



Oportunidades Industria 4.0 en Galicia

Convenio de colaboración entre el Instituto Gallego de Promoción Económica, la Alianza Tecnológica Intersectorial de Galicia y los centros integrantes de esta alianza para la detección y análisis de oportunidades sectoriales para las empresas industriales gallegas en el ámbito de la industria 4.0



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
DEFINICIÓN/DESCRIPCIÓN	4
BREVE HISTORIA	7
VENTAJAS Y LIMITACIONES	7
Ventajas asociadas a los productos.....	8
Ventajas asociadas a los procesos de fabricación	9
Limitaciones de los procesos de FA.....	10
TENDENCIAS.....	11
APLICACIONES ACTUALES.....	12
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA.....	15
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES METÁLICOS	15
Proceso de fusión selectiva por láser	17
Proceso de fusión selectiva por Haz de Electrones (EBM)	18
Laser Metal Deposition (LMD o 3D Cladding)	20
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS	21
Fotopolimerización con láser - Estereolitografía (SLA)	21
Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)	22
Fusión selectiva por láser (SLS)	24
Deposición de hilo fundido (FDM)	25
Binder Jetting	26
Material jetting - Polyjet	26
Deposición por Laminación Selectiva (SDL-LOM)	28
APLICACIONES POR SECTOR.....	29
SECTORES Y APLICACIONES DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES METÁLICOS	29
Sector biomédico	29
Sector automoción.....	30
Sector matricería	31
Sector aeroespacial	32
Sector naval.....	33
SECTORES Y APLICACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS.....	34
Sector aeroespacial.....	34

Sector aeronáutico.....	35
Arquitectura	37
Sector automóvil.....	38
Sector naval.....	41
Sector médico.....	42
Industria Alimentaria	46
Sector textil	48
Sector madera	52
Matricería.....	53
Otras aplicaciones industriales	56
EQUIPAMIENTO DISPONIBLE EN EL MERCADO DE FABRICACIÓN ADITIVA	59
CONCLUSIONES/IMPACTO EN LA INDUSTRIA	65
RETOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA	65
Perspectiva de la fabricación aditiva a medio y largo plazo.....	66
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	71

INTRODUCCIÓN

DEFINICIÓN/DESCRIPCIÓN

El término **Industria 4.0** surge como impulso del gobierno alemán para atraer la modernización de su tejido empresarial, fuertemente dependiente del sector productivo. Dentro de sus estrategias para el 2020 busca mantener unas factorías competitivas, capaces de desarrollar productos de alto valor añadido y de adaptarse a las necesidades del mercado. La factoría del futuro se prevé más inteligente, más interconectada, fácilmente monitorizable, auto-reparable y con la capacidad de producir objetos diversos dentro de la misma línea de producción con poca intervención humana, capaz de convertir la factoría y la producción en un servicio más.

Y en este contexto, la **Fabricación Aditiva** (FA) unida a otras tecnologías habilitadoras, será una herramienta clave para abordar algunos de los desafíos europeos y sus objetivos posteriores, en particular, el crecimiento y la creación de valor añadido de calidad.

Los **procesos convencionales de fabricación** de componentes requieren el uso de gran cantidad de elementos de control, necesarios para conseguir niveles de precisión y fiabilidad muy elevados. La utilización de sistemas informáticos en las fases de ingeniería de diseño, fabricación y simulación de un producto, en combinación con otras técnicas basadas en la mecatrónica, han conseguido niveles elevados de eficacia. No obstante, todavía existen ciertas limitaciones en los procesos convencionales de fabricación, ya que en función del tamaño del lote a fabricar y la complejidad geométrica del componente, es necesario utilizar procesos y utillajes que pueden encarecer el coste del producto final.

Actualmente se disponen de procesos de transformación con los que podemos arrancar, deformar, fundir y unir materiales para la fabricación de componentes en todos los sectores industriales, y desde hace unos años, también podemos acumular material por deposición, solo donde es necesario, es decir, a partir de un **modelo virtual en 3D**, es posible fabricar un componente añadiendo el material según sea el volumen sólido del modelo diseñado, proceso conocido como Fabricación Aditiva.

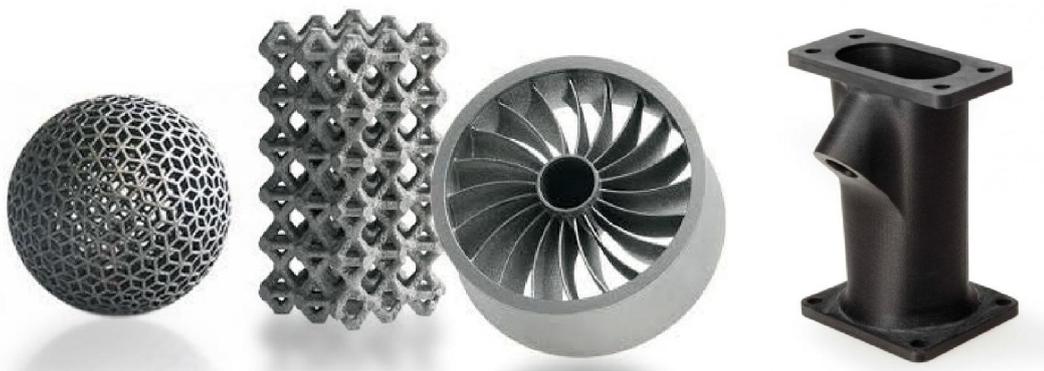


ILUSTRACIÓN 1. EJEMPLOS DE PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE FA EN METAL Y POLÍMERO

Los **procesos de aporte de material o aditivos** son aquellos que depositan un material, originalmente en estado sólido, líquido o en polvo, por capas sucesivas dentro de un espacio predeterminado y con procedimientos electrónicos. Estos métodos también son conocidos con el acrónimo MIM derivado de su

denominación en inglés como Material Increase Manufacturing. Las principales características que diferencian las diferentes tecnologías de fabricación aditiva son:

- Los materiales que se emplean en la fabricación
- Cómo se crean las capas
- Cómo se unen unas capas con otras

Atendiendo a estos criterios, existen diferentes clasificaciones en función del **material de partida** (ver tabla 1) y el **proceso de obtención del modelo** (ver tabla 2).

ESTADO DEL MATERIAL	HERRAMIENTAS	PROCESOS	NOMBRE
Líquido	Radiación láser	Solidificación	Fotopolimerización con láser - Estereolitografía (SLA)
			Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)
			Impresión láser UV de sólidos
	Lámpara de luz UV		Fotopolimerización
	Impresión por inyección (Polyjet)		
Sólido	Cabezal extrusión	Fundido / solidificado	Modelado por deposición fundida (FDM)
	Cabezal Inyección		Material Jetting - Polyjet
	Laminación	Laminación	Fabricación por laminación (SDL)
Polvo	Aglutinante	Unión	Impresión 3D (3DP)
	Láser	Sinterizado	Sinterizado por láser (SLS-DMLS)

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FA EN FUNCIÓN DEL ESTADO DEL MATERIAL

TIPO	TECNOLOGÍAS	MATERIALES
Foto-Polimerizado	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros
	Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)	Resinas líquidas
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS, etc.), aleaciones eutécticas de metales, productos comestibles
Impresión	Inyección de material (Material jetting)	Ceras, fotopolímeros o metales
	Inyección de aglutinante (Binder jetting)	Cualquier material en polvo (Usualmente metales y cerámicos, aunque también maderas)

Fusión en lecho de polvo	Sinterizado Selectivo por láser (SLS-DMLS)	Materiales en forma de polvo, principalmente metales y aleaciones, materiales compuestos, cerámicos, termoplásticos y elastómeros termoplásticos.
	Fundido selectivo por láser (SLM)	
	Fusión por haz de electrones (EBM)	
Laminación	Laminated Object manufacturing (LOM)	Láminas de termoplásticos, papel/cartón, fibra de carbono y otros materiales compuestos o metales (chapas).
	Selective Deposition Lamination (SDL)	
Depositado mediante energía dirigida	Laser cladding	Materiales en polvo o compactados, principalmente metales y aleaciones.
	Fusión de iones (IFF)	

TABLA 2. PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA SEGÚN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MODELO.

Otra clasificación de las tecnologías de FA que resulta muy interesante, es en función de la **naturaleza del material de partida**: polímero, metálico o cerámico, clasificación muy ligada a los diferentes sectores industriales (Ver tabla 3).

Tecnologías de FA	POLÍMEROS	Estereolitografía (SLA) Modelado por deposición Fundida (FDM) Sinterizado Selectivo por láser (SLS) Laminated Object Manufacturing (LOM) Binder jetting Material jetting
	METALES	Selective Laser Melting (SLM) o Laser Cusing Electro Beam Melting (EBM) Laser Metal Deposition (LMD o 3D Cladding)
	CERÁMICOS	Sinterizado selectivo por laser (SLS) Impresión tridimensional (3DP) Modelado por deposición fundida (FDM) Estereolitografía (SLA)

TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FA EN FUNCIÓN DE LA NATURALEZA DEL MATERIAL

BREVE HISTORIA

Los procesos de fabricación aditiva son herederos de los procesos de Fabricación Rápida de Prototipos (conocidos también por el término inglés **Rapid Prototyping**) en los que el objetivo final era la creación de un prototipo físico a partir de un CAD 3D, pero que rara vez cumplía con los requisitos mínimos para su uso como pieza funcional.

Inicialmente, el impacto industrial de estos procesos fue pequeño debido fundamentalmente al alto coste de los sistemas de fabricación rápida y a que su uso estaba limitado a la fabricación de prototipos no funcionales. Las empresas usuarias de estas tecnologías se concentraban únicamente en el sector médico y aeronáutico/aeroespacial.

A lo largo de la década de los 90 se desarrollaron nuevos procesos de *Fabricación Aditiva* orientados a la **fabricación de piezas funcionales**, tanto en materiales poliméricos como metálicos, y se comenzaron a comercializar sistemas capaces de fabricar piezas funcionales en materiales como Nylon, ABS o aleaciones metálicas como acero inoxidable, aleaciones base níquel o base titanio. En esta década se pasa a denominar a estos procesos **Rapid Manufacturing** o Fabricación Rápida y comienzan a ser utilizados por otros sectores en algunas aplicaciones industriales como la fabricación de pequeños moldes, insertos de moldes de alta complejidad y la fabricación de componentes de plástico para vehículos de competición o de muy alta gama. Sin embargo, el precio de los equipos seguía siendo prohibitivo para la mayoría de las empresas y el nicho de aplicaciones donde las técnicas de fabricación rápida podían ser rentables se reducía a pocos clientes.

En la actualidad, es frecuente emplear el término de **Impresión 3D** cuando se habla de máquinas de impresión de alcance doméstico o semiprofesional. **Fabricación Aditiva** es el último término aplicado y se utiliza para describir la tecnología en general. Es muy habitual cuando se hace referencia a aplicaciones de fabricación de componentes funcionales, usando equipos industriales de altas prestaciones.

El gran impacto de esta tecnología en los últimos años se debe fundamentalmente a:

- La **liberalización de patentes**, cuyo efecto inmediato fue la investigación y la innovación en maquinaria, software, materiales y aplicaciones (por ejemplo, la patente del proceso FDM que tenía la empresa norteamericana Stratasys).
- Proyectos de **hardware libre** (como el RepRap), con código abierto.
- Al importante **avance en ciencia e ingeniería** de los materiales.

Todo esto ha supuesto el desarrollo de nuevos procesos y métodos de *Fabricación Aditiva* con un amplio espectro de materiales, calidades de pieza y aplicaciones.

VENTAJAS Y LIMITACIONES

Las principales características que distinguen el proceso de *Fabricación Aditiva* de cualquier otro proceso de fabricación industrial y que, como se verá posteriormente, le confiere enormes ventajas competitivas, son las siguientes:

La **complejidad geométrica** que se debe conseguir no encarece el proceso: Características como la esbeltez, vaciados interiores, canales internos, espesores variables, formas irregulares e incluso la reproducción de la naturaleza (persiguiendo ergonomía, aerodinámica, hidrodinámica, entre otros) son

retos que los métodos convencionales (sustractivos y conformativos) de fabricación de piezas no han resuelto más que con aproximaciones, ensamblajes o por medio de procesos de muy alto coste, y que para la FA son, en muchas ocasiones, propiedades muy poco relevantes a la hora de fabricar una pieza.

La **personalización** no encarece el proceso: la FA permite fabricar productos, sin penalizar el coste, independiente de si se tiene que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido; la personalización en masa es uno de los paradigmas que persigue la industria en países desarrollados y que se considera clave para su sostenibilidad.

Estas dos características se pueden traducir en ventajas en muchos sectores industriales, que hacen que la FA sea el proceso más competitivo para la fabricación de piezas en muchas aplicaciones. De hecho, permite fabricar diseños que son imposibles mediante otras tecnologías de fabricación convencionales.

Ventajas asociadas a los productos

Entre las ventajas asociadas a los productos que es posible fabricar, destacan:

- Personalización de productos con una total **flexibilidad en el diseño y construcción**. Se pueden producir piezas de prácticamente cualquier forma y sin casi limitaciones geométricas. Un ejemplo claro es la fabricación de implantes o prótesis adaptados a las particularidades de cada paciente.
- **Productos aligerados**: La complejidad geométrica tiene una gran influencia en el peso de un objeto. Técnicas de conformado como la fabricación por moldeo permiten obtener productos huecos, pero siempre con las limitaciones que impone el desmoldeo (extraer la pieza del molde, una vez solidificada), que en ocasiones impide obtener la pieza deseada o exige utillajes muy complejos que lo hacen inviable técnica o económicamente. Otra solución, empleando métodos convencionales, es descomponer en varias piezas un objeto, pero esto requiere de trabajos adicionales de ensamblaje y añade dificultades (falta de ajuste, por ejemplo) que pueden ser también muy limitantes. Las técnicas de FA superan todas estas restricciones y pueden llegar incluso a materializar gradientes de porosidad en un mismo material, aligerando solo aquellas partes del producto que el diseñador estima que estarán menos solicitadas.
- **Ahorro máximo de material**. Se elimina el desperdicio de material en forma de viruta de mecanizado. Existen estudios donde se concluye que es posible reducir hasta en un 40% el volumen de material en bruto.
- Se producen **piezas totalmente funcionales** y sin porosidad residual.
- Posibilidad de desarrollar **productos multimaterial, ergonómicos** o con varios **mecanismos integrados** en una misma pieza. En algunas tecnologías de FA, como es el caso de Objet, además de jugar con la porosidad de un mismo material, como se ha explicado, la FA puede fabricar aportando simultáneamente varios materiales en un mismo sólido, para así superar las limitaciones actuales en la relación peso/resistencia mecánica, aportando funcionalidades nuevas o abaratando costes. Es cierto que también existen técnicas conformativas de sobremoldeo, que pueden unir varios materiales en una misma pieza, pero la distribución multimaterial en todo el volumen es mucho más limitada, y las zonas de contacto suelen ser conflictivas por el distinto comportamiento (mecánico, térmico, dilatación...) de ambos materiales.

Ventajas asociadas a los procesos de fabricación

Y entre las ventajas asociadas a los procesos de fabricación, cabe mencionar:

- **Reducción del tiempo de lanzamiento al mercado.** La aplicación de la FA a la producción rápida de prototipos ha permitido reducir los errores de comunicación entre los distintos participantes en un nuevo diseño y acelerar su salida al mercado, así como reducir el riesgo de fracaso, aun cuando la fabricación en serie se ha seguido haciendo por métodos convencionales. Si se da un paso más, y se puede disponer de una técnica de fabricación para materializar el producto final, ya no como prototipo intermedio, se pueden reducir drásticamente muchas de las fases actuales de lanzamiento y validación, así como flexibilizar su adaptación a las continuas demandas en cambio constante de los mercados.
- **Productos con series cortas:** La fabricación permite reducir los lotes de fabricación, llegando incluso a la serie unitaria, sin apenas costes extras de fabricación, al prescindir de utillaje, lo que supone una ventaja absoluta respecto a métodos de fabricación sustractivos y/o de conformado.
- **Reduce errores de montaje** y por lo tanto los costes asociados a ellos: La integración de componentes puede permitir la fabricación en un solo paso del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes y reduciendo además posibles errores durante el ciclo completo de producción (control de inventarios, procesos intermedios de inspección, manipulaciones).
- **Reducción de costes en utillajes:** La posibilidad de implementar un modelo de negocio donde el producto no esté ligado a utillajes supone no sólo gran flexibilidad de adaptación al mercado, sino que se consigue una reducción o eliminación de los costes asociados (fabricación del utillaje, paradas por cambios de referencia, mantenimiento e inspección), y de muchos procesos intermedios. Además, cuando no es viable prescindir de utillajes (caso de grandes lotes, por ejemplo), las técnicas de FA se pueden aplicar en la simplificación de la fabricación de moldes, troqueles, plantillas... con total libertad en el diseño, permitiendo, por ejemplo, canales de refrigeración embebidos, o la adaptación a geometrías complejas.
- **Procesos híbridos:** Otra posibilidad de fabricación consiste en combinar procesos FA con procesos convencionales (sustractivos y/o conformativos), para aprovechar las ventajas de ambos. Por ejemplo, puede resultar muy conveniente combinar con tecnología de mecanizado por arranque de viruta (MAV). Así, se podría iniciar la fabricación de la pieza por tecnología FM, empleando únicamente la cantidad de material requerido, y aplicar MAV al final, para alcanzar una precisión determinada en el exterior.

A pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías FA no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores. Las limitaciones actuales son debidas, como se describe a continuación, tanto a los propios procesos de FA, que aún pueden ser mejorados, como a procesos periféricos o auxiliares (manipulaciones previas de material, postproceso, control de calidad) que condicionan en muchos casos su viabilidad, e incluso al desconocimiento de cómo diseñar los productos o reorientar los negocios industriales para integrar de forma exitosa estas nuevas tecnologías.

Limitaciones de los procesos de FA

La I+D+I en este campo en de los últimos años ha permitido que estos puntos débiles de la tecnología hayan mejorado considerablemente, convirtiendo la Fabricación Aditiva en una alternativa cada vez más real a los procesos de fabricación convencionales. Las principales limitaciones de los procesos de FA son:

- **Disponibilidad y coste de materiales:** Aunque es posible aplicar técnicas de FA en muchos materiales tanto metálicos como no metálicos, la gama disponible es muy inferior a la que se puede trabajar por métodos sustractivos y/o conformativos, y además el coste del material suele ser también bastante superior. Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales, que no justifican las inversiones necesarias en los fabricantes de nuevos materiales, y por tanto, repercute negativamente en su consumo. Disponer de nuevos materiales que satisfagan requisitos concretos de la industria y los consumidores es un aspecto crítico para el futuro desarrollo de la FA.
- **Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación:** Estos aspectos se presentan juntos, pues el aumento de la velocidad de fabricación condiciona la calidad del acabado superficial. Ambos son también retos importantes que debe resolver la FA para que sea ampliamente aceptada por sectores donde actualmente solo se admiten procesos de fabricación convencionales. Al ser las piezas fabricadas por adición de capas de material, irremediablemente este efecto es apreciable en la superficie. La mejora de esta característica está ligada a la reducción del espesor de la capa, lo que tiene una influencia directa en el tiempo de fabricación final.
- **Calidad de producto y repetitividad de proceso:** Algunas tecnologías de FA presentan problemas de repetitividad y capacidad de proceso, es decir, no se puede asegurar la precisión dimensional con la que se va a realizar una pieza y la siguiente. Asimismo, la estabilidad en las propiedades físicas del producto (dureza, elasticidad, carga de rotura, metalurgia...), aspecto crítico para su homologación en determinados sectores (automóvil, aeronáutico, médico...), es también una asignatura pendiente. Una de las principales causas de las desviaciones dimensionales en las piezas son las tensiones que se generan entre las diferentes capas, una vez se ha fabricado la pieza, ya que se producen pequeñas contracciones del material al enfriarse. Al igual que ocurre con otros procesos, se deberá trabajar más en profundidad en el conocimiento de este tipo de efectos, de manera que se puedan predecir y poder realizar el sobredimensionamiento adecuado para su correcta fabricación.
- **Tamaño limitado de piezas:** El volumen de pieza máximo que se puede construir hoy en día es bastante limitado. En piezas de plástico se puede llegar a dos metros, mientras que empleando metales no se puede superar un cubo de 500 mm de lado. Existe también un límite inferior de las piezas más pequeñas que se pueden fabricar y está condicionado por parámetros, como, por ejemplo:
 - El tamaño de polvo de material que hay que utilizar para que aporte seguridad en su manipulación durante todo el proceso.
 - El diámetro o «spot» mínimo que es capaz de procesar una máquina de tecnología láser, que no podrá conseguir detalles más pequeños que entre una y media y dos veces el diámetro del haz láser.
 - Espesor de capa de deposición de material.

- **Coste de la maquinaria:** De forma análoga a lo que sucede con el coste de la materia prima por lo limitado del mercado actual, el coste de la maquinaria supone otra barrera de entrada a la FA. Los precios de los equipos varían mucho: desde 15.000 euros una pequeña impresora 3D hasta máquinas de más de un millón de euros, en función de la aplicación final del producto, del tipo de tecnologías de FA que hay que emplear y de la calidad que se requiera para cada caso. La tendencia es que esta maquinaria, como ocurrió en el pasado con otras tecnologías, vaya reduciendo su coste al ir introduciéndose poco a poco en la industria y se alcancen economías de escala. El factor que más influye en el coste de las piezas fabricadas (fundamentalmente en FA con metal) es precisamente el precio/máquina que hay que repercutir en la fabricación de cada unidad. Estudios realizados por AIMME demuestran que el material puede suponer entre el 5 y el 25 % del coste real de la pieza, siendo el resto coste de procesado. En este cálculo afecta notablemente la baja velocidad del proceso de deposición de capas, que hace que la productividad por pieza sea pequeña y, en consecuencia, el coste/máquina por pieza, muy alto.
- **Desconocimiento de la dinámica del proceso,** especialmente para piezas metálicas: Son escasos los trabajos de investigación que han analizado los diversos aspectos de la mecánica del proceso aditivo y su evolución con el tiempo, por lo que no se controlan suficientemente todos los parámetros que le afectan. Por ejemplo, aún se desconocen las relaciones entre la cantidad de material empleado, la geometría de la pieza que hay que construir, la estructura y densidad de los soportes necesarios, la orientación de las piezas en el volumen de construcción y otros parámetros de operación como la relación entre el aporte de calor de fusión y la disipación de dicho calor.

A la hora de fabricar una pieza, es indispensable encontrar la manera de evitar los soportes, conseguir la mejor calidad superficial, el menor tiempo de fabricación, la mejor posición para limitar las tensiones internas y deformaciones y la disminución de problemas de roturas de los soportes durante la fabricación. La principal causa de estos problemas radica en la aportación de calor durante el proceso y su evacuación. Este último se transmite en parte a la atmósfera, pero gran parte se queda y se transmite al resto de la pieza, bien a través de los soportes hacia la plataforma o bien al polvo circundante. Los calentamientos y enfriamientos bruscos, cíclicos, en distintas geometrías de la pieza en construcción generan reacciones incontroladas y distintas en cada caso durante el proceso de fabricación.

Actualmente existen más de 11.500 patentes y aplicaciones publicadas sobre los procesos de fabricación aditiva, y cada año se publican cerca de 1.400 nuevas patentes que abarcan todas las facetas de la tecnología incluyendo: procesos, materiales y software.

TENDENCIAS

En la actualidad se dispone de una gran diversidad de **impresoras 3D**, desde las domésticas a las profesionales especializadas o las personales de código libre, con precios variables y diferentes capacidades, en cuanto a volumen de impresión como a materiales utilizados. Existe gran variedad de materiales disponibles en el mercado adecuados para la impresión 3D, pero no todos ellos cumplen con los requerimientos deseados ya sean desde el punto de vista de las propiedades iniciales del material o de la pieza final impresa.

El **plástico** sigue siendo todavía el material más utilizado en la impresión 3D. De acuerdo con un reciente informe de SmarTech Markes Publishing, se espera que la impresión 3D genere 1,4 millones de ventas de plásticos en 2019. Sin embargo, la industria está experimentando con **nuevos enfoques** novedosos, tales como resinas de base biológica a base de maíz y aceite de soja. Además, destacar el crecimiento de la **impresión 3D de metales**, los cuales tienen el potencial de fabricar productos finales terminados o prototipos, con una gran cantidad de aplicaciones en la industria.

Por tanto, es necesario mejorar algunos aspectos de la tecnología para obtener un proceso de impresión 3D competitivo, como son:

- Desarrollo de **materiales que puedan ser impresos a gran velocidad**. Una impresión más rápida mejorará la productividad del proceso de impresión 3D.
- Mejora del **acabado superficial** sin añadir tratamientos posteriores al proceso.
- Control de la **humedad de los filamentos** durante el procesado. La mayoría de los polímeros de impresión 3D son altamente sensibles a la humedad. La humedad del ABS y el PLA puede controlarse muy bien en procesos de producción de plásticos convencionales como la extrusión y el moldeo por inyección. La humedad causa la degradación de multitud de polímeros, puesto que reduce las propiedades mecánicas. Sin embargo, en impresión 3D no existe un control durante el procesado. Este problema ha de ser solventado para poder optimizar las propiedades mecánicas del producto final.
- Mejora de las **propiedades mecánicas**. Las propiedades mecánicas del producto final impreso están altamente influenciadas por las propiedades intrínsecas del material, pero también por los diferentes parámetros de impresión (temperatura de fusión del filamento, velocidad de impresión, temperatura de la base, velocidad de llenado, etc.)

APLICACIONES ACTUALES

La fabricación Aditiva posee un **enorme potencial de crecimiento**. En el año 2015, el mercado¹ de la fabricación aditiva fue de 3.8 millones de dólares, y se espera alcance los 16.2 millones de dólares en el 2018. Y aunque inicialmente la fabricación Aditiva se orientó a la obtención de prototipos, en la actualidad las piezas funcionales son su principal aplicación:

¹ <http://adacomputer.es/impresion-3d-que-materiales-se-utilizan/>

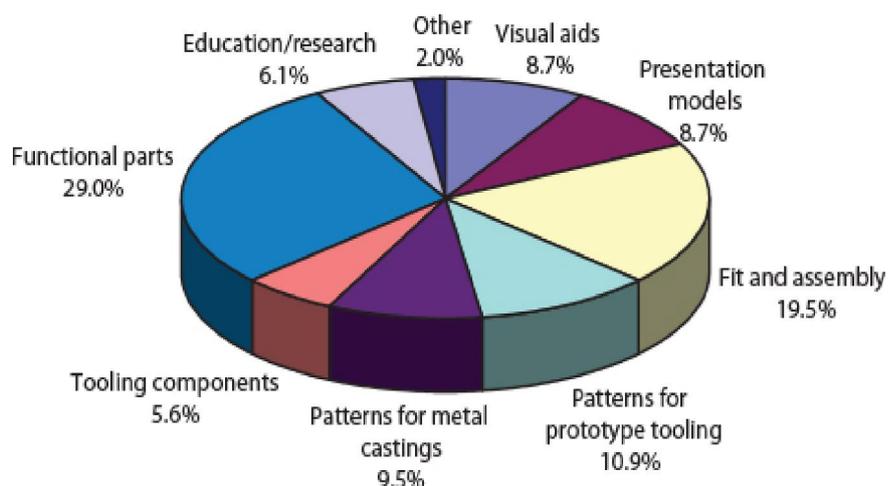


ILUSTRACIÓN 2. PRINCIPALES APLICACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA. FUENTE: WOHLERS REPORT 2014

El continuo desarrollo de las tecnologías ha hecho que las aplicaciones de la FA se hayan multiplicado exponencialmente. A día de hoy, mediante *Fabricación Aditiva* ya se fabrican una gran variedad de **componentes finales**, principalmente en los sectores de la **salud y la industria aeroespacial**, con una mayor madurez en la aplicación de esta tecnología, que permite obtener desde implantes personalizados según las necesidades del paciente, hasta componentes para los motores de las aeronaves que soportan 700º de temperatura de manera continuada. El resto de sectores, generalmente con mayores cadencias de producción, emplean la fabricación aditiva para prototipos, utillajes, modelos, etc., y poco a poco van introduciendo piezas funcionales por FA en sus procesos productivos.



ILUSTRACIÓN 3. NIVELES DE APLICACIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA POR SECTORES

El porcentaje de **utilización de la Fabricación Aditiva en los diferentes sectores** puede observarse en la siguiente gráfica:

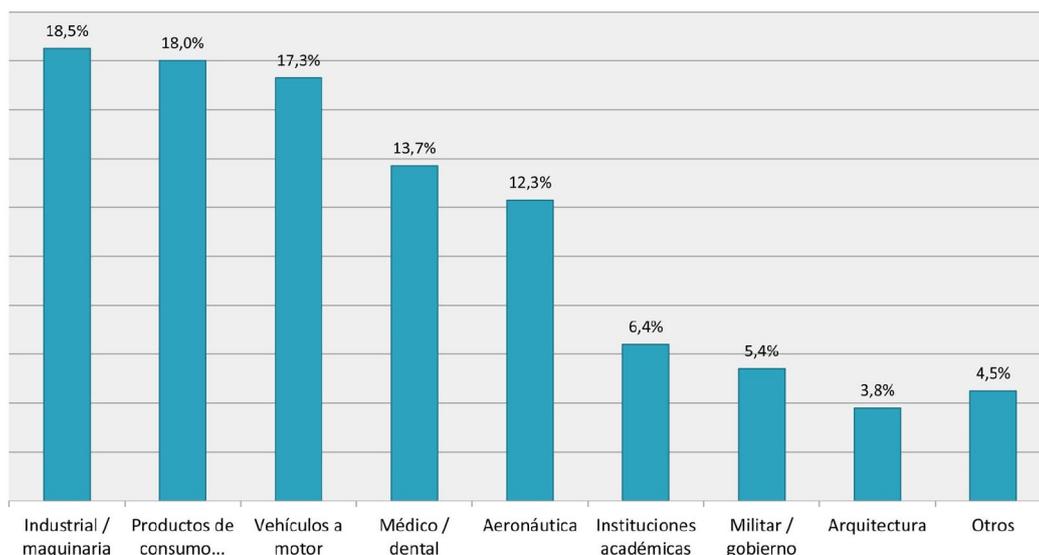


ILUSTRACIÓN 4. SECTORES INDUSTRIALES QUE UTILIZAN LA FABRICACIÓN ADITIVA. FUENTE: WHOLERS REPORT 2014

Según las necesidades de cada sector o componente, la fabricación aditiva puede desarrollarse a partir de **diferentes tecnologías**. La elección de una tecnología u otra dependerá de diversos factores como la funcionalidad que tendrá la pieza producida, o si se desea fabricar a partir de polímeros o aleaciones metálicas.

En resumen, la FA es la base de una **nueva revolución industrial**, consiguiendo un enorme ahorro en la fabricación, reducción de la cantidad de material necesario, eliminando los costes de ensamblaje, o la necesidad de diseñar y fabricar las piezas en puntos alejados del planeta, reduciendo por tanto los costes de transporte. Permite además abaratar la fabricación de piezas donde antes era más rentable fabricar el producto total, cambiando con ello los ciclos de vida de los objetos o incluso las reglas de producción que conocíamos hasta ahora.

Las aplicaciones de la FA en los distintos sectores industriales se desarrollarán en detalle a lo largo del presente informe.

PRINCIPALES TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA

PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES METÁLICOS

Para la **fabricación de piezas metálicas**, el principal requisito del proceso es la necesidad de una fuente de energía de mucha potencia para poder fundir el metal y de esta forma depositarlo. En función de las características de aporte deseadas, existen distintas alternativas en el mercado respecto a la fuente de calor a emplear. Cuando se requieren aportes muy selectivos con una zona afectada térmicamente mínima, se recurre a las tecnologías como el láser o el Electron Beam, donde se consiguen densidades de energía del orden de 107-109W/cm². En los casos en los que se requieren tasas de aporte mayores (por encima del kilo de material depositado por hora), se recurre a fuentes de soldadura al arco como TIG o plasma, donde se consiguen densidades de energía varios órdenes de magnitud inferiores pero se calienta un área mayor, lo que permite el aporte de más material.

En función del **estado del material** (ver Tabla 1), existen dos grupos de técnicas principales para llevar a cabo la fabricación aditiva de piezas metálicas:

- El primer tipo es la **fabricación directa con polvo predepositado** (también conocido como lecho de polvo o powder bed), en el que la consolidación de las capas de las piezas se realiza en dos fases. En la primera fase, el material de aporte en forma de polvo se deposita sobre la capa anterior, mientras que en la segunda fase, se aplica una fuente de alta energía tanto sobre el polvo predepositado como en la capa formada anteriormente, con lo que la capa se funde sobre la anterior consiguiendo así un material prácticamente 100% denso y alta definición geométrica.
- El segundo tipo de fabricación aditiva de piezas metálicas es el denominado aporte por **inyección del material de aporte**. En este tipo de procesos, la fuente energética utilizada genera un baño fundido en el material base donde se inyecta el material de aporte que al resolidificarse generará la capa de material correspondiente.

En términos generales, los procesos de polvos predepositados se aplican a la fabricación de piezas desde cero, mientras que los métodos de inyección de material aplican el proceso de fabricación aditiva sobre estructuras previas como piezas fabricadas por forja a las que se añaden detalles o sobre componentes de alto valor añadido que se desean recuperar.

	POLVOS PREDEPOSITADOS	INYECCIÓN DE MATERIAL
Precisión	Alta (aprox $\pm 20\mu\text{m}$)	Media (aprox $\pm 0.2\text{ mm}$)
Rugosidad	$\geq 2.5\ \mu\text{mRa}$	$\geq 10\ \mu\text{mRa}$
Integridad estructural	Alta Cámara vacío/atmosfera protegida	Alta Atmósfera protegida
Tamaño de piezas	Pequeño Limitado a tamaño de la cámara	Variable Uso en piezas grandes
Aplicación industrial	Fabricación directa de piezas	Reparación de piezas Recubrimiento Fabricación estructuras

TABLA 4. COMPARATIVA ENTRE LA FABRICACIÓN CON POLVOS PREDEPOSITADOS Y LA INYECCIÓN DE MATERIAL

Y en función de la naturaleza del material (Ver Tabla 3), los principales procesos de FA de materiales metálicos, que se desarrollaran en este capítulo, pueden ser:

- **Selective Laser Melting (SLM) o Laser Cusing**
- **Electro Beam Melting (EBM)**
- **Laser Metal Deposition (LMD o 3D Cladding)**



ILUSTRACIÓN 5. EJEMPLOS DE MÁQUINAS DE FA EN MATERIALES METÁLICOS Y PIEZAS OBTENIDAS

VENTAJAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN METALES

- Libertad de diseño: formas complejas, detalles internos, estructuras reticulares
- Personalización de productos y series cortas
- Eficiencia máxima del material (no desperdicios)
- Reducción tiempo lanzamiento mercado (flexibilidad cambios)
- No se requieren útiles, moldes ni troqueles
- Piezas totalmente funcionales y sin porosidad residual
- Productos aligerados, ergonómicos con varios mecanismos integrados
- Menor impacto medioambiental

LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN METALES

- Velocidad de fabricación limitada (5-20 cm³/h) (<0,16 Kg/h inox)
- Necesidad de soportes en salientes y zonas suspendidas (materiales metálicos)
- Disponibilidad y coste de los materiales (polvos)
- Tamaño limitado de piezas
- Acabado superficial de las piezas (SLM: Rz > 20 m)
- Estabilidad geométrica y repetitividad de propiedades

- Falta de normativas y especificaciones
- Inversión inicial equipamiento

Proceso de fusión selectiva por láser

El proceso de Fusión Selectiva mediante Láser, en inglés **Selective Laser Melting** o SLM, es un proceso de Fabricación Aditiva desarrollado recientemente para materiales metálicos²³⁴. Se basa en la fusión mediante la acción de un láser de polvo metálico predepositado en capas muy finas y uniformes sobre una plataforma de trabajo; el proceso se repite capa a capa hasta completarse la pieza. El láser genera en cada capa el contorno de la pieza a construir fundiendo el polvo. La plataforma desciende a lo largo del eje z tras finalizar cada capa una distancia igual al espesor de la capa trabajo (habitualmente entre 20 y 50 micras). Los procesos de aplicación y fusión se repiten de forma sucesiva hasta que se completan todas las capas que constituyen la pieza final.

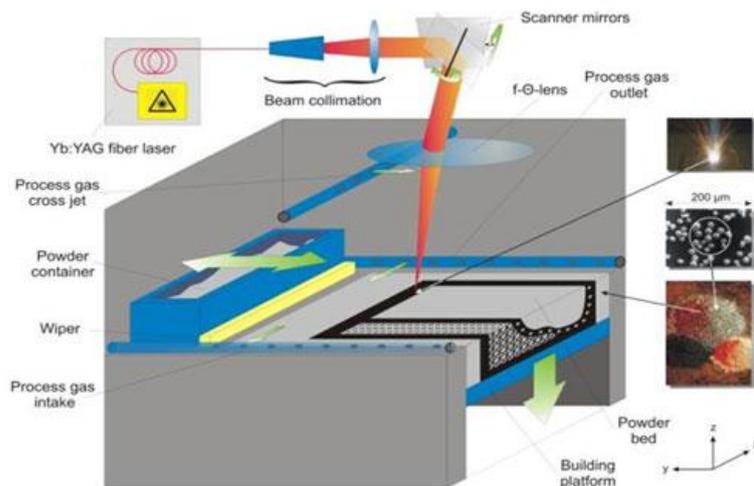


ILUSTRACIÓN 6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SLM

En la tecnología SLM se utiliza un láser como fuente de energía para fundir el polvo. Muchos de los materiales metálicos aptos para este proceso son susceptibles a la oxidación. Por este motivo el proceso SLM se lleva a cabo en cámaras cerradas y habitualmente en atmósferas protectoras (no oxidantes). Es habitual trabajar con **aleaciones de titanio o cobalto-cromo** en atmósferas inertes de argón.

² J. Kruth, «Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, » CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 40, pp. 603-614, 1991

³ J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke y T. Childs, «Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, » CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, pp. 730-759, 2007.

⁴ T. Wohlers, Wohlers Report 2012 Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2012.

En la actualidad existen distintas marcas comerciales de equipos SLM. Entre ellas destacan Electro Optical Systems (EOS), Realizer GmbH, Renishaw y SLM Solutions GmbH, las dos últimas surgidas de MTT Machines. La compañía americana Concept Laser comercializa también esta tecnología con el nombre alternativo de **Laser Cusing**, si bien se trata de la misma tecnología.

Aunque la gama de materiales procesable puede variar en función de las características de cada equipo, a día de hoy se pueden procesar una gran variedad de materiales metálicos entre los que se incluyen aceros inoxidables, aceros de herramienta (H13), aleaciones de titanio (TiAl6V4 y TiAl6Nb7), aleaciones de cobalto cromo, aleaciones de aluminio (AlSi12Mg y AlSi10Mg), aleaciones de bronce y aleaciones de níquel (INC625 e INC718).

Las **capacidades actuales** de la tecnología SLM se resumen en la siguiente tabla:

TECNOLOGÍA SLM	
Materiales	Aceros inoxidables, aceros herramienta, aleaciones base Ni, aleaciones Ti y Al (limitadas), aleaciones Co-Cr, bronce y metales preciosos
Densidad	> 99%
Tolerancias dimensionales	± 0,05-0,1 mm
Espesor de pared	> 200 m
Acabado superficial	Rz 20-100 m
Limitaciones geométricas	ángulos inferiores a 45º con soportes
Tamaño de la pieza	Limitado por plataforma (L < 250 mm)

TABLA 5. CAPACIDADES DE LA TECNOLOGÍA SLM

Proceso de fusión selectiva por Haz de Electrones (EBM)

La **tecnología EBM** (*Electron Beam Melting*) funde polvo metálico en vacío por la acción de un haz de electrones. El proceso EBM fabrica añadiendo el material por capas, es decir, el polvo metálico (con tamaño de partícula entre 45 y 100 micras) es repartido en una fina capa sobre el área de trabajo. El haz de electrones funde el polvo metálico selectivamente siguiendo exactamente el patrón de la sección geométrica de la pieza para cada capa. Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha fabricado. El espesor de capa puede variar entre 70 (alta calidad), 100 y 200µm (alta productividad).

En cada capa del proceso de fabricación, el haz de electrones realiza un precalentamiento del área de trabajo para elevar la temperatura (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. La tecnología EBM **se caracteriza por su alta productividad** comparada con tecnologías SLM, pudiendo llegar a procesar hasta 60 cm³/hora de material gracias a los 3000 W de potencia del haz de electrones.

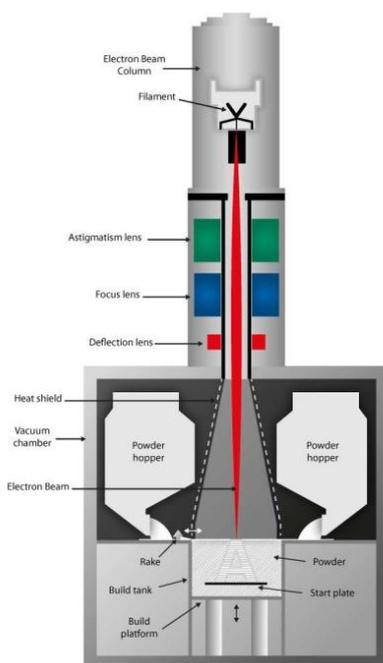


ILUSTRACIÓN 7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EBM

Esta tecnología fue por primera vez comercializada por la empresa sueca **Arcam**, en Goteborg (1997). El proceso es similar al sinterizado por láser, pero en este caso la fuente de energía es un cañón de electrones acelerados hasta aproximadamente 0,8 veces la velocidad de la luz. Al impactar contra el lecho de polvo, desprenden la energía en forma de calor que funde el material. Dado que el haz de electrones es concentrado y deflectado mediante campos electromagnéticos, es decir, no hay sistemas mecánicos móviles de espejo, se consiguen elevadas velocidades de recorrido del haz sobre el lecho. Una de las limitaciones de este sistema es que, al tratarse de partículas con masa, parte de la energía se transmite como cinética y el polvo se levanta de su lecho produciendo una pequeña nube que interfiere con el propio haz; este hecho limita el tamaño mínimo de polvo que se puede emplear y, en consecuencia, la precisión y acabado de las piezas.

El proceso se encuentra limitado a materiales conductores (normalmente se emplea polvo de titanio y cromo-cobalto) y a superficies que como en otros procesos de este tipo necesitan un postprocesado para su acabado definitivo. Otra de las particularidades es que trabaja en cámara de vacío con el material precalentado entre 600 y 800 °C, lo que en materiales como el titanio representa una ventaja metalúrgica. Por el contrario obliga a esperar un tiempo de enfriamiento para retirar el material sobrante y las piezas, lo que penaliza su productividad

Este proceso es capaz de imprimir **piezas muy densas y fuertes**. Además, apenas produce residuos ya que en el postprocesado se recupera casi todo el material sobrante.

Como **inconvenientes** de la fusión por haz de electrones, las impresoras 3D de EBM son muy caras y además requieren de un personal muy especializado para su manejo, por lo que la inversión inicial es muy alta. Por otro lado, la superficie final de las piezas es rugosa, haciendo necesario un postprocesado mecánico si la aplicación lo requiere.

Laser Metal Deposition (LMD o 3D Cladding)

Esta tecnología nace como **evolución de la soldadura y recargue láser**. Se caracteriza por utilizar una boquilla que alimenta material (según el caso, polvo o varilla) justo en el punto en el que se aplica una fuente intensa y concentrada de energía, como un láser o plasma. El material de aporte se funde sobre el sustrato y solidifica inmediatamente. Normalmente se proyecta gas inerte alrededor del punto de fusión para proteger el caldo. La aplicación inicial fue la de reparar o recargar piezas caras y normalmente de gran tamaño, como turbinas, hélices, etc. En estos casos el cabezal es móvil y se desplaza siguiendo las trayectorias programadas.

Hay sistemas de FA basados en esta tecnología con **diversas configuraciones**:

- **Cabezal fijo y mesa móvil orientable**: El cabezal está en posición vertical hacia abajo, mientras la placa de construcción está sujeta a un cabezal de hasta cinco ejes.
- **Cabezal superior móvil y mesa móvil**: Tiene más complejidad en la programación, pero más libertad en las geometrías.
- **Cabezal móvil y mesa fija**: El cabezal puede tener varios grados de movimiento, con importantes limitaciones de las geometrías que se pueden construir, y suelen alimentar hilo o varilla.

En principio **no existen limitaciones a los materiales** de aporte salvo las relativas a parámetros del proceso de soldadura. No se realizan estructuras de soporte, aunque en ciertas geometrías pueden llegar a requerirse, y teóricamente se podrían construir. Estas tecnologías entran dentro de FA porque, aunque las capas de adición no son todas iguales y paralelas, sí es cierto que se construye aportando material allí donde se necesita y que, al menos localmente, el aporte se produce en capas.

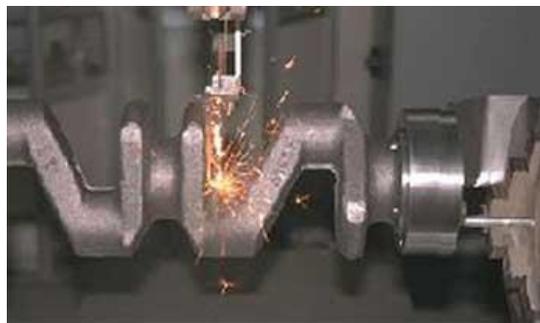


ILUSTRACIÓN 8. REPARACIÓN DE CIGÜEÑAL MEDIANTE LASER CLADDING



ILUSTRACIÓN 9. PIEZA FABRICADA POR CAPAS MEDIANTE LASER CLADDING

PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS

A continuación, se ofrece una breve descripción de los **principales procesos de impresión 3D** relacionados con materiales poliméricos y cerámicos, descritos en la Tabla 3.

- Fotopolimerización con láser - Estereolitografía (SLA)
- Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)
- Sinterizado Selectivo por láser (SLS)
- Modelado por deposición Fundida (FDM)
- Binder Jetting
- Material Jetting - Polyjet
- Deposición por laminación selectiva (SDL-LOM)

Fotopolimerización con láser - Estereolitografía (SLA)

En la **estereolitografía (SLA)**, el objeto se construye sobre una plataforma horizontal, sumergida en una resina líquida fotopolimérica. Un haz de luz láser (ultravioleta o visible) solidifica la superficie de la resina por fotopolimerización. La absorción de la luz por el fotopolímero limita el grosor de cada capa a unas décimas de milímetro (0.1-0.2mm), que coincidirá con la medida de cada estrato. Tras solidificar una capa de resina, la cubeta se hunde exactamente la medida de un estrato para que un nuevo haz de luz solidifique el siguiente. Estos ciclos se repiten hasta obtener el objeto. A diferencia de otras técnicas como el sinterizado selectivo por láser y la deposición de material fundido, en SLA es necesario un post-tratamiento al horno para terminar la polimerización y aumentar al máximo la resistencia del material. Finalmente se limpia la pieza con un solvente.

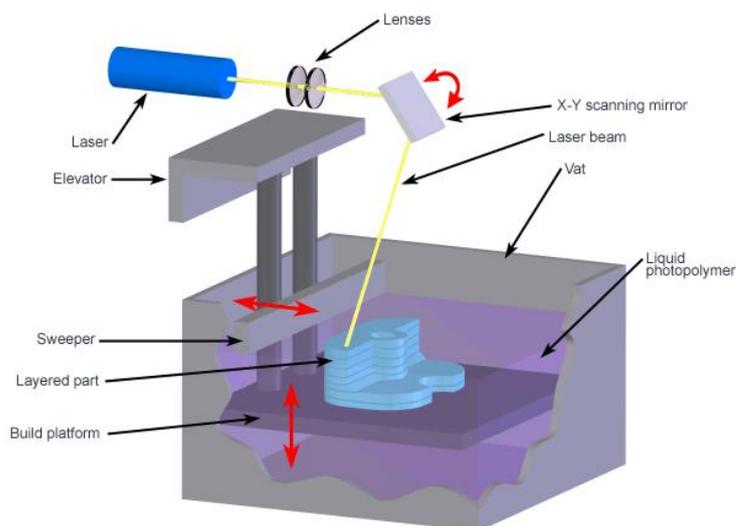


ILUSTRACIÓN 10. PROCESO DE ESTEREOLITOGRAFÍA. FUENTE: 3D NATIVES

Los materiales empleados son resinas de fotopolímero curable, epoxi-acríticas: Poly 1500, Tusk Solid Grey 3000, Xtreme, etc.

VENTAJAS E INCONVENIENTES

Una de las mayores ventajas de la estereolitografía es su **rapidez**. Los objetos funcionales pueden ser producidos en menos de un día. La duración del proceso depende de su tamaño y complejidad, que puede variar desde unas simples horas a más de un día. El acabado superficial de las piezas es muy bueno. La mayoría de equipos de estereolitografía son capaces de producir objetos con un máximo de, aproximadamente, 50x50x60 cm, aunque hay algunos que llegan a los 210x70x80 cm. Las piezas fabricadas mediante estereolitografía son suficientemente duras como para ser mecanizadas, y pueden también ser usadas en la creación de moldes maestros para moldeo por inyección, termoconformado, moldeo por soplado, y varios procesos de forja.

Por el contrario, **las resinas utilizadas pueden ser más frágiles y menos flexibles** que en el sinterizado láser SLS. Los objetos obtenidos mediante esta tecnología son sensibles tanto a la humedad ambiental como a la temperatura, aunque hay procesos posteriores que mitigan dichas debilidades. Aunque la estereolitografía puede producir una amplia variedad de formas, suele ser cara. El coste de la resina foto endurecible varía de 60 a 90 euros el litro, y el precio de los equipos desde 75.000 a más de 400.000 euros. De todas formas, el reciente interés por dicha tecnología ha hecho se produzcan modelos de consumo con precios muy asequibles, como la Ilios HD del fabricante OS-RC y la Form 1 de Formlabs.



ILUSTRACIÓN 11. PIEZAS DE AJEDREZ FABRICADAS MEDIANTE SLA

Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)

Conocida por sus siglas **DLP (Digital Light Processing)** al igual que sucede en la técnica de estereolitografía se trata de solidificar por acción de la luz una resina fotopolimérica en estado líquido, pero en vez de utilizar un láser ultravioleta, la fotopolimerización se realiza por el sistema de proyección por máscara DLP (Digital Light Processing).

La resina en estado líquido se expone a una imagen proyectada por el proyector DLP, desde el fondo de la máquina, que empieza el proceso de cura. Una vez terminado, la placa de cristal sube arriba, una nueva capa de resina líquida fluye, la placa baja otra vez hasta poner en contacto la capa sólida en construcción

con la resina líquida, y el proceso sigue adelante. Este método resulta en ocasiones **más rápido que la estereolitografía**⁵.

En general se usan **resinas plásticas curables** por UV, con una gama de materiales cada vez más amplia según marca y modelo de impresora. Por ejemplo, muchas empresas utilizan esta tecnología para fabricar los moldes de silicona y hacer coladas al vacío de poliuretano.

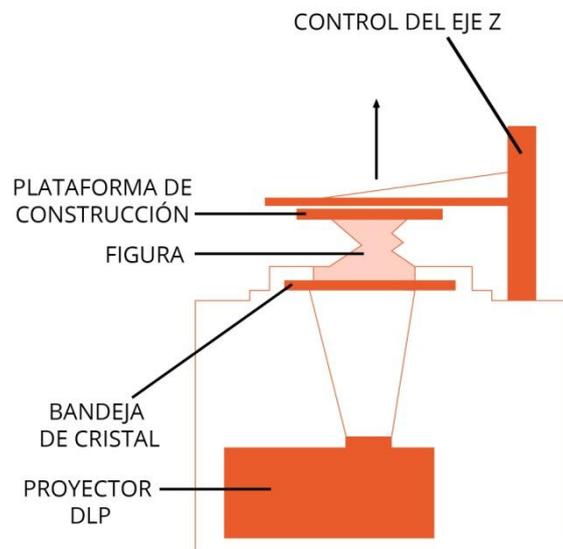


ILUSTRACIÓN 12. DIGITAL LIGHT PROCESSING. FUENTE: ENVISIONTEC

VENTAJAS E INCONVENIENTES

Es la aplicación estrella para **prototipado rápido**, por la alta precisión y resolución alcanzable, con unos acabados superficiales muy buenos. Gracias a esta gran resolución de impresión, permite imprimir piezas de gran complejidad geométrica.

Por el contrario, aunque cada vez se usan resinas con mejores características mecánicas, lo cierto es que los fotorpolímeros son frágiles por naturaleza. Aun así, son materiales suficientemente duros como para ser mecanizados e incluso pueden ser usados en la creación de moldes maestros, como por ejemplo para moldeo por **inyección, termoconformado o moldeo por soplado**. Otros inconvenientes de esta tecnología es la necesidad del uso de estructuras durante la impresión y de un postprocesado de endurecimiento.

Sus principales aplicaciones son en joyería, sector médico (prótesis dentales y audífonos), moldes y componentes de automoción.

⁵ Servicios Tecnológicos Avanzados, memoria 2007, AIMME <<http://www.aimme.es/documentos/difusion/memorias/2007/servicios-tecnologicos/servicios/rapid-manufacturing.html>>

Fusión selectiva por láser (SLS)

La producción de objetos mediante SLS requiere el uso de un **láser de alta potencia** (por ejemplo, un láser de CO₂) para fusionar pequeñas partículas de plástico, metal, cerámica o cristal en una forma tridimensional deseada.

El láser fusiona de forma selectiva material en forma de polvo en una cubeta mediante el barrido de finas capas transversales que van, así, generando el objeto tridimensional. Una vez completada una capa, la cama de material desciende y un rodillo alisa el polvo sobre la superficie de la cama, previamente a la siguiente pasada del láser que formará la capa siguiente. Esta capa posterior, es fundida con la anterior y el proceso continúa hasta formar el sólido que se pretende fabricar.

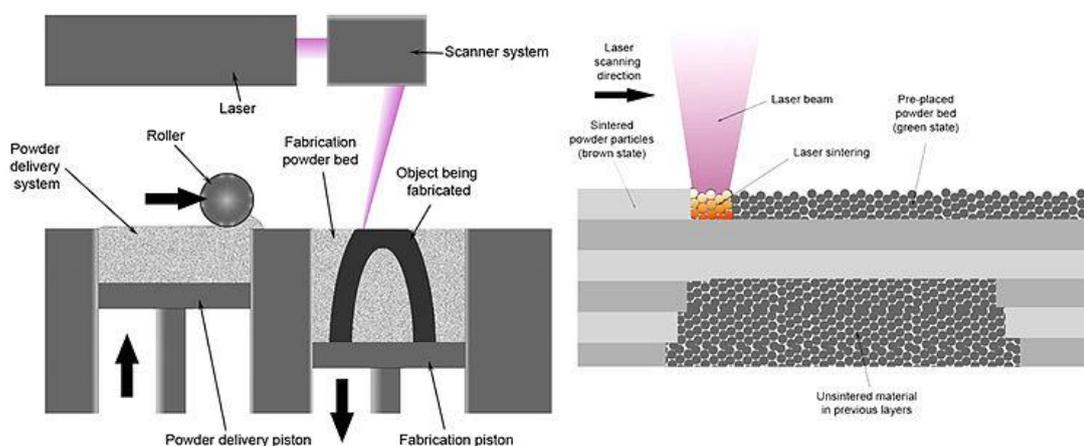


ILUSTRACIÓN 13. LASER SINTERING PROCESSING. FUENTE UJWAL BHATIA (2015)

El **espesor mínimo** de capa es de 0.08mm, y el **material** puede ser PA, PA-GF, PA2241, FR, etc.

VENTAJAS E INCONVENIENTES

Las piezas terminadas tendrán una **densidad que depende de la potencia pico del láser** más que de su duración, los equipos SLS usan un láser de pulso. El equipo SLS precalienta el material polvo base en la cubeta a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión de dicho material. De esta forma hace que la fusión del material por calentamiento sea más sencilla.

Al contrario que en otros procesos de fabricación por adición, como la estereolitografía (SLA) y deposición de hilo fundido (FDM), la sinterización selectiva por láser **no necesita de soportes** ya que la parte sinterizada está todo el tiempo rodeada de polvo sin sinterizar que actúa de soporte.

Al tratarse de una poliamida sus características mecánicas, en muchas ocasiones, son próximas a las que corresponderían al material definitivo. Es posible realizar piezas, en las que el material tenga una carga del 30 % F.V. Son elementos especialmente indicados para conjuntos en los que se prevé un montaje y desmontaje. Soportan temperaturas más elevadas que en el caso de la SLA.

Deposición de hilo fundido (FDM)

Esta técnica de fabricación se conoce por **Fused Deposition Modeling (FDM)** o **Fused Filament Fabrication (FFF)**, consiste en la deposición de un termoplástico fundido a través de un cabezal de extrusión de temperatura controlada, capa a capa, sobre una plataforma de fabricación. El proceso es similar al modo en que las pistolas de cola caliente extruyen las gotas fundidas de cola. Cada capa se temple al ser depositada y se adhiere a la anterior, así sucesivamente hasta que el objeto en cuestión es creado. El tamaño máximo del modelo es de 914*610*914mm.

El **espesor mínimo** de capa depende del material empleado, 0.13-0.25mm para ABS; 0.18-0.25mm para PC.

Esta tecnología es compatible con una larga lista de **polímeros termoplásticos** (ABS, Policarbonato, PPSF y ULTEM) lo que se traduce en una amplia gama de colores (el 98% de los colores de photoshop están disponibles) con excelentes propiedades mecánicas y biocompatibles. Además, también es posible imprimir con filamentos de madera y piedra (LayWood y LayBrick respectivamente), cerámica y materiales alimentarios, haciendo algunas adaptaciones en la extrusora. En consecuencia, la deposición de materia fundida es utilizada en distintas áreas: aeroespacial, automóvil, arquitectura, medicina, decoración, arte y cocina, tanto para el prototipado rápido como para la fabricación de piezas funcionales.

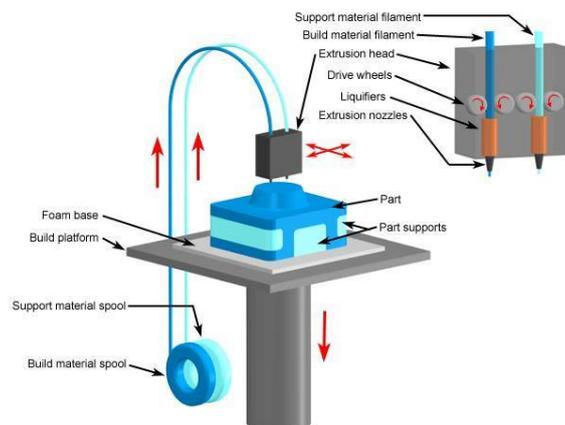


ILUSTRACIÓN 14. PROCESO FDM. FUENTE: 3D NATIVES

VENTAJAS E INCONVENIENTES

FDM emplea **termoplásticos como ABS⁶ y policarbonato**, obteniéndose buenas propiedades estructurales, comparables a las del material de producción seleccionado, lo que significa que es muy apropiado para aplicaciones funcionales. Las impresoras FDM tienen la mejor relación calidad-precio para la producción en pequeñas series, pero .como desventaja, se trata de un proceso más lento que los anteriores y menos preciso, donde la precisión depende del diámetro de la boquilla de extrusión.

⁶ ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Binder Jetting

Esta tecnología, desarrollada en los 90 por el MIT, trabaja con dos tipos de materiales, un **material en polvo** (que puede ser un polímero o un cerámico) y un **agente ligante o endurecedor** normalmente en estado líquido. El polímero en polvo es depositado en forma de una fina capa sobre la superficie de trabajo. Una vez depositada la primera capa de material, la máquina recorre el patrón de la pieza inyectando el agente endurecedor donde es necesario. Finalizada la primera capa, se dispensa una nueva capa de polvo, siguiéndole una nueva inyección de endurecedor. Después de cada capa, el objeto es descendido por la plataforma de fabricación⁷.

El **espesor mínimo** de capa es de 0.013-0.076mm.

Entre los **materiales empleados**, se encuentran ABS, PA, PC (polímeros) y vidrio (cerámicos). Como ventaja destaca la gran variedad de combinaciones posibles polvo-ligante, unido a la flexibilidad para obtener propiedades mecánicas diferentes. Aunque es un método rápido de fabricación, en ocasiones de deben someter a las piezas a post procesado, por lo que se añade tiempo de operación. Por último destacar, que no siempre es adecuado para la fabricación de piezas estructurales debido al empleo del agente ligante.

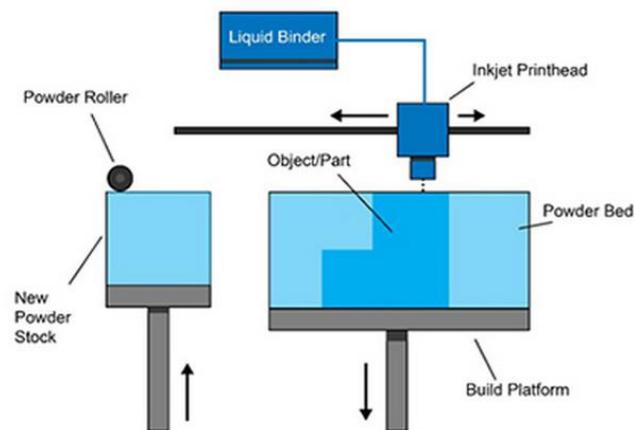


ILUSTRACIÓN 15. BINDER JETTING. FUENTE: LOUGHBOROUGH UNIVERSITY

Material jetting - Polyjet

Esta tecnología es **la más cercana a la impresión 2D** convencional. La creación de piezas consiste en la deposición de pequeñas gotas de material, generalmente fotopolímero, por medio de múltiples inyectoras las cuales curan al estar en contacto con luz UV. Algunos modelos de impresoras incluyen además del fotopolímero otro material que puede ser añadido como soporte y después retirado. Este material es, en ocasiones, un polímero soluble en agua y basta con introducir la pieza en agua para retirarlo.

⁷Russ, H (2015). Additive Manufacturing, Binder Jetting.

<<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>>

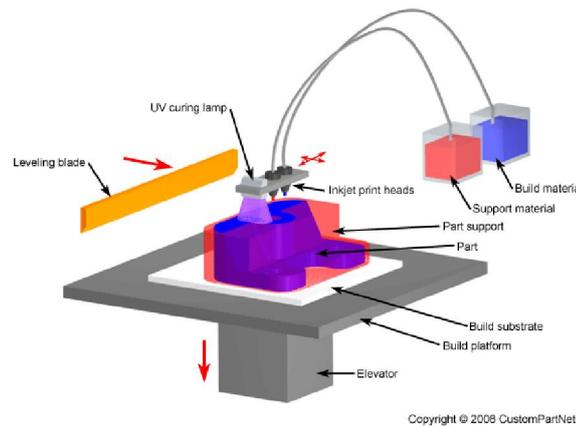


ILUSTRACIÓN 16. MATERIAL JETTING. FUENTE: LOUGHBOROUGH UNIVERSITY

El **espesor mínimo** de capa es de 0.017mm.

La gama de **materiales** es muy amplia, desde resinas traslucidas, polipropileno, ABS o resinas elásticas.

Dentro de los diferentes procesos basados en material jetting, cabe destacar el proceso Polyjet desarrollado por Stratasys, el cual consta de los siguientes pasos⁸:

- **Procesado previo:** el software de preparación de bandeja calcula automáticamente la ubicación de los fotopolímeros y el material de soporte a partir de un archivo CAD 3D.
- **Producción:** la impresora 3D imprime y cura al instante mediante luz UV las gotas de fotopolímero líquido. Se acumulan finas capas en la bandeja de construcción para crear una pieza en 3D. Si hay salientes o formas complejas que requieran soportes, la impresora 3D inyecta un material de soporte similar al gel que se puede eliminar posteriormente.
- **Eliminación del soporte:** el usuario elimina fácilmente los materiales de soporte a mano o con agua. Los modelos y piezas están listos para utilizar al sacarlos de la impresora 3D, sin necesidad de curado posterior.

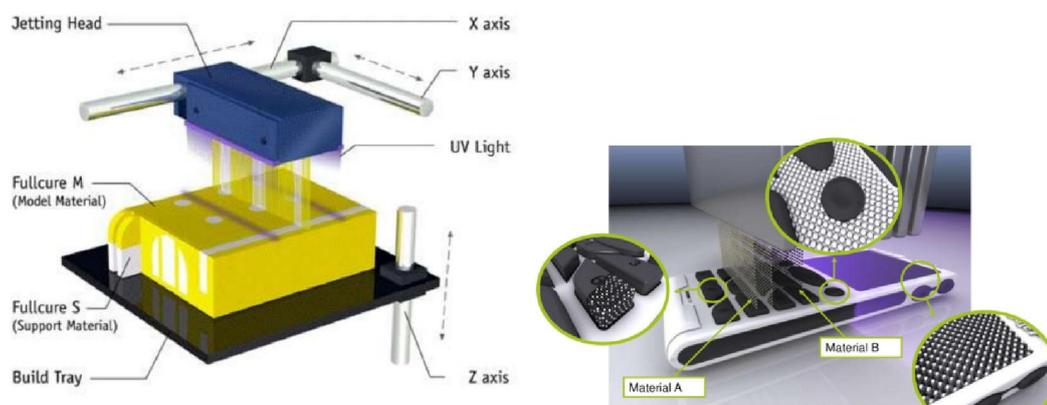


ILUSTRACIÓN 17. POLYJET. FUENTE: STRATASYS

⁸ Stratasys 2015. < <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology> >

Deposición por Laminación Selectiva (SDL-LOM)

Inventada en 2003 por el Dr. MacCormack, SDL no debe confundirse con la tecnología de fabricación de objetos por laminación (LOM). LOM es un proceso de fabricación aditiva en el que las capas de papel, plástico o metal laminados recubierto con adhesivo son sucesivamente pegadas entre sí y cortadas en una forma determinada mediante una cuchilla o un cortador láser. En SDL **se utiliza un adhesivo** que se deposita en la zona requerida, tanto del modelo como del soporte, y una cuchilla que corta el contorno de la capa.

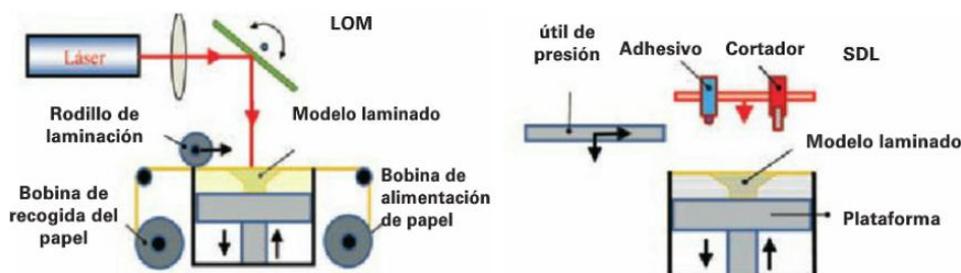


ILUSTRACIÓN 18. DEPOSICIÓN POR LAMINACIÓN SELECTIVA (LOM Y SDL)

En LOM, el **espesor de capa** es de 0.165mm, y en SDL, el espesor corresponde al espesor del papel utilizado más la capa del adhesivo. En ambos casos, los materiales de impresión son: Papel, plástico o metal, todos ellos en láminas.

VENTAJAS Y LIMITACIONES

Debido a que la tecnología de laminación de hojas no conlleva ninguna reacción química ni altas temperaturas, **no se necesita una cámara cerrada ni de vacío**, por lo que es más fácil construir modelos de gran tamaño. Los materiales utilizados también son de bajo coste, consistentes y fácilmente disponibles. Permite además crear la pieza con cables o electrónica integrada y el uso de diferentes materiales en una misma pieza.

Las aplicaciones de la laminación de hojas, principalmente se basan en la creación de **modelos a escala y prototipos conceptuales**, para la forma o diseño. También se puede utilizar para hacer moldes para la fabricación tradicional, como por ejemplo moldes de arena para procesos de fundición de metal.

Como inconvenientes, hay que destacar que la tecnología de laminación de hojas no permite crear piezas tan precisas como las creadas por otros métodos de impresión 3D, como pueden ser la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS). No es la tecnología ideal para la creación de objetos con geometrías complejas y como este proceso **no produce piezas de muy alta precisión**, no suele utilizarse para crear prototipos funcionales.

APLICACIONES POR SECTOR

SECTORES Y APLICACIONES DE FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES METÁLICOS

Los primeros sectores en utilizar la fabricación aditiva han sido el **automovilístico de alta gama, aeroespacial y bienes de consumo**. Las distintas aplicaciones están aumentando en sectores como el dental, médico y herramienta. La fabricación aditiva avanzada de metales se utiliza para producir cantidades pequeñas de piezas de consumo industrial, pero un número creciente de OEM (Fabricantes de equipos originales) está adoptando esta tecnología como parte complementaria integral de sus procesos de producción.

Sector biomédico

Los **implantes médicos** son uno de los nichos de mercado más importantes de la tecnología SLM. Al igual que el cuerpo humano, se trata de piezas personalizadas y únicas. La tecnología SLM tiene un gran número de ventajas en esta aplicación entre las que destacan: la posibilidad de fabricación de formas complejas y personalizadas, la inmediatez en el desarrollo de una solución (a partir de una tomografía de la zona a reconstruir se puede diseñar a medida un implante), la reducción del tiempo y de las complicaciones quirúrgicas (se puede ajustar el implante en modelos antes de la operación sobre moldes o esqueletos fabricados en polímero a partir de la zona a reconstruir) y la posibilidad de fabricación de estructuras ligeras y graduales con una mayor compatibilidad biomecánica, confort y osteointegración.

La fabricación aditiva puede aplicarse a la fabricación de **dispositivos médicos a medida** para implantes y guías craneofaciales. Los dispositivos ortopédicos y dentales son solo alguna de las áreas en las que puede utilizarse la fabricación aditiva, pero tiene muchas otras aplicaciones.

El uso de impresión 3D en **prótesis médicas** está avanzando rápidamente. En el año 2012 se hizo por primera vez un trasplante de mandíbula impresa en titanio. Hoy, trasplantes de este tipo ya no son una novedad y existen muchos casos exitosos de trasplantes de caderas, mandíbulas y otras partes del cuerpo. Como ejemplos, mencionar del desarrollo de implantes y prótesis maxilofaciales (coronas y puentes dentales, reconstrucción de mandíbula), su aplicación en traumatología (rodilla, cadera) y neurocirugía (implantes craneales y de corporectomía), a partir de aleaciones cobalto-cromo, titanio y acero inoxidable.



ILUSTRACIÓN 19. CORONAS E IMPLANTES DENTALES FABRICADOS POR SLM

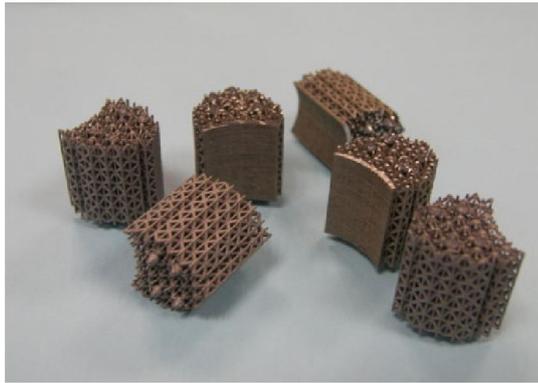


ILUSTRACIÓN 20. IMPLANTES DE COLUMNA FABRICADOS POR SLM

Sector automoción

En el sector de la automoción, se ha pasado de tecnologías para la obtención de prototipos (**Rapid Prototyping**) a tecnologías que permiten disponer de productos plenamente funcionales (**Rapid Manufacturing**). Se está aún lejos de que los coches salgan de las líneas de montaje con piezas impresas, debido a la alta cadencia necesaria, exceptuando el mundo de la competición y los segmentos de vehículos de lujo.

Algunas de las dificultades de la aplicación de la fabricación aditiva a la producción normal de vehículos, son la falta de técnicos preparados en estas nuevas tecnologías, las velocidades de producción de la impresión 3D son muy lentas, la limitación del tamaño de las piezas (piezas pequeñas), la inexistencia de protección legal ante la piratería de los complejos diseños que la impresión 3D hace posible, poca evolución de la potencialidad de realizar piezas únicas de alta complejidad que reemplacen conjuntos de piezas en el coche, así como la poca experiencia de la tecnologías ante la necesidad de **piezas multimateriales**.



ILUSTRACIÓN 21. PROTOTIPO DE MINIFURGONETA DE REPARTO HONDA, CUYA CARROCERÍA HA SIDO FABRICADA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D



ILUSTRACIÓN 22. PRESENTACIÓN DEL COCHE DEL FUTURO DE LA MARCA ROLLS-ROYCE, LA MOVILIDAD DE LUJO CON PERSONALIZACIÓN GRACIAS A LA IMPRESIÓN 3D (ROUNDHOUSE DE LONDRES, JUNIO 2016)

Pero las posibilidades de la fabricación aditiva son espectaculares en campos como el **ultra-aligeramiento de piezas**. El hecho de poder imprimir usando polvo de metales como el acero o el aluminio hace que sea posible fabricar piezas en las que cada gramo de material está colocado donde hace falta. Estructuras que mimetizan a la naturaleza, con vaciados y nervios imposibles, son ahora posibles debido a que la construcción se hace por capas y al hecho que el polvo no solidificado en cada capa hace de elemento sustentante de las siguientes: podemos imprimir piezas con una piel exterior que le de resistencia y una estructura mallada interna que le aporte rigidez. Así, nace todo un reto para los ingenieros, y a la luz de esta necesidad han venido en su ayuda desarrollos de **programas CAE** (Computer Aided Engineering) capaces de guiar la optimización del material empleado partiendo del diseño CAD.



ILUSTRACIÓN 23. COMPONENTE DE AUTOMOCIÓN FABRICADO POR SL

Sector matricería

La libertad de diseño que ofrece la tecnología SLM se puede aplicar a la **fabricación de insertos y moldes**. El objetivo principal de los moldes de inyección y colada es asegurar un enfriamiento adecuado de la pieza. Este enfriamiento depende de la transferencia de calor entre el metal fundido y el molde. Para optimizar este enfriamiento se pueden utilizar componentes fabricados mediante SLM con canales de refrigeración internos que discurran cerca de la superficie. El concepto más habitual es la fabricación de

insertos que se colocan sobre bloques de molde prefabricados. La utilización de estos insertos proporciona una transferencia de calor homogénea (evita el sobrecalentamiento de partes del molde), mejora la calidad superficial de las piezas inyectadas y reduce considerablemente los ciclos de inyección.

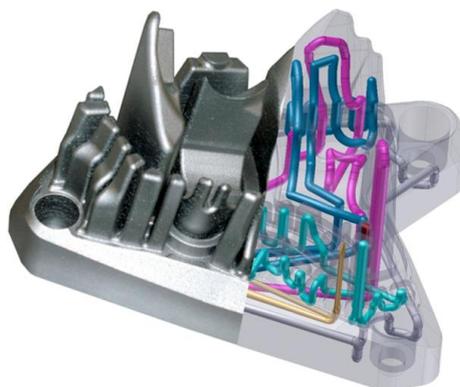


ILUSTRACIÓN 24. SIMULACIÓN DE LOS CANALES DE ENFRIAMIENTO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN POR SLM

Sector aeroespacial

La tecnología SLM permite fabricar **estructuras reticulares o de celosía** tanto con piel externa como sin piel. Este tipo de estructuras proporcionan un potencial enorme para conseguir un aligeramiento estructural que hasta ahora era complicado fabricar mediante procesos convencionales. Las posibilidades que ofrece la tecnología SLM se están aplicando de una manera cada vez más patente en sectores donde la reducción de peso y el aumento de la relación resistencia frente a peso suponen una ventaja. En particular en el sector aeronáutico, esta tecnología está suponiendo una verdadera revolución, consiguiendo reducciones importantes del peso y de los costes de producción. En la actualidad, esta tecnología se aplica para la fabricación de componentes de instrumentación y motores de aviación en **súper aleaciones base Níquel** del tipo INC718 [8] y titanio (TiAl6V4). En estas aplicaciones además se cuenta con la ventaja de la reducción del volumen de material de partida necesario y como consecuencia del aligeramiento, la reducción del consumo de combustible en el transporte.



ILUSTRACIÓN 25. COMPONENTE DE VEHÍCULO LUNAR FABRICADO CON SLM



ILUSTRACIÓN 26. SATÉLITE RUSO TOMSK-TPU-120, FABRICADO CON UNA IMPRESORA 3D, QUE FORMARA PARTE DE LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

Sector naval

Dentro de la fabricación aditiva de materiales metálicos, se han llevado a cabo diferentes proyectos para la fabricación por láser cladding de **refuerzos sobre chapas de acero** al carbono de espesor 15mm, como proceso alternativo a la soldadura MIG/MAG de dichos refuerzos. Pero a día de hoy, en este tipo de piezas de gran tamaño, el proceso de fabricación no resulta rentable.



ILUSTRACIÓN 27. REFUERZO NAVAL FABRICADO POR LÁSER CLADDING

En cambio, en **reparación y mantenimiento** de componentes navales, la impresión 3D tiene un amplio abanico de posibilidades, al igual que en otros sectores industriales, debido a la precisión, rapidez y escasas deformaciones de las piezas en su reparación.

SECTORES Y APLICACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS

Son muchos los sectores donde se están llevando a cabo fuertes inversiones y grandes apuestas por este método productivo, enfocado a los materiales plásticos o compuestos con base polimérica. A continuación, se exponen algunos de los sectores más relevantes en el campo de interés, así como casos prácticos.

Sector aeroespacial

Los ingenieros aeroespaciales aplican principalmente la tecnología FDM de fabricación aditiva para el prototipado, mecanizado y fabricación de piezas. La tecnología FDM funciona con termoplásticos de alto rendimiento como ABS, PCABS y policarbonatos, para fabricar sujeciones, fijaciones, dispositivos de comprobación y piezas finales de aeronaves. Los diseñadores del sector han adoptado masivamente la tecnología FDM para el modelado y prototipado de conceptos.

Componentes para vehículos espaciales: La NASA ha comenzado a ensayar con un modelo de Rover de última generación (robot de exploración espacial), cuyo objetivo será dar apoyo a los astronautas cuando finalmente aterricen en Marte. Más del 70 % de este Rover está construido por una impresora 3D de Stratasys, que emplea la tecnología FDM. De esta manera, se han conseguido piezas y componentes más ligeros, pero igual de robustos que otros más pesados. Estas piezas se fabricaron a partir de modelos CAD, entre las cuales se encuentran: carcasas y respiraderos ignífugos, soportes para cámara, puertas grandes, una gran pieza que hace las veces de parachoques, etc.⁹



ILUSTRACIÓN 28. NASA'S HUMAN-SUPPORTING ROVER HAS FDM PARTS. STRATASYS 2013

⁹ Stratasys 2013. 3D printing a space vehicle. <<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Aerospace/SSYS-CS-Fortus-NASA-08-13.pdf?v=635157814585337421>>

Sector aeronáutico

Son varias las compañías que están empezando a introducir piezas en sus equipos fabricadas a partir de impresión 3D. Tal es el caso de Boeing¹⁰, la compañía ha apostado por la tecnología SLS empleando los materiales DuraForm de 3D Systems. Otros ejemplos en el sector son los siguientes:

PIEZAS PARA PRUEBAS DE DISEÑO EN PROTOTIPOS DE AERONAVES

Algunos ejemplos de las piezas fabricadas por la tecnología 3D utilizadas con el propósito de realizar pruebas de diseño aeronáutico en un tiempo reducido son como se muestra en la siguiente figura, tapones cónicos de varios tamaños que afectan el diámetro de flujo de salida del motor, una bifurcación aerodinámica para guiar los cables de potencia del motor al fuselaje o carenados próximos al ventilador y motor. En este caso particular, las piezas son fabricadas en termoplástico por FDM por Redeye para Aurora¹¹.



ILUSTRACIÓN 29. PIEZAS UTILIZADAS POR AURORA PARA SUS PRUEBAS DE DISEÑO. FUENTE: SAE INTERNATIONAL

PIEZAS PARA SIMULACIÓN EN TÚNELES DE VIENTO

Otra de las aplicaciones tanto de la tecnología 3D como los materiales empleados por ésta, son simulaciones en túneles de viento. Resulta muy útil porque presenta una alta variedad de tecnologías de impresión y de materiales a utilizar, con sus respectivas características y parámetros. Otra ventaja de la impresión es la variedad de formas que se le pueden dar al objeto en cuestión, ya sean agujeros de gran diámetro como objetos de pequeño tamaño.

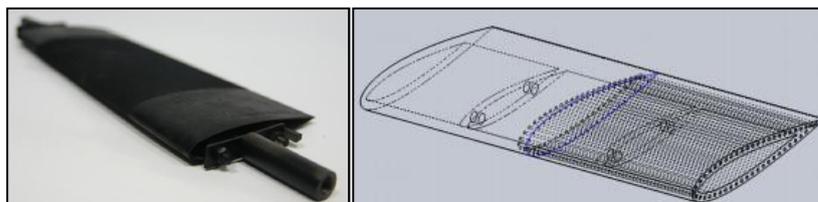


ILUSTRACIÓN 30. PERFIL DE ALA SIN ENSAMBLAR PARA PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO. FUENTE: IOP SCIENCE

¹⁰ 3D Systems 2014. Boeing Sees Growing Value & Versatility in SLS System and DuraForm Materials.

<<http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/boeing-case-study-01-06-141.pdf>>

¹¹ SAE International, 2014. 3-D printing in aerospace: not just winging it <<http://articles.sae.org/13170/>>

RADOMOS

Los radomos son cubiertas o estructuras protectoras para radares y sistemas de comunicación realizadas en material transparente para no aislar la antena receptora de las ondas de radiofrecuencia. Se pueden colocar en la superficie exterior de aeronaves. Esta es una de las aplicaciones de la nueva tecnología desarrollada por Oxford Performance Materials Inc., una empresa que se dedica a desarrollar tecnología de impresión 3D. El material empleado es OXFAB-N, un material compuesto por FEKK sin modificar, con una constante dieléctrica de microondas muy baja para evitar interferencias.



ILUSTRACIÓN 31. EJEMPLO DE RADOMO EN EL MORRO DE AVIÓN. FUENTE: NOAA RESEARCH

CARCASA PARA CÁMARA DE MINI AVIONES NO TRIPULADOS

La empresa Survey Copter, subsidiaria de EADS, ha recurrido a la tecnología FDM de Stratasys (equipos Fortus 400mc y Dimension Elite 3D) para la fabricación de prototipos y piezas para sus sistemas de vigilancia de aeronaves no tripuladas.¹²



ILUSTRACIÓN 32. CARCASA PARA LENTE DE CÁMARA (IZDA.) INSTALADA EN MINI AVIÓN NO TRIPULADO. FUENTE: SURVEY COPTER

¹² Applications & Testing & Experience, Business News, Technology on May 24, 2013 <<http://www.uasvision.com/2013/05/24/survey-copter-turns-to-3d-printer-for-prototyping/>>

DISEÑO DE CONDUCTOS COMPLEJOS

La impresión 3D ofrece la posibilidad de fabricar conductos y tuberías complejas en sustitución de procesos tradicionales de moldeo con fibra de vidrio (el mecanizado del molde y el proceso de lay-up puede llevar semanas). El caso más conocido es la introducción de un conducto de aire realizado con el termoplástico ULTEM 9085 resistente al calor, alta relación resistencia-peso, resistencia química y rigidez. Esta pieza fue desarrollada por SABIC en colaboración con Stratasys para incorporarlo en el avión hospital Orbis¹³. Hoy día se está cursando su aprobación para vuelos civiles por parte de la FAA - Federal Aviation Administration en Estados Unidos.



ILUSTRACIÓN 33. CONDUCTO DE AIRE FABRICADO EN TERMOPLÁSTICO ULTEM 9085. FUENTE: STRATASYS

Arquitectura

El prototipado rápido de modelos ha sido la aplicación comercial más extendida para la impresión 3D. Permite a los estudios de arquitectura crear modelos complejos y duraderos in situ, directamente a partir de los datos de CAD. Debido a la reducción de tiempo en la fase de diseño, este mercado ha crecido durante los últimos años.

En el caso de la arquitectura, su uso es muy claro y puede tener diversos enfoques, como la creación de una maqueta para mostrar al público las características de un edificio que ya existe en la realidad, o la creación de un prototipo de desarrollo urbanístico¹⁴.

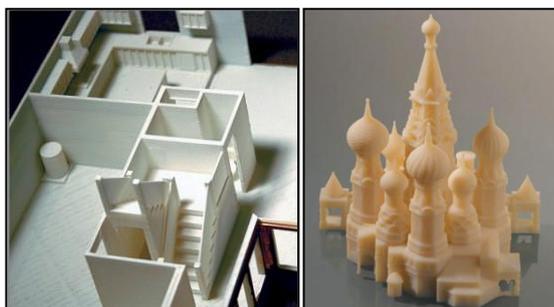


ILUSTRACIÓN 34. MAQUETA DERECHA REALIZADA POR TECNOLOGÍA FDM, IZQUIERDA POLYJET. FUENTE: STRATASYS

¹³ Stratasys, Marzo 2015 <<http://blog.stratasys.com/2015/03/05/3d-printed-air-duct-flying-eye-hospital/>>

¹⁴ Stratasys 2012. Application Brief: Architectural Models.

<<http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Application>>

Sector automóvil

El sector del automóvil también apuesta fuerte por la impresión 3D. Grandes compañías como Honda, BMW o Volvo ya han introducido la fabricación por adición en sus procesos productivos.

En la planta BMW AG en Ratisbona (Alemania)¹⁵, se emplean impresoras 3D de Stratasys para fabricar herramientas de mano para las líneas de montaje y testeo consiguiendo una mayor ergonomía, ligereza y libertad de movimientos para el trabajador. La impresión 3D, en particular FDM, continúa siendo fundamental en la fase de prototipado del automóvil, aunque la empresa está extendiendo esta tecnología hacia el proceso de fabricación en sí mismo.

BMW ya considera el FDM como una alternativa a los métodos tradicionales de mecanizado como el fresado, torneado o mandrinado, que se puede reflejar en mejoras financieras resultantes de la reducción de costes vinculados a la documentación técnica, almacenamiento y fabricación:

Method	Cost	Lead Time
Traditional CNC Machining (Aluminum)	\$420	18 days
Fortus System (ABS-M30 Thermoplastic)	\$176	1.5 days
SAVINGS	\$244 (58%)	16.5 days (92%)

ILUSTRACIÓN 6. COMPARATIVA ENTE MECANIZADO POR CONTROL NUMÉRICO FRENTE A FDM. FUENTE: STRATASYS

En ese mismo sentido, Honda ha introducido esta tecnología como alternativa a los equipos de control numérico. Con ello, han disminuido tiempos de fabricación al mismo tiempo que se han solucionado retrasos debidos a fallos de comunicación entre Honda y las oficinas de servicios, relacionados con el escaneado, preimpresión o imprimación de color.

FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS PORTÁTILES PARA EL MONTAJE

BMW igualmente ha descubierto las grandes ventajas asociadas a la libertad de diseño que ofrece la impresión 3D, particularmente con FDM, para la fabricación de herramientas portátiles para el montaje permitiendo crear configuraciones que perfeccionan la ergonomía y reducen peso.

¹⁵ Stratasys 2013. Direct Digital Manufacturing at BMW. <<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Automotive/SSYS-CS-Fortus-BMW-07-13.pdf?v=635139936049694673>>



ILUSTRACIÓN 35. HERRAMIENTA PARA COLOCACIÓN DEL PARACHOQUES CON FDM. FUENTE: STRATASYS

HERRAMIENTAS PARA ENSAMBLAJE

Volvo ha introducido la tecnología 3D en su línea de montaje. En concreto, en las herramientas de montaje, como útiles de troquelado, abrazaderas, soportes... Utilizando una impresora de la familia Fortus de Stratasys y como material ABS plus, han conseguido disminuir los 100 €/cm³ que les costaba la fabricación de piezas metálicas a 1 €/cm³. Otra ventaja es que se pueden incorporar posibles mejoras ergonómicas en las herramientas aportadas por los operarios y de esta manera se consiguen útiles totalmente customizados.



ILUSTRACIÓN 36. HERRAMIENTAS DE MONTAJE REALIZADAS CON IMPRESIÓN 3D. FUENTE: STRATASYS

FABRICACIÓN DE AUTOPARTES CUSTOMIZADAS

Otro ejemplo de fabricación aditiva en el sector de automóvil son accesorios personalizables. Una filial del Honda Group¹⁶ con sede en Tokio, Honda Access, tiene como especialidad la fabricación de accesorios personalizados a las preferencias de los compradores locales (carcasas para faros, embellecedores, protectores de capó...). Estos accesorios juegan un rol muy importante en las ventas globales, el rango de las referencias de accesorios disponibles para cada modelo de Honda oscila entre las 200 y 300 unidades.

¹⁶ Stratasys 2015. The Drive for speed. <<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Automotive/CS-PJ-Auto-HondaAccess-EN-06-15-Web.pdf?v=635709257342674183>>



ILUSTRACIÓN 37. EJEMPLO FARO CUSTOMIZADO POR HONDA. FUENTE: STRATASYS

En las siguientes imágenes se observan tres aplicaciones pertenecientes al sector del automóvil realizadas por el Centro Tecnológico Aitiip.

La primera de ellas corresponde a un panel, medallón y reposabrazos realizados vía FDM, con un equipo FORTUS900MC (38 h) y material ABS-M30. También una rejilla de altavoz, en este caso mediante SLS (DTM2500PLUS) y material PA. El objetivo era realizar la validación de montajes / interferencias de estos componentes y se obtuvieron como principales ventajas la reducción de tiempo en fase de desarrollo (Fabricación directa 140h), además de la eliminación de moldes de inyección (sistema convencional de fabricación).



ILUSTRACIÓN 38. PROTOTIPO DE CONJUNTO PANEL DE PUERTA TRASERO DE SEAT ALTEA. FUENTE: AITIIP

La siguiente imagen corresponde a un conjunto prototipo de boca de gasolina cuyo sistema convencional de fabricación es la bi-Inyección de plástico. El objetivo de este prototipo era validación de diseño y análisis de factibilidad de fabricación. Se emplearon los siguientes materiales /equipos:

- Tapa: OBJET1000PLUS, Material RGD450 ENDUR (Simulación PP)
- Cuerpo: Material RGD450 ENDUR (Simulación PP) + TANGO BLACK + (Simulación elastómero)

Las ventajas alcanzadas con la fabricación aditiva fueron la fabricación directa de pieza bicomponente, eliminación de moldes de inyección y la reducción del tiempo de fase de desarrollo.



ILUSTRACIÓN 39. CONJUNTO PROTOTIPO BOCA GASOLINA. FUENTE: AITIIP

Por último, se presenta un prototipo para validación de diseño de una nueva pieza utilizada en la cadena de montaje OPEL para no dañar la carrocería del coche durante el proceso de ensamblado.



ILUSTRACIÓN 40. PROTECTOR LÍNEA DE MONTAJE. FUENTE: AITIIP

En este caso el sistema convencional era el termoconformado, sustituido por un proceso de fabricación aditiva FDM (equipo FORTUS900MC), material ABS-M30 con un tiempo de fabricación de 38h. Las ventajas de la fabricación directa fueron la eliminación de utillaje de conformado, la reducción de coste y tiempo.

Sector naval

La impresión 3D en el sector naval depende del subsector de aplicación (construcciones de barcos, estructuras flotantes o embarcaciones de recreo y deporte) y dentro de él, existen muy diferentes aplicaciones. A pesar de ser un sector donde la rigidez, resistencia a impacto y resistencia a la corrosión ofrecida por los materiales metálicos es difícil de conseguir con otro tipo de materiales, los materiales compuestos han supuesto una revolución para la fabricación de elementos estructurales, así como el equipamiento interno de los buques, y es también donde la impresión 3D encuentra un mayor campo de aplicación.

En fabricación aditiva de materiales poliméricos, la empresa española Navantia, dedicada a todo tipo de actividades navales (desde la construcción de barcos hasta la transferencia tecnológica en su especialidad), ha firmado un convenio con el Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEI Mar), radicado en Cádiz, para la aplicación de la impresión 3D al sector marítimo para la producción de cabinas.

Además, equipos de impresión 3D de pequeño tamaño ya se incorporan en barcos de ejército, para ser capaces de reproducir componentes que se rompen, y evitar así llevar un amplio número de repuestos, o en muchos casos, volver a tierra para su reparación.

Sector médico

De todas las ramas profesionales, la medicina es el sector donde más suelen darse usos innovadores a las tecnologías de impresión 3D. De hecho, la impresión 3D médica se considera un área emergente que explora formas de sustituir o ayudar a las estructuras biológicas existentes. A largo plazo, la impresión 3D podría tener un gran impacto en el campo de la medicina, con el desarrollo de la bioimpresión (procedimiento enfocado al desarrollo de piel y tejidos impresos en 3D), mediante la extrusión de células vivas en lugar de materiales plásticos, empleando impresoras 3D.

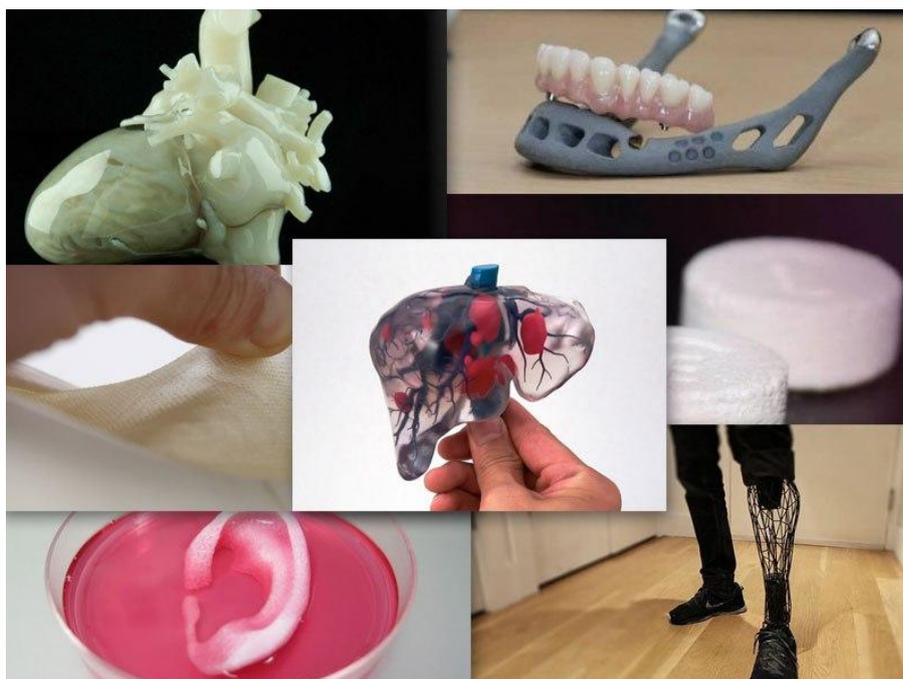


ILUSTRACIÓN 41. APLICACIONES MÉDICAS GENERADAS CON IMPRESORAS EN 3D

Entre las aplicaciones más usadas de la impresión 3D en el sector médico destacan:

ODONTOLOGÍA

En el caso del sector dental, la tecnología 3D ha supuesto una gran ventaja. Son diversas las firmas encargadas de dar soluciones a centros odontológicos y profesionales del sector, que consiguen acelerar la producción de forma rápida y precisa de coronas, puentes, modelos cerámicos y toda una gama de aplicaciones para ortodoncia.

Tal es el caso de CORE3D17, firma que fabrica estructuras realizadas en polímeros con la tecnología Polyjet desarrollada por Stratasys, que se colocan de forma temporal, pero que ofrecen una estética y pasividad óptimas.

¹⁷ CORE3D 2015. Leaders in digital dentistry. <<http://www.avinent.com/public/adjunts/ENG.pdf>>

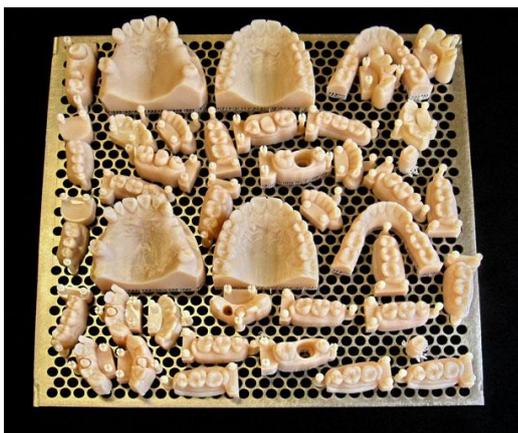


ILUSTRACIÓN 42. PIEZAS DENTALES IMPRESAS CON TECNOLOGÍA POLYJET. FUENTE: STRATASYS

AUDÍFONOS

La revolución comenzó en este caso en 1998, y en la actualidad el 98% de los audífonos existentes en la actualidad se han fabricado usando impresión 3D, con tremendos avances desde entonces, llegando una sola máquina actual a imprimir 30 aparatos en solamente hora y media. En la actualidad, ya existen más de 3 millones de audífonos impresos en 3D y se investiga en la fabricación de microbaterías de litio para la alimentación de estos y otros dispositivos.

HUESOS IMPRESOS EN 3D

En primavera de este mismo año, un paciente en EEUU se sometió a una cirugía radical, en la cual el 75% de su cráneo fue sustituido por un implante impreso en 3D realizado en un material biocompatible semejante al hueso.

PRÓTESIS PERSONALIZADAS

Gracias a la impresión 3D, la ortopedia avanza hacia una mayor velocidad en los procesos productivos, y la disminución de los costes. Un proyecto español, FABIO, financiado en 2009 por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y liderado por el Instituto de Biomecánica de Valencia se enmarcó en el desarrollo de nuevos biomateriales poliméricos para la obtención directa de productos sanitarios personalizados mediante tecnologías de fabricación aditiva. Mediante la tecnología de estereolitografía (SLA) se desarrolló un demostrador órtesis tobillo-pie personalizada a la anatomía del paciente¹⁸ como se observa en la figura:

¹⁸ J. Delgado et al. 2010. FABIO project: Development of innovative customized medical devices through new biomaterials and additive manufacturing technologies, 3rd Int Conference on Additive Technologies, iCAT '10, September 2010 Slovenia.



ILUSTRACIÓN 43. ORTESIS TOBILLO-PIE PERSONALIZADA A LA ANATOMÍA DEL PACIENTE, FABRICADO MEDIANTE SLA. FUENTE PROYECTO FABIO

IMPRESIÓN DE CÉLULAS MADRE

La impresión 3D ha permitido que un grupo de la Universidad escocesa Heriot Watt produzca racimos de células madre. El método usado es el de la impresión basada en válvulas, para mantener estas células en un alto nivel de viabilidad, y producir esferoides de un tamaño uniforme con una precisión adecuada, tal como han publicado en la revista especializada Biofabrication.

INJERTOS DE PIEL

Los injertos de piel llevan ya tiempo formando parte de los tratamientos médicos, siendo a la vez extremadamente dolorosos, ya que se cogen fragmentos de piel sana para cubrir una zona dañada del cuerpo. Cuatro estudiantes de la Universidad de Leiden (Holanda) han desarrollado un proceso, combinando una impresora 3D y la tecnología de células madre inducidas (iPS) que permiten crear células madre a partir de células ya diferenciadas. Dado que las células madre inducidas se desarrollan a partir de las propias células del paciente, se reducirían las respuestas inmunes al nuevo tejido. La importancia de este descubrimiento radica sobre todo en el tratamiento de heridas de gran extensión, dada la dificultad de encontrar injertos de piel de ciertos tamaños.



ILUSTRACIÓN 44. EJEMPLO DE INJERTO DE PIEL CON IMPRESIÓN 3D

ÓRGANOS IMPRESOS EN 3D

Existen numerosos experimentos de prototipos de órganos en versión miniatura, que en el futuro podrán crear estructuras de tamaño similar a órganos humanos, junto con las redes de vasos necesarias para nutrirlos.

La oreja biónica es el resultado de unir el trabajo de varios investigadores de Princeton y el Hospital John Hopkins, y significa un paso adelante para las personas sordas. Se trata de una oreja totalmente artificial, consistente en dispositivos electrónicos, alojados en una estructura biónica: una estructura tridimensional a forma de esqueleto, con células cartilagosas que, 10 semanas más tarde, dan lugar a una oreja completa. Incluso posee una antena extremadamente sensible a las microondas, por lo que esta oreja podría convertirse en un buscador de satélites permitiendo al oído humano escuchar la radio y otras señales electromagnéticas.



ILUSTRACIÓN 45. OREJA BIÓNICA

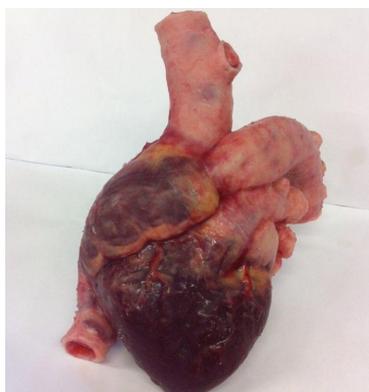


ILUSTRACIÓN 46. CORAZÓN IMPRESO EN 3D

Otros desarrollos que la tecnología 3D permite, serían:

- Material quirúrgico específico y personalizado
- Medicamentos personalizados
- Formación médica con modelos impresos en 3D

Industria Alimentaria

¿Qué se comerá en el futuro? Desde hace años, se han estado inventando nuevas formas de preparar alimentos y objetos que hacen que la pregunta sea difícil de contestar. Ahora puede parecer algo raro, pero la impresión 3D de alimentos, todavía un campo nuevo, pero en el que se han realizado avances importantes, podría traer grandes cambios. Las expectativas son muy altas y el camino recorrido importante. El objetivo, para muchos, es automatizar procesos e imaginar una nueva manera de consumir alimentos. Y es que la combinación de alimentos y tecnología está dando forma a la industria alimentaria, desde los métodos de envasado, al uso de conservante o técnicas de vanguardia como la gastronomía molecular (que ya familiarizó conceptos como esferificación).

La tecnología basada en la impresión 3D será, según los expertos, fundamental en el modo en el que las personas interactuarán con los alimentos en un futuro. Las máquinas están cada vez más presentes en las cocinas (electrodomésticos, robots de cocina, etc.) y **la impresión 3D de alimentos** también podría formar parte de una nueva revolución.

La mayoría de las impresoras 3D funcionan depositando lentamente capas de material, una encima de otra, hasta que se construye un objeto. Una de las iniciativas en la impresión 3D de alimentos se introdujo en 2014 con Foodini, una de las primeras impresoras 3D de comida real capaz de imprimir una amplia gama de alimentos, tanto salados como dulces.

Este dispositivo, conectado a Internet, está constituido por una pantalla táctil en la parte frontal que proporciona la interfaz al consumidor de los alimentos que quiere imprimir. Una vez dada la orden de la receta que se quiere imprimir, se activan las distintas cápsulas con los diferentes alimentos y empieza la impresión. El tiempo que tardan en salir depende de los ingredientes, la receta y la cantidad. En algunos casos pueden pasar pocos minutos (en alimentos planos como galletas), mientras que los tiempos son más largos, de hasta 20 minutos. Algunos de los alimentos que ya se han impreso son pastas (raviolis o espaguetis), hamburguesas de verdura y carne, *nuggets* de pollo, pizza, patatas fritas, galletas o chocolate. Una de las partes más complejas es la de la textura, un aspecto que los expertos esperan poder perfeccionar en un futuro.



ILUSTRACIÓN 47. MAQUINA IMPRESIÓN 3D COMIDA. FUENTE NATURALMACHINES.COM



ILUSTRACIÓN 48. HAMBURGUESAS IMPRESAS EN 3D. FUENTE: NATURALMACHINES.COM

Desde entonces, han seguido el mismo camino otras tantas iniciativas. Aunque el sabor no es uno de los puntos fuertes de este tipo de producción de alimentos, la ventaja principal es la posibilidad de crear sinergias entre el diseño y la comida. Por ejemplo, la impresión 3D de chocolate ha aumentado en los últimos años. Y aunque aún está lejos, esta forma de preparar alimentos tiene el potencial de revolucionar buena parte de los aspectos de la industria de la alimentación, desde el origen de los ingredientes, a su valor nutricional y la manera en la que se cocinarán.

La agencia aeroespacial estadounidense, está trabajando desde hace años en la creación de **impresoras 3D destinadas a alimentar a sus astronautas durante las misiones espaciales**. Uno de los principales aspectos positivos que destacan de esta tecnología es la capacidad de que se disponga de una variedad importante de alimentos durante misiones de larga duración. Esta estrategia se enmarca dentro del programa para desarrollar métodos que proporcionen alimentos para satisfacer la seguridad, aceptabilidad y variedad nutricional para las misiones largas con menos residuos.

Otra aplicación de la impresión 3D en el sector alimentario es la **fabricación de moldes y envases** específicos o personalizados, ya que existen materiales imprimibles que son aptos para el uso alimentario. Uno de ellos es el PLA, quizás el material más utilizado para las impresión con tecnología FFF.

LA SEGURIDAD DE LOS ALIMENTOS

La impresión 3D comenzó como una forma distinta de imprimir objetos como juguetes u otros aparatos. A medida que ha avanzado la tecnología, ha empezado a aplicarse a otros sectores como el sanitario y el alimentario. Por tanto, la gran mayoría de impresoras 3D se han diseñado para usos distintos al alimentario.

En la impresión 3D en alimentos, una de las preguntas que surgen es si estos son seguros. La seguridad, según los expertos, está en el dispositivo que se emplea. Este debe ser específico para alimentos, por tanto, se debe poder limpiar con facilidad. Si no es así, el riesgo de contaminación por bacterias es alto.

Como otros sistemas de producción, uno de los problemas que pueden aparecer es la acumulación de bacterias en el sistema; se considera que incluso las impresoras mejor diseñadas pueden tener pequeños espacios donde los alimentos pueden llegar a aglutinarse y, por tanto, pueden desarrollarse bacterias. La limpieza es fundamental en este aspecto, puesto que de ella dependerá que no se formen restos de

comida. Además, los ingredientes que se usen deben tener una consistencia que permita que se eliminen en su totalidad por el sistema.

Otro aspecto fundamental es el material con el que están hechas las máquinas. En la mayoría de ellas se utiliza ácido poliláctico (PLA), un plástico que la Agencia de Alimentos y Medicamentos estadounidense (FDA) califica como "seguro". Este material es termoplástico, lo que significa que se ablanda y moldea cuando se calienta y vuelve a sólido cuando se enfría. Se obtiene a partir de recursos renovables como el maíz, el trigo o la caña de azúcar.

Sector textil

En el mundo de la moda, la impresión 3D se limita prácticamente al diseño de modas de alta costura, a modo de curiosidad y de impacto, pero no como tendencia a desarrollarse en el futuro a corto plazo ni para extenderse en las tendencias generales de los parámetros del sector. Esto se debe a que:

- Es una tecnología que sale cara para diseñar ropa, sobre todo a nivel de tiradas de producción largas. Sigue y seguirá siendo más barato producir un vestido de tela en china o en cualquier otro país.
- Es lenta. Al menos de momento. Son horas lo que se necesita para imprimir piezas de tejido que a lo mejor no superan los 50cms. cuadrados, y de ahí para arriba, dependiendo de la complejidad del diseño. Nada que ver con una tejedora industrial.
- Limitación en los materiales: Ni es tela, ni piel, ni se parece a ninguno de ellos en textura, tacto o caída, lo que es uno de los puntos más flojos de la impresión 3D en los textiles.

La impresión 3D ha sido utilizada por jóvenes diseñadores en colecciones presentadas en importantes pasarelas de moda de la **alta costura**. Un ejemplo de ello es el de Iris Van Herpen, una diseñadora holandesa que resultó ganadora del premio ANDAM (Asociación Nacional para el Desarrollo de la Moda y las Artes de Francia) en 2014.



ILUSTRACIÓN 49. VESTIDO IMPRESO EN 3D, DISEÑO DE IRIS VAN HERPEN. FUENTE: CLICKNL.NL

Pero hasta la fecha, el material empleado es plástico, con las grandes pegadas que esto conlleva: desde la limitación creativa que supone para el diseño de modas, pasando por la falta de transpiración del modelo sobre la piel, la falta de flexibilidad y de caída, hasta la imposibilidad de competir con la enorme variedad

de texturas maravillosas que nos aportan los distintos tejidos que la moda pone a nuestra disposición: encajes, tules, denim, algodón, rasos, piel, etc., con numerosas posibilidades que hasta el momento no aportan la impresión 3D y sus materiales.

Para que la impresión 3D dé el gran paso en la fabricación de ropa, es necesario que las impresoras puedan llegar a imprimir tejidos parecidos a los que usualmente conocemos y vestimos. Sin duda, eso supondría una revolución palpable en el mundo de la moda, aunque seguiría teniendo la dificultad de competir con la producción textil tradicional, mucho más barata. Y en cuanto al diseño de modas, no aportaría ninguna novedad. Por ello, la impresión 3D, aún en el mejor de los casos, seguiría perdiendo la batalla en la producción para consumo masivo.

Sin embargo, a nivel de producción exclusiva y personalizada, sí es posible imaginar un escenario en el que nos podamos “escanear” en 3D, mandar nuestro modelo biométrico por internet a una empresa, y que ésta nos fabrique con impresión 3D un vestido hecho totalmente a medida.

En el mundo de la moda, donde la impresión 3D ha tenido un mayor impacto es en **Joyería, y no tanto en Zapatos, Bolsos y otros complementos.**

JOYERÍA

La **joyería** se trata de una de las áreas dentro del mundo de la moda en la que la impresión 3D ha pegado fuerte. Además, ha aportado importantes mejoras en cuanto a reducción de costes, capacidad de producción en pequeños talleres y sustitución de moldes carísimos por otros hechos en 3D, por no hablar de la capacidad de personalización y customización que ofrece esta tecnología a cualquier pieza, ya que se puede usar un scanner 3D para escanear, por ejemplo, un dedo o un brazo, para luego hacer la joya totalmente adaptada a la fisonomía del cliente.

Además de todo esto, las piezas ya pueden hacerse en materiales finales, como ciertos tipos de plástico, o también se pueden crear los moldes necesarios para hacerlas en metales preciosos como el oro, la plata, etc. También existe ya software específico para esto, lo que facilita mucho el diseño para los creadores.

Es posible afirmar que en este campo la impresión 3D se ha asimilado de forma rápida y se ha asentado fuertemente en la producción de piezas, tanto a alto nivel como en talleres de producción más pequeños.

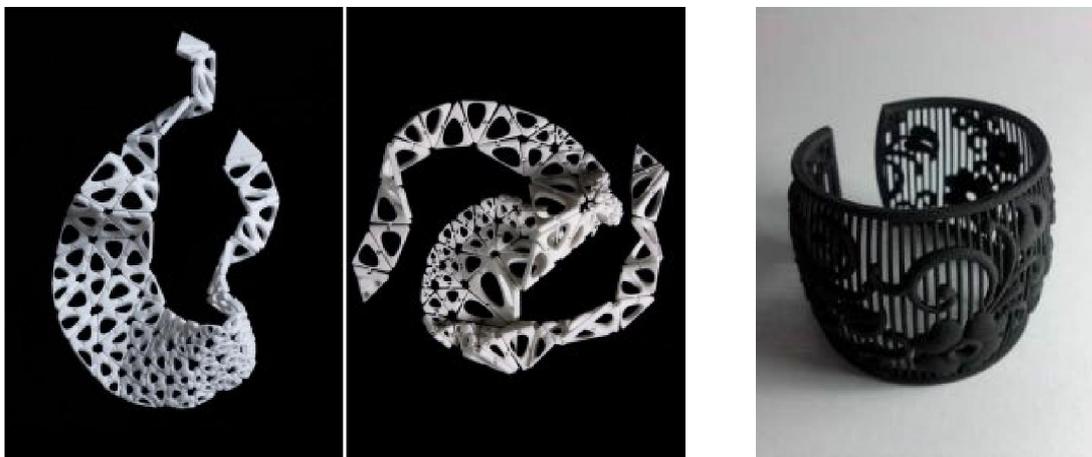


ILUSTRACIÓN 50. EJEMPLOS DE JOYERÍA REALIZADAS EN 3D

CALZADO

A nivel de **calzado** deportivo ya hay algunas marcas, como Feetz o Adidas, que se han animado a hacer modelos íntegramente impresos en 3D, en cuanto a personalización bajo demanda aún está muy restringido a modelos muy exclusivos de tiradas limitadas o diseñados específicamente para algún cliente en particular, con el consiguiente sobrecoste que supone.

El problema es básicamente que, por limitaciones de material (puesto que no hay ninguno aún que tenga la textura o calidades de la piel o materiales similares), la impresión 3D en zapatos se limita en su mayoría a las suelas, al tacón o la cuña, no pudiendo aún fabricar el modelo completo con esta tecnología, que dependerá de cómo vayan evolucionando los materiales impresos en 3D, principalmente en la medida que consigan acercarse en similitud a la piel y sus propiedades.



ILUSTRACIÓN 51. ZAPATOS FABRICADOS CON IMPRESORA 3D

En calzado deportivo, la impresión 3D está siendo utilizada por marcas como *Nike*, *Adidas* o *New Balance*, en suelas o partes exteriores. *Nike* comenzó utilizando la impresión 3D para la fabricación personalizada de tacos de botas de jugadores de la *Super Bowl* y, actualmente, la incluye ya frecuentemente en muchos de sus diseños, como espinilleras o suelas específicas para botas de fútbol.



ILUSTRACIÓN 52. SUELAS DE ZAPATILLAS NIKE IMPRESAS EN 3D. FUENTE: IMPRESORAS3D.COM



ILUSTRACIÓN 53. ADIDAS FUTURECRAFT 3D

El proyecto de Futurecraft 3D representa una experiencia de personalización única para los deportistas, en la que Adidas ha combinado de manera única material y proceso. Su innovador proceso de producción supondrá la evolución del calzado de running, ya que cada zapatilla ofrecerá un refuerzo y una amortiguación totalmente individualizadas y adaptadas a cada pie, lo que permitirá a los deportistas rendir al máximo. El objetivo declarado de la empresa es que cada corredor pueda entrar en una tienda Adidas, correr un poco sobre una cinta y obtener de manera inmediata una zapatilla impresa en 3D. Esta ambición final es lo que ha llevado como primer paso a la creación de la media suela Futurecraft 3D de Adidas.

COMPLEMENTOS

Con los **bolsos, cinturones y demás complementos**, ocurre algo parecido que con los zapatos. Actualmente, hay varias firmas que han sacado modelos exclusivos impresos en 3D, como Kipling o Pasquale Bonfilio, y la verdad es que se han conseguido piezas muy estilizadas y llamativas como podemos ver en las imágenes que os mostramos un poco más abajo.

Sin embargo, la piel y sucedáneos siguen teniendo un lugar mayoritario tanto en la producción como en la venta, debido a su versatilidad, flexibilidad etc.

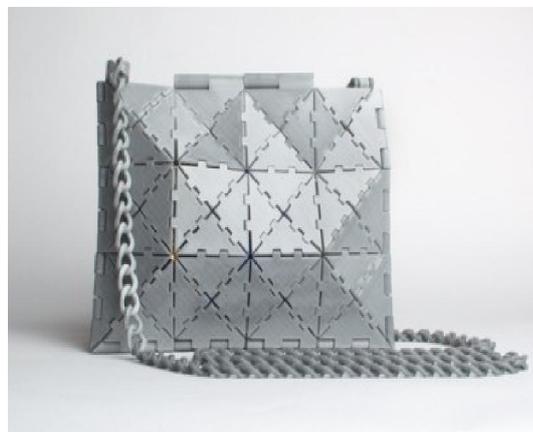


ILUSTRACIÓN 54. EJEMPLOS DE BOLSOS FABRICADOS CON IMPRESIÓN 3D

Sector madera

El sector de la madera es todavía incipiente en las tecnologías de fabricación aditiva, consecuencia de la falta de materiales con características similares a la madera (sí que existen materiales poliméricos con acabados parecidos a la madera). Su potencial reside en la personalización de las aplicaciones. Existen en la actualidad desarrollos de I+D+I que tienen por objeto diferentes vías de trabajo:

- Desarrollo de materiales derivados de la madera en forma de fluido viscoso para poder ser aplicados mediante la tecnología de inyección.
- Desarrollo de impresoras basadas en la fabricación por láminas (tecnología LOM- Laminated Object Manufacturing), con espesores variables entre 0.1-3mm.

En la actualidad, existen en el mercado filamentos de impresión, como el **Laywoo-D3**, inventado por Kai Parthy para utilizar con impresoras de hilo tipo RepRap. El material de impresión está compuesto de madera reciclada en un 40% y polímeros que dan cohesión a las partículas de madera. El material resultante tiene una durabilidad similar al PLA y puede ser impreso a Tª entre 175-250°C.



ILUSTRACIÓN 55. EJEMPLOS DE PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE FA EN MADERA



ILUSTRACIÓN 56. FILAMENTO LAYWOO-D3 PARA LA IMPRESIÓN 3D D ELEMENTOS DECORATIVOS

Otros filamentos, como el **Timberfill Light Wood Tone** poseen una alta calidad para impresión 3D FFF/FDM, y son biodegradables con aspecto de madera (Polvo de madera 100% natural).

Las piezas obtenidas con filamentos pueden ser lijadas y pintadas. Además, si se modifica la temperatura de extrusión cambia ligeramente el color de superficie de la pieza. Cuanto menor sea la temperatura de extrusión se obtiene un color más claro y si la temperatura de extrusión es más alta se obtiene una superficie de color más oscura en la figura.

Matricería

PROTOTIPADO EN MOLDEO POR SOPLADO

Una de las demandas que se pueden atender mediante impresión 3D es el moldeo por soplado, proceso industrial para fabricar botellas y otros recipientes huecos. A lo largo de los años, las empresas han evitado el uso de prototipado por los altos costes y reducida velocidad de producción. Hoy día, la fabricación aditiva ha cambiado la visión del prototipado en estos procesos, permitiendo a los ingenieros validar parámetros y acelerar el visto bueno de los diseños.

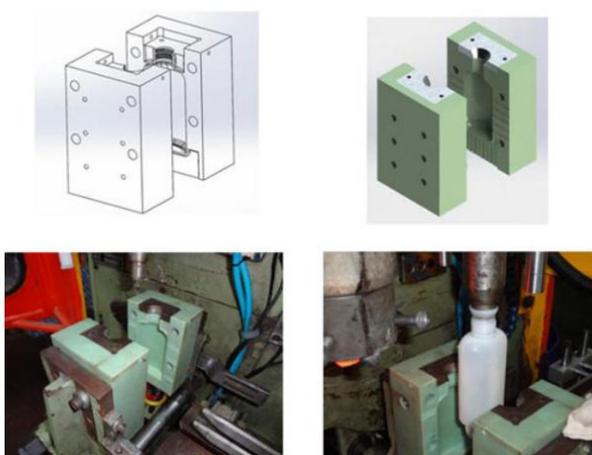


ILUSTRACIÓN 57. PARTE SUPERIOR IZQUIERDA: DISEÑO CAD DEL MOLDE DE EXTRUSIÓN POR SOPLADO. MOLDE IMPRESO CON POLYJET. BOTELLA DE POLIETILENO FABRICADA USANDO EL MOLDE IMPRESO EN 3D. FUENTE: STRATASYS

El moldeo por soplado impreso en 3D representa una solución rápida y rentable para hacer prototipos con material definitivo termoplástico, además se pueden utilizar los procesos de fabricación tradicional o la extrusión por soplado o la inyección de pre-formas con moldeo por soplado. El prototipo permite al diseñador validar el diseño de la botella, así como realizar pruebas funcionales tanto del modelo como en el proceso.

Los moldes realizados en FDM o Polyjet pueden ser instalados en las máquinas de moldeo por soplado por extrusión, así como en las máquinas de moldeo por soplado de preformas, cubriendo con ello una amplia gama de productos, geometrías y materiales termoplásticos¹⁹.

¹⁹ StratasyS <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/112719-Moldeo-por-soplado-con-impresoras-3D.html>>

SIMULACIÓN DE SOBREMOLDEO

El sobremoldeo es un proceso de moldeo en el que se combinan dos o más materiales para fabricar una sola pieza. Una pieza sobremoldeada comienza con el moldeo de un sustrato rígido de termoplástico. Encima del sustrato se moldea un elastómero de termoplástico.



ILUSTRACIÓN 58. EJEMPLOS DE SOBREMOLDEO SIMULADO. FUENTE: STRATASYS

La tecnología PolyJet tiene la capacidad de inyectar dos o más materiales al mismo tiempo para crear prototipos con piezas sobremoldeadas impresas. Gracias a esto, el modelo se puede conseguir de manera rápida, ideal cuando el diseño aún no es definitivo.

En un único proceso de fabricación es posible imprimir una pieza de prototipo para simular diversas variaciones de un producto sobremoldeado, ofreciendo la posibilidad de evaluar más opciones de diseño en menos tiempo y a un menor coste.

MODELOS PARA MOLDES DE SILICONA

La tecnología de moldes de silicona resulta interesante para la fabricación de series cortas de piezas plásticas de 25 a 100 unidades. Partiendo de un prototipo realizado mediante impresión 3D, se fabrica un molde de silicona que posteriormente se inyectará con un poliuretano en una cámara de vacío. Estos moldes de silicona reproducen fielmente todos los detalles del prototipo master, por lo que es deseable contar con un prototipo con buen acabado superficial. Stratasys aconseja para esta aplicación la tecnología FDM.²⁰



ILUSTRACIÓN 59. MOLDES DE SILICONA CON MODELOS REALIZADOS CON FDM. FUENTE: STRATASYS

²⁰ Stratasys RTV molding <<http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/rtv-molding>>

MODELOS PARA MOLDES DE ARENA VERDE

El moldeado por arena verde consiste en crear un molde en una mezcla de arena de sílice, presionando la arena contra un modelo con la forma del objeto a realizar. El objeto produce una cavidad en la arena por la que se vierte acero fundido.

La impresión 3D de los modelos en este tipo de moldes es utilizada cuando los moldes son tanto para prototipado como para fabricación, para moldes divididos, cuando la copa o bebedero de colada es similar a los canales de alimentación o cuando la colada es de gran tamaño o complejidad²¹.

Modelos para moldeo centrífugo: El moldeo rotacional, centrífugo o rotomoldeo, es una técnica de transformación de plástico empleado para producir piezas huecas, en el que plástico se vierte dentro de un molde mientras gira en dos ejes biaxiales. El plástico se va fundiendo mientras se distribuye y adhiere en toda la superficie interna.



ILUSTRACIÓN 60. MOLDEO EN ARENA “MATCHPLATE” CON INSERTO EN FDM (BLANCO). FUENTE: STRATASYS

En rotomoldeo con moldes de caucho vulcanizado, se suelen emplear patrones o modelos, que pueden ser fabricados por impresión 3D, por ejemplo con los sistemas Fortus de Stratasys. Es posible por tanto reemplazar los modelos metálicos mecanizados ahorrando así tiempo de fabricación. Los modelos a partir de material termoplástico Fortus PC (policarbonato) y PPSF (polifenilsulfona) con FDM pueden someterse al proceso de vulcanización. Este proceso consiste en someter al molde y sus patrones a temperaturas de 149 a 177°C y presiones de 5,5 a 24.1 MPa de 1 a 2 horas.²²



ILUSTRACIÓN 61. EJEMPLO DE PIEZA FABRICADA POR COLADA CENTRÍFUGA. FUENTE: STRATASYS23

²¹ Stratasys 2015. Sand Casting With PolyJet and FDM Patterns. <<http://www.technimoldsistemi.com/upload/files/articoli/3/Stratasys-SandCasting_techimoldsistemi.com.pdf>>

²² Spin Casting With PolyJet or FDM Tooling <<http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/spin-casting>>

²³ Caso de éxito Stratasys <<http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/spin-casting>>

MOLDES PARA INYECCIÓN

Un caso de éxito en la fabricación de este tipo de herramientas de moldeo viene de la mano de Unilever, propietaria de marcas tales como Surf, Comfort, Hellmanns y Domestos, la cual está utilizando el sistema 3D Objet500 Connex de Stratasys para fabricar herramientas de moldeo por inyección para sus divisiones de productos de hogar y lavandería, con una tirada de unas 50 unidades para una amplia variedad de piezas de prototipos tales como tapones y cierres de botellas y bloques desinfectantes para inodoro.

Imprimiendo en 3D los moldes de inyección en Digital ABS, la empresa ha podido mantener la alta calidad propia de los prototipos fabricados con el sistema tradicional, soportando las elevadas temperaturas y presiones de la máquina de moldeo por inyección, a un coste y con unos plazos de fabricación notablemente reducidos.²⁴



ILUSTRACIÓN 62. MOLDE DE INYECCIÓN IMPRESO EN DIGITAL ABS CON POLYJET PARA PROTOTIPO DE BLOQUE DESINFECTANTE DOMESTOS (UNILEVER). FUENTE: COMHER

Con ello, la empresa ha reducido los plazos de entrega en la fase conceptual en aproximadamente un 35%, mejorando así el proceso global de fabricación. Esto permite evaluar los nuevos diseños rápidamente y eliminar los que no son adecuados, antes de comprometer inversión importante previa a la producción en masa.

Otras aplicaciones industriales

Intercambiadores de placas de plástico para industria del petróleo y gas: La escuela de ingeniería A. James Clark²⁵ de la universidad de Maryland, EEUU, ha colaborado con Stratasys en la fabricación de lo que va a poder ser el primer intercambiador realizado por fabricación aditiva. Es un intercambiador de placas, con tubos en su interior para el paso del líquido (en este caso agua) y por donde circula aire transversalmente. El desarrollo surgió de la colaboración con el Instituto del Petróleo de Abu Dhabi para introducir el intercambiador de calor de polímero en la aplicación de refrigeración de agua de mar de los procesos de gas natural licuado.

²⁴ <http://www.comher.com/works/caso-de-exito-la-impresion-3d-permite-a-unilever-reducir-un-40-los-plazos-de-fabricacion/>

²⁵ A. James Clark 2012. Clark School Engineers Work with Stratasys to Utilize Fused Deposition Modeling Technology in New Application <<http://www.eng.umd.edu/html/media/release.php?id=156>>



ILUSTRACIÓN 63. INTERCAMBIADOR DE CALOR FABRICADO CON TECNOLOGÍA FDM. FUENTE: SCHOOL OF ENGINEERING

PROTOTIPOS PARA ANÁLISIS DE FRICCIÓN

El coeficiente de fricción de la superficie de un prototipo es un componente funcional, no un factor estético y simula las propiedades mecánicas del producto final. Este tipo de análisis de fricción resulta especialmente útil en empuñaduras y para reducir el desgaste de una parte de un objeto.

Un prototipo bien diseñado en el que se tenga en cuenta el estudio de fricción puede tener las siguientes ventajas: un agarre mejorado para el usuario final, reducción del desgaste en una de las partes del producto y capacidad de deslizamiento de los componentes. Son especialmente indicados para esta aplicación los fotopolímeros PolyJet.²⁶



ILUSTRACIÓN 64. PIEZA PARA SIMULACIÓN DE FRICCIÓN CREADA POR IMPRESIÓN 3D. FUENTE: CIMTECH

ELEMENTOS DE SOPORTE Y SUJECIÓN

Estos útiles al ser impresos en 3D son fabricados de una manera más customizada y precisa, además de contar con una reducción tiempo frente al mecanizado tradicional. Stratasys ofrece la opción de fabricar estos elementos mediante FDM, que admite materiales termoplásticos resistentes y duraderos, capaces de soportar un entorno de fabricación. También se admite la fabricación por Polyjet cuando las piezas son más complejas e intrincadas.²⁷

²⁶ Cimtech3d <<http://cimtech3d.com/applications/functional-prototyping/dfc/>>

²⁷ Joe Hiemenz, Stratasys, Inc., 3D Printing Jigs, Fixtures and Other Manufacturing Tools <<http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/White-Papers/Rebranded/SSYSWP3DPrintingJigsFixtures0313.pdf?la=en>>

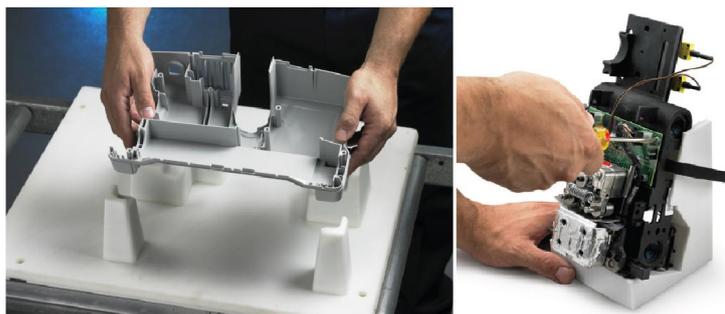


ILUSTRACIÓN 65. ELEMENTOS DE SUJECCIÓN PARA MONTAJE, REALIZADAS CON FDM. FUENTE: CIMTECH Y STRATASYS

MODELO SUSTITUTO

Los modelos sustitutos (Surrogate Components) son piezas que se emplean a la hora del ensamblaje o montaje de ciertos productos. Su función es la de llenar el espacio que debe ocupar la pieza que finalmente incorpora el producto final. Tienen gran utilidad cuando se trata de piezas de un gran valor económico, se coloca el modelo sustituto y se cuenta con el espacio que éste va a ocupar para seguir instalando el resto de componentes.

En el lapso de tiempo entre el montaje del producto final y la evaluación de la instalación, se pueden producir modificaciones de diseño y las piezas pueden ser dañados durante los ciclos repetidos de instalación. Si esto ocurre, el componente debe ser reparado o reemplazado y no supondrá apenas coste si se trata de una pieza sustituta.²⁸



ILUSTRACIÓN 66. MODELO SUSTITUTO DE COLOR ROJO QUE SIMULA EL ESPACIO A OCUPAR POR CONDUCTOS ELÉCTRICOS EN EL CHASIS DE UN OSPREY (HÍBRIDO ENTRE HELICÓPTERO Y AVIÓN). FUENTE: STRATASYS

BISAGRAS FLEXIBLES

La creación de bisagras flexibles con FDM permite las pruebas funcionales rápidas de contenedores y carcasas con bisagras, en termoplásticos empleados a nivel de producción. Si bien los prototipos con

²⁸ Stratasy 2015. Surrogate Components for Design, Manufacturing, Training and Support. <<http://www.stratasy.com/solutions/rapid-prototyping/functional-prototyping/surrogate-parts>>

encaje a presión y bisagras flexibles FDM son especialmente indicados para imprimirlos en 3D con el material FDM Nylon 12, también es posible la impresión 3D de PolyJet²⁹.

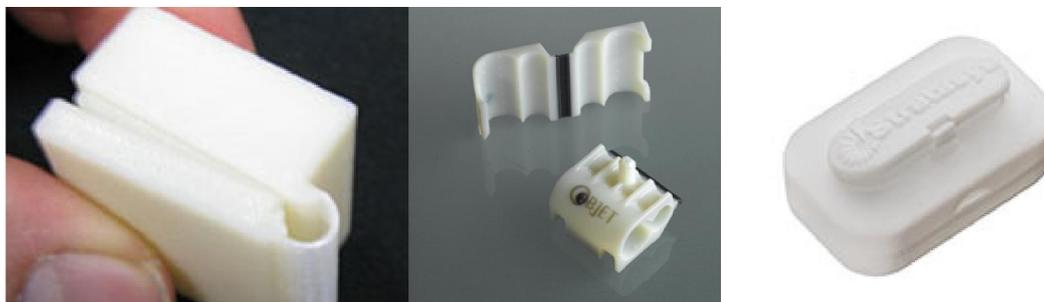


ILUSTRACIÓN 67. EJEMPLO DE BISAGRA FLEXIBLE REALIZADA CON TECNOLOGÍA FDM. FUENTE: STRATASYS

EQUIPAMIENTO DISPONIBLE EN EL MERCADO DE FABRICACIÓN ADITIVA

Antes de comenzar con el estudio sobre modelos de máquinas de FA de especial relevancia, cabe realizar un breve resumen sobre el mercado de la impresión 3D actual (principales empresas fabricantes y sectores a los que se dedican):

3D SYSTEMS ³⁰

La empresa estadounidense “3D Systems” fue la primera empresa fundada específicamente para la fabricación de máquinas de FA en 1986. Actualmente, “3D Systems Corporation” o “3DS” es una de las mayores empresas a nivel mundial del sector de la fabricación aditiva, con más de un millar de personas y 25 oficinas repartidas por todo el mundo.

Sus mayores contribuciones para el sector fueron la invención de la técnica de “SLA” (primer modelo comercializado en 1989) y la invención del formato de archivo “.STL”, que hasta que la ASTM introdujo su nuevo formato “.AMF” hace pocos años, fue un estándar en la industria.

Destacar que en el año 2011, 3D Systems adquiere 16 pequeñas empresas de tecnología de FA y materiales, que le permite ofrecer máquinas y servicios de SLA, SLS, FDM, DMS, etc.

EOS³¹

La empresa alemana “EOS GmbH, Electro Optical Systems”, se fundó en 1989 alentada por el éxito en Estados Unidos de “3D Systems” y de la nueva tecnología de fabricación “SLA”, viendo surgir un nuevo mercado. En la actualidad, emplea a más de 540 personas en todo el mundo y posee más de 16 acuerdos de colaboración con otras empresas e instituciones del sector.

²⁹ Stratasy, caso de éxito bisagras flexibles <<http://www.stratasy.com.cn/es/aplicaciones/prototipos-funcionales/living-hinges>>

³⁰ <http://www.3dsystems.com/>

³¹ <https://www.eos.info/en>

La empresa llegó a inventar, sin infringir las patentes de “3D Systems”, una máquina de estereolitografía que comercializó en 1990. Durante 1994 y 1995, “EOS” comienza a comercializar su propia línea de máquinas de sinterización por láser tanto para materiales poliméricos como metálicos, convirtiéndose así en la primera empresa mundial que comercializó ambas tecnologías (“SLA” y sinterización por láser) a la vez. Sin embargo, en el año 1997, la empresa vendió todos los derechos de sus máquinas de estereolitografía a la norteamericana “3D Systems”, dedicándose desde entonces a las máquinas de lecho de polvo exclusivamente, renunciando al futuro desarrollo y comercialización de estas máquinas de “SLA”

De la misma manera, ha desarrollado incansablemente materiales específicamente para el empleo en sus líneas de máquinas, destacando la introducción del titanio-6-4 para uso en procesos de sinterización –la primera empresa en el mundo que lo consiguió en 2007–, aleaciones de níquel en 2010 y oro en 2012. Para el año 2014, “EOS” ya había conseguido vender más de millar y medio de unidades de máquinas de sinterización por láser en todo el mundo

En la actualidad, “EOS” sólo ofrece modelos de máquinas de SLS de polímeros, cerámicos y metales, y sus gamas de productos están más enfocados al sector industrial en vez de a las pequeñas empresas o particulares

OPTOMEC³²

Fundada en 1997, esta empresa norteamericana es notable en el sector de la fabricación aditiva por ser una de las marcas más conocidas de proveedor de máquinas dentro de las tecnologías de depositado mediante energía dirigida. Desde 1998 lleva comercializando sus máquinas y tecnología bajo el nombre comercial de “LENS” o “Laser Engineered Net Shaping”.

Conjuntamente a sus actividades de impresión 3D, la empresa ha desarrollado otra tecnología denominada “Aerosol Jet”, que es empleada para la fabricación de componentes electrónicos y microelectrónicos.

La compañía ha vendido 150 máquinas en el 2012 por todo el mundo, y su línea de fabricación aditiva la enfoca a la reparación o regeneración de componentes mediante la técnica del **“laser cladding”** más que a la producción o fabricación de piezas. Ofrece flexibilidad a sus clientes en cuanto a la personalización de sus impresoras, con el objetivo de permitir la compatibilización e integración de sus máquinas de fabricación aditiva en entornos y procesos donde se utilizan métodos tradicionales de fabricación para que puedan coexistir.

En cuanto a materiales, la empresa no los ofrece directamente, sino que los provee a través de terceros. Sin embargo, ofrece una amplia gama de metales, aleaciones y materiales compuestos (“cermets”) importantes de uso aeroespacial.

³² <http://www.optomec.com/>

CONCEPT LASER³³

“Concept Laser GmbH”, empresa alemana perteneciente al “Hofmann Innovation Group”, representa otra gran marca especializada en la fabricación de impresoras de una sola tecnología de fabricación aditiva en particular, en concreto la tecnología de lo que se ha estudiado como **“SLM” o Fundido Selectivo por Láser**, aunque la empresa se refiere a esta tecnología mediante su propio nombre comercial de **“LaserCUSING”**. Iniciada en el año 2000, la empresa cuenta ya con 500 empleados, y ofrece todos los servicios y materiales necesarios para comercializar sus máquinas de fusión en lecho de polvo de metales

RENISHAW³⁴

La empresa británica “Renishaw plc”, a diferencia de las demás empresas estudiadas hasta el momento, no fue fundada para, ni se dedica principalmente, a la fabricación aditiva. La empresa comenzó sus operaciones en 1973 para dedicarse en general a tareas de ingeniería de la medición, sensores, espectroscopia y mecanizado de precisión. No fue hasta abril del 2011 cuando, con la adquisición de “MTT Technologies Ltd.”, renombrada como “SLM Solutions GmbH”, cuando se adentra en el sector de la FA. Heredando los sistemas de “MTT”, en la actualidad solo comercializa un modelo de la **tecnología de fusión de metales en lecho de polvo, “EVO Project”**, orientada a la producción industrial de piezas de un solo metal, con énfasis en la automatización y autonomía del proceso en cuanto al post-procesado y limpieza de la pieza (retirada del polvo restante y su reciclado).

REALIZER³⁵

La empresa alemana “ReaLizer GmbH” actualmente sólo se dedica al desarrollo y fabricación de impresoras de la tecnología de fusión de metales en lecho de polvo (**“SLM”**). Comercializa cuatro modelos de máquinas, enfocadas a la producción de componentes finales y prototipos de alto rendimiento. Cabe destacar que ha sido una de las primeras empresas que ofrece una máquina de fusión de metales en lecho de polvo de dimensiones lo suficientemente reducidas como para poder considerarse “de escritorio”. La mayoría de sus máquinas integran sistemas automáticos de reciclado y filtrado de polvo. Así mismo, la propia empresa desarrolla y provee a sus clientes los materiales que emplean sus máquinas.

STRATASYS³⁶

La otra empresa estadounidense dominante del sector, “Stratasys Ltd.” se encuentra en una batalla encarnada contra su rival, “3D Systems”, para intentar dominar su sector del mercado de la impresión 3D en su país natal y, en menor medida, en el resto del mundo. Sin embargo, a diferencia de “3DS”, “Stratasys” ha apostado por limitar el rango de las tecnologías de fabricación aditiva que ofrece a las de

³³ <https://www.concept-laser.de/en/home.html>

³⁴ <http://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--1030>

³⁵ <http://www.realizer.com/en/>

³⁶ <http://www.stratasys.com/>

modelado mediante depositado de fundidos (“**FDM**”) y a sistemas basados en sistemas de **impresión mediante inyección de material**. Cuenta con unos 500 empleados, y ofrece servicios de venta de maquinaria y producción de piezas en casi todas las tecnologías de FA a través de otras pequeñas empresas adquiridas.

Junto al desarrollo de máquinas, “Stratasys” trabaja continuamente para desarrollar nuevos materiales para uso en sus impresoras, ofreciendo termoplásticos de alta gama y noveles que han llegado a emplearse y certificarse para su uso en aeronaves, como el “ULTEM 9085”.

Entre las contribuciones recientes más notables de esta empresa al sector está la fabricación del automóvil híbrido “Urbee” junto con la empresa estadounidense de ingeniería “KOR Ecologic”.

ARCAM AB³⁷

“Arcam AB”, empresa sueca fundada en 1997, es la única a escala mundial que fabrica de fusión de metales en lecho de polvo mediante el empleo de **haz de electrones (EBM)** en lugar de la tecnología láser. Dispone de varios modelos dirigidos al sector ortopédico, así como máquinas para el sector aeroespacial.

La empresa desarrolla y comercializa su propia línea de materiales metálicos en polvo, muy restringida si se compara con otras empresas de fusión en lecho de polvo, pero comprensible si se tiene en cuenta sus aplicaciones. Principalmente comercializa titanios y súper aleaciones de cobalto-cromo. Así mismo, ofrecen servicios posventa, de entrenamiento y de desarrollo de paquetes informáticos para el uso en sus máquinas.

BEAM³⁸

Empresa francesa que surgió a partir de la adecuación de sistemas de “**laser cladding**” desarrollados por el instituto francés de I+D “IREPA LASER” para la fabricación aditiva. El resultado de tres tesis doctorales, y los más de 15 años de experiencia, sirvieron para desarrollar la primera máquina de fabricación aditiva que emplea tecnología de depositado mediante energía dirigida, empleando sistemas láser y polvos metálicos.

“BeAM” comercializó su primera máquina de fabricación aditiva industrial en el año 2009, y en los pocos años hasta la actualidad se ha situado en el primer plano del empleo de esta tecnología para la fabricación y reparación de piezas a nivel europeo, en parte por ser los pioneros de esta tecnología en nuestra región.

Actualmente ofrecen tres modelos de esta tecnología que ofrecen gran versatilidad y modularidad para poder ser adoptadas fácilmente en entornos industriales productivos ya existentes.

³⁷ <http://www.arcam.com/>

³⁸ <http://beam-machines.fr/>

OTRAS EMPRESAS DE INTERÉS

- **Aspect**³⁹. Empresa japonesa que fabrica impresoras de fusión en lecho de polvo
- **BigRep**⁴⁰. Fabricante alemán de una impresora de extrusión con una capacidad de 1,3 m3. Se encuentran desarrollando la segunda generación de estas máquinas.
- **Farsoon**⁴¹. Empresa china que fabrica máquinas de sinterización por láser (en lecho de polvo).
- **InssTek**⁴². Empresa surcoreana de fabricación de impresoras de depositado mediante energía dirigida.
- **TPM China**⁴³. Fabrica modelos de impresoras de sinterización por láser (en lecho de polvo).
- **Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co.**⁴⁴ Empresa china fabricante de impresoras de fusión y sinterización en lecho de polvo, entre otras.

³⁹ <http://aspect.jpn.com/>

⁴⁰ <http://bigrep.com>

⁴¹ <http://www.farsoon.com/>

⁴² <http://insstek.yehkwang.com/>

⁴³ <http://www.trumpsystem.com/>

⁴⁴ <http://www.binhurp.com/cn/>

A continuación, se resumen los **principales fabricantes** por tecnología y materiales, junto con una estimación del rango de precios de los equipos:

PROCESO DE FA	EMPRESA	MATERIALES	PRECIO ESTIMADO (\$)
Sinterización en lecho de polvo (SLS, DMLS)	3D Systems	Resinas termoplásticas Metales y compuestos cerámicos	300.000 – 1.000.000
	EOS	Resinas termoplásticas Metales	190.000 – 1.500.000
Fusión en lecho de polvo (SLM, EBM)	Concept laser	Metales	360.000 – 1.775.000
	SLM Solutions		200.000 – 500.000
	Realizer		200.000 – 400.000
	Renishaw		500.000
	Arcam AB		500.000 – 975.000
Depositado mediante energía dirigida	Optomec	Metales	300.000 – 1.300.000
	BeAM		350.000 – 850.000
Tecnologías de modelado mediante depositado de fundidos (FDM)	Stratasys	Termoplásticos	100.000 – 1.000.000

TABLA 7. TABLA RESUMEN DE LOS PRINCIPALES FABRICANTES DE EQUIPOS PARA FA

CONCLUSIONES/IMPACTO EN LA INDUSTRIA

RETOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

En la actualidad, la fabricación Aditiva presenta todavía una serie de retos que hacen que esta tecnología no suponga un peligro para los métodos de fabricación convencionales. Resumiendo lo ya descrito en la Introducción – Ventajas y limitaciones de los procesos de FA, cabe destacar:

- **Limitaciones de velocidad.** Actualmente, excepto para algunas máquinas específicas, las velocidades constructivas son demasiado lentas para ser aceptables si se necesita fabricar una gran cantidad de piezas en un plazo corto. Por ejemplo, las tecnologías de “DMLS” o “SLM”, es decir, las de sinterización y fusión de metales en lecho de polvo, que suponen la mayoría de los sistemas que procesan metales, tienen velocidades que rondan los 10 cm³/h.
- **Limitaciones de tamaño.** Otro aspecto que comparten la gran mayoría de los sistemas de fabricación aditiva es el reducido tamaño de las piezas que pueden fabricar si se compara con las tecnologías convencionales. Aunque existen excepciones, son pocas actualmente, y esto supone un gran impedimento para que estas tecnologías alcancen el nivel de fabricar componentes estructurales complejos.
- **Rango insuficiente de materiales.** Aparte del gran problema económico que existe actualmente con el suministro y comercialización del material para las grandes impresoras industriales, desde el punto de vista técnico, la escasez de variedad de dichos materiales contribuye actualmente en gran medida a que no se puedan emplear en todas las aplicaciones que se desearían dentro del sector. Aunque es cierto que existen actualmente encarnaciones en forma de polvo metálico de aleaciones de titanio, níquel, cobalto-cromo y aceros, la cantidad de aluminios es escasa así como la variedad de sus aleaciones.
- **Capacidad de impresión multi-material limitada.** Aunque quizá se pueda considerar relativamente el menor de los factores que suponen un reto técnico de la adopción de la fabricación aditiva en el sector, aún supone una gran relevancia. Si se tuviera dicha capacidad, se podrían fabricar directamente productos que actualmente deben ensamblarse y unirse empleando mano de obra y otros materiales y/o energía.
- **Falta de consistencia en la calidad.** El último gran reto quizá sea el más importante y el que más reacio vuelve a los directivos de las empresas aeroespaciales a adoptar las tecnologías de impresión 3D. No existe actualmente repetitividad ni consistencia en la calidad de una misma pieza que se fabrique no sólo en otra máquina, sino en la misma. Incluso para piezas más pequeñas que se pueden fabricar a la vez como parte de un lote, existen importantes variaciones entre los parámetros de calidad de unas con respecto a otras. No solo esto, sino que el propio proceso y el material llevan a complicaciones difíciles de paliar o detectar actualmente como porosidades y otros desperfectos en la microestructura del material que resultan en piezas propensas a fallos inesperados. El hecho de no disponer de sistemas de metrología e inspección lo suficientemente sofisticados integrados en las impresoras que puedan ir garantizando la calidad de cada capa conforme se va depositando hace que sea imposible obtener piezas de calidades consistentes dentro de una cierta tolerancia con el estado actual de la tecnología en el mercado.

Para solucionarlos, el mayor esfuerzo investigador actual está encaminado a **conocer profundamente los procesos y mecanismos** que tienen lugar mientras se fabrican las piezas para las distintas tecnologías de impresión que existen. Una vez identificadas, y con un conocimiento mucho mayor de los procesos que ocurren, se podrán desarrollar sistemas automatizados de monitorización que controlen los parámetros y variables relevantes del proceso para así llegar a producir piezas cuya calidad sea, dentro de un cierto rango de incertidumbre admisible, consistente, como ocurre con las tecnologías de fabricación tradicionales.

Perspectiva de la fabricación aditiva a medio y largo plazo

El sector de la producción o fabricación industrial, entendiendo como tal al conjunto de todas aquellas empresas de cualquier sector cuyo cometido es la producción de un bien destinado a cualquier fin, necesitan hacer uso de las tecnologías de fabricación que tienen a su alcance para llevar a cabo su cometido. Siempre que ha surgido una nueva tecnología productiva asociada a un material, desde los distintos procesos de fundición hasta los centros de mecanizado de control numérico, el conjunto de dichas industrias se han aprovechado de ellas y, tras un periodo de tiempo de adaptación y consolidación de dichas tecnologías, las han adoptado, ya que su uso les reportaba algún beneficio en cuanto a la fabricación del que antes carecían. Esto puede ir desde ahorros en tiempos y costes de fabricación a la posibilidad de innovar en sus productos empleando nuevos materiales o empleando geometrías más eficientes que antes eran imposibles de producir con los métodos de los que disponían.

El conjunto de las tecnologías de fabricación aditiva se ha de considerar desde este punto de vista: una nueva tecnología de fabricación que ofrece una serie de ventajas para ciertas aplicaciones. Su consideración como tecnología consolidada a la misma altura que procesos como la fundición o el laminado aún está lejos, pero simplemente debido al factor tiempo.

El conjunto industrial productivo está dividido en una multitud de sectores dedicados a la fabricación de productos similares o destinados a un fin similar, compartiendo muchos de los requisitos técnicos. Esto da lugar a la actual sectorización del panorama industrial productivo, como el sector aeroespacial, naval, automovilístico, médico, alimentación, energético, textil, etc. Esto también da lugar a que cada sector, por sus particularidades y requisitos diferentes, tengan una necesidad mayor o menor de cada tecnología de fabricación existente – es decir, empresas dedicadas a la fabricación de lotes de cientos de miles de piezas simples metálicas no considerarán el uso de técnicas de mecanizado si pueden obtener su pieza final mediante embutición.

Con estos conceptos en mente, se debe considerar la adopción que podrían tener las tecnologías de fabricación aditiva a medio y largo plazo a la vez que éstas maduran y alcanzan una solidez técnica que las equipare con otros métodos de fabricación convencionales. En dicho escenario se presentarían los siguientes posibles casos:

A) Implementación cuasi-completa: sustitución de las tecnologías tradicionales por FA

Es posible que algunos sectores especializados, como el de los implantes médicos o dentales, acaben completamente dominados por la impresión 3D a largo plazo, ya que el empleo de las tecnologías convencionales para la fabricación de piezas únicas y de materiales especializados no resultaría nada ventajoso frente a la impresión 3D. Prueba de ello es la gran cantidad de equipos comerciales existentes diseñados de manera específica para estas tecnologías.

B) Implementación parcial significativa: las tecnologías de FA coexisten con las técnicas tradicionales, ocupando un lugar equiparable

Es el caso de sectores como el aeroespacial. Al existir piezas y componentes con diferentes requisitos técnicos, se podrán emplear las tecnologías de fabricación aditiva para aquellas que supongan un panorama ventajoso frente a las tradicionales, como la fabricación de piezas altamente complejas geométricamente o que demanden una gran personalización y la producción de series cortas. Para el resto de las piezas y componentes se seguirán empleando los métodos tradicionales de fabricación, cuyo empleo es más ventajoso frente a la impresión 3D. También podría resultar ventajosa para la fabricación de repuestos localizados, por lo que habrá un gran empleo de éstas para este cometido junto con las de fabricación principal.

C) Implementación parcial menor: las tecnologías de fabricación aditiva cobran importancia en las tareas de fabricación indirectas, como la fabricación de repuestos

Esto ocurrirá en sectores cuyos productos en su mayoría no requieran de una gran personalización o complejidades geométricas, aunque seguirá estando presente en una proporción menor la necesidad de personalización. La FA será marginal frente a los métodos tradicionales, que resultarán más ventajosos y eficientes para la producción en masa, como en el sector automovilístico convencional. Sin embargo, el empleo la impresión 3D para este tipo de empresas podría resultar de gran relevancia en cuanto a la fabricación de piezas de repuesto, que se podrían realizar de manera descentralizada y respondiendo a la demanda.

D) Implementación cuasi-nula: predominio de las tecnologías convencionales frente a las tecnologías de FA.

En este grupo se encuentran empresas que produzcan piezas sencillas y baratas, en masa, y con escasa o ninguna personalización, cuya necesidad de repuestos también será nula.

CONCLUSIONES

En la Tabla 8 se resumen las principales características de los procesos de FA descritos en el presente informe, teniendo en cuenta:

- **Velocidades de impresión.** Este aspecto intenta englobar de forma representativa el tiempo empleado por las máquinas dentro de un mismo grupo tecnológico en fabricar una pieza. Obviamente, variará de una máquina a otra, dependiendo del material empleado y según la resolución que el usuario desee alcanzar.
- **Tamaño máximo de piezas.** Al igual que el aspecto anterior, pretende englobar una figura representativa del máximo tamaño de piezas promedio de las máquinas de una misma tecnología que puede fabricar, es decir, se pretende dar un valor más o menos acorde a las máquinas en su conjunto sin escoger, por ejemplo, el de un único modelo excepcional.
- **Calidad de la pieza.** Este aspecto pretende englobar todos los factores que influyen en la calidad de la pieza final. Aquí se pretende englobar cualitativamente factores como resoluciones de las

máquinas y propiedades materiales (mecánicas, térmicas, acabados superficiales, porosidad, etc.), todo ello *después* de llevar a cabo los post-procesados pertinentes, obteniendo así la calidad máxima.

- **Cantidad de post-procesado necesario.** Como el aspecto anterior, pretende englobar un conjunto de factores que influyen en la cantidad de trabajo adicional que hay que asignarle a cada pieza fabricada para obtener la máxima calidad posible. Aquí se incluyen tratamientos térmicos para aliviar tensiones térmicas o para obtener propiedades mecánicas más favorables, operaciones de extracción y limpieza de la pieza (que a su vez reflejan la complejidad de añadir estructuras especiales de soporte o anclaje), recubrimientos y tratamientos superficiales a la par que operaciones de reinicio de la máquina para llevar a cabo la fabricación de otra pieza, como puede ser la reintroducción del polvo sobrante y su filtrado en los procesos de fusión en lecho de polvo. A su vez, se incluyen operaciones convencionales adicionales, como pueden ser el fresado, taladrado, ensamblaje, etc. que puedan ser necesarios para obtener la pieza final.

Adicionalmente, se incluye una última columna en la tabla de comentarios con aspectos destacables de la tecnología en cuestión.

MATERIALES	TECNOLOGÍA	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	TAMAÑO MÁXIMO DE PIEZAS	CALIDAD DE LA PIEZA	CANTIDAD DE POST-PROCESADO NECESARIO	ASPECTOS DESTACABLES
Polímeros, cerámicos y compuestos de matriz polimérica	Sinterización selectiva por láser ("SLS")	+ (Muy baja) 5-25 cm ³ /h	++ (Bajo) 0,7x0,48x0,48 m ³	++++ (Alta)	++++ (Alto)	Se pueden emplear materiales compuestos de matriz polimérica y se pueden fabricar, en menor medida, cerámicos, además de polímeros.
	Modelado por depositado de fundidos ("FDM")	++ (Baja) >24 cm ³ /h	+ (Muy bajo) 0,13x0,13x0,17 m ³	++ (Baja)	+ (Muy bajo)	Sólo se pueden emplear materiales termoplásticos.

Metales, y compuestos metálicos	Sinterización directa de metales por láser (“DMLS”)	+	++	+++	++++	Calidad similar a las fundiciones post-procesadas con tratamientos térmicos. Mayor porosidad que “SLM”.
	Fundido selectivo por láser (“SLM”)	+	++	++++	+++++	Calidad similar a las fundiciones post-procesadas con tratamientos térmicos.
	Fundido por haz de electrones (“EBM”)	++	+	+++	++++ (Muy alto)	
	Formado por láser de polvo (“LPF”)	+++	+++	+++++	+++	Posibilidad de reparación de piezas mecánicas mediante el “laser cladding”. Calidad similar a piezas forjadas.
	Fabricación directa mediante haz de electrones (“EBDM”)	+++++	+++++	+++	+++	

TABLA 8. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE FA

Como se aprecia en la Tabla 8, los procesos de fusión o sinterización en lecho de polvo añaden tiempo de post-procesado en general por requerir operaciones más complejas de extracción y limpieza, pues hay que retirar el polvo mediante personal cualificado (requiriendo medidas de seguridad), filtrarlo y reconducirlo hasta la máquina. Así mismo, los procesos de sinterización suelen resultar en piezas más porosas y menos densas que las conseguidas mediante la fusión, por lo que se requerirán procesos de post-procesado adicionales para paliar esto, aunque sus propiedades mecánicas serán similares a piezas de fundición. Es por esta razón que para procesos de “PBF” para metales, las piezas sinterizadas poseen menor calidad relativa a las obtenidas mediante la fusión en el mismo grupo tecnológico. Sin embargo, al requerir los procesos de fusión en lecho de polvo (como el “SLM” y “EBM”) complejas estructuras de soporte del mismo material que la pieza, al final resultan requerir más tiempo y complejidad de post-procesado que las sinterizadas.

En cuanto a piezas obtenidas mediante tecnologías de depositado mediante energía dirigida, su calidad relativa en general se asemeja a la de las piezas forjadas. En comparación, los tiempos de post-procesado son mucho menores que las de lecho de polvo pues las operaciones de extracción y limpieza no suponen costosos tiempos adicionales al tener que retirar material, filtrarlo, etc. Aunque en algunos casos las estructuras de soporte son necesarias, no suelen ser tan complejas como las empleadas en el caso de las máquinas de lecho de polvo.

Para la tecnología “FDM”, ésta parece estar en desventaja; pero sólo se ha de comparar con el “SLS” para fabricar termoplásticos. Aunque de menor calidad, suelen tardar menos y sus tiempos de post-procesado son mucho menores.

Aunque las velocidades de construcción para las tecnologías de lecho de polvo sean mucho menores que las demás, permiten la fabricación simultánea de varias piezas y el escaso uso de soportes (para los procesos de sinterización).

En esencia, no existe una sola tecnología que sea superior a las demás para un material dado. Hay que considerar las ventajas e inconvenientes de cada una y, posteriormente, unir a estos criterios otros factores económicos y de disponibilidad que deben ser estudiados para cada aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS DE REFERENCIA

- J. Kruth, «Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, » CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 40, pp. 603-614, 1991
- J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke y T. Childs, «Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, » CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, pp. 730-759, 2007.
- T. Wohlers, Wohlers Report 2012 Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2012.
- J. Delgado et al. 2010. FABIO project: Development of innovative customized medical devices through new biomaterials and additive manufacturing technologies, 3rd Int Conference on Additive Technologies, iCAT '10, September 2010 Slovenia.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- Servicios Tecnológicos Avanzados, memoria 2007, AIMME :
<http://www.aimme.es/documentos/difusion/memorias/2007/servicios-tecnologicos/servicios/rapid-manufacturing.html>
- Russ, H (2015). Additive, Manufacturing, BinderJetting.:
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- Stratasy 2013. 3D printing a space vehicle:
<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Aerospace/SSYS-CS-Fortus-NASA-08-13.pdf?v=635157814585337421>
- 3D Systems 2014. Boeing Sees Growing Value & Versatility in SLS System and DuraForm Materials:
<http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/boeing-case-study-01-06-141.pdf>
- SAE International, 2014. 3-D printing in aerospace: not just winging it:
<http://articles.sae.org/13170/>
- Applications & Testing & Experience, Business News, Technology on May 24, 2013:
<http://www.uasvision.com/2013/05/24/survey-copter-turns-to-3d-printer-for-prototyping/>
- Strastasy, Marzo 2015: <http://blog.stratasys.com/2015/03/05/3d-printed-air-duct-flying-eye-hospital/>
- <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Application>
- Stratasy 2013. Direct Digital Manufacturing at BMW:
<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Automotive/SSYS-CS-Fortus-BMW-07-13.pdf?v=635139936049694673>

- Stratasys 2015. The Drive for speed:
<http://usglobalimages.stratasys.com/Case%20Studies/Automotive/CS-PJ-Auto-HondaAccess-EN-06-15-Web.pdf?v=635709257342674183>
- CORE3D 2015. Leaders in digital dentistry: <http://www.avinent.com/public/adjunts/ENG.pdf>
- Stratasys: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/112719-Moldeo-por-soplado-con-impresoras-3D.html>
- Stratasys RTV molding: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/rtv-molding>
- Stratasys 2015. Sand Casting With PolyJet and FDM Patterns:
http://www.technimoldsistemi.com/upload/files/articoli/3/Stratasys-SandCasting_technimoldsistemi.com.pdf
- Spin Casting With PolyJet or FDM Tooling: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/spin-casting>
- Caso de éxito Stratasys: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/tooling/spin-casting>
- <http://www.comher.com/works/caso-de-exito-la-impresion-3d-permite-a-unilever-reducir-un-40-los-plazos-de-fabricacion/>
- James Clark 2012. Clark School Engineers Work with Stratasys to Utilize Fused Deposition Modeling Technology in New Application: <http://www.eng.umd.edu/html/media/release.php?id=156>
- Cimtech3d: <http://cimtech3d.com/applications/functional-prototyping/dfc/>
- Joe Hiemenz, Stratasys, Inc., 3D Printing Jigs, Fixtures and Other Manufacturing Tools:
<http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/White-Papers/Rebranded/SSYSWP3DPrintingJigsFixtures0313.pdf?la=en>
- Stratasys 2015.Surrogate Components for Design, Manufacturing, Training and Support:
<http://www.stratasys.com/solutions/rapid-prototyping/functional-prototyping/surrogate-parts>
- Stratasys, caso de éxito bisagras flexibles: <http://www.stratasys.com.cn/es/aplicaciones/prototipos-funcionales/living-hinges>
- <http://www.optomec.com/>
- <https://www.concept-laser.de/en/home.html>
- <http://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--1030>
- <http://www.realizer.com/en/>
- <http://www.stratasys.com/>
- <http://www.arcam.com/>
- <http://beam-machines.fr/>
- <http://aspect.jpn.com/>

- <http://bigrep.com>
- <http://www.farsoon.com/>
- <http://insstek.yehkwang.com/>
- <http://www.trumpsystem.com/>
- <http://www.binhurp.com/cn/>