un acabado superficial mejor al ofrecido por la máquina.
3. Fase de acabado: se agrupan aquí los procesos de finalización de la pieza que incluyen tanto labores por exigencias de acabado superficial como la extracción de los soportes. En algunas ocasiones se realizan incluso vaciados y rellenados con un material o tratamientos térmicos y

operaciones para mejorar las propiedades mecánicas (en los puntos posteriores se explicarán).

A continuación se exponen los puntos de forma más detallada:

- ❖ Fase de concepción. Este apartado incluye el desarrollo de un modelo de CAD en tres dimensiones. Este modelo 3D es la figura final y se genera con un software como puede ser Rhinoceros, AutoCAD, Catia, etc. Para depurar este diseño debido a las facilidades que ofrece la fabricación aditiva, se puede usar un programa de optimización del tamaño y de la forma originando la imagen virtual que se exporta a los programas anteriores. Cuanto más trabajado esté un diseño, mejor cumplirá con su función y mayor será su valor añadido. Además, aquellos más trabajados, complejos y optimizados tendrán un coste de producción mucho menor. También se puede obtener el modelo 3D final por ingeniería inversa: se parte de una pieza física y se le hace un escaneado tridimensional que se transforma en una nube de puntos y finalmente en un modelo CAD. Sobre todo esto:
 - Los programas mencionados que ayudan a obtener el mejor diseño son herramientas de MEF de optimización topológica que permiten la obtención de geometrías cercanas a la final diseñadas a partir de cargas y condiciones de contorno. Es una aproximación matemática que optimiza la distribución del material en un espacio de diseño para unas determinadas solicitaciones de manera que el diseño resultante cumpla con un conjunto de objetivos prefijados. Usando la optimización topológica los ingenieros pueden encontrar el mejor concepto de diseño que cumple con los requerimientos. La optimización topológica es usada en un proceso de diseño a nivel de concepto para llegar a una propuesta de forma y tamaño de la pieza. Este diseño conceptual o preforma es poco a poco refinado en detalle para asegurar su funcionamiento mediante su uso combinado con programas especializados de cálculo de tensiones, deformaciones y modos de vibración. Esto permite ahorrar tiempo en las iteraciones de diseño y por tanto reduce la etapa de desarrollo y diseño del producto y sus costes asociados, al mismo tiempo que mejora la eficiencia y rendimiento del producto.
 - Hoy en día se está desarrollando un tipo de software como el comentado en el párrafo anterior que tiene sumado un programa de cálculo de estructuras de tal forma que se encuentra la pieza de forma y tamaño óptimo con menos iteraciones y el único paso posterior es refinar el diseño propuesto por el programa, es decir, queda a criterio del ingeniero la forma final de este. Un ejemplo de empresas que trabajan en esto son Airbus o CATEC.

- Con estas simulaciones es posible sacar el máximo partido a la FA al optimizar la cantidad de material de una pieza, dadas unas cargas y condiciones de contorno, mediante iteraciones y variaciones de la geometría inicial: el diseñador añade y resta material, eligiendo constantemente cual es la mejor opción y trabajando sobre ella. De esta forma se orienta al ingeniero indicándole qué regiones de la pieza trabajan menos que otras y por tanto reforzar aquellas que lo necesiten para soportar las condiciones de funcionamiento y liberar las demás modificando la cantidad de material consiguiendo al final usar el mínimo en la producción y obteniendo productos de mayor valor añadido. Así, sea cual sea la forma, con la FA se puede obtener.

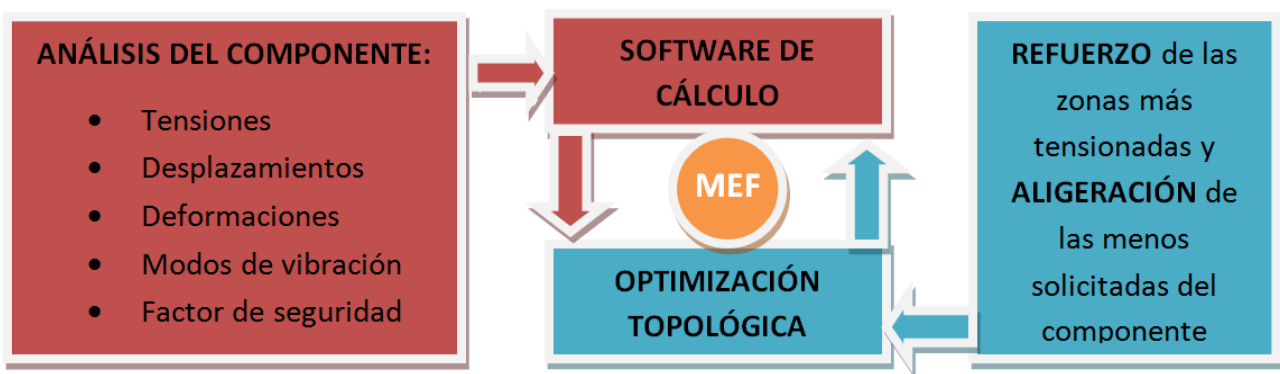


Ilustración 10. Ciclo de diseño de los componentes.

- ❖ Fase de transformación: se realiza un mallado del modelo CAD formado únicamente por triángulos. Este proceso hace que la información en un principio ajustada a tangencias, radios, límites... se transforme en una información matemática que sólo contempla esos triángulos interrelacionados y la posición de sus vértices (cualquier plano se puede definir por tres puntos, de ahí el modelo triangular). Este formato se conoce como el ya mencionado STL (proviene de la abreviatura de *Stereolithography*, estereolitografía, primer método de fabricación aditiva y considerado precursor del resto) y puede trabajar bajo un formato binario o ASCII. El código ASCII tiene el inconveniente de que ocupa un mayor espacio. En los formatos STL también es posible incluir la información de color (para el que sea el caso) e incluso, a partir de Julio de 2009, el organismo ASTM puso en marcha la realización de un nuevo formato de archivo estándar para la fabricación aditiva, el STL 2.0., que ya está en marcha y evita problemas de precisión en la representación de superficies curvadas. Además de lo anterior, posibilita la texturización de superficies, verifica la viabilidad del proceso e incluye información asociada al modelo. Hoy en día, a pesar de la procedencia inicial del

nombre de este tipo de archivos, al formato STL se le llama *Standard Triangulation Language*. Detallando las ideas expuestas:

- Según la cantidad de triángulos que se generen en el archivo STL, el tamaño del fichero se amplía considerablemente. Debido a ello puede ser miles de veces mayor que el CAD original. Esto está directamente relacionada con la precisión que se requiera: mayor precisión, mayor número de triángulos y, en definitiva, un mayor tamaño del archivo. También está relacionado, obviamente, con la complejidad presente en el modelo CAD. Es una tarea imprescindible comprobar y corregir la malla de triángulos para evitar posibles errores en la fabricación.
- Un punto a tener en cuenta al trabajar con este tipo de formatos es que la modificación de parámetros es bastante complicada ya que toda la información geométrica se ha perdido para cambiarla por información matemática, para ello es preferible regresar al fichero CAD 3D. Actualmente hay software capacitado para realizar y modificar diseños de una forma parecida a la que se encontraría en un software de CAD 3D.
- Por último se define la posición inferior de la pieza.

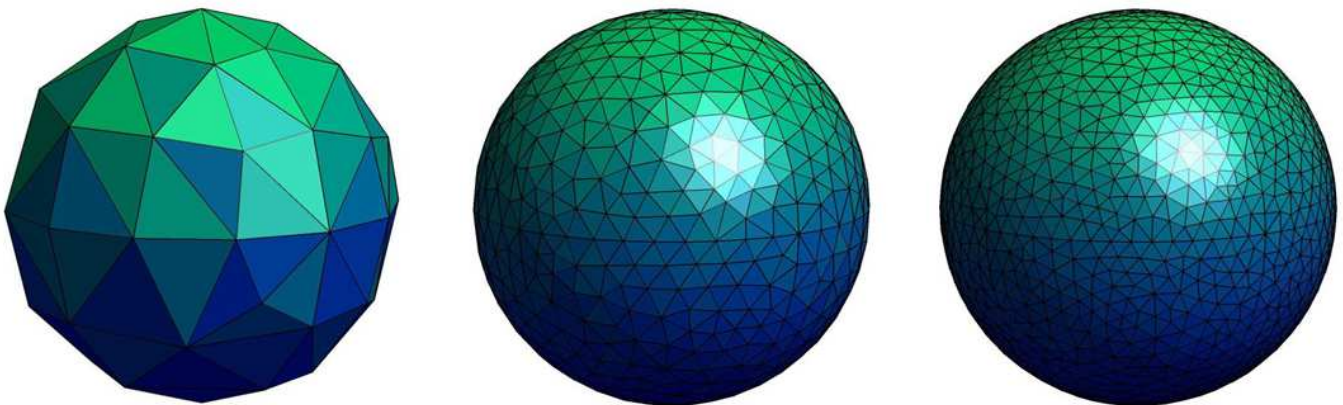


Ilustración 11. Malla de una esfera de menor a mayor detalle según de izquierda a derecha, lo que implica de menos más tamaño respectivamente del archivo STL.

- ❖ A continuación, se sitúa virtualmente el objeto en un espacio réplica del volumen de trabajo que tiene la máquina de AM, hasta orientarla correctamente (para usar los mínimos soportes posibles y la fabricación sea la óptima). Cada tecnología de fabricación aditiva tiene su plataforma específica. Los modelos STL son colocados de la forma más favorable de acuerdo con las capacidades y limitaciones de cada proceso. A continuación, debido a que hay zonas de la pieza que no se pueden fabricar de forma aditiva, se puede proceder al posicionamiento de estructuras de soporte para que el material no solidifique en el aire. Esto soportes son columnas finas o entramados que sustentan zonas de la pieza demasiado esbeltas, voladizos, o superficies con ángulos de

fabricación normalmente menores a 45° respecto a la horizontal. Estos se fabrican a la vez que el componente y suelen ser del mismo material. Esta labor es uno de los problemas que tienen alguno de los procesos de AM. Generalmente se dispone de software dedicado al diseño de estos soportes de forma automática según la tecnología, los cuales se integran en el fichero STL original para poder proceder con el proceso de fabricación.

- ❖ Terminado el paso anterior, hay que “capear” toda la pieza a partir del modelo STL. Con esto se obtienen las capas tanto de la pieza como de los soportes además de proporcionar una orientación adecuada para la fabricación. Estas secciones se realizan con un espesor de capa determinado según la precisión que se necesite. Este rebanado o *slicing* se hace en la totalidad de la pieza desde la posición inferior (definida anteriormente).
 - Esta tarea también es desarrollada por determinados software concebidos para ello. Aquí se fundamentan los procesos de fabricación aditiva: se consigue simplificar una geometría 3D en un apilamiento de geometrías 2D, aunque obviamente la capa tiene un cierto grosor que se considera despreciable.
 - Como anotación se debe aclarar que en el transcurso de esta operación se pierde cierta información asociada a la geometría debido al grosor de capa. El borde de cada una es vertical y por tanto cualquier geometría que no sea completamente vertical respecto al corte no se reproducirá con su forma original sino que lo hará mediante un escalonamiento. Este será más notable cuanto menos inclinación respecto a la horizontal presente el plano.
 - De forma estándar existen varias resoluciones disponibles en cada tecnología. Estas se pueden englobar en:
 - Baja resolución: ofrece una alta productividad con baja calidad de detalle y con un espesor de capa grande (resulta apreciable el efecto de escalonamiento).
 - Resolución estándar: buen compromiso entre productividad y nivel de detalle, con un espesor de capa intermedio.
 - Alta resolución: alto nivel de detalle pero con una productividad reducida. Los espesores en este caso son muy pequeños, con lo que para fabricar la pieza se tienen que depositar más capas, tardando más. No se aprecia el efecto de escalonamiento.
 - A esta etapa de preparación se le denomina “capeado” y el formato de fichero digital obtenido tiene diferentes extensiones (SLC, CLS, ABF, etc.) dependiendo de la tecnología y su correspondiente patente.

- ❖ Por último, el fichero anterior es mandado al sistema ALM y este imprime la pieza. Como se ha mencionado reiteradas veces, este proceso se realiza de diferentes formas según la tecnología aditiva elegida, pero todas ellas siguen el mismo proceso a la hora de fabricar: se crea la capa y a continuación se adhiere a ella la inmediatamente superior, una tras otra, hasta que el objeto esté completo. De forma más extendida:
 - El material es repartido sobre la bandeja de fabricación formando una capa del mismo espesor en el que se ha dividido virtualmente el fichero 3D o se puede aplicar directamente sobre el haz de energía. El formato de la materia prima puede ser líquido, en el caso de tecnologías que procesan polímeros ó polvo esférico para las tecnologías que procesan metales. Además, como se ha visto, existen tecnologías que procesan polímeros partiendo de polvo.
 - Una fuente de energía (haz laser, haz de electrones, luz...) procesa selectivamente el material de la capa.
 - Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha completado. Esto se consigue repartiendo una nueva capa de material que se vuelve a procesar sobre la anteriormente creada. La fuente de energía introduce la suficiente como para procesar la capa actual y unirla a las anteriores. Hay que añadir que en cada capa la maquina procesa una sección de la pieza diferente siguiendo el patrón del fichero 3D dividido en capas y cohesionando la nueva capa con las anteriores.
- ❖ Tras este proceso se retira la pieza junto con los soportes fuera de la cuba de fabricación:
 - Se extrae el polvo de materia prima no usado (por la máquina y aquel que envuelve a la pieza que no ha sido procesado, reutilizable entre un 95% y 99%). Esto se hace según el método que se ha usado: en el caso de polvo se soplan con aire a presión o son chorreadas con arena o con el mismo material de partida, como ocurre con el titanio, para evitar la contaminación. Cuando se trata de resinas líquidas, estas se drenan y después se remueve lo sobrante con aire a presión.
 - Se retiran los soportes mediante procesos manuales con la ayuda de herramientas como pinzas, bisturís, tenazas, sierras, discos de corte.... En el caso de piezas metálicas se usan operaciones de mecanizado en las zonas donde se requiere más precisión, como planeado, taladros, roscados.... También se pueden realizar pulidos.
 - Por último se puede llevar a cabo un post-procesado donde se le dará el acabado superficial, el tratamiento térmico, el infiltrado de

material de aporte... según los requerimientos especificados por el cliente o uso final.

Además, hoy en día hay otra etapa que se ha explicado: la validación de los componentes para que se puedan usar (validación pieza a pieza, normalización y estandarización).

En el sector que nos atañe se ha comenzado hace un tiempo a usar la fabricación aditiva para la producción de productos finales. Para ello, se reconoció hace más de una década la necesidad de llegar a un consenso de estandarización de estas tecnologías en los ámbitos de terminología, ensayos e informes sobre propiedades de los materiales, guías específicas de aplicación, especificaciones de los procesos, etc.

Estas son las acciones que está llevando a cabo el proyecto SASAM, como se ha mencionado, haciendo que tanto ISO como ASTM trabajen juntas para obtener una estandarización reconocida internacionalmente.

Capítulo 3.

Fundamentos de las técnicas

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen una serie de etapas a seguir a la hora de usar la FA. Las primeras son “comunes”, se diferencian en el medio con el que se realicen, pero la final que da lugar a la pieza resultante cambia según el método de fabricación a emplear. Esto es debido al amplio abanico de medios de producción que usan el pensamiento aditivo para formar la pieza. En este capítulo se abordarán los más influyentes en la industria aeronáutica.

3.1. Clasificación y selección de la tecnología

Las tecnologías de fabricación aditiva no deben ser clasificadas en función de su aplicación puesto que con la misma tecnología podemos fabricar prototipos, productos y utillajes [2, 4.3, 8, 9]. Para hacerlo hay que tener en cuenta las características de los procesos para poder diferenciar los aspectos a catalogar bajo un mismo criterio. De esta forma existen numerosas maneras de catalogarlas, como por ejemplo, en función de la energía que procesa el material (haz láser, haz de electrones, máscara de luz...) o en función del espesor de capa y la resolución que puede alcanzar (baja, estándar o alta)...

La forma más usada de hacerlo es según la naturaleza de la materia prima que se deposita y cómo se lleva a cabo el aporte de material, es decir, si el proceso es para metales, polímeros o cerámicos con forma de polvo o varilla, en láminas o líquidos.

A esta clasificación se le suman otras dos que determinan la rapidez del proceso debido a la forma en que se deposita el material y cómo se produce el aporte de energía. En cuanto a la forma:

- En punto: se usa un sistema que aporta material punto a punto. El mecanismo que aporta el material se mueve gracias a un sistema de ejes (normalmente cinco grados de libertad: x, y, z y dos giros).
- En línea: se usa un sistema que aporta material en líneas o conjuntos de puntos alienados gracias a inyectores con múltiples canales. El aplicador realiza barridos a lo largo de la zona de trabajo depositando donde se requiere.
- En lecho: se usa un sistema que aporta el material en exceso. Se añade una cantidad igual al espesor de capa que rellena toda la superficie de trabajo y después se unen solamente las partículas de las posiciones requeridas. Estos sistemas disponen de un *coater* (un distribuidor del material) que es el encargado de aportar y alisar las capas.

Por otra parte, saber cómo se produce la consolidación de la pieza es muy importante porque afecta directamente a las características del componente como porosidad, resistencia... La clasificación es la siguiente:

- Sistemas 0D: la energía se centra en un único punto. De esta forma la consolidación depende de un solo punto que tienen que moverse por toda la superficie que está destinada a formar la pieza.
- Sistemas 1D: la energía se transmite en una línea que va variando su longitud según va haciendo el barrido.
- Sistemas 2D: se trata de la unión selectiva del material de una misma capa de una sola vez.

A continuación, la clasificación de los métodos que se aplican hoy en día en la industria que nos compete:

Tabla 3. Clasificación de los métodos que se usan hoy en día en la industria aeronáutica (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space)

Material	Tecnología	Base polvo	Base cable	Base líquido
Metales	Deposición directa de metal (DMD/LENS)	X En punto 0D		
	Fundido selectivo por láser (SLM/DMLS)	X En lecho 0D		
	Fundido por haz de electrones (EBM)	X En lecho 0D		

Polímeros	Estereolitografía (SLA)			X En lecho 0D
	Modelado por deposición fundida (FDM)		X En punto 0D	
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	X En lecho 0D		

A la hora de elegir un método de producción, para fabricar piezas metálicas en aeronáutica la industria se está decantando por el fundido selectivo por láser (SLM), ya que:

- Permite un amplio rango de materiales para fabricar componentes.
- El espesor de capa y rugosidad final son comparativamente mejores que las otras dos tecnologías. La técnica de fundido por haz de electrones (EBM) transfiere mucha más energía que un láser con lo que los acabados superficiales son peores y la deposición metálica directa (DMD) es menos eficaz a la hora de fabricar piezas completas en cuanto a material y tiempo empleado así como al diseño de soportes que si se realizase con SLM).

El método de deposición directa de metal se usa en el sector aeroespacial para aportar material en reparaciones. Ejemplos de su empleo son ejes desgastados, reparación de álabes de motor...

La técnica de fundido por haz de electrones necesita aun más estudio, aunque es la que más rápido está creciendo en menos tiempo.

En cuanto a la fabricación de materiales plásticos en la industria aeroespacial, se descarta el uso de la estereolitografía (SLA) debido a que solo se puede aplicar a resinas líquidas fotosensibles, lo que limita mucho el rango de aplicación. Esta técnica solo se deja para posibles desarrollos en el futuro. Por otra parte, tanto la sinterización selectiva por láser como el modelado por deposición fundida permiten un amplio abanico de materiales a usar y muy buenas tolerancias y dimensiones.

3.2. Para la fabricación de piezas metálicas

A continuación, los tres métodos usados para fabricar piezas metálicas en la industria aeronáutica. Con ellos se consiguen propiedades similares a las aleaciones que podemos encontrar en este sector. Fabricantes como EOS GmbH, ARCAM... son especialistas en esto y en su página web podemos encontrar información sobre las piezas aeroespaciales que fabrican.

3.2.1. Deposición directa de metal/Laser Engineered Net Shaping

Es un método de fabricación aditiva que consiste en la deposición y fundido de partículas metálicas (polvo) sobre una pieza ya existente o una plataforma [2, 4.3, 5, 6, 7, 12]. Una o varias boquillas inyectan el material sobre un haz de láser que transfiere la energía necesaria para su unión en un punto específico. Acto seguido, se solidifica la zona rápidamente. El proceso ocurre en una cámara cerrada con una atmósfera inerte o bajo la inyección de argón para evitar la contaminación de la pieza.

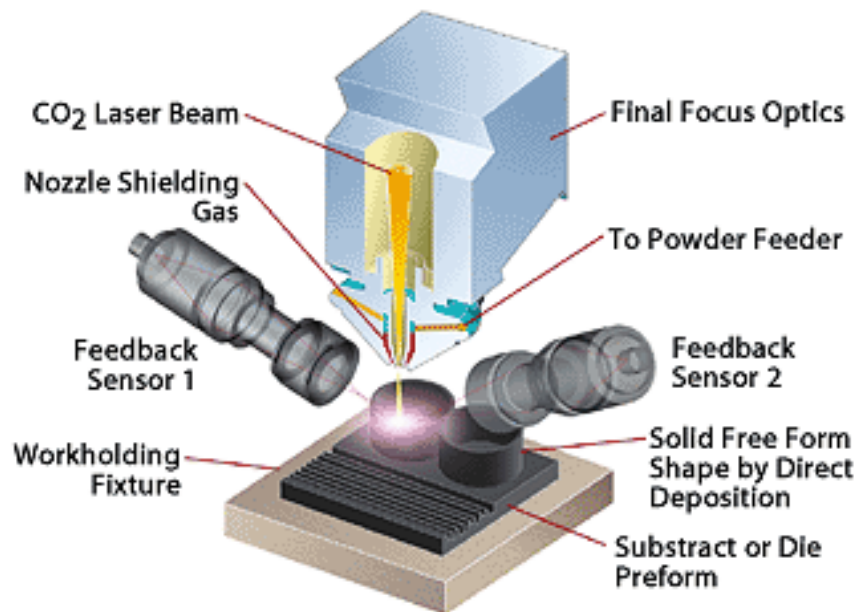


Ilustración 12. Fundamento DMD (cortesía VII Workshop tecnológico de operaciones, Airbus Defence & Space).

Este método permite usar una amplia variedad de metales y combinaciones de ellos como aceros inoxidables, aleaciones de base níquel, Ti6Al4V, acero de herramienta, aleaciones de cobre y más. Se puede usar incluso alúmina.

Toda esta gran variedad de materiales se usan para la reparación de componentes que por otros procesos sería imposible o muy costoso de hacer, como por ejemplo la reparación de los álabes de turbinas de aeromotores.

Uno de los problemas de este proceso son las tensiones residuales debidas al desigual proceso de calentamiento y enfriamiento que pueden ser significantes en procesos de alta precisión. Debido a ello, según los requerimientos será necesario un tratamiento térmico tras la fabricación de la pieza y así aliviar las dichas tensiones que hay en ella.

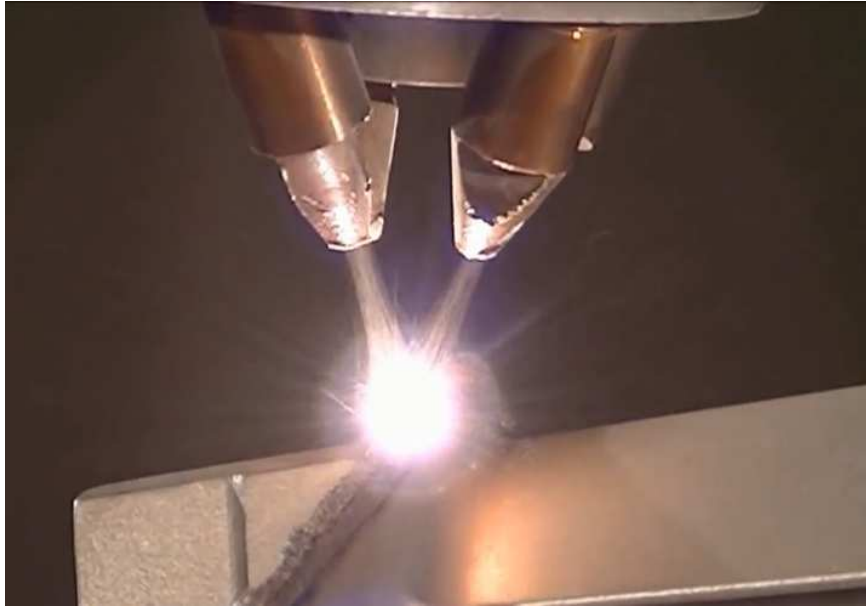


Ilustración 13. LENS (cortesía Optomec).

3.2.2. Fundido selectivo por láser/sinterizado metálico directo por láser

El Fundido Selectivo por Láser (SLM) o Sinterización Metálica Directa por Láser (DMLS) es un sistema de impresión en 3D que emplea el mismo principio: fundir/sinterizar el polvo metálico sobre una capa previa formada mediante la aplicación de energía dada por un haz de láser [2, 4.3, 5, 6, 7, 12, 14]. La diferencia entre los nombres reside en unas pequeñas diferencias en cuanto a cómo se unen las partículas según sus diferentes patentes.

El primero de ellos fue creado en 1979 y se empezó a comercializar en los 90 por la compañía EOS GmbH. En un principio se trataba de un método donde se fundía un material ligante (por eso se llama selectivo, es decir, actúa sobre el material de unión) y al solidificar las partículas de la pieza se quedaban unidas y fijas. A continuación, la pieza se sometía a un proceso térmico donde se eliminaba dicho ligante dejando un esqueleto poroso de metal que se rellenaba por infiltración obteniéndose al final un componente formado por dos metales. El segundo es una variación de la misma empresa en donde el ligante es un metal, de tal forma que se eliminaba el proceso térmico posterior para quitarlo.

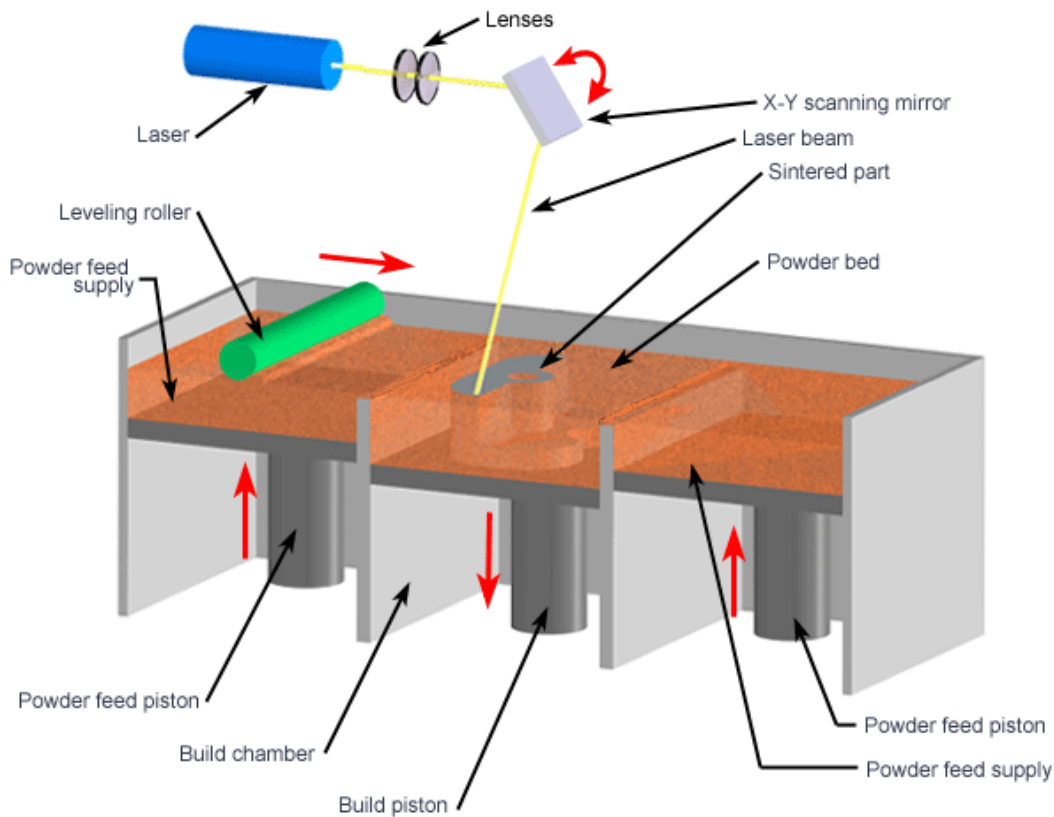


Ilustración 14. SLM (cortesía CustomPartNet).

Todo esto no parece que pueda cumplir los requisitos de la industria aeronáutica, pero la empresa EOS GmbH posteriormente presentó una nueva generación de máquinas dotadas con un láser cuya longitud de onda es absorbida totalmente por los metales además de ser mucho más potente, lo que da lugar a que se puedan fabricar piezas directamente en aleaciones comerciales: aceros de herramienta, aceros maraging, inoxidable, aleaciones cromo-cobalto, titanio, aluminio, inconel, hastelloy... Hoy en día, las propiedades de estos son equivalentes a las que se comercian con el mismo nombre.

Este proceso se da lugar en una cámara que se encuentra a una temperatura cercana a la de fusión del material de tal forma que la exposición al haz láser sea el que ocasiona la unión de las partículas. La sinterización/fusión implica el calentamiento del polvo a una temperatura por debajo del punto de fusión para generar una unión de las partículas en estado sólido, de tal forma que se consigue una pieza de mejores propiedades que si fuera de fusión.

Además, todo esto se lleva a cabo bajo una atmósfera de argón para evitar la oxidación. A continuación, un coater distribuye y reparte una capa de polvo de material suelto de tal forma que el láser se focaliza en una zona determinada para cada capa según el diseño. Cada vez que se hace una, el

pistón que carga toda el área de trabajo baja la misma dimensión que el espesor de la que se va a realizar a continuación.

Este proceso ofrece una gran variedad de materiales que pueden ser usados pudiendo realizar incluso combinaciones. Además, el polvo que no pasa a formar parte del componente puede ser reciclado.

Por último, el único inconveniente es que la precisión está limitada por el tamaño de las partículas de material, aunque esto con el tiempo va siendo un problema mucho menor con los desarrollos que se implementan día a día en este aspecto.



Ilustración 15. Componentes de aeromotores (cortesía EOS GmbH).

3.2.3. Fundido por haz de electrones

El fundido por haz de electrones (EBM) es una tecnología análoga al fundido selectivo por láser con la diferencia fundamental de que en este caso la energía necesaria para la fusión del polvo metálico la proporciona un haz de electrones (un “cañón” basado en campos electromagnéticos acelera electrones hasta aproximadamente 0,8 la velocidad de la luz, de tal forma que al impactar estos sobre la superficie del material se desprende energía en forma de calor) [2, 4.3, 5, 6, 7, 12, 16]. Una de las limitaciones es que al tratarse de partículas con masa, parte de esta energía se transmite como cinética levantando el polvo del lecho, con lo que hay limitación del tamaño mínimo de polvo que se puede emplear, y en consecuencia, la precisión y acabados de la pieza.

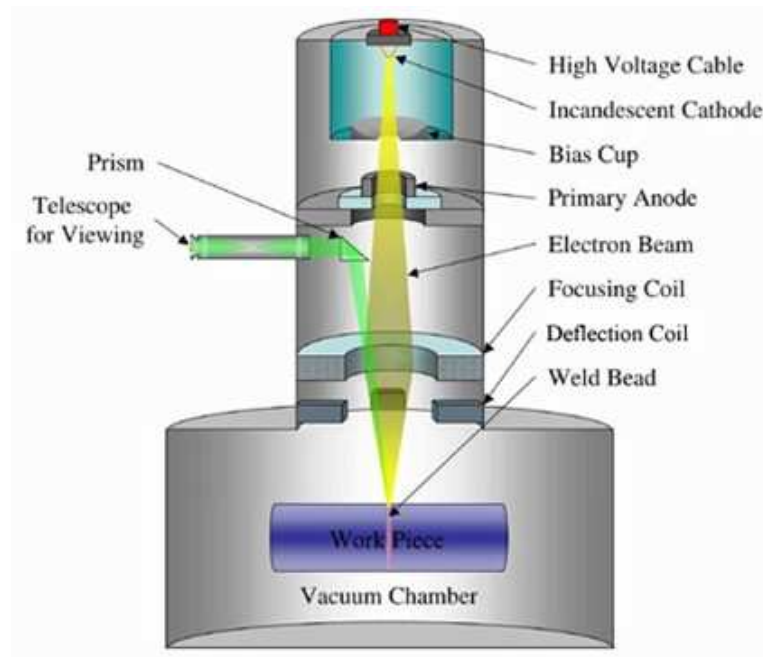


Ilustración 16. Fundido por haz de electrones (cortesía Popular3DPrinters).

Patentada por la empresa ARCAM y creada en 1997, tiene las ventajas de fundir el polvo dentro de un amplio rango de aleaciones metálicas (Ti6Al4V normal, ELI, Titanio de grado 2, aleación cobalto-cromo ASTM F75...) con propiedades similares a las que se consiguen por los métodos convencionales y con altas velocidades de producción.

En este proceso la energía se transmite mediante un haz de electrones de alto voltaje, típicamente entre de 30kV y 60kV, y tiene lugar en una cámara de vacío para evitar los problemas de oxidación. El vacío en la cámara de trabajo permite procesar materiales metálicos reactivos (aleaciones de titanio y aluminio) y conseguir una alta pureza en el proceso de fusión. El haz, que es dirigido cambiando el campo magnético por el que pasa, funde el polvo metálico que está repartido en una fina capa sobre el área de trabajo de forma selectiva. En cada capa se produce un precalentamiento de esta para elevar la temperatura (temperatura de calentamiento específica para cada aleación) antes de fundir el polvo. Como resultado, las piezas obtenidas por EBM no tienen tensiones residuales ni sufren distorsión al enfriarse. Por el contrario, hay que esperar a que la pieza se enfríe lentamente, con lo que se penaliza la producción.



Ilustración 17. Ábabe de turbina de baja presión (cortesía Avio Aero).

Recientemente la empresa ARCAM ha desarrollado la tecnología EBM MultiBeam TM que utiliza la electrónica de control para dividir el haz de electrones en múltiples de menor potencia. Esta estrategia permite fundir múltiples zonas del área de trabajo simultáneamente controlando la energía suministrada a cada punto. Con ello se obtiene un mejor acabado superficial, detalles y estructuras porosas sin perder productividad.

Actualmente se está tratando de sacarle más partido a esta técnica por el potencial que tiene en la industria aeronáutica. A pesar de que es una técnica muy joven, esfuerzos que se están realizando para desarrollarla están dando su fruto siendo el método que más ha crecido en menos tiempo. Una de sus aplicaciones futuras de más nivel es la de fabricar componentes aeronáuticos en el espacio exterior.



Ilustración 18. Ingenieros de la NASA probando el sistema EBM en un vuelo parabólico (cortesía NASA).

3.3. Para la fabricación de plásticos

A continuación, los tres métodos usados para fabricar piezas plásticas en la industria aeronáutica. Las propiedades son como las obtenidas en el sector. En la página web de Stratasys podemos encontrar información sobre las piezas aeroespaciales que fabrican.

3.3.1. Estereolitografía

La Estereolitografía (SLA) es el primer método de fabricación aditiva y el más usado hasta ahora en el mundo. Patentada en 1986 por Chuck Hull y fabricada por 3D Systems al año siguiente, los archivos STL deben su nombre a este proceso.

Su principio básico es la fotopolimerización (curado) de una resina líquida fotosensible mediante la focalización de un láser ultravioleta en puntos determinados (según el diseño) [2, 4.3, 5, 6, 7, 12, 16]. Dicho foco actúa de catalizador dibujando en una capa de líquido lo que se quiere producir. Una vez se ha realizado, la cuba que contiene el líquido desciende la dimensión del espesor de la nueva capa dejando que se cubra de nuevo de resina lo que se ha realizado hasta ese momento para permitir la polimerización de una nueva

encima. Al final de todo el proceso de construcción capa a capa, la resina se drena y se vuelve a exponer toda la pieza a la luz ultravioleta para que cure totalmente. A continuación según el caso, se realizan los procesos de acabado y eliminación del material para darle tolerancias dimensionales o quitar soportes.

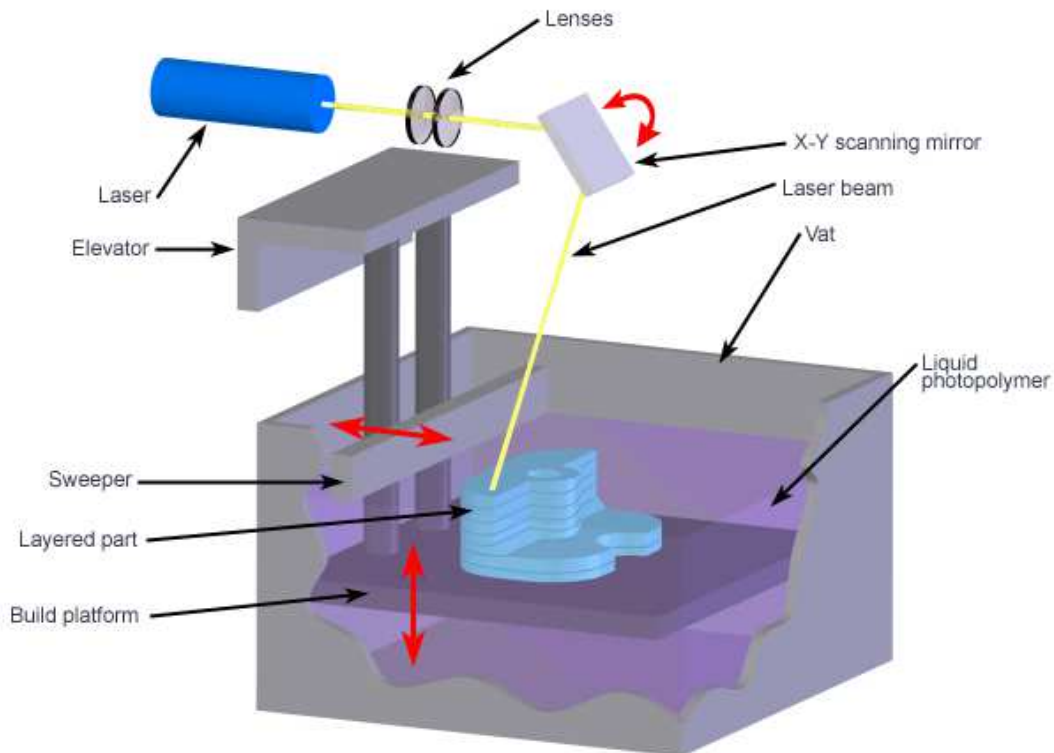


Ilustración 19. Estereolitografía (cortesía CustomPartNet).

Actualmente existe una nueva versión que se llama microestereolitografía donde se consiguen resoluciones del orden de las micras. También se puede realizar en este proceso componentes formados por varios materiales. Para este caso, se produce un drenado de la resina que estaba y un llenado con la nueva cuando se quiera usar (con lo que las etapas de producción tienen que estar muy bien estudiadas). Otra modificación sería aportar a la resina líquida otro tipo de partículas como cerámicas para concederle unas propiedades determinadas.

El tamaño máximo de la pieza, como es ya habitual en todos estos procesos, es el tamaño de la plataforma de trabajo. Esta limitación no es del todo relevante en este procedimiento puesto que hay empresas como la belga *Materialise* que ha desarrollado la máquina de FA más grande del mundo de estereolitografía con una capacidad de trabajo de 2100 x 700 x 800 mm.

Este método conlleva una serie de precauciones para que las piezas salgan como se quiere. Para ello hay que realizar el proceso de forma cuidadosa puesto que su mal cálculo puede hacer que no se peguen las capas

recién fabricadas a las anteriores o no se curen, o que resulten materiales defectuosos debido a que las capas que se han aplicado son de espesor variable puesto que las resinas que se emplean son de alta viscosidad y no se han aplicado de forma uniforme sobre lo ya fabricado.

Como ventajas en su uso son la realización de piezas transparentes, flexibles y biocompatibles pudiendo elegir entre una amplia variedad de resinas epoxi que hay actualmente en el mercado. Estas se pueden aplicar en aeronáutica como prototipos para probar el tamaño de piezas y así, tras ver los resultados, poder pedirla de esas dimensiones. A parte de esto, este método no tiene mucha más cabida en la industria aeronáutica puesto que los materiales que usa no son normalmente aplicables a este sector.

Como desventajas es que se fabrican productos que se degradan en mayor o menor medida según si están expuestos a la luz solar (curado continuo) y no son resistentes a la temperatura, afectando ambos factores a las propiedades mecánicas.

3.3.2. Modelado por deposición fundida (método de extrusión)

El modelado por deposición fundida (FDM) consiste en la adición de capas consecutivas provenientes de la fusión directa de un material que es proporcionado en forma de cable enrollado. Este atraviesa una boquilla calentada por encima del punto de fusión donde se extruye y el material se adhiere fundido sobre la capa previa [2, 4.3, 5, 6,7, 12]. Fue comercializada por *Stratasys* en 1991 por primera vez y puede trabajar con varios tipos de termoplásticos, normalmente ABS.

El material se funde y se extruye a través de dicha boquilla de modo que cede parte de su calor al material ya enfriado depositado en la capa anterior sobre la que se apoya, y al que por tanto se adhiere y se solidifica formando el aporte de la nueva capa. Algunos equipos aplican otro material de apoyo como sustento para las zonas en voladizo (soportes). Estos se pueden fabricar con el mismo material o con distintos de tal forma que al eliminarlos no deje marcas. La boquilla debe ir recorriendo en trayectorias más o menos complejas toda el área que en cada capa corresponde a material sólido. Hay máquinas que disponen de varias boquillas y varios cargadores de carretes de hilo, con lo que pueden fabricar piezas de distinto color, aunque no puede mezclarlos.

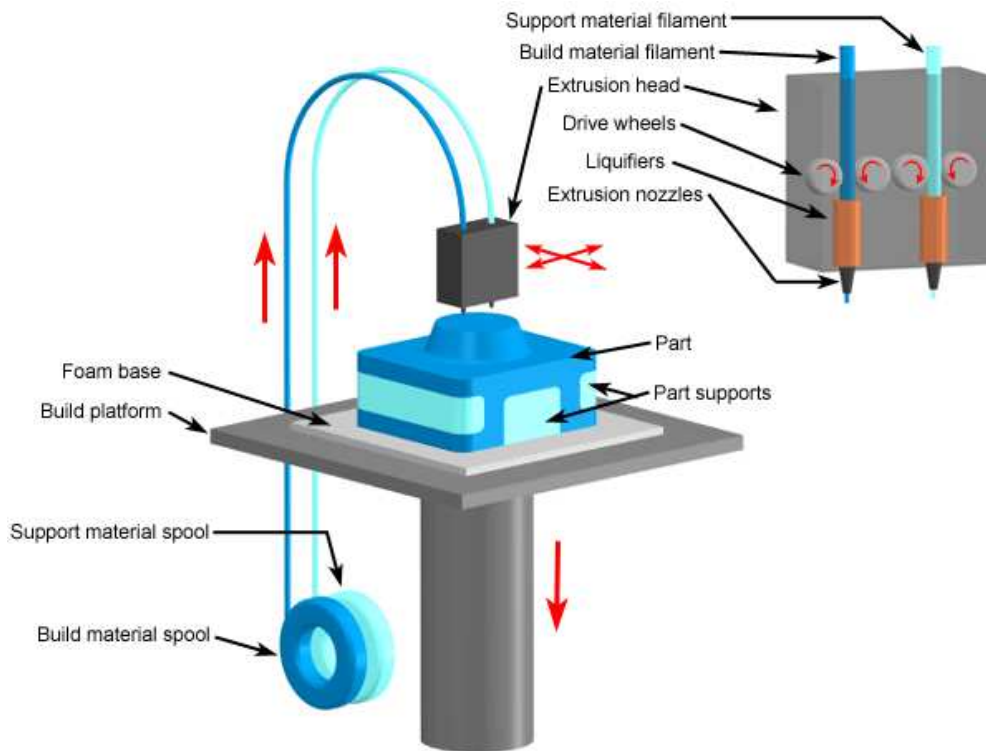


Ilustración 20. FDM (cortesía CustomPartNet).

Como ventajas frente a los otros métodos de formación de piezas de plástico está que no requiere un post-proceso químico, es decir, no se necesita curado. Además, las máquinas son más baratas y el proceso es más eficaz. Estos sistemas tampoco requieren personal altamente cualificado puesto que son bastante autónomos y necesitan un escaso mantenimiento. Por otra parte son lentos y la calidad superficial varía según la precisión de la máquina.

Sus aplicaciones pueden ser fabricación de piezas para comprobar sus dimensiones, prototipado, UAVs... A continuación se muestran algunas imágenes donde se puede ver su uso:



Ilustración 21. Interiores con FDM (cortesía de Stratasys).

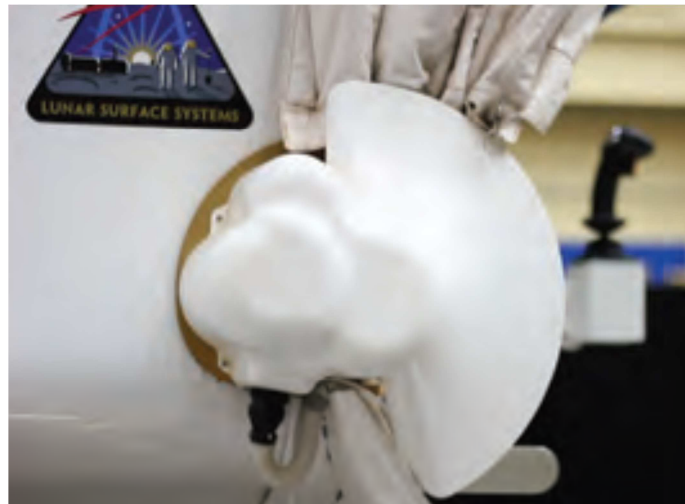


Ilustración 22. Partes del rover fabricadas con FDM (cortesía NASA).



Ilustración 23. Componentes del sistema de ventilación con FDM (cortesía de Stratasys).

3.3.3. Sinterizado selectivo por láser

El Sinterizado Selectivo por Láser (SLS) es también aplicable a materiales plásticos: poliamidas y poliestirenos. Esta tecnología fue inventada y patentada por *Ross Household* en 1979, pero fue comercializada por la Universidad de Texas a finales de los años 80, lo que dio lugar a la empresa *DTM Corporation*, que lanzó la primera máquina en 1992. En 1994, la empresa alemana *EOS GmbH* lanzó al mercado la primera máquina *EOSINT-P* que cubre una parte muy importante de este mercado en este tipo de sistemas en la actualidad.

Al igual que antes, es un proceso de impresión 3D donde el polvo es colocado en un lecho mediante un *coater* y luego es sinterizado o fundido por la recepción de energía proveniente de un láser. También, la cámara donde se realiza el proceso de fabricación está a una temperatura cercana a la de fusión del material (temperatura de transición) de modo que el láser solamente debe aplicar la energía necesaria para fundir el material y a continuación, este volverá a solidificarse. El láser es dirigido sobre una localización específica fundiendo el polvo y así, tras repetir el proceso para cada capa, al final se obtenga la pieza del diseño [2, 4.3, 5, 6, 7, 12, 14].

Para pasar de una capa a otra, la plataforma que aguanta el componente desciende por la acción de un pistón una dimensión igual al espesor de la capa que va a fabricar y se vuelve a repetir el proceso.

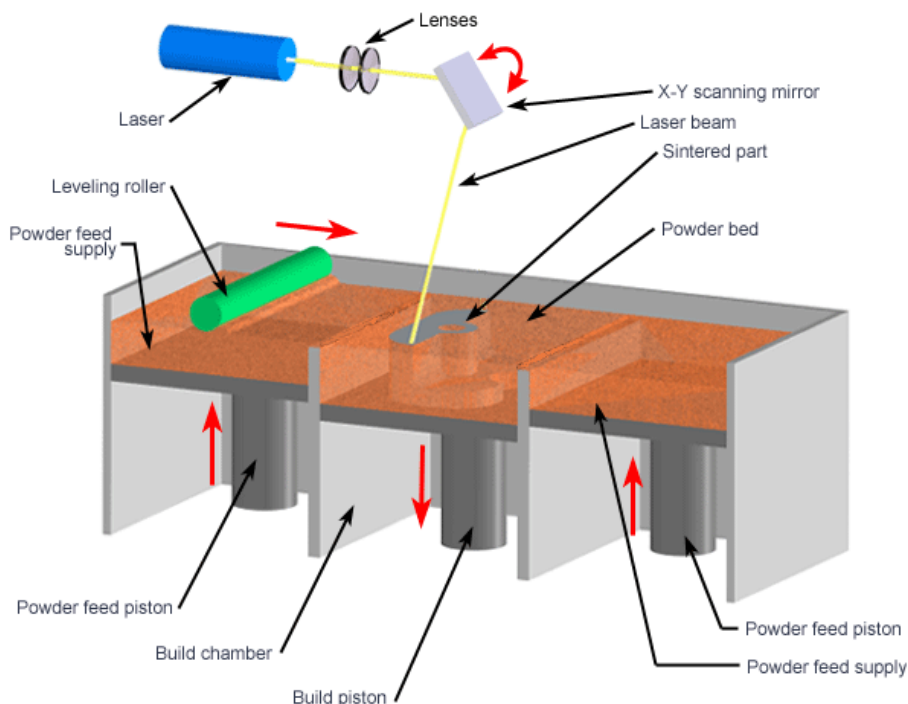


Ilustración 24. SLM (cortesía CustomPartNet).

El material habitual es la poliamida 12 o poliamidas con fibra de vidrio, aluminio, carbono u otros aditivos para mejorar sus características mecánicas según las solicitudes que se tengan que cumplir. En 2009, *EOS GmbH* presentó el primer sistema del mundo para fabricar piezas PEEK, plástico técnico de muy altas prestaciones.

Al igual que se dijo en este proceso para metales, se puede usar en un amplio rango de materiales y el polvo que no ha servido para la construcción de los componentes puede ser reutilizado. Además, no necesita generar estructuras de soporte (el propio lecho realiza esta acción), permitiendo fabricar mecanismos. Por último, los plásticos con los que se trabaja tienen las mismas propiedades mecánicas que si hubieran sido fabricados por métodos de inyección convencionales.

Como contra, el proceso de enfriamiento de toda la cuba debe ser lento para que no se produzcan deformaciones en los componentes fabricados de modo similar al proceso de inyección de plástico. Esto es una lacra para la productividad del sistema.

Existe otra variante que en vez de un láser usa una máscara. Esta tecnología sinteriza el polvo mediante radiación proyectada sobre una máscara, es decir, cada capa se expone de una sola vez. La empresa *Sintermask GmbH*, fundada en 2009, es una gran precursora de este proceso aunando varias patentes tecnológicas en la producción de máscaras y en la alimentación en polvo obteniendo grandes resoluciones y además, en un tiempo de producción muy bajo. Esta es la principal ventaja de hacerlo de esta forma: el tiempo de fabricación disminuye drásticamente.

3.4. Otros métodos

Además, existen otros métodos que pueden ser de aplicación en el futuro en este sector por los resultados en productividad y propiedades que pueden conseguir.

3.4.1. Fabricación por superposición de capas (LOM)

Este es un proceso que combina la fabricación aditiva y la sustractiva a la hora de fabricar capa por capa materiales, por ejemplo, compuestos.

El sistema es alimentado de material en láminas provenientes de un rollo mediante un rulo. Dichas láminas están bañadas en resina polimérica, de tal forma que al ir siendo posicionadas sobre el área de trabajo, son apisonadas por un rodillo caliente y así la nueva capa de material se adhiere a la anterior. A

continuación, un láser corta con una profundidad igual al espesor de capa cada una siguiendo el contorno que deben tener según el fichero STL. Como resumen, se deposita una lámina, se corta y se recoge el desperdicio, y esto se repite hasta que se complete la pieza [4, 5, 6].

La fabricación por superposición de capas posee un sistema alimentador que se encarga de proveer el material para cada capa a una temperatura preestablecida y recolectar parte del desperdicio de materia prima. También posee un sistema elevador, que desciende la plataforma de trabajo un espesor de hoja en cada paso del proceso. Por último, posee un sistema laminador que consta del rodillo caliente mencionado anteriormente que se encarga de presionar cada nueva capa sobre la anterior permitiendo que la adherencia entre ellas sea completa. Cuando ya todas estén apiladas, se unen finalmente las unas a las otras por medio de presión y calor. De esta forma, el componente se forma por un curado de la pieza.

Como ventajas de este proceso están el bajo coste, que no hay un post-proceso de ningún tipo (solo retirada del material sobrante) y que permite la construcción de piezas grandes.

Los inconvenientes que nos podemos encontrar son que el material que sobra es un desecho (no se aprovecha el 100%) y el apilado es la parte del proceso más difícil puesto que no puede haber cavidades internas y todas las láminas tienen que quedar bien pegadas las unas a las otras.

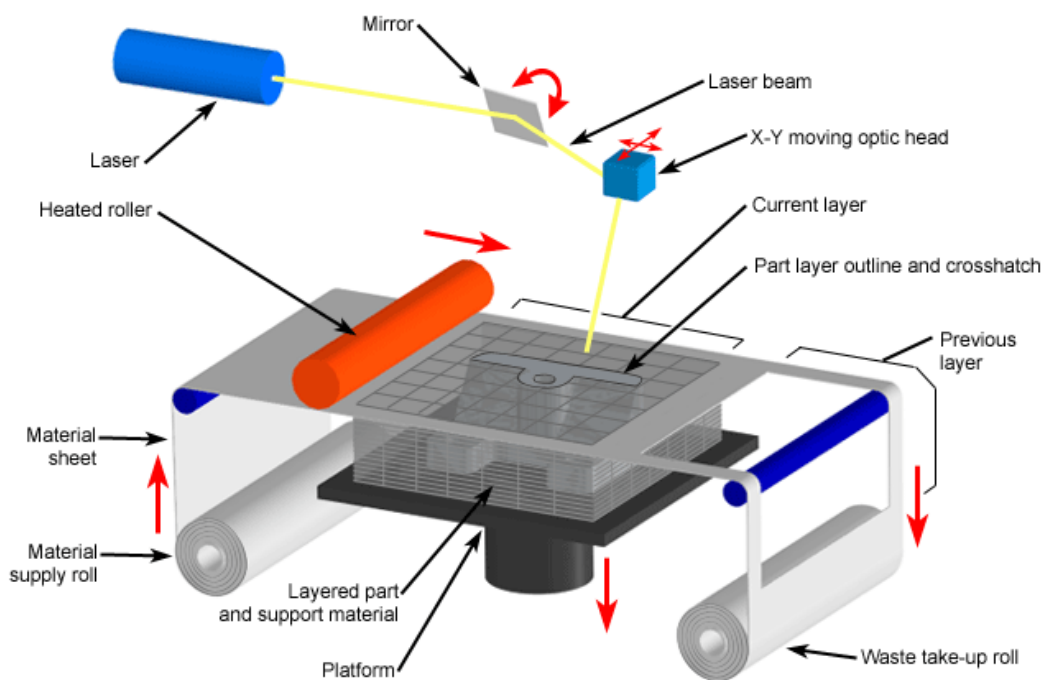


Ilustración 25. LOM (cortesía CustomPartNet).

3.4.2. Laser cladding

Esta tecnología nace como evolución de la soldadura y el fundido selectivo por láser. El sistema se caracteriza por usar una boquilla que alimenta de material (polvo) en el lugar donde justamente se aplica una fuente muy intensa y concentrada de energía [2, 4, 4.3, 5, 6, 7, 8, 12, 14]. Una de estas fuentes es un láser, de tal forma que esta técnica es el método LENS (ambos son lo mismo). No sería igual, sin embargo, para la otra fuente que se usa en este método: plasma.

El material de aporte se funde sobre el sustrato y solidifica inmediatamente. Además, se necesita de la aplicación de un gas inerte (argón) para proteger el baño fundido.

Su aplicación fundamental en la industria aeronáutica es la de reparar o recargar de material piezas normalmente de gran tamaño, como turbinas o hélices. Además, ya está empezando a sustituir a la soldadura TIG ahí donde se usaba. Para todos estos pasos, lo primero que hay que hacer es eliminar la zona dañada para comenzar con la reconstrucción. Esto último lo realiza el propio cabezal, que es móvil y se desplaza siguiendo unas trayectorias programadas.



Ilustración 26. Laser cladding en la reparación de un turbocompresor (cortesía industrial-lasers.com).

Este proceso, además, suele tener 5 grados de libertad: los tres ejes de desplazamiento y dos giros. Estos grados pueden tener las siguientes configuraciones:

- Cabezal fijo y mesa móvil orientable: el cabezal está en posición vertical hacia abajo mientras que la placa de construcción está sujeta a un cabezal con los cinco ejes dichos.

- Cabezal superior móvil y mesa móvil: Es la que tiene más complejidad de programación, pero más libertad en las geometrías. Se reparten los grados de libertad.
- Cabezal móvil y mesa fija: existe limitación en las geometrías de las piezas que se pueden reparar.

En un principio no hay limitaciones a los materiales de aporte salvo las relativas al propio proceso de soldadura. Por último, no necesita estructuras de soporte a fabricar.



Ilustración 27. Álabes de turbina reparándose con láser cladding (cortesía de industrial-lasers.com).

Aunque no se puede hablar de capas ni de adición paralela de las unas a las otras, es un proceso de FA porque construye aportando material allí donde se necesita y este aporte se produce en “capas”, localmente hablando.

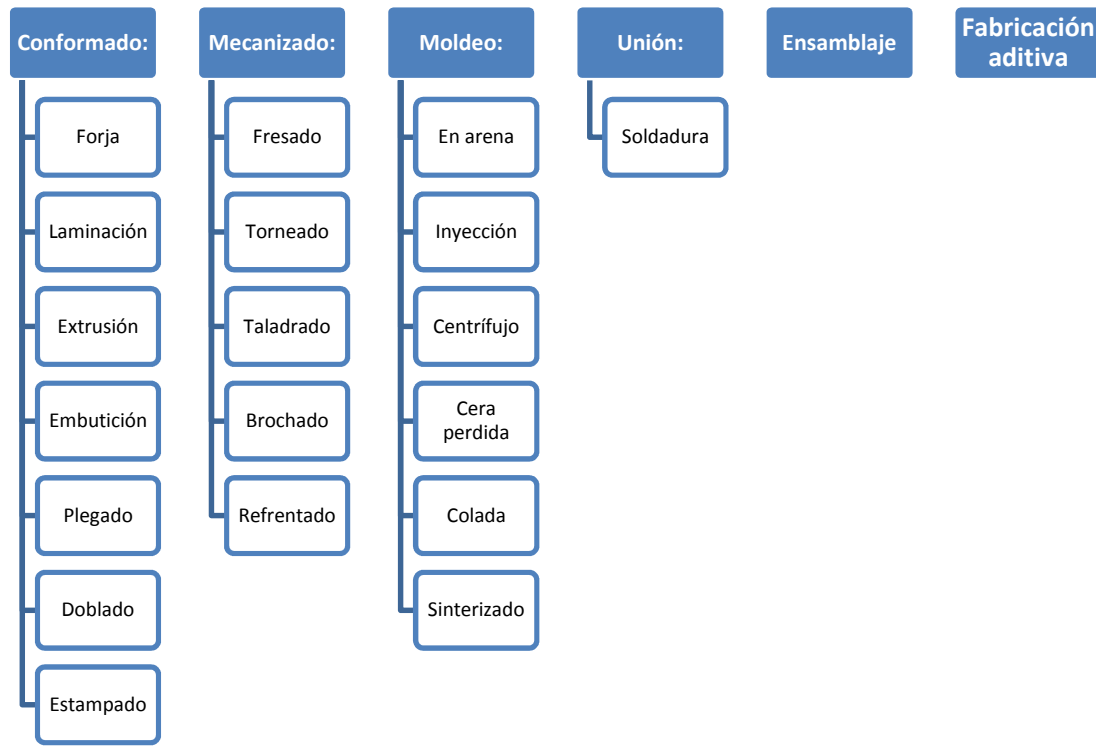
3.5. Fabricación híbrida

La fabricación híbrida se ha ido mencionando a lo largo del presente documento de forma directa y consiste en integrar los procesos de FA en toda la cadena de valor junto al resto de procesos de fabricación (sustractivos y conformativos), de manera que se aproveche lo mejor de cada uno aprovechando las ventajas que ofrecen de forma individual ahí donde tengan sentido y complementándose con el resto cuando se requiera [2, 4.3, 6, 8].

Para que dicha integración tenga éxito, es necesario llegar a conocer los puntos fuertes y limitaciones de cada uno para poder así ubicar dentro de las etapas de fabricación el método que más convenga en cada caso.

En general, hay que tener en cuenta los siguientes procesos de tal forma que se obtenga el componente de la mejor forma posible:

Tabla 4. Procesos a complementar con la fabricación aditiva



Por ejemplo, en la inyección de plásticos por los métodos convencionales, muy extendidos hoy en día, la fabricación aditiva puede ayudar a aumentar la complejidad de las piezas cuando sea necesario y la inyección de plásticos no lo permita. También se puede usar cuando se tenga que disminuir el número de componentes para lograr la funcionalidad deseada (puesto que a más componentes, más moldes, utillaje...) y con la fabricación aditiva se pueden hacer mecanismos de una sola vez. Otro uso es la realización de piezas donde es muy difícil el cálculo de los ángulos de desmolde o donde resulte complicado minimizar las zonas con reentradas y negativos.

Además permite complementar la realización de piezas con distintos espesores de pared cuando el diseño lo establezca así, no usa las líneas de partición ni tampoco produce la soldadura/unión fría. Otra ventaja que puede aportar al usarlo es cuando no se puedan ver las marcas de los expulsores y del canal de inyección o cuando el molde sea propenso a cambiar mucho a lo largo del tiempo (la FA no está asociada a ningún molde y la modificación se puede hacer en CAD).

A su vez, la inyección de plásticos es un proceso mucho más productivo. Debido a ello, habría que adaptar ambos métodos para conseguir hacer el

componente de la forma más económica y rápida posible (punto de compromiso bien estudiado).

En cuanto a la producción de productos metálicos, la elección de un proceso para introducirlo en la cadena de valor no es tan sencilla debido a que es muy difícil que una sola tecnología de FA pueda cubrir los distintos procesos que se encuentran implantados en la industria en la actualidad (inyección y colada, forja, conformado, fresado, torneado, doblado, estampación...). Debido a esto, es necesario un estudio detallado de la pieza a la hora de tomar una decisión sobre qué proceso es el más adecuado.

Una de las cosas que se podría hacer es fabricar partes de moldes o moldes completos con complejos canales usando el material necesario para evitar el desbaste. A ellos se les sumaría los procesos de mecanizado, acabado y pulido por métodos convencionales.

Otro método a complementar es el fresado o el mecanizado avanzado de alta velocidad (HSM, high speed machining) que elimina menos material a cada pasada pero hace más en menos tiempo. El único inconveniente es que, al aumentar la complejidad de la pieza, el coste de esta se dispara. Esto no ocurre en la FA, con lo que se debe estudiar cada caso particular.

Lo mismo se podría decir para las piezas fabricadas por torno, aunque al ser piezas de revolución y con geometrías menos complejas, las ventajas de complementar este proceso con la fabricación aditiva no es tan obvia.

En los procesos de estampado hay mucho que hacer, puesto que presentan un gran volumen de mercado. Las geometrías planas de las piezas fabricadas por este tipo de procesos no son muy complicadas y se caracterizan por su relación superficie/espesor muy grande, que hace que sean de difícil fabricación por procesos de FA (por el tamaño de las "impresoras"). Una vez más se debería de pensar en el diseño. Cuando se diseña una pieza para estampación ya viene definida con un espesor de material que hay que utilizar. Si se tuvieran en cuenta las necesidades básicas de la pieza puede que resultase un diseño totalmente distinto.

Por último, en cuanto a la inyección de metales es igual que para plásticos.

En general, el acabado superficial que presentan los procesos de fabricación aditiva no es tan preciso como el conseguido por procesos de rectificado por ejemplo. Por otra parte, se sabe que una pieza fabricada por tecnologías de arranque de viruta genera un desperdicio de materia prima. Así pues, se podría plantear un sistema en el que las tecnologías aditivas se encarguen de la fabricación del modelo (sin necesitar excesos de material para

su modelado) y el acabado superficial se realice mediante tecnologías de arranque de viruta (mejorando el acabado superficial generado aditivamente).

Los procesos de FA se pueden aprovechar para el modelado de punzones con geometrías complicadas que sean difíciles de producir de otra forma. También en el campo del moldeo. Ya se ha hecho referencia a esa ventaja específica de la fabricación aditiva referida a la facilidad para realizar geometrías intrincadas, cosa que habitualmente en procesos de moldeo es una opción poco viable por la dificultad que supone. Aunque disponga de esta ventaja, la productividad de una máquina de AM no es comparable a la que se podría conseguir con procesos convencionales. Por lo tanto, lo mejor sería aprovechar ambas ventajas: se realizaría la pieza macho mediante fabricación aditiva, aprovechando su facilidad para generar geometrías difíciles, y el proceso de llenado de moldes de forma convencional, aumentando la productividad del sistema. Asimismo es posible usar AM no para fabricar el macho, sino directamente para fabricar los distintos elementos del molde, siendo más fácil la creación y montaje del mismo.

Por consiguiente, es importante realizar una comparativa entre procesos convencionales y aditivos para solventar cómo fabricar una pieza de forma óptima pensando en los costes de producción y en la pieza en sí (que cumpla las solicitudes por las que ha sido creada).

Para terminar, además de los costes de producción también se ha de tener en cuenta otro factor referido al valor del producto: el valor añadido. Las piezas generadas mediante FA tienen un valor añadido mucho mayor que las fabricadas por los procesos convencionales. Esto se debe a las posibilidades ventajosas de la fabricación aditiva como personalización de piezas, reducción de peso, mejora en el diseño, ergonomía... Muchas de estas ventajas no son apreciables a simple vista, por ello la creación de nuevos diseños y procesos de fabricación híbridos debe partir de cero, ser minuciosamente pensada y no sujeta a las limitaciones que hasta ahora han existido.

Capítulo 4.

Restricciones en la fabricación

Antes de empezar este apartado mencionar que cada proceso de producción tiene sus propias limitaciones. Además afecta el material y máquina que se use de tal forma que para obtener con precisión las limitaciones hay que realizar numerosos ensayos y estudiar los resultados [2, 4, 9]. Este solo es un apartado orientativo de los ensayos a llevar a cabo con cada proceso de FA y con cada material para obtener las dimensiones y formas críticas que afectan a la calidad del componente de tal forma que se establezca en qué situaciones se necesitan soportes. Además, algunas de estas restricciones pueden aplicarse de manera general en todos los métodos de fabricación aditiva. Estos puntos se podrían considerar reglas de diseño:

- Agujeros cilíndricos verticales: existe una limitación en el diámetro inferior de ellos establecida por el grosor de la capa depositada. Para estudiarla habría que realizar una batería de cilindros huecos. Por otro lado no existe una limitación superior.
- Agujeros cilíndricos horizontales: existe una limitación tanto superior como inferior. La inferior afecta a la calidad y el detalle del agujero dando lugar en el peor de los casos a un escalonamiento que depende directamente del grosor de las capas. A mayor diámetro, las últimas capas que cierran el agujero se pueden suponer como un “voladizo bi-apoyado”, tanto mayor cuanto más lo es el diámetro del agujero. Esto hace que se pueda producir un círculo achatado si no se usan soportes. Esta imperfección de cierre de los agujeros se percibe más cuanto mayor sea dicho “voladizo”. Además, se puede llegar al punto en que se rompan dichas capas si este es demasiado grande. En su análisis se tiene que tener en cuenta tanto el material que pasa a formar las capas como el que no se agrupa y tras los ciclos térmicos ha quedado

levemente unido, lo que supone más peso para la estructura a la hora de aguantar y un peor acabado. Como se dijo en la introducción de este apartado, el valor a partir del cual es necesario poner soportes depende del proceso y del material y se debe obtener mediante una batería de pruebas de distintos diámetros, tanto internos como externos.

- Superficies inclinadas: por norma general se pueden fabricar superficies inclinadas sin soporte por encima de 45° respecto a la horizontal. Además, estas zonas son críticas puesto que se fabrican por capas y según el espesor de estas se notará más o menos un escalonamiento al final del proceso productivo, es decir, unos pequeños voladizos con polvo sin procesar que quedan unidos levemente por el calor debajo de ellos al procesar el haz láser la zona de volado. A más ángulo, los voladizos cada vez son menores por lo que se une una menor cantidad de polvo metálico no procesado y el acabado superficial es mejor al acabar el proceso de deposición. Para el caso de ángulos inferiores a 45° el volado es más grande con lo que el peso de este más el del material sin procesar unido debajo (más cantidad cuanto más voladizo haya) hace que no se pueda soportar la estructura y sean necesarios soportes. Si se sigue construyendo mal, al final dará una pieza defectuosa. Finalmente, hay que seguir las instrucciones del principio de este apartado para conocer bien las limitaciones a nuestro caso particular realizando una batería de ensayos (paredes a varios ángulos y con varias alturas). Mientras mayor sea el tamaño y la altura de las piezas mayores serán los problemas, ya que los desprendimientos de las capas pueden producir daños en el propio componente.
- Voladizos mono-apoyados o bi-apoyados: existirá un tamaño de voladizo que depende en cada caso del material, del proceso y de la máquina a partir de los cuales se necesite usar soportes.
- Las propiedades del material no son iguales en la dirección de deposición que en las perpendiculares a esta. Esto sirve a la hora de orientar el material según las sollicitaciones que vaya a tener. Hoy en día esta restricción no es tan crucial puesto que se está consiguiendo que sean cada vez más similares. Por último, la forma de calcular las tensiones y deformaciones según las sollicitaciones en un programa de cálculo se puede hacer de dos formas: se supone que el material es isótropo y el valor de sus propiedades es el más bajo de todos sus ejes o también hay programas que tienen en cuenta diferentes propiedades según la dirección.
- La validación de las propiedades mecánicas se tiene que hacer hoy en día pieza por pieza comparando los resultados con la norma para el material usado y demostrando que cumple los requisitos.

Como complemento a los puntos anteriormente descritos, actualmente los espesores de las capas son del orden de micras y los escalonamientos mencionados en los componentes son casi inexistentes.

En los procesos que usen un coater (es el repartidor del lecho de polvo) hay que tener especial cuidado porque pasa por encima de la superficie y puede dañarla o deformarla si existen trozos desprendidos.

Además, la mayoría de estas restricciones se resuelven con soportes, que son finas columnas de material que aguantan partes de las piezas. También se pueden denominar puntales y aseguran la fabricación correcta de volados o caras inclinadas. Estos soportes son retirados tras la fabricación mediante mecanizado. A más puntos de soporte resultará una mejor fabricación pero después hay que pensar que sus posiciones y número de ellos tienen que ser bien estudiados para hacer de forma sencilla la tarea de retirada cumpliendo con los objetivos por los que se les ha creado. Otra forma de hacer más sencilla esta tarea es con soportes de otros materiales que sean más fáciles de quitar (no disponible en todas las tecnologías ALM). Para reiterar la idea más importante es que hay que estudiar muy bien según el caso el espacio óptimo entre soportes y su localización, de tal forma que debe ser un compromiso entre fiabilidad durante la fabricación, buen acabado, el uso del menor número posible y que la eliminación sea sencilla.

Por último, hay que tener en cuenta el nivel de detalle que se puede conseguir con la máquina que se tiene y debido a ello, pensar en el espesor a eliminar en un posible mecanizado si es necesario para obtener la rugosidad superficial requerida. Para tener datos del nivel de detalle, las empresas suelen realizar columnas y paredes muy finas y se estudia su acabado. Para saber el espesor de capa a eliminar para obtener una rugosidad determinada hay que realizar un mecanizado iterativo para que tras eliminar poco a poco material se llegue a una superficie totalmente lisa y sin poros llegando al material 100% denso. Al final, con la suma del grosor de todas las capas iteradas se obtiene la superficie mínima de mecanizado.

Capítulo 5.

Formas de mejorar las características resultantes

Como se ha ido comentando a lo largo de este documento, al final del proceso de producción usando los métodos de FA se pueden realizar otros post-tratamientos para mejorar las propiedades de los componentes fabricados [4, 4.2].

Entre estos están los tratamientos térmicos convencionales igual a los aplicados a los componentes fabricados de forma convencional. Estos sirven para proporcionar un alivio de las tensiones residuales originadas en los ciclos térmicos producidos por el proceso de deposición (calentamiento y solidificación periódica rápida). Unos ejemplos de tratamientos que servirían para este fin son un recocido o un revenido.

Y después están aquellos que sirven para mejorar la rugosidad y la vida a fatiga de las piezas. Estos métodos son:

- Pulido electroquímico. Es un tratamiento superficial mediante el cual el metal a ser pulido actúa como ánodo en una celda electrolítica, disolviéndose.
- Mecanizado por haz de láser (laser beam machining). Es un proceso no convencional de mecanizado de índole térmica, que no genera viruta, en el que la eliminación del material se provoca por la fusión y vaporización del mismo al concentrar elevadas temperaturas en zonas localizadas. Las radiaciones del haz láser son monocromáticas y paralelas y se pueden focalizar resultando una energía de hasta 100MW por milímetro cuadrado. Se usa para obtener una precisión micrométrica en las piezas fabricadas.

- Grinding/Polishing. Es un método en el que se usan partículas abrasivas cada vez más finas para eliminar material de la superficie de un componente hasta que se obtenga el resultado superficial requerido.
- Shot Peening. Es un tratamiento superficial que se aplica a temperatura ambiente por bombardeo de la superficie con bolas pequeñas. Cada bola que impacta el material actúa como un pequeño martillo produciendo una huella muy pequeña en la superficie. La huella se crea con un fenómeno de alargamiento en tensión. Debajo de la superficie, el material intenta restaurar la capa deformada a su estado original, lo que crea una tensión residual de compresión de fuerte amplitud.
- Laser Peening. Es un sistema donde un haz láser se proyecta sobre un área donde se desea introducir tensiones residuales de compresión. Dicha área debe estar cubierta por una película opaca que actúa como capa de separación y aislante térmico. Si se hace sin ella, se deberá quitar algunas micras de material después del proceso. Este tratamiento superficial consiste en lanzar un chorro de agua muy fino y a continuación, mandar un pulso de alta energía con el láser a la zona con la pequeña película de agua formándose plasma que produce una onda de choque que se transmite por el componente. De esta forma se introducen tensiones residuales de compresión más profundas que con shot peening sin variar la microestructura.

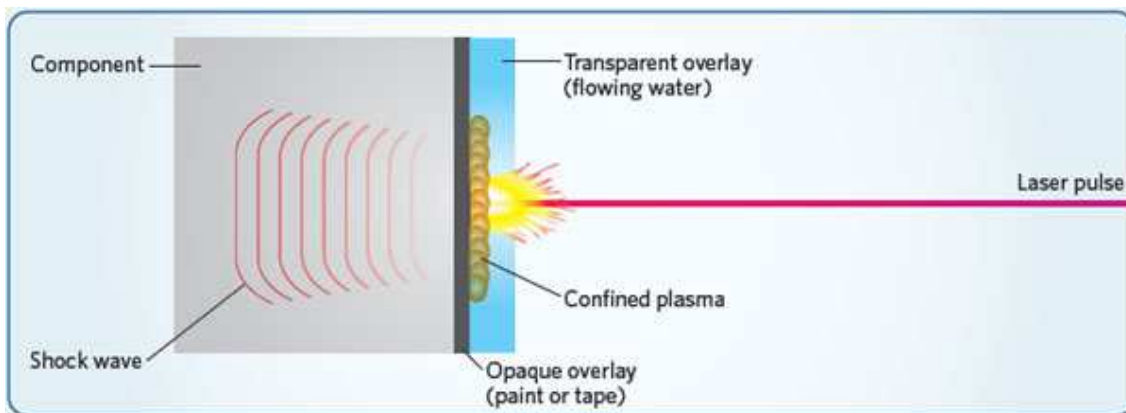


Ilustración 28. Láser Peening (cortesía de LSP Technologies).

- Electron Beam Hardening. Es un proceso en el que se aplica una alta temperatura a un punto localizado de la superficie y después se enfría rápidamente produciéndose un temple, y todo ello se realiza con un haz de electrones.

Capítulo 6.

Métodos de ensayo de las piezas producidas

A la hora de estudiar las propiedades de las piezas las empresas realizan una serie de ensayos destructivos para determinarlas. Pero a la hora de validar una pieza y saber su estado para usarla ya no puede ser ensayada hasta que resulte inservible. Para ello, se están desarrollando los métodos existentes de tal forma que se puedan realizar test no destructivos (NDT) para estudiar el 100% del volumen mediante inspecciones no destructivas (NDI) [4, 4.2].

Estas pueden realizarse a lo largo de las etapas del proceso de producción de tal forma que no perjudique en la productividad y se vaya poniendo solución a los problemas que se vayan encontrando.

En nuestro sector y con este método de fabricación, lo que se quiere conocer principalmente es la porosidad interna, las distorsiones dimensionales y las tensiones residuales del material.

Para ello se realizan inspecciones similares a los componentes CFRP (inspección con ultrasonidos) pero no pueden ser tan complejas y ocupar tanto tiempo. Por ello, a los componentes realizados con fabricación aditiva se les hace una tomografía computarizada, que es un método fiable para el desarrollo de productos e inspecciones complejas.

El primer paso de todos es realizar las radiografías al componente. Este estará sobre una plataforma que gira de tal forma que el proceso de toma de las placas virtuales sea automático (solo colocar y quitar la pieza de la

plataforma giratoria). En la imagen también se puede apreciar el dispositivo que lanza los rayos X y el detector.

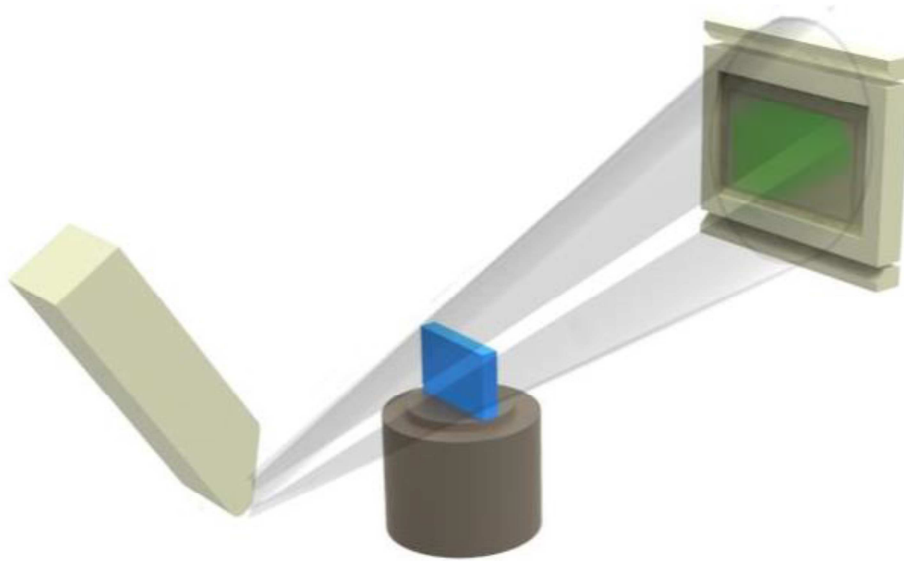


Ilustración 29. Inspección del material con tomografía computarizada (cortesía de CATEC).

A continuación, ya se tienen todas las placas necesarias para caracterizar el material:

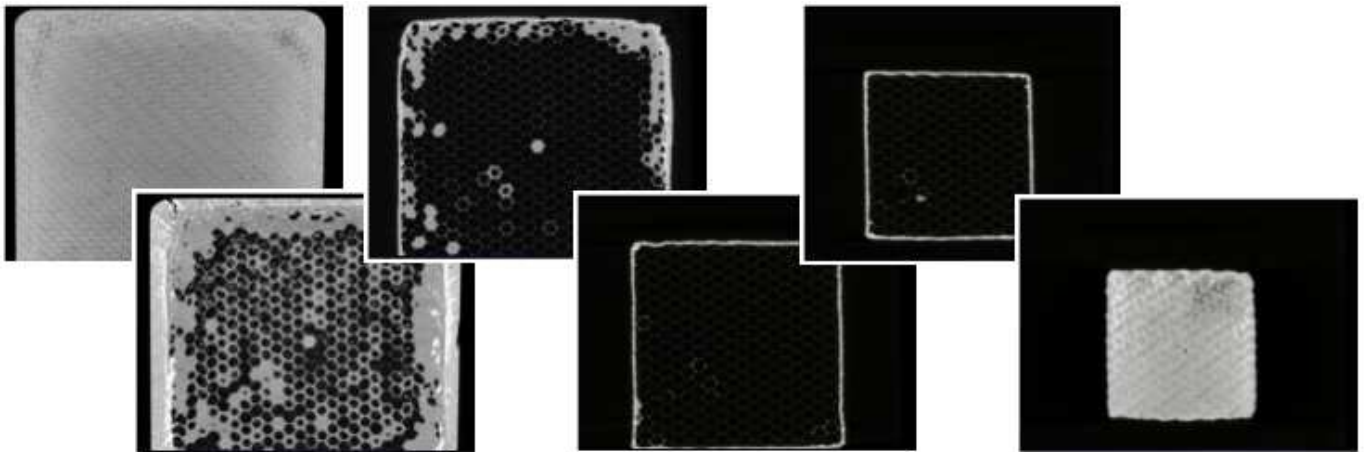


Ilustración 30. Placas obtenidas de la tomografía computarizada (cortesía de CATEC).

Por último, todas ellas se procesan por ordenador, resultando un componente 3D virtual donde se pueden apreciar todos los detalles (cavidades, poros, métrica...).

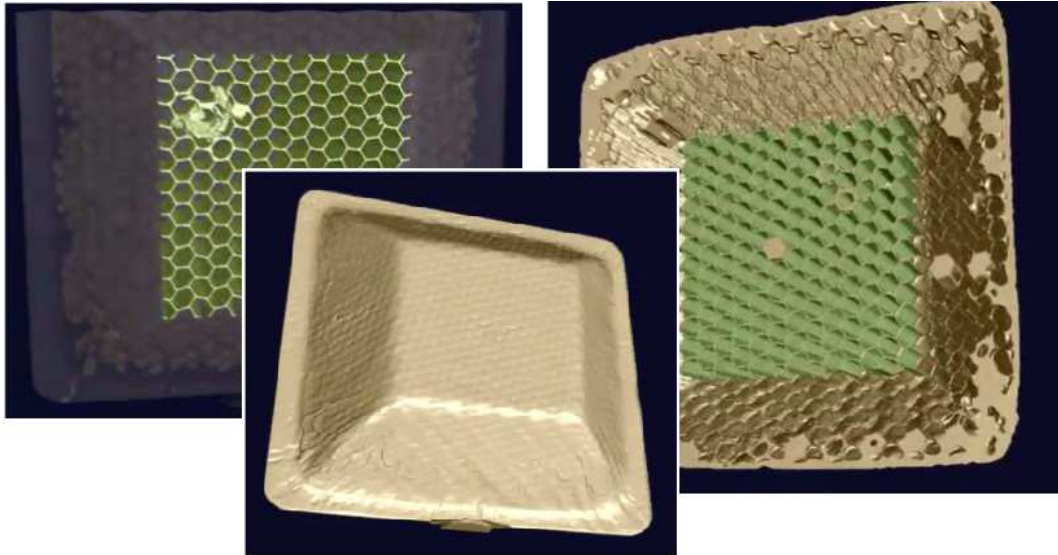


Ilustración 31. Imagen virtual resultado de la tomografía computarizada (cortesía de CATEC).

En resumen, la tomografía de rayos X computarizada es un test no destructivo que obtiene toda la caracterización 3D de los materiales y su metrología, es decir, se puede realizar un estudio profundo de las características nominales e internas de las piezas gracias a software especializado. Dos ejemplos más de este software son:

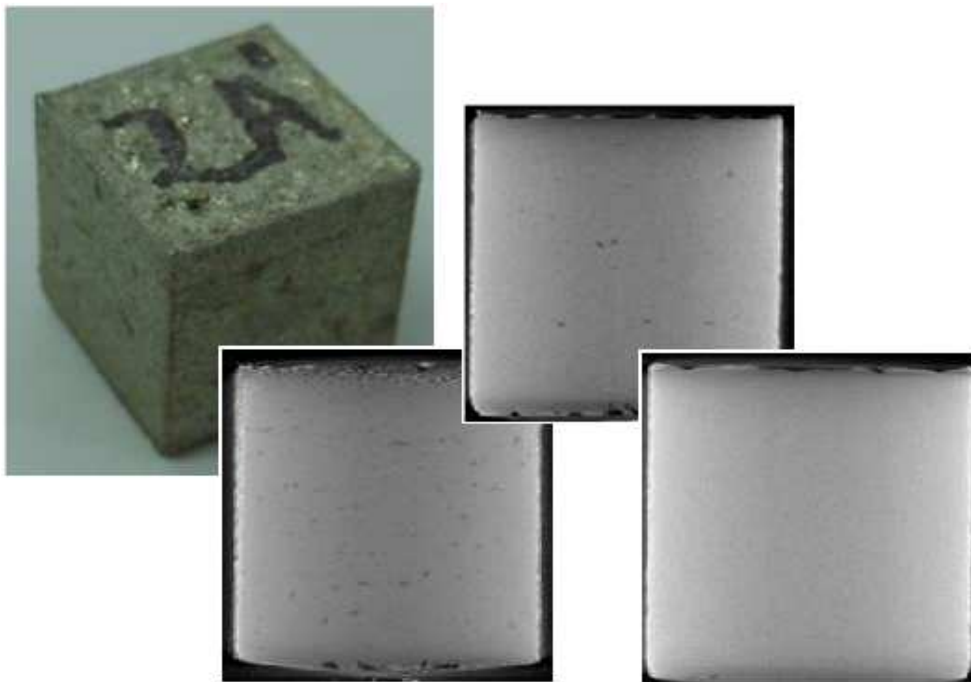


Ilustración 32. Componente analizado por tomografía computarizada (cortesía de CATEC).

A continuación, se puede realizar el estudio con dicho programa especializado, obteniendo una caracterización en 2D o 3D:

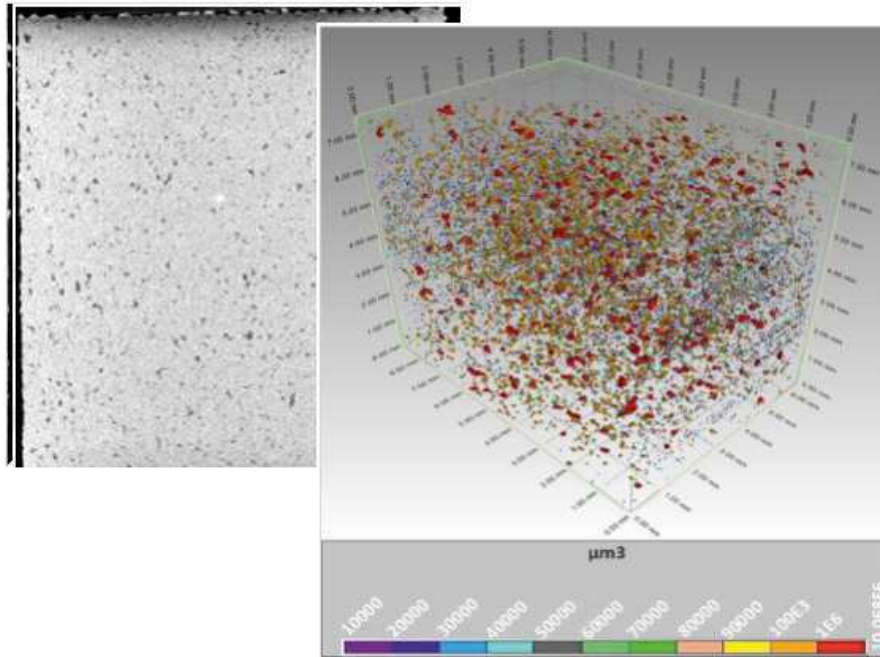


Ilustración 33. Análisis 2D y 3D de componentes por tomografía computarizada (cortesía de CATEC).

Y el segundo caso en cuestión son las bandas de sujeción del ARIANE 5 (estudio entre CATEC/Astrium):

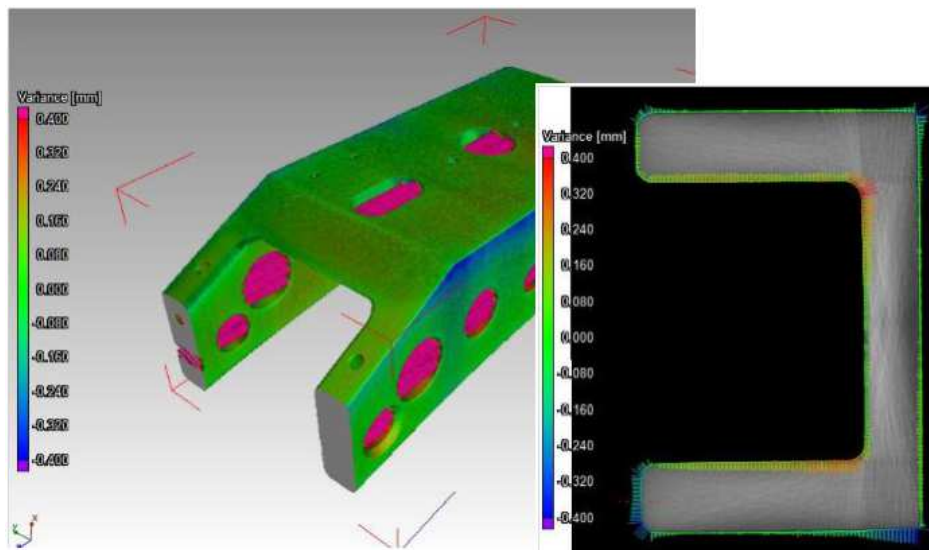


Ilustración 34. Tomografía computarizada a las bandas de sujeción del ARIANE 5 (cortesía de CATEC/Astrium).

En resumen y tras lo que se ha podido ver, el proceso consiste en realizar una tomografía a una pieza que rota sobre un eje obteniendo todas las secciones 2D necesarias para después realizar una construcción 3D del componente, de tal forma que se tenga finalmente la geometría *free form* totalmente estudiada.

Otras piezas que se pueden estudiar con este método son las siguientes:

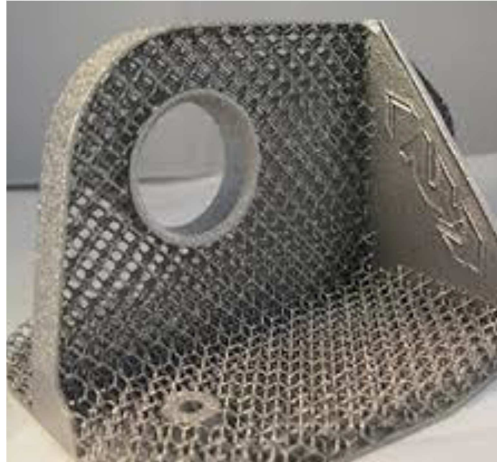


Ilustración 35. Pieza aeronáutica (cortesía de GKN Aerospace).



Ilustración 36. Brackets optimizados del A320 realizados con SLS (cortesía de EADS Innovation Works).



Ilustración 37. Brackets optimizados del A380 (cortesía de EADS Innovation Works).

Existe otro proyecto de futuro que a corto plazo aplica sobre los materiales compuestos y componentes a lo largo de la línea de producción y

que podría aplicarse a largo plazo en la fabricación aditiva. Este se basa en conseguir realizar todas las inspecciones aeronáuticas de forma automática, es decir, caracterizar los componentes, mientras están en producción. Para ello se usarán inspecciones realizadas por varios robots o con y sin contacto por medio de ultrasonidos.

Será un proceso flexible y automático de ensayos no destructivos y manipulación de objetos de tal forma que se realicen inspecciones y se pueda obtener datos de las piezas y del proceso.



Ilustración 38. Ensayos no destructivos automáticos (cortesía de TECNATOM S.A.).

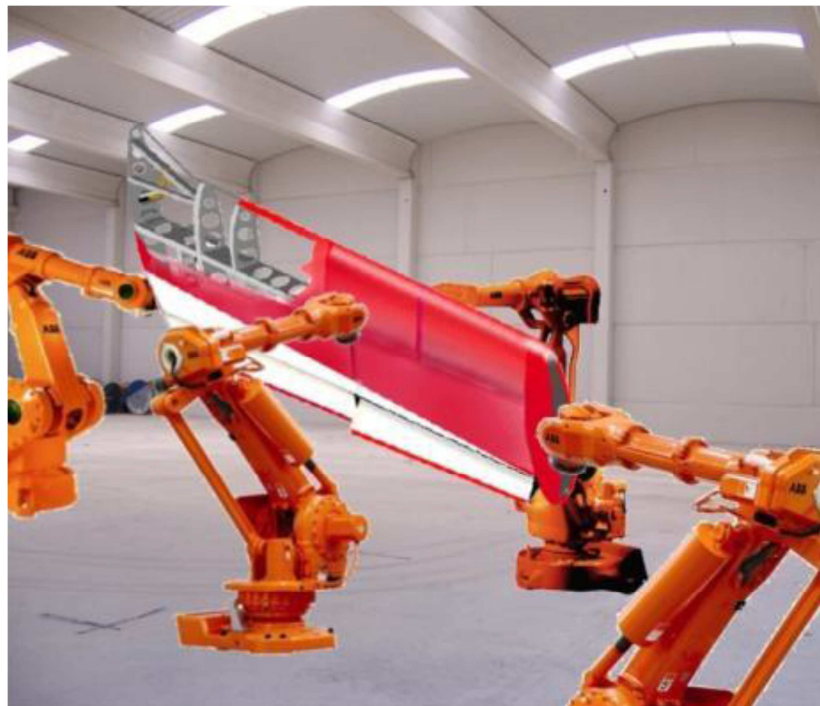


Ilustración 39. Ensayos no destructivos automáticos (cortesía de CATEC).

Capítulo 7.

Capacidades y aplicaciones aeronáuticas

En general, para todas las aplicaciones aeronáuticas, las empresas están siguiendo los siguientes pasos para implementar las tecnologías de FA:

- Fase 1: detección de la aplicación.
- Fase 2: definición del desarrollo del trabajo y verificación de un plan (caracterización mecánica y test no destructivos avanzados).
- Fase 3: ejecución del desarrollo de la tecnología y verificación del plan.
- Fase 4: definición preliminar de la placa de prueba y optimización topológica.
- Fase 5: fabricación y verificación de los componentes.

En lo referido a los materiales que se están investigando hoy día para la fabricación aditiva en su uso en el sector aeroespacial, estos son, junto con las propiedades obtenidas hasta ahora por las tecnologías de FA.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de aleaciones aeronáuticas (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space)

Materiales	Resistencia a tracción última, UTS (MPa)	Espesor de capa, Rz (μm)	Deposición por unidad de tiempo, η (cm ³ /h)
Aleaciones de titanio			
Ti6Al4V	>972	36	10÷12
Ti6Al7Nb	>1020	36	-
Titanio puro	>290	36	-
Aceros			
1.2709	1110	35	7,5÷14,5
AISI 431	625	38	-

1.2344 (H13)	1730	34	-
15-5PH	1100	14	6,5÷11,5
Aleaciones de aluminio			
AISi12	409	34	-
AISi10Mg	352	32	12÷45
AISi7Mg	294	31	-
Inconel			
Inconel 625	680	28	-
Inconel 718	1150	30	7

La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas de la resistencia a tracción de los distintos metales que se usan en el sector aeronáutico obtenidas con probetas fabricadas por medio de la FA. Es una información proporcionada por la compañía europea Airbus. Con estos valores se puede hacer una comparación con los obtenidos por métodos convencionales en la actualidad llegando a la conclusión de que son muy similares. En algunos casos contados en los que se produce un tratamiento específico tras la obtención de estas aleaciones mediante métodos convencionales, estos datos se acercan por debajo pero son próximos. También decir que estos valores se repiten en los ensayos que están teniendo lugar, cosa muy importante en la industria aeronáutica.

Sumado a lo anterior, existen otras compañías como Renishaw o Arcam que están muy avanzadas en el desarrollo de componentes mediante “impresión 3D” y mejoran enormemente las propiedades de las aleaciones metálicas anteriormente expuestas dando información de todas sus características e incluso de las propiedades que se obtienen al realizar post-tratamientos para mejorarlas. Un ejemplo es la aleación Ti6Al4V (grado 23)^[a] realizada mediante fundido selectivo por láser de polvo por la máquina AM250 de la empresa Ranishaw con un láser de 200W, cuyas propiedades pueden verse en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas para la aleación Ti6Al4V (Cortesía Ranishaw)

Powder composition / percent by mass								
Ti	Al	V	Fe	O	Residual	C	N	H
Balance	5.5 to 6.5	3.5 to 4.5	<0.25	<0.13	<0.1 each <0.4 total	<0.08	<0.03	<0.0125

Mechanical data	Stress relieved ^[b]		Test / ISO standard where applicable
	Min	Max	
Tensile strength (UTS) / MPa [*]	1 155	1 197	BS EN ISO 6892-1:2009
Yield strength (0.2%) / MPa [*]	1 070	1 111	BS EN ISO 6892-1:2009
Elongation at break / % [*]	2	8	BS EN ISO 6892-1:2009
Hardness / Vickers HV0.5 [*]	361	376	BS EN ISO 6507-1:1998
Surface roughness in X, Y / R _a μm	4	6	JIS B 0601-2001 (ISO 97)
Surface roughness in Z / R _a μm	4	7	JIS B 0601-2001 (ISO 97)
Generic data			
Density	4.42 g/cm ³		Generic wrought material
Thermal conductivity at 20 °C	6 W/m·K to 8 W/m·K		Generic wrought material
Melting range	1 635 °C to 1 665°C		Generic wrought material
Coefficient of thermal expansion ^[c]	8 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ to 9 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹		Generic wrought material

Los test para obtener dichos valores han sido realizados por los laboratorios de acreditación independiente Nadcap y UKAS. En la tabla aparecen los valores máximos y mínimos calculados mediante probetas fabricadas en las direcciones horizontal y vertical, es decir, tiene en cuenta que las propiedades no son similares según el eje pero se puede ver que son muy cercanas. La [a] se refiere a una aleación ELI (Extra Low Interstitial) y aparece en el párrafo anterior a la hora de identificar la aleación, [b] a que la fabricación se realiza con una resolución determinada por capas de un espesor de 30μm y se ha realizado un alivio de tensiones bajo argón a 730°C durante dos horas, y [c] significa entre 0°C y 100°C.

Estos valores son mayores a los obtenidos hasta ahora por Airbus y no solo se produce este hecho para esta aleación, sino también para algunas expuestas anteriormente. Esto es debido a la inversión realizada por la empresa Renishaw (o Arcam, por ejemplo) tanto en materiales como en la forma de realizar el proceso, obteniendo propiedades para sus aleaciones similares a las producidas por forja.

Para terminar, se presentan algunos ejemplos de casos prácticos en estudio de componentes aeronáuticos realizados por medio de la fabricación aditiva:

- ✚ Borde de ataque con lattices incorporados como estructura interna. Las propiedades de la chapa son muy similares a las que son obtenidas por métodos de conformado. Además, la fabricación de la pieza se hace de una sola vez, chapa y barras incluidas, estas últimas proporcionando un refuerzo a la estructura ante golpes, impactos...



Ilustración 40. Borde de ataque fabricado por ALM (cortesía de Airbus Defence & Space).

- ✚ El soporte de conexión del adaptador de carga útil (ACU). En este proyecto se busca rediseñar este componente fuera de los límites establecidos por la fabricación convencional y realizarlo mediante ALM de forma que se ahorre peso en los lanzadores y se pueda llevar más carga de pago al espacio (ahorro de muy grandes cantidades de dinero). Para ello, se parte del diseño original, y como se ha visto en este documento, se le hace la optimización topológica. De aquí se van a obtener unos diseños que van a ser estudiados de forma individual para que cumplan con los requerimientos y van a ser reforzados por lattices al final. Este es el proceso descrito:
 - Diseño original con un peso de 0,453 kg y formado por cuatro piezas.

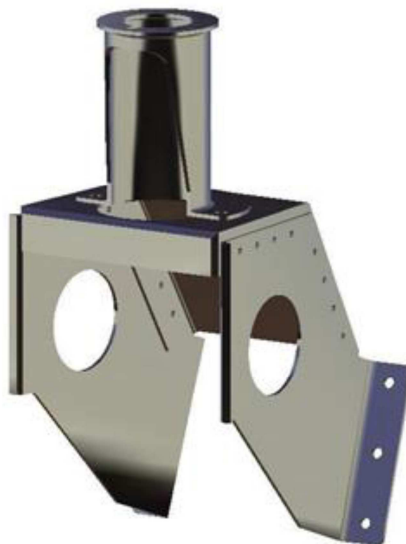


Ilustración 41. Diseño original del soporte de conexión (cortesía de CATEC).

- Primera optimización con un peso de 0,197 kg en un solo componente:

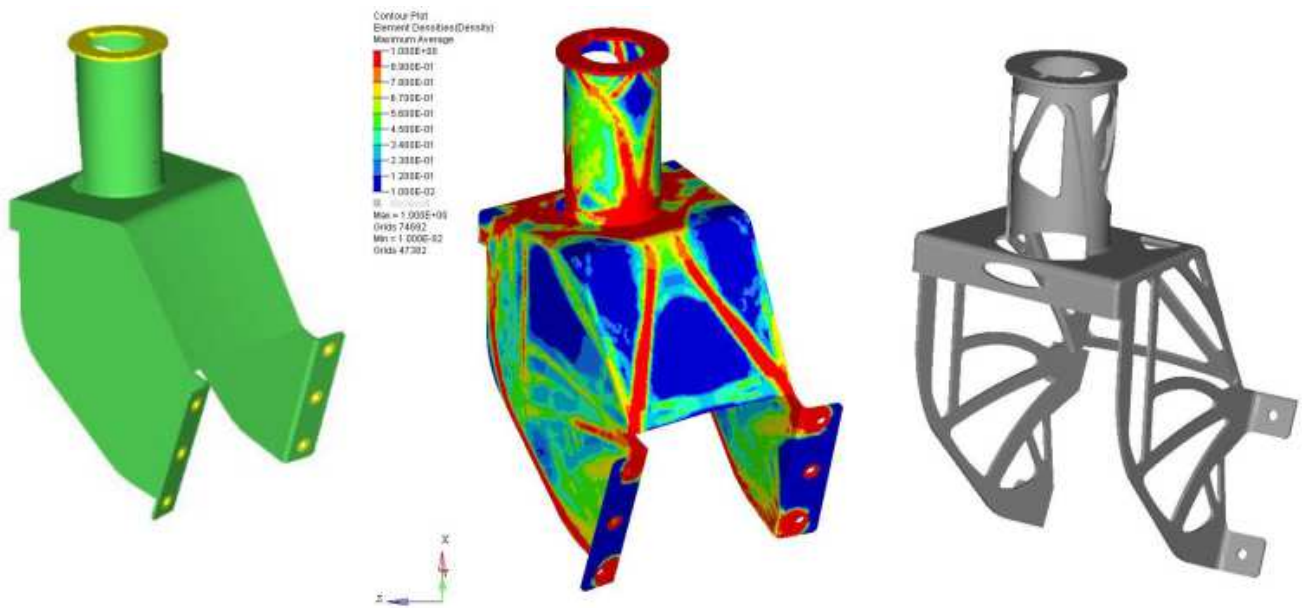


Ilustración 42. Primera optimización del soporte de conexión (cortesía de CATEC).

- o Segunda optimización con un peso de 0,168 kg en un solo componente:

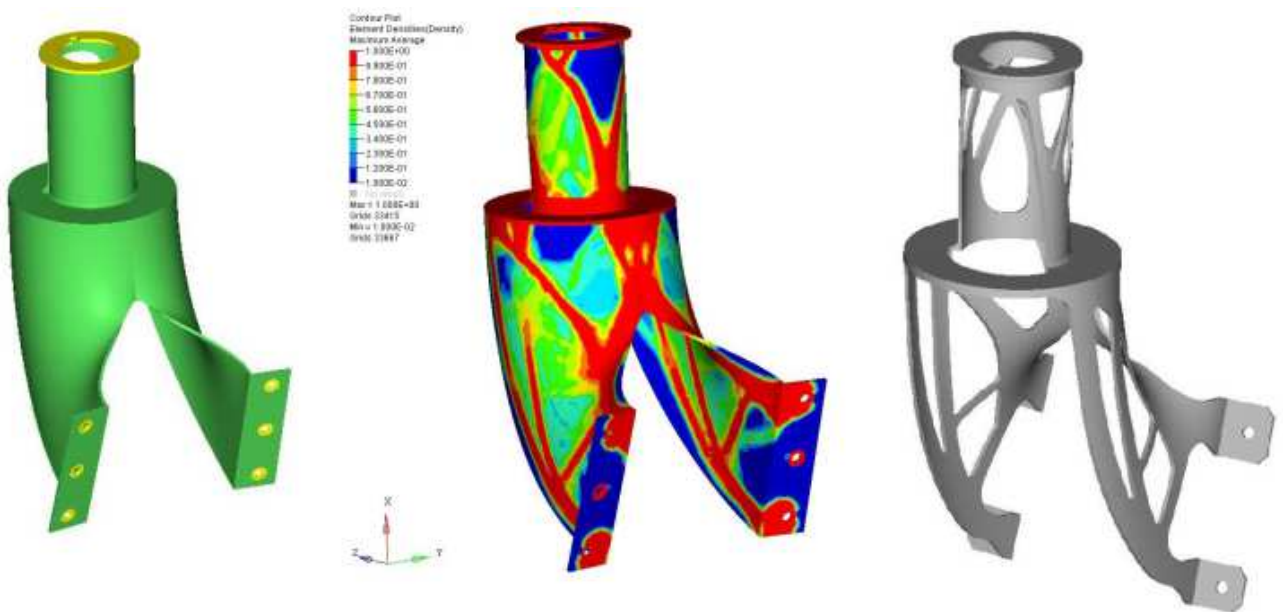


Ilustración 43. Segunda optimización del soporte de conexión (cortesía de CATEC).

- o Unión de las partes e incorporación de los lattices:

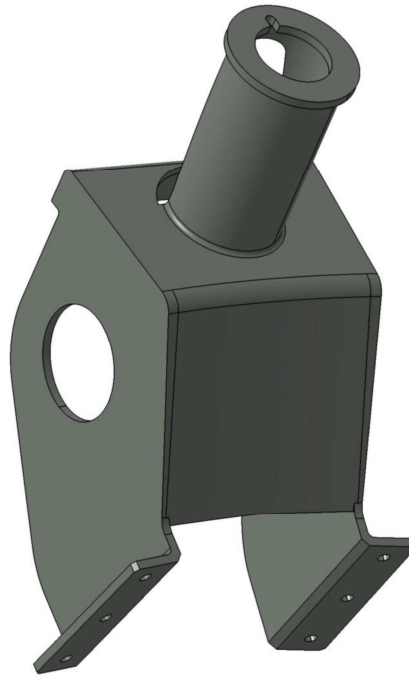


Ilustración 44. Los cuatro componentes en uno mediante FA (cortesía de CATEC).



Ilustración 45. Primera y segunda optimización con lattices (cortesía de CATEC).

- Establecimiento de la posición de construcción y distribución de soportes:

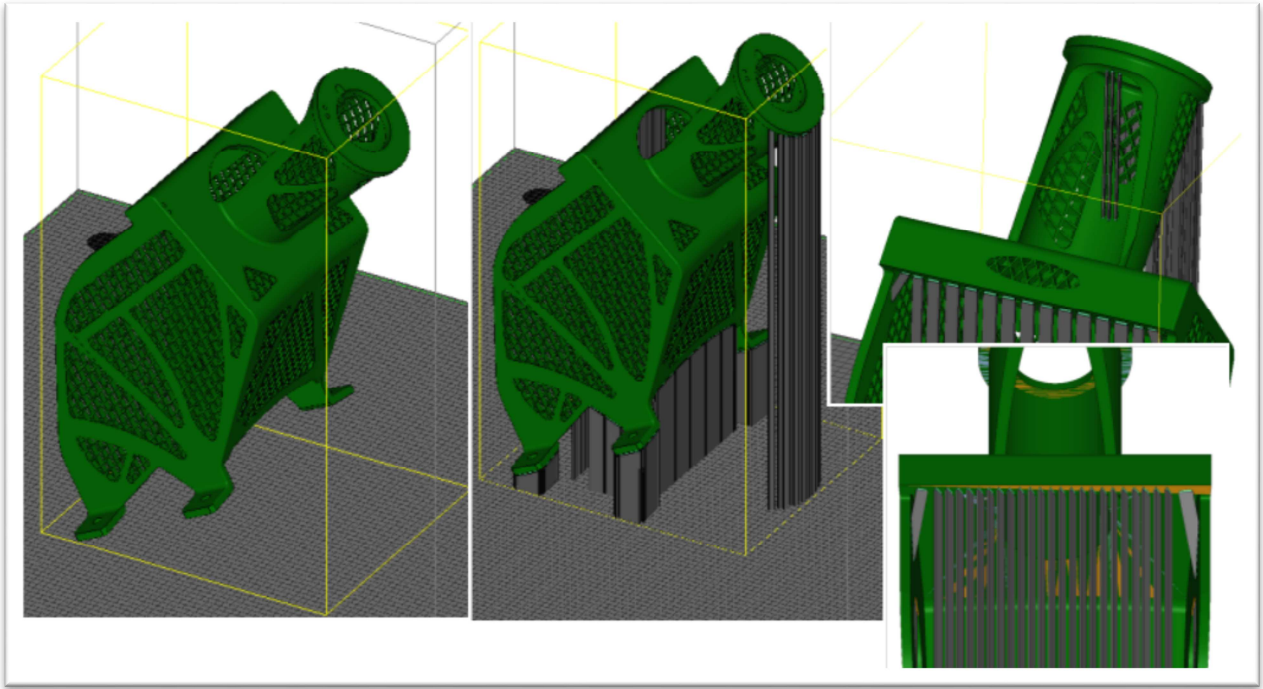


Ilustración 46. Posición del componente y soportes (cortesía de CATEC).

- “Capeado” y elección del camino de construcción (análisis en plataforma virtual):

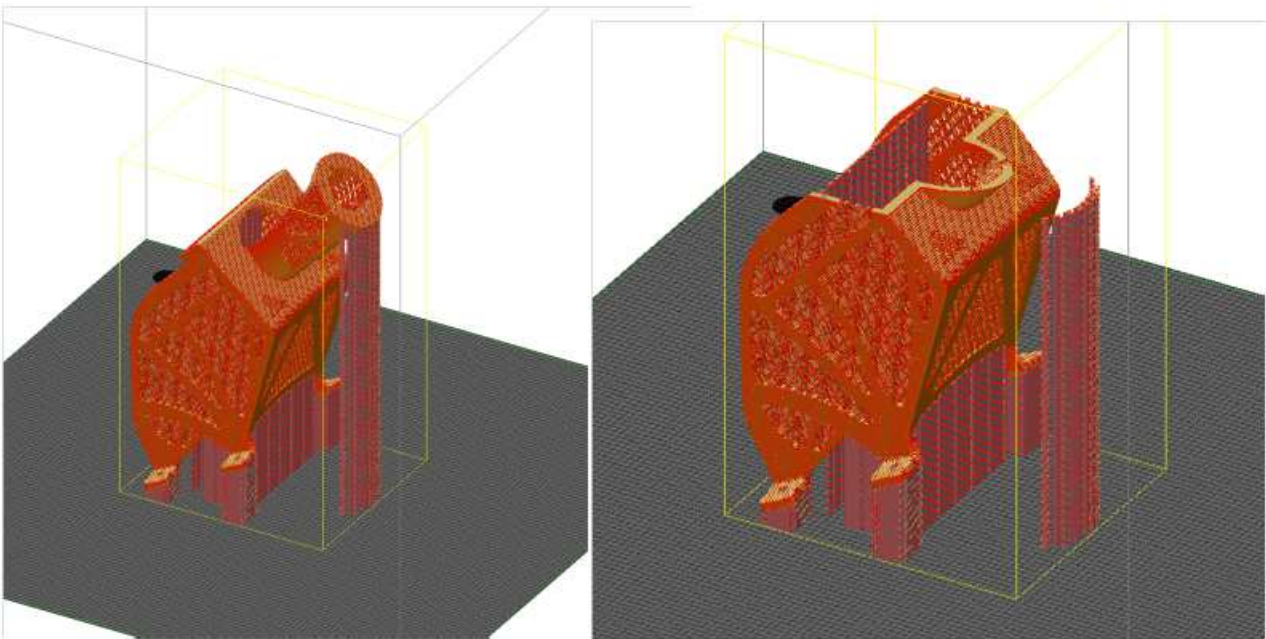


Ilustración 47. Slicing y simulación de la construcción (cortesía de CATEC).

- Posicionamiento de las piezas en la plataforma y selección de los parámetros de construcción:

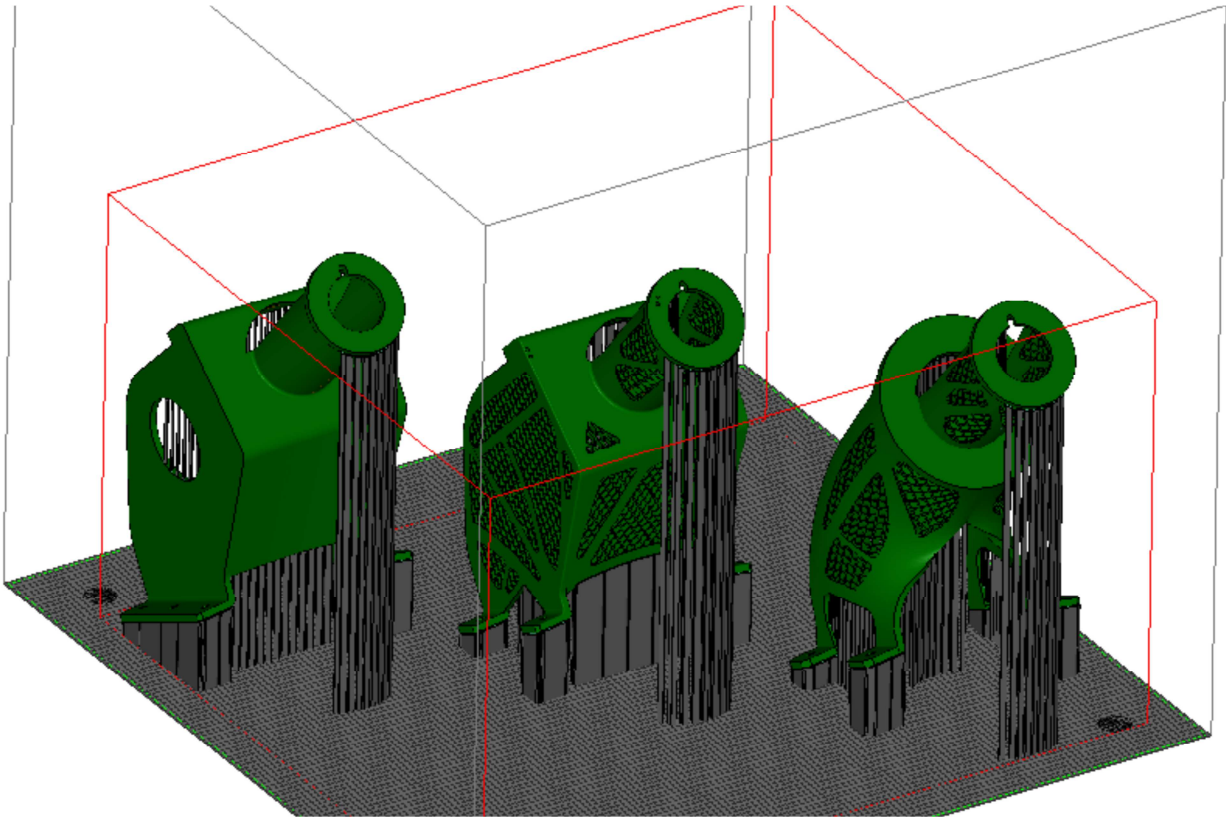


Ilustración 48. Selección de parámetros y posicionamiento en la plataforma (cortesía de CATEC).

- Resultados de la fabricación:

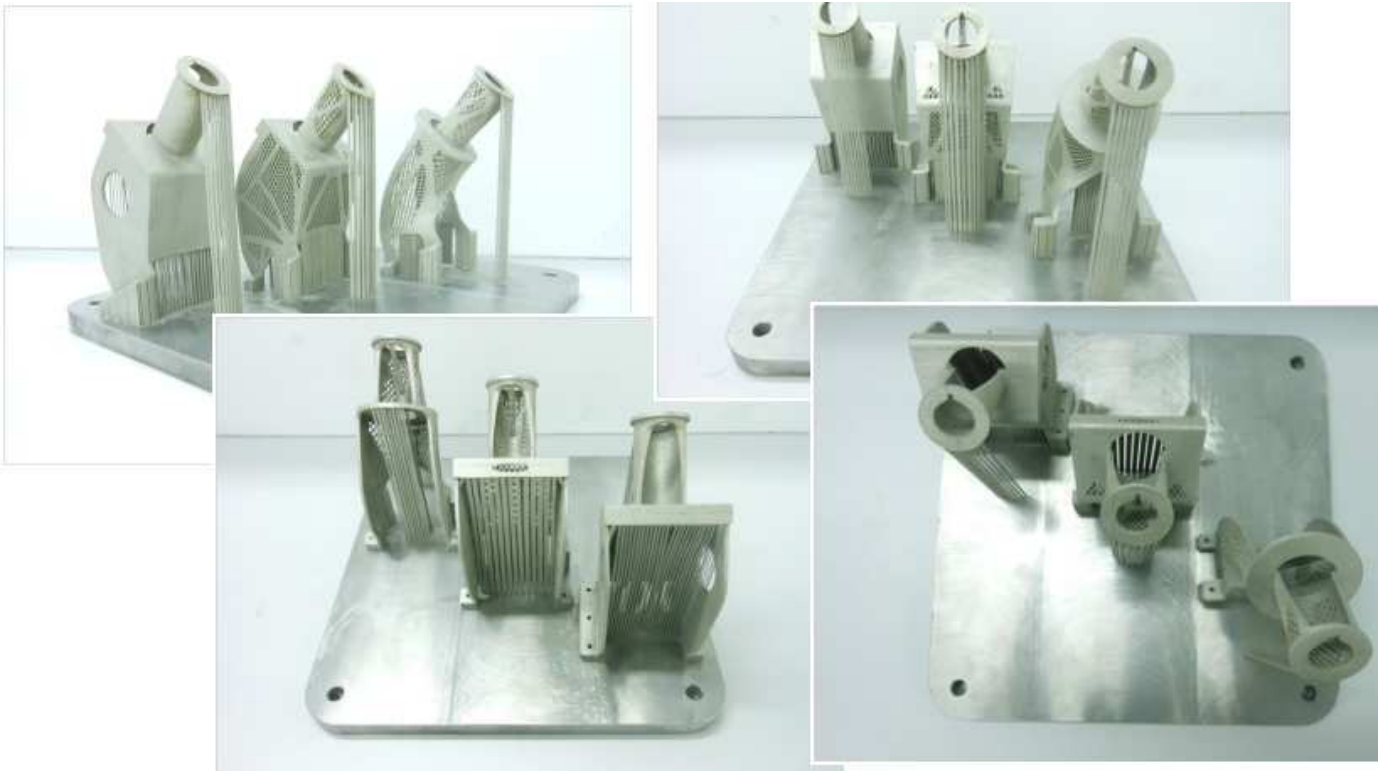


Ilustración 49. Pieza recién fabricada (cortesía de CATEC).

Tabla 7. Datos del proceso de fabricación de las piezas de la ilustración 40 (cortesía VII Workshop Tecnológico de Operaciones, Airbus Defence & Space y CATEC)

Building Report	
Part Volume [cm ³]	71
Support Volume [cm ³]	22
Slice number (Nº)	2707
Support slices (Nº)	80
Contour Speed [m/s]	0.20
Support Speed [m/s]	0.59
Hatch speed [m/s]	0.4
Build Time	28h50min

- Eliminación de soportes y separación de la plataforma de fabricación (pieza final):



Ilustración 50. Pieza final (cortesía de CATEC).

Aunque no se han usado todas para realizar este apartado, en esta lista existen varios casos de componentes en estudio en la industria aeronáutica [4, 4.1, 4.2, 4.3, 7, 11, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Capítulo 8.

Conclusiones. Tendencias futuras

En este capítulo se van a recoger las conclusiones obtenidas tras el estudio del estado del arte realizado a los métodos de fabricación aditiva.

Como se ha podido ver, al combinar las herramientas basadas en el MEF con las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas se consigue una nueva tipología de productos de gran valor añadido, donde el diseño es la etapa más importante en la pieza, mejorando y optimizando el desempeño de las funciones.

Recordar que los diseños mejorados se obtienen por este método mediante de un proceso de optimización del tamaño y forma del componente para una determinada sollicitación cumpliendo las restricciones del diseño. Esto se consigue con programas de optimización topológica y software de cálculo de estructuras, ambos usando el MEF.

Con todo lo anterior, usar la fabricación aditiva supone:

- Obtener componentes más eficientes: que cumplan con las sollicitaciones y restricciones, y tengan la cantidad de material necesaria (sumando un factor de seguridad).
- Lo anterior da lugar a un ahorro de material.
- Poder diseñar componentes con distintos comportamientos y con un mismo material en el mismo proceso de fabricación. Esto es incluir zonas rígidas (más reforzadas) y zonas flexibles (con menor rigidez, más ligeras).
- La complejidad de la pieza no afecta ni al tiempo ni al coste.
- Una reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado para productos personalizados y posibles modificaciones. Actualmente, la

fabricación aditiva es competitiva en series cortas, ya que no se necesita una inversión inicial en utillajes.

- Todas las piezas, incluso las modificadas, se obtienen de la misma máquina.

Además, hay que realizar los ensayos explicados en el “Capítulo 4. Restricciones en la fabricación” y de esta manera determinar las limitaciones de cada máquina.

Asimismo, dependiendo del componente, su aplicación, del material y/o de la tecnología de FA, es posible que sea necesario algún paso o comprobación adicional.

Por último, la fabricación aditiva tiene una gran acogida en el sector aeronáutico y tiene el potencial para revolucionarlo. La causa principal de esto es derivada de los puntos anteriores: el alivio de peso en estructuras (el objetivo más importante de la industria aeroespacial y de sus diseñadores). Aún queda mucho trabajo antes de que la fabricación aditiva se estandarice en la industria, sobre todo en el campo de la precisión y acabados superficiales y las propiedades mecánicas de los materiales para aplicaciones de alto nivel. En este último punto sobre todo se quiere obtener propiedades similares a las de forja, donde la diferencia entre las capacidades mecánicas en la dirección de deposición del material y la perpendicular sean mínimas y los resultados estén acotados dentro de un intervalo.

Otro aspecto a destacar en este apartado son las tendencias futuras. Como puntos básicos hablar de que se están produciendo mejoras en la resolución (formas muy próximas a la neta), espesores de capa, velocidad de proceso, etc. prácticamente cada año. Esto conlleva que la metodología desarrollada debe ser actualizada según los avances producidos, puesto que estos previsiblemente mejorarán las capacidades y disminuirán las limitaciones de los procesos de FA.

Algunos puntos relacionados con la tendencia futura son:

- Diseño: con cada año que pasa se está mejorando la metodología de diseño óptimo para la fabricación de componentes basada en cálculos de MEF. Esto originará para su implementación programas de modelado mecánico 3D, con módulos de cálculo MEF (como los que se están desarrollando vistos en este documento), que permitiría al usuario interactuar entre los resultados obtenidos por el cálculo basado en MEF y la modificación de la geometría del componente, todo esto bajo la supervisión de un especialista en esta materia. Hay que recordar que el diseño ahora no va ligado a ninguna restricción geométrica y que existe libertad a la hora de pensar la forma del componente.

- Estandarización y certificación para su posterior explotación (consolidación)
- Factores económicos: que depende de la productividad y que este proceso sea competitivo. En estos aspectos, la fabricación aditiva mejora por años notablemente, descubriéndose nuevos materiales (mejor desarrollo de la base de polvo de material) para ser usados y obteniendo propiedades similares a las obtenidas por forja (en el caso de metales). Además, su mercado es amplio, dejando fabricar materiales tanto metálicos, como plásticos, cerámicos o materiales compuestos.

Con el paso del tiempo, la fabricación aditiva va en un continuo crecimiento y desarrollo tanto de su uso, como de su rango de aplicación, como en las mejoras de propiedades y productividad que consigue. En un futuro, y previsiblemente gracias a la fabricación híbrida, podríamos encontrar en este método la próxima revolución industrial, aunque para ello queda aún mucho trabajo por delante.

Anexo 1. Estándares actuales y su proceso (Diciembre del 2013). (Cortesía SASAM)

WG1 : Terminology	WG2 : Methods/Processes/Materials	WG3 : Test Methods /design	WG4 : Data Processing				
<p>VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologies. Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen</p> <p>Additive fabrication: Rapid technologies (rapid prototyping) Fundamentals, terms and definitions, quality parameters, supply agreements</p> <p>Voted</p>	<p>VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologies. Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen</p> <p>Additive fabrication: Rapid technologies (rapid prototyping) Fundamentals, terms and definitions, quality parameters, supply agreements</p> <p>Voted</p>	<p>ISO 17296-1: Terminology</p>	<p>TC ISO 261</p>	<p>TC ISO 681</p>	<p>ASTM F 42</p> <p>F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies F2921-11a2 Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies</p>	<p>UNE (ABNCTN 116)</p>	
<p>Ongoing work</p>	<p>ISO/ASTM 52915 Coordinate Systems and Test Methods ISO/HP 17296-1: Terminology</p>	<p>ISO 2747-1:2010 Plastics - Preparation of test specimens of thermoplastic materials using mouldless technologies - Part 1: General principles, and laser sintering of test specimens</p>	<p>ISO/CD 17296-3: Performance criteria and quality characteristics</p>	<p>ISO/VD 17296-2: Methods, process&materials</p>	<p>WK26433 New Terminology for Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Technologies WK26387 New Terminology for Lattice Structures</p>	<p>WK28741 Electron Beam Melting (EBM) Titanium 6Al-4 V EL/WK26106 New Specification for Material Qualification for Additive Processes WK26105 Material Traceability for Additive Processes WK26102 Metrics for Initial Conditioning of Machines &/or Performance Metrics for Metal Deposition WK25936 Electron Beam Melting (EBM) Titanium 6Al-4V WK25479 Conditioning of machines and performance metrics of metal laser sintering systems. WK27762 Laser Sintered Polyamides WK30657 Standard Specification for Laser Sintering Moderately Conductive High Melt Temperature Polymers for Non-Structural Aerospace Components WK33776 Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion WK33833 Additive Manufacturing Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum with Powder Bed Fusion WK37854 New Practice for Machine Operation for Directed Energy Deposition of Metals WK37855 New Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06825) with Powder Bed Fusion WK37883 Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Extra Low Interstitials with Powder Bed Fusion</p>	<p>UNE 118005 Layer by layer manufacturing in plastic materials Additive manufacturing Preparation of testing specimens</p>
<p>Ongoing work</p>	<p>XPE 67-030 - Specifications guideline in order to receipt parts produced by additive manufacturing</p>	<p>ISO/CD 17296-3: Performance criteria and quality characteristics</p>	<p>ISO/CD 17296-3: Performance criteria and quality characteristics</p>	<p>WK30107 New Practice for Reporting Results of Testing of Specimens Prepared by Additive Manufacturing WK37892 New Guide for General Design using Additive Manufacturing WK38342 New Guide for Design for additive manufacturing</p>	<p>ASERMI 1-001-009 Technical drawings. Representation for additive manufacturing</p>		
<p>Voted</p>	<p>ISO/ASTM 52915 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)</p> <p>ISO/CD 17296-4: Data processing</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>		
<p>Ongoing work</p>	<p>ISO/ASTM 52915 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)</p> <p>ISO/CD 17296-4: Data processing</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>	<p>F2915-12 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1</p>		

Bibliografía

- [1] Wohlers, T. Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. 2014. Colorado, USA. Wohlers Associates.
- [2] Fundación COTEC para la innovación tecnológica. Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas: fabricación aditiva. 2011.
- [3] Additive Manufacturing: SASAM Standardisation Roadmap. 2014
- [4] VII Workshop Tecnológico de Operaciones “3D PRINTING & AL: Present and Future in Aerospace Industry”. 2014. Sevilla (ITC de Airbus Defence & Space).
 - [4.1] A. Periñan, S. Tudela, A. Zorrilla, F. Lasagni, J. Vilanova. Additive Manufacturing of Topology Optimized Connector Support. 2014. CATEC-Airbus Defence & Space.
 - [4.2] Fernando A. Lasagni, Juan Pedro Vela, Carlos Pérez. Prospects and Challenges of Additive Manufacturing and Process Automation in the Aerospace Industry. 2013. FADA-CATEC.
 - [4.3] José Manuel Martín-Márquez. Workshop tecnológico MTI: Introducción a la Fabricación Aditiva (ALM). Airbus Defence & Space. 2014. Airbus Defence & Space.
- [5] Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez. Review Article: A Review of Additive Manufacturing. 2012. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami. USA.
- [6] Juan G. Ardila M. Manufactura por capas: prototipado rápido. 2007. Universidad Nacional de Colombia.
- [7] IK4 LORTEK: fabricación aditiva en metal. 2013.
- [8] Manuel Porras Rodríguez. Análisis técnico-económico de técnicas de fabricación aditiva para aplicación en diferentes sectores industriales. 2012. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. España.
- [9] Juan Vicente Haro González. Desarrollo de un procedimiento de diseño óptimo para fabricación de componentes mediante tecnologías aditivas. 2012. Universidad politécnica de Valencia. España.
- [10] Asunción Martínez García, Ignacio Sandoval Pérez, Josefa Galvañ Gisbert. Acción de Soporte a la Normalización en Fabricación Aditiva. Proyecto SASAM. 2013.

- [11] Lars Krog, Alastair Tucker & Gerrit Rollema. Application of Topology Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. 2011. Altair-Airbus UK.
- [12] Dr. Guillermo Reyes Pozo. BIP. Fabricación Aditiva: Tecnologías. Universidad Ramón Lull
- [13] Víctor Paluzíe Ávila. Materiales Metálicos y Plásticos Avanzados para Aplicaciones en Sectores Manufactureros con Elevados Requerimientos (Aeronáutico, Biomédico, Competición, Industria del Molde): Presentación de Casos de Éxito. 2009. RMS-EOS.
- [14] A-P. Rochus, J.-Y. Plesséria, B-M. Van Elsen, J.-P. Kruth, C-R. Carrus, T. Dormal. New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing (RP/RM) technologies for space instrumentation. 2007. A-Centre Spatial de Liège (CSL), Université de Liège, av. du Pré Aily, 4031 Angleur, Belgium. B-Katholieke Universiteit Leuven (KUL), Division PMA, Celestijnenlaan 300B, 3001 Heverlee, Belgium. C-Crif, Liege Science Park, Rue Bois Saint-Jean 12, B-4102 Seraing, Belgium.
- [15] Página web: www.custompartnet.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [16] Empresa ARCAM. Página web: www.arcam.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [17] Empresa Renishaw. Página web: www.renishaw.es, a fecha de Septiembre del 2014.
- [18] Empresa Stratasys. Página web: www.stratasys.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [19] Empresa 3Dsystems. Página web: www.3dsystems.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [20] Empresa EOS GmbH. Página web: www.eos.info, a fecha de Septiembre del 2014.
- [21] Página web: www.solid-scape.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [22] Empresa Optomec. Página web: www.optomec.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [23] Página web: www.imprimalia3D.com, a fecha de Septiembre del 2014.
- [24] Wohlers, T. Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. 2014. Colorado, USA. Wohlers Associates.