

COTEC es una fundación de origen empresarial que tiene como misión contribuir al desarrollo del país mediante el fomento de la innovación tecnológica en la empresa y en la sociedad españolas.

ISBN 987-84-92933-15-0



Cotec

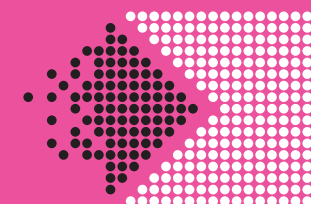
Fundación Cotec
para la Innovación Tecnológica
Pza. Marqués de Salamanca 11, 2.º izqda.
28006 Madrid
Teléf.: (34) 91 436 47 74
Fax: (34) 91 431 12 39
<http://www.cotec.es>



AGENCIA DE DESARROLLO ECONÓMICO DE LA RIOJA
AGENCIA DE INVERSIONES Y SERVICIOS DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN
AGENCIA NAVARRA DE INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA
ALMA CONSULTING GROUP
ALMIRALL
APPLUS+
ASESORÍA I+D+I
ATOS ORIGIN ESPAÑA
AYUNTAMIENTO DE GIJÓN
AYUNTAMIENTO DE VALENCIA
BBVA
CAJA DE AHORROS Y PENSIONES DE BARCELONA (LA CAIXA)
CÁMARA DE COMERCIO E INDUSTRIA DE MADRID
CIDEM
CLARKE, MODET & Cº
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN Y CIENCIA DE LA JUNTA DE CASTILLA-LA MANCHA
CONSEJERÍA DE INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPRESA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA
CORPORACIÓN MONDRAGON
CORPORACIÓN TECNOLÓGICA DE ANDALUCÍA
CRISA
DELOITTE
DEPARTAMENTO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y UNIVERSIDAD DEL GOBIERNO DE ARAGÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN DE LA XUNTA DE GALICIA
DIRECCIÓN GENERAL DE UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DE LA CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MADRID
ENDESA
ENRESA
ESTEVE
EUROCONTROL
EUSKALTEL

EVERIS
FUNDACIÓN ACS
FUNDACIÓN BARRÍE DE LA MAZA
FUNDACIÓN FOCUS-ABENGOA
FUNDACIÓN IBIT
FUNDACIÓN LILLY
FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
FUNDACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA
FUNDACIÓN VODAFONE
FUNDECYT
GAS NATURAL FENOSA
GÓMEZ-ACEBO & POMBO ABOGADOS
GOOGLE ESPAÑA
GRUPO MRS
GRUPO PRISA
GRUPO SPRI
HC ENERGÍA
HISPASAT
IBERDROLA
IBM
IMADE
IMPIVA
IMPULSO
INDRA
INSTITUTO DE DESARROLLO ECONÓMICO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS
INSTITUTO DE FOMENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS, S. A.
LA SEDA DE BARCELONA
LECHE PASCUAL
MERCADONA
MIER COMUNICACIONES
OHL
PATENTES TALGO
PRICEWATERHOUSECOOPERS
REPSOL YPF
SADIEL
SOLUTEX
TALÈNCIA CATALUNYA RECERCA
TELEFÓNICA
VICINAY CADENAS
ZELTIA

30 FABRICACIÓN ADITIVA



FUNDACIÓN COTEC PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

DOCUMENTOS COTEC SOBRE OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS

30

FABRICACIÓN
ADITIVA

30

FABRICACIÓN ADITIVA

Primera edición:
Octubre de 2011

Depósito legal: M. 37.432-2011
ISBN: 978-84-92933-15-0

Imprime:
Gráficas Arias Montano, S. A.

ÍNDICE

Presentación	9
1 Introducción	13
1.1 Un breve vistazo atrás: la industrialización y el desarrollo económico	14
1.2 La fábrica en la era digital	15
1.3 Fabricación de sólidos por adición de capas de material	17
2 Ventajas y retos de futuro del AM	21
2.1 Ventajas asociadas a los productos que hay que fabricar	23
2.2 Ventajas asociadas a los procesos de ejecución	29
2.3 Limitaciones y retos de futuro	31
2.4 El valor frente al coste de la tecnología	40
3 Sectores de aplicación	47
3.1 Sector médico	47
3.2 Sector aeronáutico	55
3.3 Sector automoción	60
3.4 Sector del molde y matricería	61
3.5 Sectores intensivos en diseño: joyería, arte, textil y mobiliario	64
3.6 Industria manufacturera en general	67
3.7 Nuevos sectores económicos	70
4 Relevancia mundial del AM	77
5 Relación de prestadores de servicios	81
5.1 Centros tecnológicos y universidades	81
5.2 Proveedores de maquinaria	83
5.3 Proveedores de servicios	84

6 Conclusiones	85
7 Enlaces de interés	87
7.1 Páginas en la red	87
7.2 Publicaciones	87
8 Glosario de términos	89
Anexo 1: Integración del AM con procesos convencionales de fabricación	91
Anexo 2: Cadena de operaciones en los procesos de AM	101
Anexo 3: Descripción de tecnologías de AM	107
Anexo 4: La importancia del diseño en el AM	129
Anexo 5: Materiales, software y normalización en AM	137

PRESENTACIÓN

Una de las actividades permanentes de Cotec es mostrar y difundir oportunidades tecnológicas que permitan al tejido empresarial y social español incrementar su capital técnico, su capacidad innovadora y su competitividad.

Los Documentos Cotec sobre Oportunidades Tecnológicas conforman una colección orientada a cumplir con el objetivo estratégico de contribuir a incrementar la actitud innovadora, tanto en los ámbitos empresarial y académico como en la sociedad en general. Estos documentos se editan después de un proceso de debate sobre un borrador muy elaborado, que tiene lugar en sesiones con expertos en las áreas de la tecnología o grupo de tecnologías implicadas en o próximas al tema del documento en cuestión. El objetivo de estos debates es complementar y enriquecer la visión de los coordinadores del documento con la de esos expertos externos, contribuyendo a mejorar el documento final.

Desde Cotec se ha elegido para este documento el tema de las tecnologías de fabricación aditiva, que se encuentran en los inicios de un proceso de expansión horizontal como modalidades de la fabricación avanzada, cuya aplicación puede contribuir con grandes ventajas competitivas. Son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas

por este principio, constituyendo así una nueva revolución en la industria.

En este documento se recogen los aspectos más destacables de las tecnologías de fabricación aditiva y se explican los conceptos fundamentales para su comprensión. Se describen los beneficios que tienen sobre los procesos convencionales de fabricación, y se discuten los retos que aún se deben superar para conseguir aplicarlas de forma exitosa en una gran variedad de sectores.

La sesión de debate de este documento tuvo lugar el día 3 de febrero de 2011 en la sede de Cotec en Madrid, y contó con la colaboración de un equipo de expertos empresariales e investigadores coordinados por Jesús Fernández, Íñigo Felgueroso y Carlos García Pando, de la Fundación Prodintec, que prepararon y coordinaron el material de esta publicación. La Fundación Cotec quiere expresar su agradecimiento a todos los que contribuyeron a hacer posible este documento, especialmente a los coordinadores de la Fundación Prodintec.

Cotec, 2011

Participantes en la sesión Cotec sobre fabricación aditiva

Expertos participantes

Pascal Antoine	IMVOLCA
José Ramón Blasco	AIMME
César Carrión	AIJU
Joaquim de Ciurana Gay	Universidad de Girona
Felipe Esteve Oró	ASERM (Asociación Española de RM)
Juan Alberto Favaro	ESDi-AdiFad
Magí Galindo	Centro Tecnológico LEITAT
Berta Gonzalvo	Fundación AITIIP
Manuel González	SOCINSER
José Greses	EOS GMBH Electro Optical System
José Antonio Jaldo	Hoffmann Innovation Iberica
Víctor Paluzié Ávila	RMS Rapid Manufacturing Systems
Javier Peña Andrés	ELISAVA
Xavier Plantá	ASCAMM
Luis Portolés	AIMME
Emilio Ramiro	Ramen
Guillermo Reyes	IQS Instituto Químico de Sarriá
Ramón Rubio García	Universidad de Oviedo

Expertos coordinadores

Jesús Fernández	Fundación Prodintec
Íñigo Felgueroso	Fundación Prodintec
Carlos García Pando	Fundación Prodintec

INTRODUCCIÓN

La Fabricación Aditiva o *Additive Manufacturing* (AM), como se conoce internacionalmente, consiste básicamente en manipular material a escala micrométrica y depositarlo de forma muy precisa para construir un sólido.

Aunque novedosas, son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio, lo que supone una nueva revolución industrial. La posibilidad de prescindir de utillajes, de reproducir cualquier geometría que el ser humano pueda imaginar (y dibujar), la inmediatez en la respuesta a la demanda cambiante del consumidor, y otra serie de ventajas que se explican más adelante, hacen del AM una auténtica pieza angular del futuro industrial en los países más desarrollados del planeta.

En este documento se recogen los aspectos más destacables del AM, se explican los conceptos fundamentales para entender esta tecnología, se describen las ventajas frente a procesos convencionales de fabricación y también los retos que aún debe superar para conseguir su aplicación exitosa en múltiples sectores.

Para entender la verdadera magnitud de esta nueva revolución, es conveniente recordar el importante papel de la industria en el desarrollo económico mundial, y repasar conceptos como el de la era digital contemporánea.

1.1 UN BREVE VISTAZO ATRÁS: LA INDUSTRIALIZACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO

Desde la antigüedad el avance en las condiciones de vida de la humanidad ha estado directamente ligado a la capacidad para adaptar las riquezas naturales del entorno (materias primas) y convertirlas en productos elaborados (tejidos, calzado, herramientas, armas, alimentos) mediante el consumo de energía, buenas ideas y destreza técnica. No obstante, hasta bien entrado el siglo XVIII, el disfrute de estos productos estaba muy limitado a los estratos más pudientes de la sociedad, por ser fruto de trabajo artesano, muy personalizado y de escasa capacidad de producción; es decir, eran muy caros. Fue en ese momento cuando una serie de avances tecnológicos (el más conocido tal vez sea la máquina de vapor) fueron aplicados como métodos de fabricación. De esta manera se consiguió reducir los costes y se habilitó la producción masiva de productos en una cantidad que podían llegar a cubrir las demandas de un mercado mucho mayor. En esta etapa nace la industrialización que ha venido desempeñando un papel crucial en la economía en los últimos doscientos años, constituyendo el principal motor de generación de valor añadido, y un elemento clave de la modernización y del aumento del nivel de vida.

El país pionero en este proceso de industrialización fue Inglaterra, que aplicando las innovaciones en maquinaria se convirtió en la primera potencia económica del momento. A Inglaterra le sucedieron los Estados Unidos de América en esta posición de liderazgo, ya que fue allí donde se desarrollaron avances en campos como la energía eléctrica o la producción en cadena. Los desarrollos tecnológicos crearon nuevos negocios (surgen entonces empresas como GE, Ford y OTIS), además de auténticas revoluciones en la sociedad y en la forma de vivir en general, como el fluido eléctrico, los automóviles o la edificación vertical.

Posteriormente, en los años cincuenta, la capacidad de Japón para recuperar su industria y su particular método de organización de la producción (conocido en Occidente como *Lean Manufacturing*), cuyo paradigma encarna la empresa Toyota, situó a la economía nipona entre las primeras del mundo. Finalmente, en los últimos veinte años se asiste al nacimiento de China como potencia económica, con crecimiento estrechamente ligado a su capacidad manufacturera, que la ha convertido en la «fábrica del mundo».

Todo este proceso de industrialización es el que ha establecido (si no en todo, al menos en gran parte) el *ranking* contemporáneo de mayores potencias económicas. Pero hoy en día la industrialización es condición necesaria, pero no suficiente, para alcanzar crecientes niveles de riqueza y desarrollo de un país. Hace falta un potente sector servicios, que no es sustituto del industrial, sino que se apoya en él y lo complementa. La cuestión es que no toda la industria genera el mismo valor. Hay países con una industria muy productiva, que genera un sector terciario muy potente y que es capaz de crear riqueza muy alta por habitante, mientras que otro tipo de industria no actúa de la misma manera. Este es un tema de máxima trascendencia hoy en día en Europa, donde existe una gran preocupación por la creciente deslocalización de las fábricas. Si este fenómeno no se controla, se podría causar un grave daño al empleo (y en consecuencia al nivel de vida) que en un cuarto del total depende directamente de la industria y en un 75 % de forma indirecta, pues el sector servicios vive en gran medida de sus clientes industriales.

1.2 LA FÁBRICA EN LA ERA DIGITAL

En las tres últimas décadas se está asistiendo a una transición hacia lo digital en distintos ámbitos de la vida, tanto personal como profesional. Existen multitud de ejemplos

que hablan por sí solos de este vertiginoso cambio: las oficinas técnicas han pasado de los planos de papel dibujados a mano a ficheros paramétricos, primero en dos dimensiones (sistemas de dibujo asistido CAD 2D) y luego en tres dimensiones (sistemas de dibujo asistido CAD 3D); en las comunicaciones, del envío de correo postal a la aparición primero del fax y luego del correo electrónico; en el ocio, de la televisión en dos canales en blanco y negro a la infinita oferta de TDT, o el cambio de la baraja de cartas por el videojuego de realidad aumentada; en el mundo de la salud, de la radiografía RX a la resonancia magnética, TAC (Tomografía Axial Computarizada), o Ecografía Doppler 3D.

Las fábricas no son ajenas a este fenómeno. Ya se han mencionado los sistemas de Diseño Asistido por Computador (CAD), que afectan a la concepción del producto en las oficinas técnicas, pero también son bien conocidos los software de Fabricación Asistida por Computador (CAM) o para la asistencia a la ingeniería (CAE), el empleo de autómatas y robots en planta, la inspección por visión artificial, el control del avance de la producción en tiempo real (MES), o incluso la modelización y recreación virtual de procesos y fábricas enteras con software de simulación (CAPE).

Los avances de la cibernética permiten procesar a gran velocidad ingentes cantidades de datos y manejar sistemas mecánicos, superando los límites conocidos de fiabilidad y precisión. No obstante, los procesos de fabricación de piezas, aunque asistidos por controles más avanzados, siguen siendo básicamente los mismos: arranque de viruta, conformado en frío o en caliente, fundición o inyección (anexo 1). Todos ellos se enfrentan a limitaciones, ya no de control, sino físicas, como la imposibilidad de realizar taladros curvos, las colisiones de herramientas con la pieza de geometría compleja, las restricciones de ángulos de desmoldeo, por poner algunos ejemplos. Estas limitaciones bloquean la creatividad y constituyen una barrera, a veces

infranqueable, al desarrollo de nuevos productos de alto valor añadido o con nuevas funcionalidades.

1.3 FABRICACIÓN DE SÓLIDOS POR ADICIÓN DE CAPAS DE MATERIAL

En el último cuarto del siglo XX surgen las tecnologías AM, que se aprovechan de todo este conocimiento desarrollado en la era digital, y que pueden superar las limitaciones antes descritas. En esencia, suponen un giro copernicano respecto a los procesos de construcción de piezas empleados hasta ese momento, ya que se pasa a fabricar por deposición controlada de material, capa a capa, aportando exclusivamente allí donde es necesario, hasta conseguir la geometría final que se persigue, en lugar de arrancar material (mecanizado, troquelado...) (ilustración 1), o conformar con ayuda de utillajes y moldes (fundición, inyección, plegado...).

De esta manera, se pueden clasificar los procesos de fabricación de piezas de la siguiente forma:

- **Tecnologías conformativas:** Utilizan preformas para obtener la geometría requerida (inyección plástico y metales, PIM, sinterizado, colada la vacío, RIM, *electroforming*...).
- **Tecnologías sustractivas:** Obtienen la geometría requerida sustrayendo material de una geometría mayor (mecanizado, electroerosión, corte por agua, corte por láser...).
- **Tecnologías aditivas (AM):** Obtienen la geometría añadiendo material a partir de geometría virtual, sin uso de preformas (conformativas) y sin sustraer material (sustractivas). Estas últimas tecnologías serán el objeto de este documento.



Ilustración 1: Concepto de fabricación sustractiva comparado con AM

Son muy diversas las técnicas de aplicación de AM (como la estereolitografía o el sinterizado selectivo, descritas ampliamente en el anexo 2) que permiten obtener piezas directamente de un archivo CAD 3D, «imprimiéndolas» de forma totalmente controlada sobre una superficie. Por ello también se han empleado otros términos para referirse a ellas como *e-manufacturing* (fabricación electrónica), *Direct Manufacturing* (fabricación directa) o *Additive Layer Manufacturing-ALM* (fabricación aditiva por capas).

Prácticamente en desuso está la taxonomía, que atiende al destino final de la pieza fabricada, y que en origen servía para distinguir tecnologías de bajo nivel (prototipado) o de alto nivel (*manufacturing*):

- *Tecnología de prototipado rápido o Rapid Prototyping (RP)*, si lo que se pretende fabricar es un prototipo, es decir una pieza que sirve para validar o verificar un nuevo diseño, que posteriormente se llevará a producción, probablemente, con tecnología no aditiva (inyección, mecanizado...).
- *Tecnología de fabricación directa o Rapid Manufacturing (RM)*, cuando se consigue la pieza final y el producto es, por lo tanto, plenamente funcional.

En realidad, dependiendo del uso y requerimientos finales de la pieza a fabricar, o de su cantidad, por citar algunos fac-

tores, debe ser el usuario quien decida emplear una tecnología aditiva para el «prototipado rápido» o para la fabricación final del producto. No obstante, es cierto que el término *Rapid Prototyping* (RP) es el más antiguo, y que muchas tecnologías, inicialmente concebidas para hacer prototipos, han evolucionado hacia técnicas de fabricación de productos plenamente funcionales, gracias sobre todo al desarrollo de nuevos materiales de características mejoradas.

Además, el calificativo *Rapid* se ha replicado en otros términos como *Rapid Tooling*, *Rapid Casting* y *Rapid Manufacturing* para nombrar las sucesivas aplicaciones de la fabricación aditiva a medida que iban apareciendo.

Existen, sin embargo, otras tecnologías de fabricación rápida de sólidos, que no están incluidas en el concepto de AM y no son objeto de estudio en este documento, como el mecanizado en alta velocidad (*HSM -High Speed Machining*) o deformación incremental de chapa (*Dieless Forming*), por poner unos ejemplos (ilustración 2).

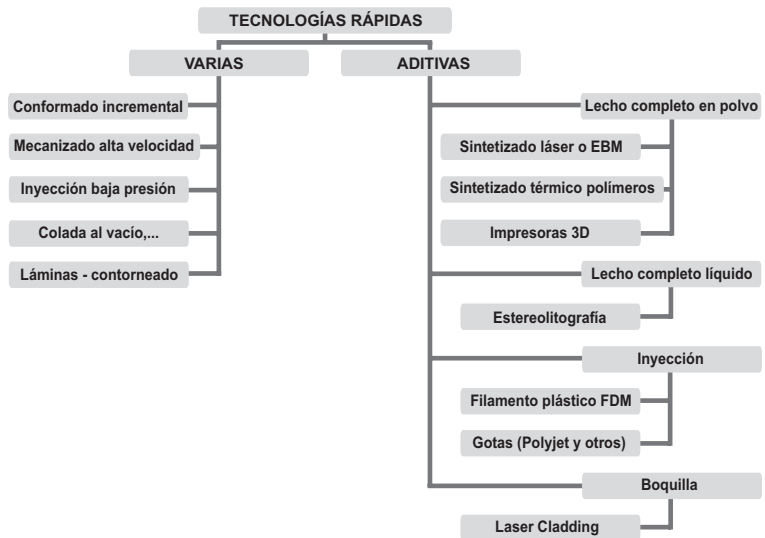


Ilustración 2: Esquema de tecnologías rápidas de fabricación, clasificadas como aditivas y no aditivas

Con sus diferentes denominaciones, tipos y técnicas (anexo 3), las tecnologías AM, hoy en día, aún no se han implantado de una forma extensa en la industria, en parte porque se deben resolver algunas limitaciones del propio proceso, así como de elementos periféricos al mismo, pero también porque es bastante desconocida por los potenciales usuarios, que no son conscientes de las enormes ventajas que puede aportar frente a otros procesos, en muchos nichos de mercado. Muchos de ellos se describen en el siguiente apartado.

2

VENTAJAS Y RETOS DE FUTURO DEL AM

Las principales características que distinguen el proceso de fabricación de sólidos por adición de capas de material (AM) de cualquier otro proceso de fabricación industrial y que, como se verá posteriormente, le confieren enormes ventajas competitivas, se pueden resumir en dos y son las siguientes:

- **La complejidad geométrica** que se debe conseguir no encarece el proceso: Características como la esbeltez, un vaciado interior, canales internos, los espesores variables, las 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 el AM son, en muchas ocasiones, propiedades muy poco relevantes a la hora de fabricar una pieza.



Ilustración 3: Cortesía de Moldkar y Axis.
Diseño KX onfirmat y CloneNature

La personalización no encarece el proceso: AM 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.



Ilustración 4: Fabricación personalizada de implantes dentales.
Cortesía de EOS GmbH

Estas dos características se pueden traducir en ventajas en muchos sectores industriales, que hacen que el AM sea el proceso más competitivo para la fabricación de piezas en muchas aplicaciones. De hecho, permite materializar ejecuciones que son simplemente imposibles mediante cualquier tecnología de fabricación (sustractiva o onfirmativa) en diversas fases de la cadena de valor industrial:

- Desarrollo de nuevos productos (modelos conceptuales, prototipos).
- Obtención de útiles, patrones, moldes... en el proceso de industrialización y pre/series.
- Producción de productos finales.

2.1 VENTAJAS ASOCIADAS A LOS PRODUCTOS QUE HAY QUE FABRICAR

- Productos que requieren de una **gran complejidad de forma**: Paradójicamente, mientras una geometría compleja suele suponer un aumento del coste si se siguen procesos convencionales (sustractivos o conformativos), cuando se aplica AM puede suponer incluso un abaratamiento o simplificación. Por ejemplo, en el caso de la Ilustración 5, es mucho más barato acometer el diseño con la compleja escalera helicoidal interior y el detalle de sillería en la superficie de la torre, que ejecutar una forma simplificada, maciza interiormente y lisa en el exterior.



Ilustración 5: Geometría interna compleja en la escalera helicoidal interna de una torre del tamaño de una moneda

Estas nuevas capacidades de ejecución geométrica habilitan un diseño que pueda jugar con distintas composiciones tridimensionales del material, a la hora de conce-

bir un producto y no sólo por una cuestión estética, sino que a veces permite actuar sobre propiedades químicas, mecánicas o eléctricas y **adaptar un comportamiento** a las necesidades estrictamente necesarias y requeridas en cada caso (resistencia, capilaridad, aerodinámica, conductividad). Estas posibilidades suponen un cambio radical en el proceso de diseño de los productos y permiten gran libertad creativa, así como la réplica exacta de modelos teóricos de ingeniería (análisis con elementos finitos, por ejemplo), sin las aproximaciones (más o menos ajustadas) que imponen los métodos sustractivos o conformativos. Esas limitaciones que se solían expresar con «el papel lo aguanta todo» se superan, gracias al AM, y se pasa a sentenciar de manera muy genérica que «si lo puedes dibujar, se puede fabricar», siempre que las dimensiones de la pieza encajen en la máquina a emplear.

Un ejemplo especialmente singular de geometría compleja es el de los **fractales**, término acuñado por Benoît Mandelbrot para definir formas basadas en modelos matemáticos cuyas principales características son la auto-similitud y la dimensión fractal. Este tipo de estructuras se encuentran habitualmente en la naturaleza, donde los fractales permiten minimizar el uso de materiales y optimizar la funcionalidad, por lo que son la base del crecimiento de muchos sistemas biológicos. El ser humano hasta la actualidad no ha conseguido poder replicar estas complejas formas, por lo que han pasado prácticamente desapercibidas a la hora de buscar aplicaciones prácticas para ellas. El diseño de productos basado en la naturaleza, aprovechando las posibilidades que ahora ofrecen las tecnologías de AM (espesores de pared variables, por ejemplo), supone un campo muy prometedor aún por explorar.



Ilustración 6: Estructuras fractales tipo árbol fabricadas en poliamida. Cortesía Fundación Prodentec

Un caso curioso de réplica precisa de formas complejas que se encuentran en la naturaleza, el proyecto de investigación TERMES (*Termite Emulation of Regulatory Mound Environments by Simulation*) (www.sandkings.co.uk) ha realizado un estudio sobre la construcción de los termiteros, con el objeto de conocer sus mecanismos y estudiar las posibles aplicaciones futuras de estas complejas estructuras fabricadas por las termitas, en el ámbito de la construcción para viviendas. Los termiteros en el África Subsahariana tienen un comportamiento excepcional a la hora de regular y controlar la temperatura interna, como si se tratara de una estructura «inteligente» capaz de mantener unos determinados niveles de confort. Se estudian los sofisticados sistemas de ventilación que estas construcciones emplean y que hasta ahora no había sido posible visualizar, por medio de tecnologías de escaneado, y posteriormente se procesan por ordenador los datos para reconstruir y simular en detalle el termitero, aplicando técnicas de AM.

- **Productos aligerados:** La complejidad geométrica tiene una aplicación especialmente destacable en la reducción del peso de un objeto, por medio de estructuras internas huecas o jugando con la densidad de los materiales, por ejemplo. Técnicas conformativas 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 sofisticar el utillaje de forma que lo hace inviable técnica o económicamente. Otra solución por la que se puede optar, empleando métodos convencionales, es descomponer en varias piezas un objeto, pero eso requiere trabajos adicionales de ensamblaje y añade dificultades (falta de ajuste, por ejemplo) que pueden ser también muy limitantes. Las técnicas de AM 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. De nuevo se abren posibilidades nunca antes soñadas para concebir nuevas ideas y soluciones.



Ilustración 7: Estructura compleja interna en silla Osteon:
Diseño y fotos cortesía de Assa Ashuach Studio,
patrocinado por EOS GmbH y Complex Matters

- **Productos multimaterial:** En algunas tecnologías de AM, como es el caso de Objet, además de jugar con la porosidad de un mismo material, como se ha explicado, el AM puede fabricar aportando simultáneamente varios materiales en un mismo sólido, para así seguir superando limitaciones actuales en la relación peso/resistencia mecánica o aportando funcionalidades nuevas o abaratando costes. Es cierto que también existen técnicas conformativas de sobre/moldeo, 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 interconexión suelen ser conflictivas por el distinto comportamiento (mecánico, térmico, dilatación...) de ambos materiales.



Ilustración 8: Ejemplo de pieza fabricada de una vez con una combinación de materiales con tecnología Objet

- **Productos ergonómicos:** Otra gran ventaja de la absoluta libertad geométrica que confiere el AM a sus productos es la adaptación de las formas a la biomecánica humana, de manera que los diseños alcancen una mejor interacción con el usuario sin necesariamente afectar los

costes de fabricación. Además, por la característica previamente citada de la personalización, esa ergonomía en el diseño puede adaptarse no solo a unas tallas estándar, sino exactamente a las particularidades antropométricas de cada individuo.

- **Mecanismos integrados en una misma pieza:** Al poder integrar distintas geometrías y materiales en un mismo sólido, el AM puede conseguir incluso que simultáneamente se fabrique un eje y su cojinete, un rodamiento, un muelle y su soporte, un tornillo sinfín y su corona; en definitiva, un mecanismo totalmente embebido en la pieza en la que debe trabajar, sin necesidad de armados y ajustes posteriores. Esta particularidad no se da en todas las tecnologías de AM y principalmente se puede conseguir en aquellas que no necesitan soporte para su fabricación.



Ilustración 9: Ejemplo de integración de funciones en una sola pieza. Pinza para brazo robotizado. Fuente Fraunhofer IPA y EOS GmbH

- Acceso a **nuevos nichos de mercado:** El avance de las técnicas de AM, cada vez más sofisticadas y precisas, unido a la imaginación de los diseñadores, ha permitido ir descubriendo (y más aún lo hará en el futuro) ya no solo nuevas soluciones a productos actuales, sino aplicaciones radicalmente nuevas e incluso modelos de

negocio basados en estas tecnologías. Ejemplos destacables son la aparición de nuevos tejidos metálicos, un producto bidimensional, fruto de una técnica de fabricación tridimensional, o la producción controlada y personalizada de texturas, característica hasta ahora muy dependiente del proceso de fabricación (acabado del molde, tamaño de la herramienta...).



Ilustración 10: Nuevas funcionalidades. Producto Neck Lace, diseño OOMS (www.ooms.nl)

2.2 VENTAJAS ASOCIADAS A LOS PROCESOS DE EJECUCIÓN

- Reducción del **time to market** de nuevos diseños: La aplicación de AM a la producción rápida de prototipos ha permitido, ya hace años, 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 dicho mercado.

- **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 conformativos. Así, la implantación de Lean Manufacturing, desarrollada por Toyota a mediados del siglo xx, lo facilita enormemente, permitiendo ganar en productividad global de la planta, gracias a la reducción drástica de inventarios, de operaciones sin valor añadido y de una logística interna simplificada.
- **Reduce errores de montaje** y por lo tanto los costes asociados a ellos: La integración de componentes puede permitir la fabricación de una sola vez del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes, reduciendo además posibles errores durante el ciclo completo de producción (control de inventarios, procesos intermedios de inspección, manipulaciones).
- **Reducción de costes de inversión en utillaje:** La posibilidad de implementar un modelo de negocio donde el producto no esté ligado a utillajes supone no solo gran flexibilidad de adaptarse al mercado, sino que se consigue una reducción o eliminación de costes asociados (fabricación del utillaje, paradas por cambios de referencia, mantenimiento e inspección), y de muchos procesos intermedios. Adicionalmente, cuando no es viable prescindir de utillajes (caso de grandes lotes, por ejemplo), las técnicas de AM 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:** Una opción que no se debe olvidar es combinar procesos AM 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 AM, empleando únicamente la cantidad de material requerido, y aplicar MAV al final, para alcanzar una precisión determinada en el exterior. De esta manera se evita partir de un bloque de material a desbastar, que requiere mucho tiempo, desgaste de herramienta y alto consumo energético, pues el AM aproxima la geometría final (se denomina *near net shape*) y el proceso de mecanizado se reduce a un simple acabado, reduciendo el coste total del proceso. También es posible la hibridación opuesta, es decir, partiendo de un bloque, fabricar por métodos sustractivos, por ejemplo, mecanizando, aquellas geometrías menos complejas, masivas y añadir posteriormente mediante AM aquellas características especialmente complicadas y que generan alto valor, como, por ejemplo, es el caso de canales internos de refrigeración complejos para insertos de moldes de inyección.

2.3 LIMITACIONES Y RETOS DE FUTURO

A pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías AM no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores.

Las limitaciones actuales son debidas, como se describe seguidamente, tanto a los propios procesos de AM, que aún pueden ser mejorados, como a procesos periféricos o auxiliares (manipulaciones previas de material, posproceso, 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.

Dichas limitaciones son, sin duda, superables, y constituyen retos para la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación, que actualmente están siendo abordados por equipos de investigadores y por muchas empresas en todo el mundo.

2.3.1 Limitaciones de proceso del AM

- *Disponibilidad y coste de materiales:* Aunque es posible aplicar técnicas AM 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 de adquisición de material por unidad de medida suele ser también bastante superior. Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales, ya que se produce el conocido círculo vicioso entre baja demanda, que no justifica las inversiones necesarias en los productores de nuevos materiales, y el alto coste unitario que disuade de un aumento del consumo. Disponer de nuevos materiales que satisfagan requisitos concretos de la industria y los consumidores es un aspecto crítico para el futuro desarrollo del AM.
- *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 muy principales que debe resolver el AM 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 pasa por la reducción del espesor de la capa, lo que tiene una influencia directa en el tiempo de fabricación final.

- *Calidad de producto y repetibilidad de proceso:* Algunas tecnologías AM 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. Uno de los principales causantes de 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 en los procesos térmicos. 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 de láser;
 - espesor de capa de deposición de material.

- *Coste de la maquinaria:* De forma análoga a cuanto sucede con el coste de la materia prima por lo limitado del mercado actual, el coste de la maquinaria supone una barrera de entrada. No obstante, los precios varían mucho: desde 10.000 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 AM 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, vayan 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 AM 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 el punto más apto para evitar los soportes, con-

seguir 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 necesario para 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, situaciones que a priori no se pueden predecir. Los programas de software comerciales actuales prevén de manera genérica estas situaciones y pueden orientar a la hora de minimizar este problema, pero siempre de manera genérica para una pieza que durante la fabricación, debido a su geometría cambiante en el eje Z, tendrá distintos comportamientos. Para un control más ajustado del proceso se requieren investigaciones más profundas, con el objetivo de poder determinar bien las relaciones entre todos los parámetros, para así poder prever las consecuencias que la temperatura de la pieza, los soportes, la plataforma, las tensiones y sus dilataciones durante la fabricación tienen en las deformaciones y dimensiones finales de la pieza. Este conocimiento podrá llevar incluso a introducir modificaciones en el diseño, de forma que se corrijan las desviaciones durante el proceso de fabricación y la pieza final corresponda a lo deseado.

2.3.2 Limitaciones de procesos auxiliares o periféricos

- *Sistemas de dibujo asistido (CAD)*: La creación del modelo 3D es el paso previo al AM y, aunque hoy existe soft-

ware muy diverso para diseñar sólidos y superficies complejas, éstos han sido desarrollados para una ingeniería de fabricación basada en procesos sustractivos y/o conformativos y no en procesos AM. Por ello en muchas ocasiones este software empieza a ser el auténtico cuello de botella para la creación de productos realmente innovadores y radicalmente distintos a las soluciones actuales. Por poner algunos ejemplos, las posibilidades de diseñar piezas multimaterial o con materiales con gradientes de densidad o porosidad gradual, que no supone un gran problema para una máquina de AM, no están resueltos en programas de asistencia al dibujo actuales.

- *Manipulación de materia prima en polvo:* Otra operación auxiliar en un proceso AM es el trasiego de material base en la máquina, que muchas veces se maneja en forma de polvo, y que es necesario cargar y descargar en la máquina, recuperando los sobrantes, que se vuelven a tratar para su reutilización (tamizado, compactado...), así como la limpieza para evitar la contaminación cuando se cambia de material; toda estas operaciones son actualmente manuales, por lo tanto muy laboriosas y, en ocasiones, penosas e incluso peligrosas. No hay soluciones para automatizar estas operaciones, lo que supone altas tasas de improductividad y operaciones sin valor añadido.
- *Manutención y manipulación de accesorios:* Aparte del manejo de grandes cargas de polvo, es necesario manipular otro tipo de accesorios como placas pesadas, depósitos voluminosos, o incluso la extracción de las piezas fabricadas y que, en algunos casos, salen a alta temperatura; estas operaciones, por lo general, tampoco han sido optimizadas.
- *Separación de piezas metálicas de placas de construcción:* En los procesos AM con material metálico, las pie-

zas se construyen soldadas a una placa base metálica para asegurar su correcta ejecución; una vez terminada la pieza, hay que separarla de dicha placa, proceso que se está haciendo por medio de sierras convencionales de disco o cinta, de forma muy laboriosa y poco eficiente. La geometría de las estructuras de soporte pieza/placa no son macizas y contienen material en polvo sobrante en su interior, lo que hace muy difícil recurrir a procesos de electroerosión (EDM) o mecanizado tradicional, tanto para su separación como para la eliminación de los soportes aún adheridos a la pieza (acabado). Por ello, uno de los aspectos críticos a la hora de analizar la viabilidad del AM para construir una pieza determinada, es precisamente acertar con la estrategia que permita eliminar los soportes de la forma más sencilla y económica (altura de los soportes, espesor, espacios para poder sujetar la pieza posteriormente...), y no generar deformaciones o roturas en la pieza que se acaba de fabricar. Otro problema añadido se produce cuando se fabrican muchas piezas pequeñas en una misma placa, para abaratar el coste/pieza, dado que en el momento de la eliminación de soportes se puede perder la trazabilidad y confundir unas con otras, si no presentan grandes diferencias entre sí (caso de implantes dentales, por ejemplo).



Ilustración 11: Ejemplo de pieza metálica unida a la placa de fabricación por medio de soportes. Cortesía Fundación Pro dintec

- *Procesos de acabado de las piezas:* En caso de que haya que someter las piezas a un acabado, bien por tratamiento térmico bien por procesos mecánicos, las piezas AM presentan dificultades. En los tratamientos térmicos, los problemas son de falta de experiencia y conocimiento real sobre las propiedades metalúrgicas, frente a los comportamientos bien conocidos de piezas mecanizadas, estampadas, inyectadas, fundidas, soldadas, etc. En cuanto a los procesos mecánicos de acabado, como puede ser un mecanizado bien para asegurar una tolerancia o para eliminar restos de soportes de construcción, la presencia de material en polvo sobrante o las estructuras huecas de los soportes suponen un comportamiento muy abrasivo del material que perjudica la vida de la herramienta y provoca un corte discontinuo, aparte de que suele ser difícil plantear un buen amarre de la pieza y acertar en los puntos de referencia («hacer el cero») por lo complicado de las geometrías.
- *Integración con procesos previos y posteriores:* Ya se ha mencionado anteriormente la posibilidad de realizar procesos de fabricación híbridos, en que el AM se combine con tecnologías como el mecanizado, pero la asignatura pendiente en este campo es el escaso desarrollo de sistemas que permitan comunicar los puntos de referencia entre máquinas y tecnologías tan diferentes, para evitar los errores en la transición entre un proceso AM y otro sustractivo.

2.3.3 Limitaciones ligadas a nuevos modelos de negocio

- *Reciclado al final de vida de productos:* La ventaja que supone la posibilidad de fabricar componentes multimateriales o, por ejemplo, que integren sistemas

electrónicos embebidos, supone también un problema añadido a la hora de la segregación necesaria en el proceso de reciclado de productos una vez hayan finalizado su vida. Actualmente, por el pequeño volumen de productos AM, aún no se ha identificado este como un gran problema, pero sin duda debe ser un tema a considerar en paralelo con el desarrollo de estas tecnologías.

- *Desconocimiento por parte de los diseñadores industriales:* Los diseñadores actuales han sido instruidos para concebir piezas que se puedan fabricar por métodos sustractivos o conformativos, y esto se convierte en una limitación muy considerable para sacarle todo el partido posible a las tecnologías AM. Por ello, para hacer competitivo un proceso AM, se hace necesario que diseñador y constructor realicen un trabajo de ingeniería concurrente que cuestione el diseño básico tradicional, entre en su fundamento, y se libere de tópicos y paradigmas condicionados por los procesos sustractivos y conformativos. Este trabajo, nada trivial, realizado conjuntamente entre el diseñador que domina el producto y el especialista en AM, consigue resultados realmente espectaculares, que en muchas ocasiones cambian por completo la idea inicial del producto. En este sentido hay que recordar que las tecnologías de AM se están incorporando ya a la formación técnica, tanto en asignaturas dentro de los programas formativos de distintas universidades, escuelas de diseño, así como en másteres, cursos de extensión universitaria, y que el alto interés por parte de los alumnos se traduce en un buen número de proyectos fin de carrera y tesis doctorales relacionados con la temática.
- *Propiedades anisótropas:* El AM introduce nuevos factores a tener en cuenta respecto a las características mecánicas de los productos fabricados, depen-

diendo de la dirección de construcción de las capas. Los programas de simulación y análisis actual llevan acabo su actividad bajo la hipótesis de materiales homogéneos, no siendo este el caso para productos fabricados por capas, al presentar distintos comportamientos según el eje de construcción x,y,z (anisotropía) y posibilitar la fabricación de piezas con distintos gradientes de material.

- *Propiedad intelectual*: Finalmente, la posibilidad futura que se abre de poder llegar a fabricar los productos de manera individual por parte del público en general, por ejemplo mediante descargas por Internet de diseños, hace que se deban considerar asuntos relacionados con la propiedad intelectual de dichos diseños.

2.4 EL VALOR FRENTE AL COSTE DE LA TECNOLOGÍA

Para determinar de forma correcta el coste real de una pieza fabricada con tecnologías AM se debe atender a los cinco conceptos que seguidamente se relacionan:

- *Coste de material*: Es bastante más caro que el material de iguales características empleado en procesos convencionales, a falta de que se consigan economías de escala que los abaraten. No obstante, la tecnología AM evita (o minimiza cuando requiere soportes) el desperdicio de material, por lo que en ocasiones el balance puede ser favorable.
- *Coste de personal*: El personal dedicado debe tener gran especialización para atinar con la correcta estrategia de fabricación, con la ubicación en la plataforma y la programación de parámetros adecuados,

así como en las operaciones de posproceso requeridas en el acabado. Durante la fase de construcción en la máquina no es necesaria ninguna operación, por lo que, en comparación con los procesos convencionales, se necesita menos mano de obra, pudiendo aprovechar turnos de noche y jornadas no laborables, de forma que las máquinas trabajen en modo desatendido.

- *Coste de amortización de la maquinaria:* Se trata en general de maquinaria costosa, que en muchas ocasiones opera con láser o cabezales que requieren mantenimiento y que está sujeta a desgaste, por lo que demanda recambios cada cierto número de horas de funcionamiento. El grado de utilización de las máquinas debería ser superior al 85 %.
- *Coste de tecnología periférica:* Una máquina de AM no es suficiente para implantar esta tecnología de fabricación, sino que hace falta poder manejar (o generar) ficheros digitales con los modelos que hay que reproducir, asegurando su coherencia y maquinaria de posprocesado.
- *Costes indirectos:* Entre ellos los gastos de formación del personal, consumo de energía, costes de no calidad o gastos generales asociados; la variable clave en el proceso es el tiempo de fabricación, por lo que la imputación de estos costes indirectos debe ser proporcional al número de horas de trabajo.

No obstante, para poder comparar correctamente la competitividad de un proceso de AM frente a otro tradicional, para decidir la fabricación óptima de una pieza, es necesario cambiar los métodos de análisis más habituales, simplistas, enfocados exclusivamente al coste, y comparar ese dato con el del valor añadido que le confiere al producto.

Esta recomendación está alineada con documentos de amplio consenso como la Agenda Estratégica de Investigación (SRA: *Strategic Research Agenda*) de la Plataforma Tecnológica Europea de la Fabricación, *Manufuture*, donde se hace especial mención a la necesidad de orientar la industria hacia la generación de valor en los productos y procesos, en contraste con la tendencia tradicional del abaratamiento de los costes, para asegurar su sostenibilidad.

Si hoy en día las tecnologías de AM no se han expandido ampliamente por diversos sectores industriales, es porque no se ha aprendido a medir tanto su viabilidad técnica (ajuste de calidad de las piezas, homologaciones...) como la económica en una aplicación concreta. Algunos sectores sí que han sabido explotar las ventajas que esta tecnología aporta, como el dental o la cirugía personalizada, pero se trata de sectores donde el coste no suele ser un factor limitante, al ser negocios de muy alto valor añadido. Es necesario abundar en adecuados análisis de coste/beneficio en muchos otros sectores industriales y económicos, en general, para avanzar en la implantación de los procesos aditivos.

Se han hecho varias comparativas de coste frente a procesos de inyección de plásticos. En el caso de la inyección, se hace necesario fabricar un molde, que tiene una influencia muy importante en el coste de las piezas para volúmenes bajos. Al aumentar la cantidad de piezas fabricadas, el coste/pieza se reduce de manera exponencial, y llega un momento material en que el coste del molde apenas influye en el coste de material y de operación. Por el contrario, empleando técnicas aditivas, el coste/pieza es prácticamente independiente del número de ellas, por no tener que amortizar ningún utillaje. En los gráficos de las ilustraciones siguientes se puede ver el punto de equilibrio que representa la cantidad a partir de la cual es más rentable inyectar la pieza frente a fabricarla directamente por tecnologías AM.

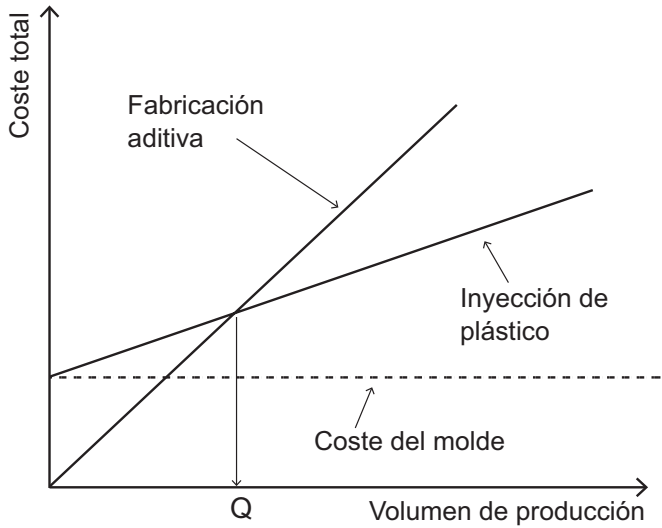


Ilustración 12: Comparativa coste/cantidad

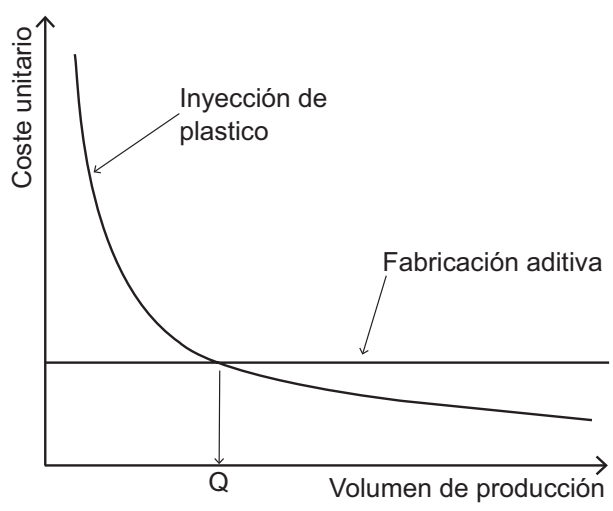


Ilustración 13: Comparativa coste unitario

Como se ha señalado anteriormente, el coste/pieza es un factor fundamental a la hora de decidirse por un proceso de fabricación determinado; y, como se acaba de explicar, el tamaño de la serie es un parámetro decisivo, pero la decisión puede ser errónea si se fija exclusivamente en la cuantía de los costes. En este momento es cuando se debe entrar a valorar otros aspectos como la libertad que puede suponer no depender de un costoso y rígido molde, los posibles cambios de diseño durante la vida del producto, la posibilidad de ajustar los lotes al número exacto que demanda el mercado (en lugar de tirar grandes lotes para justificar los costes de tiempo de cambio en la inyectora).

Cuando se trata de un producto novedoso, puede existir gran incertidumbre sobre cuál será su aceptación en el mercado y la cantidad que finalmente se va a vender. Si se opta por la inyección, una vez construido el molde, no llegar a las ventas previstas supone un riesgo que puede redundar en un desastre financiero, mientras que si se opta por el AM, se puede plantear el negocio ajustado a los costes variables y bajar dramáticamente el nivel de riesgo. Estas consideraciones permiten desplazar el punto de equilibrio a la derecha y aumentar la competitividad del AM. Adicionalmente es muy importante, al realizar este análisis de viabilidad comparada, no partir con un error de base, como es presupuestar una pieza que se ha diseñado pensando en procesos sustractivos o conformativos de fabricación, sin hacer un rediseño previo adaptado a las particularidades de las tecnologías de AM. Vaciar de material el interior de la pieza, buscar formas geométricas óptimas, por complicadas que sean, o integrar varios componentes en uno son estrategias adecuadas habituales que permiten rediseñar la pieza de forma que, en un análisis holístico, el resultado es favorable al AM.

La adaptación de un diseño para ser fabricado por capas no es trivial, requiere de un trabajo de ingeniería concurrente entre expertos del AM y la empresa o el diseñador que domina el producto, su funcionalidad esperada, y que

se aborde el proceso con amplitud de miras y con gran flexibilidad conceptual para poder llegar a soluciones realmente innovadoras, no convencionales. El proceso suele ser iterativo y por el camino se van descubriendo nuevas posibilidades, inicialmente no planteadas, como la posibilidad de personalizar piezas, realizar gamas de productos, en lugar de un diseño monolítico, reducir peso o mejorar prestaciones.

Al final el coste de fabricación puede ser menor o mayor, pero el valor añadido del producto suele ser bastante mayor que el que se podría alcanzar por otro proceso conformativo, en este caso la inyección.

3

SECTORES DE APLICACIÓN

Se detallan a continuación algunos de los sectores y aplicaciones donde las tecnologías AM son actualmente empleadas y aún disponen de gran potencial de crecimiento, gracias, precisamente, a que se han podido experimentar en condiciones reales y ha sido posible valorar las ventajas que aportan frente a procesos sustractivos o conformativos.

También se señalan otros sectores de futuro, donde aún no se está aplicando o se hace de forma muy puntual, y se ponen ejemplos de nuevos modelos de negocio que están empezando a surgir en muy diversos campos. Cabe aclarar que el AM no tiene por qué ser un sustituto de los procesos sustractivos o conformativos en el 100 % de los casos, sino que es una opción más dentro de una cadena de producción, que permite, con sus ventajas y sus limitaciones, el diseño y la ejecución de soluciones con mayor valor añadido, menores costes o simplemente más rápidas.

3.1 SECTOR MÉDICO

Uno de los principales fabricantes de maquinaria de AM identifica el sector médico como el de mayor aplicación de los productos fabricados con esta tecnología (23 %),

seguido del sector automoción (15 %) y el aeronáutico (15 %).

De hecho, este interés por el AM en el sector médico ha sido un motor para el desarrollo de la tecnología desde sus orígenes en los años ochenta. A pesar de ser un sector extremadamente conservador en la aplicación de cualquier avance tecnológico, las enormes ventajas que aportaba el AM han provocado el trabajo en colaboración entre desarrolladores (fabricantes de maquinaria fundamentalmente) y usuarios (los propios especialistas médicos) en un gran número de proyectos de investigación, muchos de ellos en marcha hoy en día.

Las particularidades que acrecientan el interés en este sector son las siguientes:

- Hay necesidad de piezas únicas, adaptadas a las circunstancias de cada paciente, cada doctor y cada tratamiento, difícilmente repetibles.
- Aunque la solución al problema entrañe altos costes, es un sector de alto valor por tratar con temas de salud, calidad de vida, o incluso riesgo de muerte.
- Los modelos geométricos son de gran complejidad para adaptarse bien al cuerpo humano, lo que hace muchas veces imposible optar por métodos convencionales de fabricación.
- Existe una familiaridad entre los sistemas de captura de datos médicos (TAC, escáner...) y las técnicas de tratamiento de ficheros necesarias para el AM, y es posible integrarlos con relativa facilidad.
- Los médicos (usuarios finales) disponen de un alto grado de autonomía en la toma de decisiones en muchos casos (especialmente en los más graves o difíciles), por lo que no se requiere un largo proceso de homologación de nuevas tecnologías.

Dentro del sector médico se pueden distinguir diversos subsectores de aplicación:

3.1.1 Biomodelos

La complejidad de formas de los distintos órganos del cuerpo humano, su singularidad y las a menudo urgentes necesidades de intervención son circunstancias que facilitan la aplicación del AM por delante de cualquier otro método de producción. Por ello, una de las prácticas que más se está extendiendo es la reproducción de partes (o totalidad) del cuerpo de un determinado paciente, a modo de prototipo, que permita al cirujano planificar a la perfección una compleja intervención quirúrgica. De uso ya habitual por ejemplo en traumatología, este tipo de aplicación reduce el riesgo de errores y replanificaciones durante la propia operación, ya que el especialista ha podido ensayar antes de actuar sobre el paciente, y limita al mínimo el tiempo de exposición en el quirófano.



Ilustración 14: Encaje transtibial, resina 18420 SLA.
Fuente proyecto FABIO: AIMME, ASCAMM, IBV e INASMET

Estos modelos facilitan la comunicación en diversas situaciones:

- Explicar a los pacientes y mejorar el consentimiento informado ante una intervención.
- Ayudar a los cirujanos en el diagnóstico en la planificación, ensayo y la simulación de la cirugía.
- Creación, comprobación y ajuste de implantes y prótesis personalizadas.
- Posicionamiento preciso de los implantes.
- Ilustrar propuestas de nuevos procedimientos.
- Modelos para campos como paleontología, antropología, arqueología, medicina forense...

3.1.2 Implantes artificiales personalizados

- *Implantes de oído*: La fabricación personalizada de las carcasas plásticas para los implantes de oído ya es una realidad industrial y una de las primeras aplicaciones de éxito de personalización en masa. Las ventajas que ofrece un producto que se adapte perfectamente a la geometría individual del canal auditivo de cada paciente, hacen que su alto valor añadido, por comodidad y funcionalidad, sea muy competitivo desde una perspectiva técnica y económica.

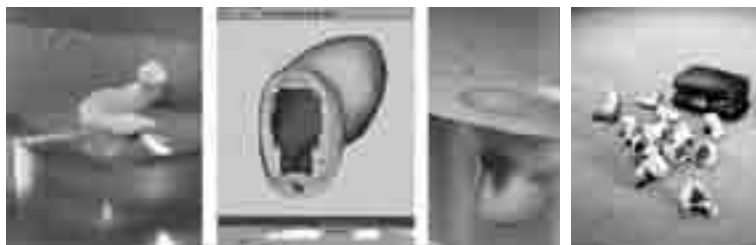


Ilustración 15: Proceso de fabricación de implantes de oído por sinterizado láser selectivo. Cortesía de PHONAK y EOS GmbH

- *Implantes dentales (coronas y puentes)*: El campo de implantes dentales es uno de los más avanzados en el empleo de tecnologías de AM de fabricación, asistida por la toma de datos mediante escaneado de la boca del paciente que hay que tratar, de forma que se consigue un acoplamiento perfecto con su dentadura. La posibilidad de emplear materiales como el cromo-cobalto-molibdeno, o el oro, asegura un futuro aún más prometedor en los próximos años, existiendo ya en la actualidad unidades de producción de este tipo de materiales de forma seriada. De hecho se está consiguiendo no solo mucha más precisión, sino incluso mayor productividad con sistemas como EOS M270 que puede fabricar 380 unidades de coronas y puentes (todas distintas y personalizadas) en cromo cobalto en unas 20 horas, según el caso, duplicando o triplicando la producción por mecanizado o colado a la cera.



Ilustración 16: Implantes dentales. Cortesía EOS GmbH

- *Implantes y prótesis articulares a medida (rodilla, hombro, cadera, traumatismos...)*: Existen soluciones AM para aleaciones de cromo-cobalto y titanio biocompatibles, que permiten fabricar implantes de geometría muy compleja, de manera rápida (de un día para otro) y de forma competitiva en costes con altos niveles de calidad. El acabado final de las piezas y sus propieda-

des mecánicas pueden ser considerados tan buenos como los de las fabricadas por métodos sustractivos.



Ilustración 17: Implante femoral de rodilla fabricado mediante EBM en aleación CoCr ASTM F75. Cortesía de AIMME

Al igual que ocurre con otros procesos de fabricación, es de obligado cumplimiento en este sector pasar un proceso de validación y cualificación de este tipo de sistemas novedosos de fabricación. Ello supone un trabajo laborioso y responsable por parte de la empresa fabricante del implante en cuanto a la ejecución del proceso de homologación del producto y proceso.



Ilustración 18: Implantes a medida. Cortesía Socinser

Las ventajas que ofrece la tecnología AM para la fabricación de piezas únicas personalizadas ofrece posibilidades reales para la fabricación de prótesis individuales, como en el caso que se muestra en la ilustración siguiente.



Ilustración 19: Protésis a medida. Cortesía de Fraunhofer IPA y EOS GmbH

3.1.3 Utilajes y herramientas de ayuda en las intervenciones

En este apartado se incluyen sistemas estéreos tácticos (plantillas y guías quirúrgicas para resección, taladrado, posicionamiento) por poner unos ejemplos.

Se trata de una industria de altísimo valor añadido y para la que se prevé un crecimiento anual en algunos segmentos del 10 %. Los requerimientos en este tipo de productos en lo que se refiere a su geometría son muy complejos: aristas afiladas, paredes esbeltas, agujeros y canales internos, aligeramiento de las piezas, diseño ergonómico. En muchos casos, además, se exige absoluta personalización del instrumental para un cirujano, un paciente, o incluso para la empresa que lo comercializa. Por todo ello supone un campo de aplicación ideal de AM, que consigue no

sólo optimizar cada una de las piezas del instrumental, sino que a veces permite integrar varias piezas en una sola. Así estas fabricaciones en AM suponen tanto una ventaja funcional como un ahorro de costes, respecto a otras técnicas.



Ilustración 20: Juego de instrumental quirúrgico fabricado mediante estereolitografía en resina 18420 y SLM en acero inoxidable AISI 316L. Cortesía de AIMME, LAFITT



Ilustración 21: Modelos quirúrgicos. Cortesía de Socinser

3.1.4 Scaffolds

Se trata de de estructuras porosas que permiten el crecimiento de tejidos artificiales, como, por ejemplo, el óseo o el cartilaginoso, y son cada vez más empleados en ingeniería tisular. AM en este caso permite fabricar estos *scaffolds* («andamijajes») con toda la complicación que se requiera, consiguiendo formas 3D en las que el nuevo tejido se puede aproximar perfectamente a su forma final.

3.2 SECTOR AERONÁUTICO

Al igual que lo descrito anteriormente para el sector médico, se puede afirmar que el AM es una tecnología que tiene un encaje perfecto con los requerimientos del sector aeronáutico.

Los bajos volúmenes de fabricación, la necesidad de un compromiso óptimo entre la resistencia mecánica de las piezas y su peso, la personalización y la necesidad de utilizar geometrías complejas constituyen un escenario ideal para que el AM sea imbatible frente a otros procesos de fabricación. Las principales constructoras de aviones están apostando de forma decidida por incorporar estas tecnologías en sus futuros desarrollos. En la actualidad es muy puntual el empleo de piezas fabricadas por AM y se reduce a aplicaciones principalmente en el sector militar y no en el civil. El gran impedimento, de nuevo, es la imperativa homologación que afecta tanto a los nuevos diseños como al propio proceso, y en lo que se está trabajando actualmente.

Las primeras aplicaciones en «piezas que vuelan» son componentes de plástico para conducciones de aire. El muy escaso espacio disponible en las aeronaves hace que sean necesarias geometrías muy complejas para estas conducciones, que se deben ir adaptando al hueco que les deja el resto de componentes del avión. La posibilidad de

diseñar y fabricar este tipo de geometrías de una sola vez (no en numerosas piezas como se venía haciendo) y en bajos volúmenes, hace que el AM encuentre su primer nicho en este sector. En lo que se refiere a componentes metálicos, se está estudiando y validando su aplicación en álabes de turbinas de motores, donde, una vez más, la libertad en el diseño permite disponer de canales de refrigeración internos que optimicen el funcionamiento.

De gran interés en este sector son las posibilidades que está ofreciendo la tecnología NNS (*Near Net Shape*) donde los procesos aditivos permiten acercarse a la geometría final de la pieza para luego ser finalizada por un proceso convencional, normalmente un mecanizado.

Según vayan avanzando los procesos de homologación, el sector aeronáutico será especialmente rentable para AM, por la reducción que supondrá en elevadas inversiones en utillaje, que actualmente penalizan mucho el coste/pieza, al tener bajo número de unidades por pedido.

CASO DE ESTUDIO: PEINE DE INSTRUMENTACIÓN RAKE. NLUTARL RAMEM ([HTTP://WWW.RAMEM.COM/](http://www.ramem.com/))

Un peine o *rake* de instrumentación para la medición de presión en la corriente de un fluido (o la de un móvil en un fluido) es un soporte (un cuerpo más un pie) con una colección de tubos o tomas de presión total y/o estática, cuya misión puede ser la de medir velocidades, entonces conocidos como tubos de Pitot, o simplemente la medición de la presión y/o temperatura, dispuestos convenientemente para medirlas en distintas cotas o puntos del espacio más o menos próximos. Estos instrumentos son de uso habitual en el sector naval y aeroespacial.

Para la medición de temperaturas basta con introducir los sensores correspondientes en las tomas dispuestas al efecto, y nltarlos a través de los conductos internos dispuestos a tal efecto en el cuerpo y el pie del instrumento.



Ilustración 22: Fabricación tradicional de peines de instrumentación *rakes*. Cortesía de RAMEM

El sistema de fabricación mediante el cual se vienen fabricando estos peines de instrumentación es lento, caro, con limitaciones geométricas y no exento de incertidumbres de precisión, como se explica seguidamente.

En primer lugar se requieren distintas operaciones de mecanizado (torno, fresa, electro-erosión...), montaje, ajuste y unión, y posteriormente un montaje de tubos y/o cables (curvados, guiados y sujeciones, soldaduras...), con alto coste de mano de obra especializada. Como complejidad añadida existen instrumentos ideados para medir a altas temperaturas y por lo tanto las soldaduras han de ser resistentes a la misma, con gran riesgo de fallo y deformación geométrica del instrumento (y por tanto de su precisión), y de concentración de tensiones (riesgos de rotura y de deformación).

La aplicación de tecnologías AM para la fabricación del *rake* supone un cambio radical de proceso con enormes ventajas funcionales y ahorro de costes. En concreto se optó por un proceso de sinterizado selectivo láser partien-

do de polvo de diversos materiales, como pueden ser bronce, distintos tipos de acero inoxidable, superaleaciones de cromo-níquel, titanio, incluso resinas poliméricas (reforzadas o no), si bien estas son menos precisas y resistentes que los metales.

De esta manera, se obtiene directamente y de una vez al menos el cuerpo del peine y los conductos interiores, sin necesidad de tener que disponer de tubos y/o cables adicionales (enrutado), como se realizaba anteriormente. En una ejecución alternativa, es posible realizar la totalidad del peine de manera integral en pieza única, es decir, cuerpo del peine, pie o base, y los tubos o tomas de presión y/o temperatura.

Todo ello hace posible fabricar instrumentos con más densidad de tubos o tomas de señal, que hasta el momento no era posible y, en consecuencia, más resolución espacial de la medida de la presión y/o temperatura.

Además, los instrumentos pueden ser aligerados en su interior o incluir rigidizadores, al criterio del diseñador o calculista. Se evita la necesidad de mecanizar piezas (tubos o tomas) por separado (normalmente esbeltas), posicionarlas en el espacio (con complejos utillajes), montarlas y unir las (por soldadura, adhesivo o montaje mecánico), o bien mecanizarlas partiendo de un bloque; se evita realizar el enrutado, es decir, montar los tubos interiores (metálicos o de polímero), curvarlos, guiarlos y sujetarlos. Se evitan juntas e imprecisiones y ofrece mayor resistencia, rigidez y mucha más seguridad al ser una pieza integral.

El cuerpo del *rake* es integral y no necesita que sea seccionado y posteriormente montado, se reduce el riesgo de que la instrumentación se separe y cause daños a otros componentes en la máquina en la que es instalado.

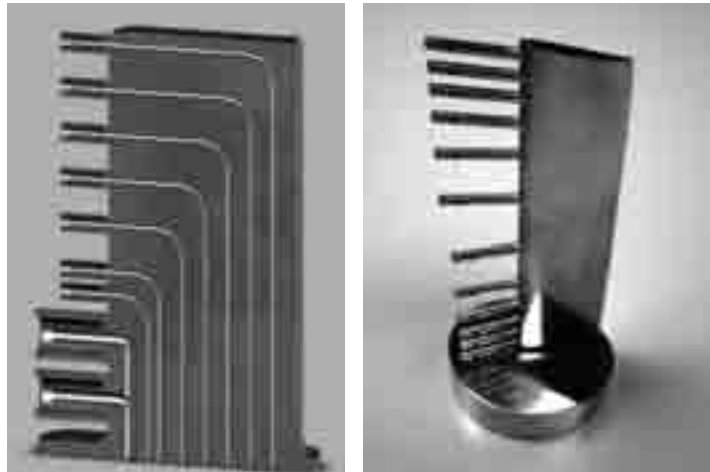


Ilustración 23: modelo de los tubos interiores y *rake* integral en acero inoxidable fabricado por sinterizado láser en Prodintec. Cortesía de RAMEM

A la hora de diseñar y fabricar el *rake*, su geometría no tiene por qué ser uniforme, puede presentar diferentes propiedades en los distintos puntos o cotas de su geometría. Propiedades que pueden variar a lo largo de los diferentes puntos, bien de manera uniforme o discreta. Las propiedades que pueden ser objeto de modificación a lo largo de su cota pueden ser peso/densidad, la capacidad de evacuación térmica o de calentamiento, la rigidez estructural y los modos de vibración. La modificación de propiedades como las anteriores se logra mediante la generación durante el proceso de fabricación de huecos estructurales, que pueden variar de tamaño desde los microhuecos hasta cuadernas rigidizadoras, pasando por celdillas o estructuras tipo *honeycomb* (celda de abeja), que efectivamente producen una modificación en el peso/densidad, propiedades térmicas, rigidez estructural y modos de vibración. Los instrumentos obtenidos mediante el sinterizado láser son más precisos y potentes, más pequeños si se desea, producidos de forma mucho más económica y más rápida, y todo ello con mayor calidad.

En 2010 RAMEM obtuvo una patente nacional (número de publicación: 1072442) para la fabricación de *rakes* sintetizados por láser, y en la actualidad mantiene la investigación y caracterización de este tipo de instrumentos con el apoyo del Ministerio de Industria y la colaboración del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

3.3 SECTOR AUTOMOCIÓN

La aplicación de AM está teniendo una notable repercusión en uno de los sectores industriales más innovadores tanto en productos como en los procesos de fabricación. Los grandes constructores actúan como tractores, y actualmente están aplicando AM en la fabricación de prototipos y para la validación de las primeras series los nuevos modelos.

Los diseñadores del sector, que han ido introduciendo continuamente nuevas formas y modelos cada vez más exigentes para la fabricación, se encuentran no obstante bastante limitados por las restricciones que impone la utilización de moldes y matrices para la fabricación masiva de los productos. El AM supondría un cambio radical en este sentido, pero el actual modelo de negocio basado en grandes series impide que, debido a las capacidades limitadas de la tecnología para dar respuesta al sector, aún no se haya empezado a utilizar de forma amplia en la fabricación de componentes.

Donde sí está empezando a encontrar su hueco el AM es en la fabricación parcial o total de moldes de inyección, donde aprovechan la libertad de diseño y fabricación de canales conformales. Es por tanto una aplicación de *Rapid Tooling*, que se verá posteriormente.

Otra aplicación natural dentro de este sector se da en el mundo de la competición y en concreto en Fórmula 1. Más parecido al sector aeronáutico, que al propio de automoción, los mismos requisitos de resistencia mecánica con reducción de peso, personalización de cada escudería y exi-

gencias aerodinámicas actuales abonan el campo para la aplicación de AM. En este caso se demandan muy pocas unidades y, además, es necesario disponer de nuevos diseños mejorados en muy poco tiempo. Dentro de una misma temporada, y de semana en semana a veces, se introducen modificaciones de diseño de algunos de sus componentes. Esto sería inviable con métodos convencionales, pero perfectamente posible con AM. De hecho, en algunas ocasiones las geometrías tan complejas que se diseñan no son factibles por ningún otro método de fabricación.

La aplicación futura de forma más extendida en este sector dependerá de mejoras en las máquinas de AM, que alcancen no solo mayores niveles de productividad, sino aumentar notablemente su capacidad de fabricar de manera estable dentro de unas tolerancias estrictas (índice de capacidad de proceso o C_{pks} mayor de 1,33, 1,67 o incluso 2), así como la calidad de acabados. También será necesario ampliar la gama de materiales disponibles.

También sería posible que se produjera un cambio de mentalidad en el usuario, y por lo tanto en el modelo de negocio, hacia la personalización del automóvil, de tal manera que fabricantes y proveedores se vean obligados a acelerar la incorporación de AM. Sería sin duda a costa de un aumento en el precio de los vehículos, pero hoy en día ya hay fenómenos de este tipo como puede ser el *tunning*, que supone un mercado importante y creciente.

3.4 SECTOR DEL MOLDE Y MATRICERÍA

El *Rapid Tooling* es una aplicación muy interesante del AM, ya que la pieza final obtenida corresponde a un proceso convencional ya establecido (inyección, por ejemplo), y es el molde el que se ha construido utilizando las ventajas que ofrece el AM.

En este campo cabe destacar las oportunidades que ofrece la fabricación directa de poder fabricar moldes o partes

de un molde con canales de refrigeración (canales conformales) con geometrías libres, capaces de adaptarse a la geometría, optimizando de esta manera la refrigeración de la pieza ahí donde se necesite y, consecuentemente, el ciclo de inyección y los requerimientos dimensionales del producto final.

En moldes muy complejos, donde existan atrapamiento de gases en el interior de la pieza obtenida, mediante el uso de canales de forma se puede controlar el enfriamiento del material y, por tanto, la ubicación final de dicho atrapamiento, convirtiendo un pieza mala en buena (inyección de metales no férreos, técnica testada en inyección de aleación de aluminio).

En ocasiones no se utiliza la tecnología para fabricar completamente el molde, sino que se optimiza su utilización aplicándola a algunas zonas (insertos), puesto que de otra manera su fabricación sería muy complicada o el plazo no sería competitivo.

En la siguiente imagen podemos apreciar sobre un corte virtual la capacidad de la tecnología para conformar estos canales de geometría compleja.



Ilustración 24: Imagen CAD 3D de corredera de acero para inyección de aluminio con canal de refrigeración adaptado fabricado mediante SLM, pieza de aluminio inyectada tras salir del molde y pieza acabada. Cortesía de AIMME, ORMET

Las ventajas de la utilización del AM en la fabricación de insertos y moldes hay que buscarla principalmente en los aspectos indicados anteriormente, donde se aporta un valor adicional a los procesos de mecanizado, y no tanto en las posibles ventajas en tiempo y coste. Para estas últimas será necesarios estudiar cada caso y valorar la mejora en tiempo que puede suponer la fabricación por tecnología aditiva frente a las convencionales sustractivas (mecanizado, electroerosión...).



Ilustración 25: Insertos de molde fabricados por sinterizado láser en metal. Cortesía de IMVOLCA, S.L. (PAKTO)

En termoconformado, como habitualmente no se requiere de una calidad superficial y dimensional tan elevada como en la inyección, es posible que el útil fabricado por AM sirva para el proceso de fabricación final sin necesidad de semiacabado o acabado y, por tanto, en este caso pueda existir una reducción del tiempo de fabricación del molde.

La aplicación principal del AM en este sector actualmente se da en la construcción de moldes, pero su utilización es posible en cualquier proceso de fabricación de utillaje, por ejemplo, de matricería.

3.5 SECTORES INTENSIVOS EN DISEÑO: JOYERÍA, ARTE, TEXTIL Y MOBILIARIO

Las tecnologías de AM están teniendo una acogida singular por parte de los diseñadores de productos de gran consumo, que aprecian la rapidez en el rediseño y la libertad que les confiere, de forma diferencial con cualquier otra tecnología. A día de hoy supone un pequeño nicho de mercado. Se aprovechan principalmente las ventajas que ofrece el AM en cuanto a la libertad en el diseño (para más detalle ver anexo 4) y de la baja infraestructura que requiere para pasar de ser diseñador a ser al mismo tiempo fabricante y comercializador del diseño.

El sector de la joyería es buen ejemplo que se inició en la aplicación de AM como medio para un prototipado rápido de los diseños; de hecho, existen máquinas desarrolladas especialmente para el sector, que permiten obtener piezas máster (en cera, por ejemplo) que luego son fundidas para obtener la pieza final en el material deseado.



Ilustración 26: Cortesía de Moldkar y Axis.
Diseño KX designers y CloneNature

El prototipado rápido ha supuesto una revolución en un trabajo muy tradicional, manual y artesano como es el de la joyería, pasando a utilizar directamente software CAD 3D para concebir los nuevos diseños, como paso previo al empleo de las máquinas de prototipado rápido que generan los modelos. La libertad del diseño, unida a la personalización y la rapidez, superan claramente a los procesos tradicionales, y han hecho posible que se haya extendido exitosamente entre las empresas del sector por todo el mundo, a pesar del esfuerzo innovador que les ha exigido.

Pero lejos de quedarse a nivel de prototipos, también se ha dado el paso hacia la fabricación directa de las joyas. Se está utilizando en menor medida, de momento, por la limitación en la gama de materiales, pero hoy es técnicamente posible utilizar oro y plata, aunque el mayor coste de la materia prima y su gestión, más compleja, son actualmente limitantes.



Ilustración 27: Anillos con geometrías complejas y personalización en el sector de la joyería.

Cortesía Fundación Prodimtec

De especial interés resulta la iniciativa de una empresa holandesa, Freedom Of Creation (www.freedomofcreation.com), especializada en diseños de productos de muy diversa función, pero todos ellos específicamente pensados

para ser fabricados por AM. Tanto a través de su página web, como de las *newsletters* que publica regularmente, se puede acceder a diversos diseños novedosos de artículos de consumo como lámparas, útiles del hogar e incluso vestidos. Su diferencial es el aprovechamiento al máximo de la libertad de geometrías que ofrece la tecnología, para sorprender al consumidor. Son productos que no compiten por precio, sino por su diseño y originalidad, con un alto valor añadido.

Se llega a fabricar productos realmente sorprendentes como textiles, trajes, lámparas o bolsos. Actualmente se trata de ejecuciones no demasiado afinadas, limitadas por los materiales disponibles y los acabados de las piezas, pero son aproximaciones pioneras que van a seguir desarrollándose de forma simultánea con los nuevos avances en procesos de AM, en el desarrollo de nuevos materiales y del software de diseño, y que aportan soluciones realmente rupturistas respecto a lo existente.



Ilustración 28: Lámpara fabricada por Moldkar y Axis.
Diseño KX Designers y CloneNature

La posibilidad futura de fabricar productos de consumo directamente desde impresoras CAD 3D en varios materiales, abre un mundo de posibilidades en muchos sectores.



Ilustración 29: Trofeos Delta'09. Cortesía de ADI-FAD y EOS Desi. Diseño KX Designers

3.6 INDUSTRIA MANUFACTURERA EN GENERAL

En los apartados anteriores se han indicado los principales sectores que ya han descubierto las ventajas de aplicación de las tecnologías de AM en sus mercados actuales. No obstante, existen otros sectores manufactureros, donde su aplicación no resulta tan evidente, pero suponen importantes nichos de mercado latente.

El desconocimiento de las posibilidades que la tecnología ofrece en determinados campos es uno de los principales limitadores a la hora de su aplicación, así como barreras antes mencionadas en el coste/pieza, los altos volúmenes de producción, la reducida gama de materiales y el tama-

ño máximo de pieza. Se requiere trabajo conjunto entre expertos en tecnología de AM y expertos sectoriales para entrar en las fases iniciales del diseño, y de esta forma facilitar la producción por estas tecnologías con viabilidad técnica y económica.

Lo cierto es que la batalla de la personalización en muchos sectores manufactureros ya está ganada, y se da un valor diferencial a esta capacidad de diseñar y fabricar productos adaptados a cada cliente o aplicación concreta, lo que supone un importante aliciente para llegar a una implantación definitiva del AM en sectores como el calzado, la ropa deportiva, los teléfonos móviles, accesorios de ordenadores (ratones, *joysticks*...) o las gafas.

Se distinguen diferentes niveles de personalización. Por un lado, hay ejemplos de productos realmente únicos, por ejemplo, unas lentes que se diseñan y fabrican para una persona en concreto. En el otro extremo, se trataría solo de modificar algún parámetro de un producto estándar, como su color o tamaño, o los acabados interiores de un coche, o la posibilidad de incorporar o excluir módulos dentro de un paquete de variadas soluciones estándar.

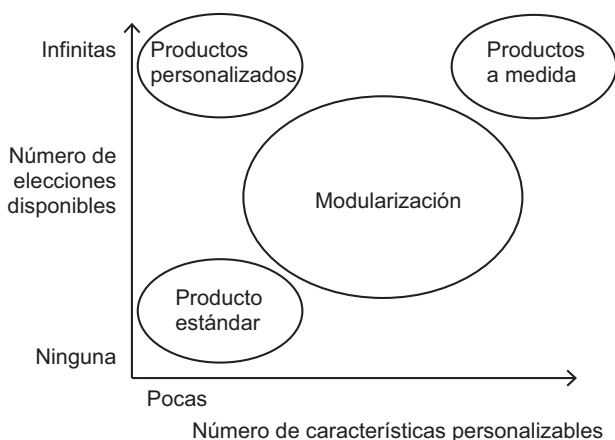


Ilustración 30: Diversos grados de personalización de un producto

El concepto de producto industrial, desde finales de siglo XVIII, se alejó de estos términos de exclusividad, más propios de una fabricación artesana. En la actualidad, en países altamente desarrollados, se están buscando soluciones para combinar la alta productividad que aporta un proceso industrial y el alto valor añadido que confiere el trabajo personalizado. Se persigue materializar un concepto de personalización en masa o *Mass Customization*. Las tecnologías AM son un paso decisivo en esta dirección.

Pero en el sector manufacturero, las tecnologías de AM pueden tener gran aplicación fuera del propio producto que comercializa, facilitando los procesos convencionales de fabricación. Ejemplos de ello se encuentran en el empleo de utillaje específico para aplicaciones de manipulación (garras para manipuladores, robots...), útiles de asistencia para facilitar ensamblajes (sistemas *Poka-Yoke*) o la mejora de la ergonomía de herramientas o puestos de trabajo.

La menor dependencia de utillaje en la planta, o su optimización, permite imaginar también la producción de piezas en lotes mínimos, e incluso unitarios, minimizando los tiempos de cambio de referencia (*SMED-Single Minute Exchange of Die*), pilares básicos de la fabricación ajustada y de alta productividad (*Lean Manufacturing*).

Otro aspecto que se debe valorar en una fábrica es cuánto cuesta la logística de recambios, tanto de componentes de producto como de los propios utillajes de fabricación con múltiples combinaciones posibles, que demandan una gestión ordenada y un espacio de almacenamiento, con grave riesgo de obsolescencia. Esto supone costes de inmovilizado considerables, que las tecnologías de AM resolverían en gran medida, ya que tanto los modelos de repuestos como de utillajes se pueden almacenar en forma de ficheros CAD que se materializan justo en el momento que se demandan.



Ilustración 31: Piezas fabricadas a la vez que su embalaje

3.7 NUEVOS SECTORES ECONÓMICOS

3.7.1 Avatares personalizados

El mercado de los videojuegos crece a nivel mundial con un ratio de dos dígitos porcentuales por año. El volumen de ingresos en entretenimiento interactivo (sin contar juegos desde móviles) era de unos 25.000 millones de euros en 2007, y se supone que alcanzó unos 36.000 millones de euros en 2009. Por otro lado se incrementa el tiempo que el usuario pasa con cada juego, de modo que se vincula emocionalmente con su personaje, al que hace evolucionar, ganar armas o habilidades y experiencia que se reflejan en su aspecto, equipamiento e imagen. Asimismo, se incrementa simultáneamente la práctica de juegos *on-line* en Internet, lo que familiariza a los usuarios con ese medio y con el comercio electrónico.

La personalización de los personajes que aparecen en los videojuegos es una tendencia cada vez más popular, de

modo que el personaje virtual (avatar) se puede configurar con características propias del jugador, como el rostro, el color de pelo, complexión física (real o deseada), vestimenta, etc. El personaje se convierte en un álter ego del jugador, un auténtico símbolo de personalidad, una versión de sí mismo en un entorno digital.

Es evidente que este entorno crea una nueva oportunidad de mercado: materializar ese avatar en una figura, por la que el jugador está dispuesto a pagar un buen dinero. Se trata simplemente de un complejo modelo 3D que, gracias a tecnologías de AM, no resulta difícil reproducir. Se puede establecer una analogía con lo que antiguamente ocurría con productos como los cromos, tarjetas, posters, pegatinas, portadas de carpetas de anillas, y toda suerte de productos de *merchandising*, pero en la mayoría de los casos carecían del factor de personalización, que ahora se puede satisfacer.

En diciembre de 2007 Ed Fries, un ex ejecutivo de Microsoft Corp., fundó Figure Prints LLC, para aprovechar en alianza con Blizzard Entertainment (propietarios del famoso juego *World of Warcraft*) las posibilidades de la tecnología de impresión 3D en color de Z Corporation. Conforme los jugadores avanzan en el juego su personaje adquiere propiedades, armas y otros ítems. Cuando el jugador entra en www.figureprints.com selecciona su personaje y los elementos de que dispone, diversas posturas pre-programadas y da la orden para «imprimir» su avatar, que, unas semanas después, recibe en su domicilio dentro de una urna transparente de protección, por un coste de 100€.

Esta iniciativa ya cuenta con otras similares que han seguido su ejemplo para otros juegos, como *Second Life* o *Spo-re* (<http://www.shapeways.com/>, <http://www.sporesculptor.com/>), pero no parece que hayan tenido el mismo éxito que *Figure Prints*, de momento. En el futuro es probable que este modelo de negocio pueda permitir fabricar juguetes a medida, diseñados por los propios usuarios.

Con una combinación de tecnologías similar, pero con una

aplicación mucho más lúdica que científica, la empresa 3dU (<http://www.3d-u.com>) tiene abierto, en la calle Fuenarral de Madrid, un establecimiento donde escanean a los clientes para fabricarles una escultura o una maqueta de su persona de forma casi instantánea y por un precio asequible.

3.7.2 Fábrica 2.0

El empleo de tecnologías de AM hace replantearse el propio concepto de fábrica que conocemos actualmente.

El escenario 2.0 contempla la posibilidad de que sean los usuarios finales quienes diseñen o configuren el producto a partir de un soporte web, y envíen el modelo digital a una «fábrica» que puede estar deslocalizada, o incluso a una impresora 3D local en su propio domicilio. Este concepto es similar a la evolución que han tenido las impresoras de documentos, que hoy en día se encuentran en hogares particulares, pues la economía de escala ha hecho que sean muy asequibles.

La posibilidad de fabricar productos personalizados es algo cada vez más demandado en la actualidad, y basta pensar en fenómenos como el tuning de vehículos, que se podría facilitar de forma espectacular con estas tecnologías. Se podría incluso imaginar la posibilidad de una fábrica de automoción que únicamente produjera plataformas genéricas de vehículos, para facilitar la personalización absoluta en un entorno local, y en el que usuario final y el concesionario trabajasen mano a mano.

En este sentido la empresa Kickstarter, a través de su página web, <http://kickstarter.freshfiber.com/>, ofrece la posibilidad de diseñar y fabricar soportes y protectores personalizados para dispositivos móviles (ordenadores...). Hay también otras iniciativas similares como Jujups, Automake, Fluid Forms, Ponoko, MGX Materialise, Future Factories, UCODO, Shapeways, Nervous System...

La involucración del cliente final en el desarrollo de productos que se habilitaría de forma total con AM, sin embargo, debe resolver nuevas dificultades. Por ejemplo, las herramientas de diseño deben ser más amigables e intuitivas, permitiendo una evaluación virtual de conformidad del nuevo producto y su validación mediante técnicas, por ejemplo, de elementos finitos. Google Sketchup (en <http://sketchup.google.com/>) permite al usuario crear contenido 3D de forma fácil y amigable al usuario no entendido. En un futuro herramientas similares más avanzadas serán capaces de generar ficheros que se podrán materializar mediante impresoras 3D.

Los procesos de certificación, como el marcado CE, también deberán contemplar este nuevo escenario, así como los términos de garantías, seguros de responsabilidad civil en el uso del nuevo producto, o incluso los términos de propiedad intelectual e industrial que le afectan.

No obstante, el hecho de que el despliegue del AM haga posible que el usuario final diseñe y fabrique sus propios productos, no significa que se convierta en un fenómeno masivo. En este sentido podemos citar al diseñador de la empresa Freedom of Creation, Janne Kytanen: «...algo es seguro... Así como la máquina de escribir no nos hizo a todos escritores y *Photoshop* no nos hizo a todos diseñadores gráficos, los software de modelado 3D y las impresoras no nos harán a todos diseñadores de producto...».

Si finalmente se consigue implicar al consumidor final con programas CAD de fácil uso y ponerlo en contacto directo con el fabricante (que puede también ser él mismo) se podría generar un efecto global de reducción de costes, inventarios y tiempos de entrega. Las redes sociales en la web 2.0 pueden permitir además interacciones entre múltiples usuarios en el proceso de desarrollo y llegar a soluciones difícilmente imaginables en este momento. ¿Fabricación personalizada en masa totalmente flexible a nivel global?

Hoy existen ya experiencias pioneras que recrean algunos

de estos escenarios, como el caso de Bits from Bytes y Makerbot Industries que ponen a disposición de cualquier usuario un sistema de AM libre, con acceso desde internet a los planos para construir un sistema propio e instalarlo, de forma análoga a lo que ocurre con el software libre (proyecto *RepRap*), y Evil Mad Science, que ha desarrollado el sistema abierto *CandyFab*.

Otra iniciativa interesante es la de Fab@home (www.fabathome.org), desarrollada por la Universidad de Cornell, que pone a disposición de cualquier persona la posibilidad de fabricar una máquina de prototipado rápido mediante la publicación de instrucciones, diseños y software necesario. Se puede disponer de una máquina de estas características, dependiendo de los modelos, entre unos 1300 y 2400 dólares. En principio se trata de un sistema con enfoque académico y de divulgación, y está muy lejos de las prestaciones que ofrecen las máquinas profesionales.

3.7.3 Fábrica itinerante

Otro concepto muy interesante es la «fábrica itinerante», aplicable cuando existe la necesidad de fabricar piezas en zonas donde, en principio, no se puede disponer de toda la infraestructura necesaria. Por ejemplo, en el caso de expediciones militares, para disponer de piezas de recambio, que pueden ser muy diversas, y sería inviable tener un *stock* que cubra todas las posibilidades e imprevistos. También existe la posibilidad de fabricar implantes quirúrgicos in situ para militares heridos. Lo mismo le ocurre a los grandes buques en alta mar, que se pasan meses sin tocar tierra, o, en una visión más futurista, se puede dar en colonias espaciales. En estos casos se pueden resolver situaciones de urgencia si se dispone de unas máquinas de AM y ficheros con los modelos digitales de las piezas que se necesita reemplazar.

Como ya se ha comentado anteriormente, los requerimientos básicos para poder fabricar de manera directa es disponer de materia prima y ficheros CAD 3D. En cuanto a este último apartado, los avances experimentados en los últimos años en Internet hacen imaginar que esta herramienta jugará un papel fundamental en el desarrollo de esta tecnología en los próximos años en muchos aspectos (costes de inventario, gestión de datos, planificación, distribución, estrategias de producción...). La gestión eficaz de la información y de la planificación logística y productiva tendrá un efecto muy importante sobre la reducción de costes.

4

RELEVANCIA MUNDIAL DEL AM

El interés por las tecnologías de AM es de ámbito internacional, y queda patente en la constitución de asociaciones y plataformas tecnológicas, en la participación en congresos y ferias, la aparición en revistas especializadas y el lanzamiento de proyectos de I+D+i que existen actualmente en todo el mundo.

En cuanto a asociaciones y plataformas cabe destacar la Asociación Global de Rapid Prototyping (GARPA: www.garpa.org) y la Asociación Wohler (www.wohlersassociates.com). Esta última publica un informe anual que es considerado como una referencia mundial en la evolución y estado del arte del AM.

A nivel europeo destaca la Plataforma Tecnológica Europea del Rapid Manufacturing (www.rm-platform.com), estrechamente vinculada con otra plataforma tecnológica más transversal como es MANUFUTURE, y desplegada en plataformas nacionales «espejo» en varios estados miembros (España, Francia, Alemania...). En concreto, en España se ha constituido la Asociación Española del Rapid Manufacturing (ASERM - www.aserm.net), que ha puesto en marcha una agrupación empresarial innovadora denominada AEI-DIRECTMAN (<http://www.aserm.net/aei-directman/>).

Estos grupos de interés aglutinan tanto a empresas fabricantes de maquinaria, software o material para distintas tecnologías de fabricación directa (fundamentalmente AM), como empre-

sas usuarias de las mismas, centros tecnológicos y universidades que desarrollan actividades de I+D+i en este campo.

En lo que se refiere a congresos y conferencias destacan:

- Conferencia internacional RM Loughborough (<http://www.rm-conference.com/>) sobre customización en masa y personalización, sirve de puente entre la investigación académica y la aplicación industrial, siendo un evento interactivo donde se discuten las últimas estrategias y tendencias.
- Fórum de Rapid Manufacturing / Additive Manufacturing en Barcelona (<http://additivemanufacturingforum.org/>) organizado por el IQS junto con el centro tecnológico LEITAT. Se trata de un foro de referencia internacional en el ámbito de la fabricación aditiva, iniciado en el año 2005, que lidera la Fundació Eduard Soler y que celebró en el año 2010 su quinta edición.
- La feria Euromold (<http://www.euromold.com>), que se celebra cada final de año en Frankfurt, es considerado a nivel mundial el evento demostrativo de referencia en tecnología de AM, y es el lugar donde se suelen presentar las novedades y últimos avances en AM.
- Euro-uRapid (<http://www.urapid.de/>) es un encuentro de usuarios y exhibición de Prototipado Rápido, Rapid Tooling y RM.
- SME Rapid Conferencie es la principal feria anual en EE.UU. y pone en contacto usuarios de tecnología, fabricantes y diseñadores en tecnologías de prototipado rápido, Rapid Tooling y RM.
- TCT Show (<http://www.tctshow.com>), organizado por la revista TCT Magazine, considerada como la publicación más relevante especializada en tecnologías de fabricación directa.
- VRAP International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (<http://www.vrap.ipleiria.pt>) sobre realidad virtual y tecnologías AM en Leiria, Portugal.
- Feria Rapid.Tech, Erfurt, Alemania, <http://uk.rapidtech.de/aussteller.html>

Otro indicador relevante de la importancia y las expectativas que despiertan estas tecnologías son los numerosos proyectos de I+D que se lanzan a nivel internacional. En Europa se ha expresado dicho interés con la inclusión del AM en varios temas dentro de las convocatorias del VI y VII Programa Marco. Entre los proyectos aprobados destaca el *Custom Fit* (VIPM), que tiene por objetivo principal aprovechar las tecnologías de fabricación directa para productos personalizados, siendo el campo de implantes médicos una de las aplicaciones principales.

Destaca el evento realizado en marzo de 2009 en Washington, que concentró a un grupo de 65 expertos a nivel mundial en las tecnologías de AM y cuyo objetivo era desarrollar un plan de trabajo para los próximos 10-12 años para afrontar los principales retos pendientes. Se presentaron 26 recomendaciones que se plasmaron en el documento *Roadmap for Additive Manufacturing*, que puede ser consultado en www.wohlersassociates.com/roadmap2009.html.

Se indican asimismo algunos proyectos relevantes asociados a las tecnologías AM tanto a nivel nacional como internacional:

- Iberm, <http://www.iberm.es/>
- Proyecto Europeo Custom-Fit (VI Programa Marco Europeo; <http://ec.europa.eu/research/fp6/>), <http://www.custom-fit.org/>

Hay que destacar la exposición permanente que ha llevado a cabo el Disseny Hub Barcelona *Full Print3d. Imprimiendo objetos* (<http://www.dhub-bcn.cat/node/151>), del 16 de junio de 2010 al 29 de mayo de 2011, donde se introduce al visitante en la fabricación digital aditiva a través de una serie de proyectos que ilustran las implicaciones conceptuales para el diseño derivadas de este tipo de producción.

5

RELACIÓN DE PRESTADORES DE SERVICIOS

Aunque existen cada vez más empresas que han incorporado este tipo de tecnologías, tradicionalmente en nuestro país han sido los centros tecnológicos y las universidades quienes desde hace años han hecho una apuesta más clara y han desempeñado un papel clave en su desarrollo y la transferencia de conocimiento a la industria.

Se relacionan a continuación los diferentes tipos de entidades que trabajan de forma más intensa en el campo de tecnologías AM en España, así como alguna referencia internacional.

5.1 CENTROS TECNOLÓGICOS Y UNIVERSIDADES

- AIDO (Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen)
Dirección: C/ Nicolás Copérnico, 7-13. Parque Tecnológico, 46980 - Paterna, Valencia
Página web: www.aido.es. Teléfono: 96 131 80 51
- AIJU (Centro Tecnológico del Juguete)
Dirección: Avda. de la Industria, 23 - 03440 Alicante
Página web: www.aiju.info. Teléfono: 965 55 44 75
- AIMME (Instituto Tecnológico Metalmecánico)
Dirección: Parque Tecnológico, Avda. Leonardo Da Vinci, 38 - 46980 Paterna, Valencia
Página web: www.aimme.es. Teléfono: 96 131 85 59

- AITIIP (Centro Tecnológico)
Dirección: Parque Tecnológico Cogullada. Ctra. Cogullada 20, naves 7-8 - 50014 Zaragoza
Página web: www.aitiip.com. Teléfono: 97 646 45 44
- Alcalá Innova (Fundación para el Desarrollo Sostenible)
Dirección: Autovía Sevilla-Málaga, km 6,3 - P. E. Alcalá 10
Página web: www.complejoideal.com. Teléfono: 95 493 66 50
- ASCAMM (Centro Tecnológico)
Dirección: Parque Tecnológico del Vallés, Avda. Universitat Autònoma, 23 - 08290 Cerdanyola del Vallés, Barcelona
Página web: www.ascamm.com. Teléfono: 93 594 47 00
- CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia)
Dirección: Polígono Industrial A Granxa Calle A, parcelas 249-250 E - 36400 Porriño, Pontevedra
Página web: www.ctag.com. Teléfono: 986 90 03 00
- ELISAVA Escola Superior de Disseny
Dirección: La Rambla 30-32 - 08002 Barcelona
Página web: <http://www.elisava.net/>. Teléfono: 93 317 47 15
- Fundació CIM
Dirección: Parc Tecnològic de Barcelona C/Llorens i Artigas, 12 - 08028 Barcelona
Página web: <http://www.fundaciocim.org/>. Teléfono: 93 401 71 71
- Fundación Pro dintec (Centro Tecnológico)
Dirección: Edificio Centros Tecnológicos. Avda. Byron, 39 Parque Científico Tecnológico - 33203 Gijón, Asturias
Página web: www.prodintec.com. Teléfono: 984 39 00 60
- IQS - Instituto Químico de Sarriá
Dirección: vía Augusta, 390 - 08017 Barcelona
Página web: <http://www.iqs.es/>. Teléfono: 932 672 000
- LEITAT
Dirección: C/ de la Innovació, 2 - 08225 Terrasa, Barcelona
Página web: <http://www.leitat.org>. Teléfono: 93 788 23 00

- LORTEK (Centro de Investigación en Tecnologías de Unión)
Dirección: Barrio La Granja, s/n - 20240 Ordizia, Guipúzcoa
Página web: www.lortek.es. Teléfono: 94 388 23 03
- Universitat de Girona
Dirección: Plaza Sant Domènec, 1 Edificio Les Àligues - 17071 Girona
Página web: <http://www.udg.es>. Teléfono: 972 41 83 84
- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria - Laboratorio de Fabricación Integrada (LFI)
Página web: <http://www.lfi.ulpgc.es>. Teléfono: 928 45 86 18
- Universidad de Oviedo
Dirección: Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Campus de Gijón s/n - 33203 Gijón, Asturias
Página web: <http://www.epigijon.uniovi.es>. Teléfono: 985 18 22 30
- Universidad de Loughborough
Página web: www.lboro.ac.uk/departments/mm/research/rapid-manufacturing/

5.2 PROVEEDORES DE MAQUINARIA

- 3D Systems, Inc. Página web: <http://www.3dsystems.com>
- Accufusion. Página web: <http://www.accufusion.com>
- Arcam AG. Página web: <http://www.arcam.com>
- Concept Laser GmbH. Página web: <http://www.concept-laser.de/>
- Envisiontec GmbH. Página web: <http://www.envisiontec.de>
- EOS GmbH. Página web: <http://www.eos.info/>
España: <http://www.rmsiberia.com>
- MTT Technologies Group. Página web: <http://www.mtt-group.com>
- Objet Geometries Ltd. Página web: <http://www.objet.com>

- Sintermask GmbH. Página web: <http://www.sintermask.com>
- Stratasy Inc. Página web: <http://stratasy.com>
- Z Corporation. Página web: <http://www.zcorp.com>
España: <http://www.zsi.com.es>

5.3 PROVEEDORES DE SERVICIOS

Aunque escasas, existen empresas especializadas en dar servicios de asesoramiento, diseño y fabricación en AM, tanto en aplicaciones de prototipado como de de producto final. Se relacionan a continuación algunas de ellas:

- 3dU. Página web: <http://www.3d-u.com>
- 3T RPD Ltd. Página web: <http://www.rtrpd.co.uk>
- ARRK Product Development Group Ltd-Barcelona. Página web: <http://www.arrkeurope.com/>
- Coproin. Página web: <http://www.coproin.com>
- FIT GmbH. Página web: <http://www.selective-space-structures.com>
- FKM Sintertechnik GmbH. Página web: <http://www.fkm-sintertechnik.de>
- Hofmann Innovation Group GmbH. Página web: <http://www.hig-ag.de>
- IDELT (Ingeniería de Desarrollo de Prototipos). Página web: <http://www.idelt.com>
- IMVOLCA S.L. (PAKTO). Página web: <http://www.imvolca.com/>
- INEO Prototipos S.L. Página web: <http://www.ineo.es>
- INITIAL. Página web: <http://www.initial.fr>
- Materialise BV. Página web: <http://www.materialise.com>
- Nexo Materia. Página web: <http://www.nexomateria.com>
- Wehl & Partner Ibérica. Página web: <http://www.wehl-partner.com>



CONCLUSIONES

Las tecnologías AM suponen un nuevo paso en la evolución tecnológica hacia una industria sostenible y generadora de servicios asociados de alto valor añadido. Estas técnicas hacen realidad nuevos paradigmas que actualmente se persiguen en la manufactura de productos como los siguientes:

- **«Personalización en masa»**, la capacidad de combinar las bondades del trabajo artesano con el volumen de demanda de un gran mercado. Ahora el diseñador es el artesano en la era digital.
- **«El papel lo aguanta todo..., pero el producto también»**, ya que desaparecen muchas limitaciones geométricas a los que los diseñadores debían adaptar sus creaciones para que fueran fabricables, y esto les permite dar rienda suelta a su imaginación, resolviendo problemas hasta ahora inabordables.
- **«La fábrica digital»**, mucho más basada en activos lógicos (software) que físicos (utillajes, moldes, herramientas), y por lo tanto mucho más configurable, adaptable, flexible.
- **«Entorno fabril 2.0»**, que permitirá que cualquiera pueda ser dueño de una empresa fabricante de sus propios productos, o involucrarse en el diseño de productos en red con entornos de fabricación distribuidos geográficamente.

- «**Procesos con desperdicio nulo**», ya que se consumirá solo el material estrictamente necesario, la energía imprescindible y reduciendo notablemente el impacto medioambiental en el transporte.

Las tecnologías de AM están llamadas a suponer una **nueva revolución industrial**, íntimamente vinculada con las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), y para la que toda la sociedad, a nivel individual y colectivo, debe ir preparándose.

Este documento permite una primera aproximación a las capacidades actuales reales de aplicación de estas tecnologías, anima a su descubrimiento y utilización (empresas industriales y de servicios, diseñadores, nuevos empresarios, estudiantes, investigadores...) y abre una ventana a un apasionante futuro que se acerca a una velocidad de vértigo.



7.1 PÁGINAS EN LA RED

- Terry Wohlers. Wohlers Associates, Inc: <http://wohlersassociates.com>
- Fab@Home: <http://www.fabathome.org>
- ASTM: <http://www.astm.org/COMMIT/COMMITTEE/F42.htm>
- Freedom of Creation: <http://www.freedomofcreation.com>
- Econolyst: <http://www.econolyst.co.uk>
- Jujups: <http://www.jujups.com>
- Automake: <http://www.automake.co.uk>
- Kickstarter: <http://kickstarter.freshfiber.com/>
- Fluid Forms: <http://www.fluid-forms.com>
- Ponoko: <http://www.ponoko.com>
- MGX Materialise: <http://www.materialise.com/MGX>
- Future Factories: <http://www.futurefactories.com/>
- UCODO: <http://www.ucodo.com/>
- Shapeways: <http://www.shapeways.com/>
- Nervous System: <http://n-e-r-v-o-u-s.com/>

7.2 PUBLICACIONES

- Terry Wohlers, *Wohlers Report 2010. Additive Manufacturing. State of the Industry*, Annual Worldwide Progress Report, ISBN 0-9754429-6-1.

- Hopkinson N. - Hague R.J.M. - Dickens P.M. 2006, Rapid Manufacturing - An Industrial revolution for the digital age, ISBN-13978-0-470-01613-8, Publisher-John Wiley and Sons Ltd UK.
- Bourell D. - Leu M. - Rosen D., Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing, University of Texas USA. 2009, <http://wohlersassociates.com/roadmap2009.pdf>.
- Revista TCT Magazine: <http://www.tctmagazine.com/>.
- Revista Rapid Prototyping Journal (GARPA), editada por EMERALD.
- Assises Européennes du Prototypage Rapide.
- Revista Time Compression: <http://www.timecompression.com/>.
- Desktop Engineering: <http://www.deskeng.com/>.
- Guías de Diseño para RM: <http://www.aserm.net/guias-diseno/>, que incluye las siguientes guías:
 - Guía de diseño LASER CUSING.
 - Guía de diseño ELECTRON BEAM MELTING (EBM).
 - Guía de diseño SINTERIZADO SELECTIVO LÁSER METAL (DMLS).
 - Guía de diseño SINTERIZADO SELECTIVO LÁSER PLÁSTICO (SLS).
 - Guía de diseño ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA).
 - Guía de diseño FUSED DEPOSITION MODEL (FDM).
 - Guía de diseño IMPRESIÓN 3D.
 - Guía de diseño POLYJET OBJECT.
 - Guía de diseño DIELESS FORMING.
 - Guía de diseño DIGITAL LIGHT PROCESSING (DLP).
 - Guía de diseño MICROFUSIÓN.

8

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AM (Additive Manufacturing): Fabricación Aditiva

DFMA (Design for Manufacturing and Assembly): Diseño para la fabricación y el montaje

DM (Direct Manufacturing o Digital Manufacturing): Fabricación Directa o digital

DMLS (Direct Metal Laser Sintering): Sinterizado directo láser de metales

DLP (Digital Light Processing): Proyección por máscara

Dieless Forming: Conformado incremental de chapa

e-M (e-Manufacturing): Fabricación electrónica o digital

EBM (Electron Beam Melting): Fusión por haz de electrones

FDM (Fused Deposition Modeling): Deposición de material fundido

HSM (High Speed Machining): Mecanizado de alta velocidad

RM (Rapid Manufacturing): Fabricación rápida

RP (Rapid Prototyping): Prototipado rápido

RT (Rapid Tooling): Fabricación rápida de utillaje/molde

SLA (Stereolithography): Estereolitografía

SLS (Selective Laser Sintering): Sinterizado láser selectivo

anexo

1

INTEGRACIÓN DEL AM CON PROCESOS CONVENCIONALES DE FABRIBACIÓN

Como ya se ha indicado en varias ocasiones en el presente documento, los procesos de AM se han de integrar en toda la cadena de valor junto al resto de procesos de fabricación (sustractivos y conformativos), aportando sus ventajas ahí donde tenga sentido y complementándose con otros procesos de fabricación cuando se requiera.

Para que dicha integración tenga éxito, es necesario llegar a conocer las ventajas y limitaciones de cada uno de los procesos que completan la cadena de valor para poder ubicar dentro de ella los procesos aditivos y obtener así lo mejor de cada uno de ellos, tal y como se ha venido haciendo con los procesos sustractivos, conformativos y de ensamblaje.

A continuación se relacionan los principales procesos de fabricación, en un esquema en el que se han incorporado los procesos aditivos a los sustractivos (mecanizado) y conformativos (conformado, moldeo...), además de los procesos de unión y ensamblaje.

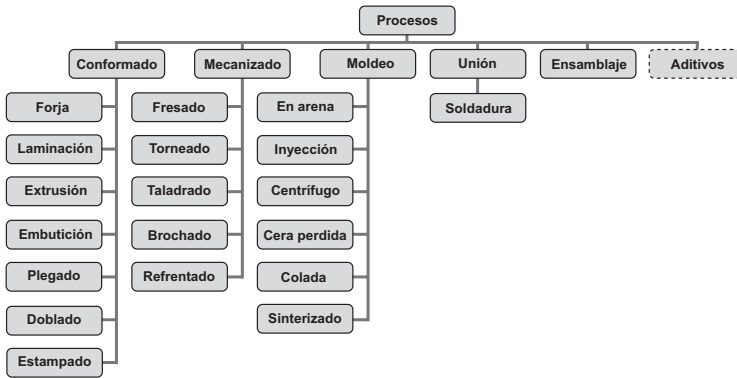


Ilustración 32: Clasificación de procesos de fabricación, conformativos, sustractivos y aditivos

Se indican a continuación las principales diferencias que ofrece la fabricación aditiva frente a algunos de los procesos que se utilizan en la industria, sustractivos y conformativos, como son la transformación de materiales plásticos, el mecanizado de materiales metálicos y, finalmente, los procesos de ensamblaje.

La transformación de materiales plásticos por inyección es un proceso muy extendido en la industria y que representa la competencia directa del AM de materiales plásticos, pues es la tecnología con la que se ha comparado tradicionalmente coste y tiempo de fabricación del molde, coste pieza...

Tomando como ejemplo el proceso de inyección de plástico, el diseñador de una nueva pieza deberá tener en cuenta en su diseño toda una serie de consideraciones (que suponen en algunos casos restricciones para diseñar libremente) impuestas por el proceso productivo. Como se irá viendo, estas restricciones desaparecen en el caso de emplear técnicas de AM.

- *Complejidad añadida:* En los procesos convencionales sustractivos y conformativos la complejidad añadida a una pieza se traduce casi siempre en un aumento de la

complejidad en el proceso de fabricación y por lo tanto en un sobrecoste. En el AM al fabricar las piezas capa a capa, las complejidades geométricas de la pieza no tienen una influencia directa en el proceso de fabricación y en muchas ocasiones pueden llegar a suponer un ahorro tanto de material como de tiempo de proceso. La complejidad queda a nivel del CAD, pudiéndose realizar diseños con altos niveles de complejidad sin que esto repercuta directamente en el coste o complejidad del proceso de fabricación.

- *Racionalización de componentes:* Un objetivo claro durante el diseño de un nuevo producto será reducir el número de componentes necesarios para cumplir con la funcionalidad que se desea. Por ejemplo, más piezas suponen más moldes, matrices, utillaje, etc., mayores costes de ensamblajes, gestión de piezas, almacenamiento, así como normalmente más peso y volumen, todo lo cual proporciona datos que hay que tener muy en cuenta a la hora de ser más competitivos. Mediante el AM se pueden integrar componentes, lo que supone un ahorro de costes.
- *Ángulos de desmoldeo:* Hay que considerar muy atentamente los ángulos de desmoldeo necesarios para poder extraer la pieza del molde una vez inyectada. En el AM no son necesarios ángulos de desmoldeo.
- *Minimizar zonas con reentradas y negativos:* Hay que tener en cuenta las zonas donde existan negativos. Habrá que intentar evitar estas zonas por la imposibilidad de desmoldear la pieza, a no ser que se introduzcan en el molde mecanismos de desmoldeo en forma de correderas, siempre costosas tanto en la fabricación del molde como en costes de operación y mantenimiento futuro del mismo. La falta de un buen ajuste en estas zonas da lugar a rebabas y problemas de calidad de las piezas. En el AM no es necesario definir estas zonas, al no depender de la apertura de ningún molde.
- *Espesores de pared:* Es recomendable mantener un espesor de pared constante en toda la pieza para evitar

problemas de enfriamiento diferencial en distintas zonas, lo que podrá provocar rechupes, alabeos y falta de exactitud dimensional. En el AM no es necesario mantener espesores de pared constante.

- *Líneas de partición:* Es necesario definir correctamente la línea de partición del molde y tenerla en cuenta dentro del diseño para evitar posibles problemas de calidad. Siempre existirá una pequeña rebaba en esa zona y, si no se define correctamente y se sitúa en una zona funcional, puede resultar problemática. En el AM no existen líneas de partición.
- *Acabado superficial:* Habrá que definir el acabado superficial que se desea en cada una de las partes de la pieza, para tenerlo en cuenta a la hora de fabricar los electrodos y el molde. En el AM se puede «jugar» de manera controlada con el acabado en cada zona.
- *Marcas de expulsores y de canal de inyección:* Son necesarias para poder evacuar las piezas una vez inyectadas. Su ubicación es importante, ya que dejarán pequeñas marcas sobre la pieza que será necesario tener en cuenta para que no afecten a la funcionalidad de la misma. No son necesarias en el proceso de AM.
- *Soldaduras-uniones frías:* Habrá que tener en cuenta durante el diseño las posibles zonas donde se puedan producir soldaduras frías del material. Estas uniones no se dan en AM.
- *El propio hecho de que el AM no está asociada a un molde* supone que para cualquier modificación que sea necesaria en el mismo, ésta se realiza directamente sobre el fichero CAD sin tener que realizar costosas modificaciones físicas (en tiempo y dinero) en los moldes.

En cuanto a la transformación de productos metálicos, no es tan sencilla la elección de un proceso concreto, como en el caso anterior, que cubra la gran mayoría de los procesos que se encuentran implantadas en la industria actualmente.

La cantidad de procesos de transformación de productos metálicos es mucho más amplia y va desde la propia inyección y colada de materiales como el aluminio o el magnesio, hasta la forja, el conformado, fresado, torneado, doblado o estampación. La comparativa de fabricar por uno de estos métodos frente al AM es muy extensa y se debería abordar de manera individual. En algunos casos las ventajas de una tecnología frente a la otra es clara. En otros casos es necesario un estudio detallado de la pieza a la hora de tomar una decisión sobre qué proceso es el más adecuado.

Una aplicación muy clara de transformación de productos metálicos mediante AM, y que ha sido una de las principales tractoras del desarrollo de estas tecnologías en metales, es la posibilidad de fabricar insertos y partes de moldes o moldes completos. Las partes del molde fabricadas por AM vienen a sumarse en la cadena de valor al resto de procesos sustractivos utilizados en el sector del molde como son el mecanizado, la electroerosión, acabado y pulido. La clave está en el aprovechamiento de las ventajas que cada proceso ofrece en un determinado momento. Así se puede emplear AM para ahorrar en el material necesario, reduciendo tiempos elevados de desbaste del molde, así como el mecanizado de electrodos y la posterior electroerosión del molde. Otra ventaja importante del AM es la que permite embeber complejos canales conformales interiores, imposibles por métodos sustractivos, que ayudan a reducir el tiempo de inyección mejorando la refrigeración de las piezas y, por tanto, su funcionalidad. Por contra, en la mayoría de las ocasiones, será necesario un acabado del molde mediante un mecanizado y/o pulido debido a la insuficiente calidad de acabado superficial que ofrecen actualmente los procesos de AM.

Por el tipo de geometría de los productos fabricados, quizás el proceso de fabricación que más se viene comparando con las tecnologías AM sea el mecanizado por fresado. Mediante este proceso se pueden obtener geometrías

complejas cuando se utiliza maquinaria con cinco ejes indexados. De esta forma se permite fabricar con pocos o ningún amarre adicional en la máquina, lo que repercute en el tiempo de fabricación y en la calidad de la pieza, al no tener que referenciar en cada nuevo amarre en la máquina, añadiendo desviaciones. Las máquinas actuales de mecanizado avanzado incorporan la alta velocidad (HSM: *High Speed Machining*), lo que consigue optimizar el proceso, eliminando menos material de cada pasada, pero dando más pasadas en menos tiempo. Este tipo de proceso es el que se utiliza tradicionalmente para fabricar desde piezas metálicas con geometrías sencillas hasta las más complicadas para sectores como el aeronáutico o el automóvil. Un problema que tiene este tipo de fabricación es que el aumento de la complejidad de las piezas va asociado directamente con un incremento del coste de la pieza. Esto es debido a que la complejidad de las piezas tiene que ser traducida inicialmente a un programa de CAM que genere dichas geometrías complejas en forma de un código que a continuación sea entendido por la máquina. Se requiere por lo tanto de tiempo para su programación y de personal cualificado para su realización. Asimismo para cada nueva geometría tendrá que ser realizado el mismo proceso.

En función de la geometría de cada pieza en particular se debe analizar la ventaja del AM frente a un mecanizado. En algunos diseños, por ejemplo, se utilizan programas de simulación por elementos finitos para estudiar el comportamiento y la resistencia de la pieza y las geometrías óptimas teóricas no pueden ser fabricadas por métodos sustractivos o conformativos, por lo que se renuncia a ellas o se plantean soluciones aproximadas a la teórica. Empleando técnicas de AM, sí que se puede disponer de estas geometrías óptimas.

Lo mismo se podría decir para las piezas fabricadas por torno, aunque en este caso al ser piezas de revolución y no ser geometrías tan complejas como en el fresado ni

necesitar de laboriosos programas en CAM, las ventajas actuales del AM no son tan obvias.

Donde aún hay mucho por hacer es en los procesos de estampado, que representan un gran volumen de mercado. Las geometrías planas de las piezas fabricadas por este tipo de procesos no son muy complicadas y se caracterizan más por su relación superficie/espesor, que hace que sean de difícil fabricación por procesos AM actualmente. Las tensiones generadas durante la fabricación por capas, principalmente por el aporte térmico del láser, unidas a los soportes necesarios, desaconsejan en principio la aplicación en piezas de estampación. Pero una vez más se debería reflexionar sobre si el diseño es el más adecuado. Como ocurre con el mecanizado, cuando se diseña una pieza para cumplir con unos requerimientos, ya se sabe que va a ser fabricada por estampación y por ello se define un espesor de material que hay que utilizar. No sería de extrañar que, si se tuvieran en cuenta las necesidades iniciales básicas de la pieza y se diseñara para AM, resultara un diseño totalmente distinto orientado a este proceso, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas actuales, y fuera entonces viable su fabricación por este método.

En cuanto a los procesos de inyección de piezas metálicas (aluminio, magnesio, etc.) se pueden presuponer las mismas limitaciones que existen en la inyección de plásticos, al depender el proceso de un molde para inyectar las piezas. Salvando las diferencias asociadas a cada material, los problemas de diseño que se indicaron en el apartado anterior para los materiales plásticos son de aplicación para el mismo proceso con componentes metálicos.

En cuanto a los procesos de sinterizado tradicionales, al igual que en los procesos de AM parten de un material muy similar, en polvo, que mediante un prensado con temperatura a través de un molde obtienen una pieza final maciza. Se consiguen productos con unas muy buenas características mecánicas, acabado superficial y tolerancias. En algu-

nas ocasiones se hacen necesarios procesos de acabado por mecanizado para la obtención de la geometría final. Este tipo de posprocesos en la mayoría de los casos se encuentra integrado totalmente en el proceso de fabricación. Es en sí un proceso "similar" a la fabricación directa en el sentido de que parte de un material en polvo y mediante la aplicación de una fuente de energía (y presión), alcanza el material compacto final. Por el contrario, sigue utilizando y estando ligado a un molde, lo que lo acerca más a los procesos conformativos (plástico o metal).

Los procesos indicados anteriormente, sobre todo la inyección de metales, la estampación, el sinterizado tradicional, aunque pueden fabricar series cortas, están pensados para grandes volúmenes de fabricación y geometrías relativamente sencillas. Tiradas de miles de piezas con tiempos de ciclo muy bajos (desde décimas de segundo en estampación, hasta 5-10 segundos en el sinterizado, o medio minuto en la inyección de metales). Actualmente estas cadencias de fabricación no son económicamente viables por AM.

Los procesos de AM irán mejorando, reduciendo los tiempos de fabricación mediante láseres más potentes, nuevas formas de trabajar por capas, etc., pero difícilmente se llegarán a superar las capacidades de producción de ciertos procesos. Pero tampoco debe ser ese el objetivo. No todas las piezas podrán ser fabricadas por AM; y aquellas donde el aprovechamiento de las ventajas que ofrece el proceso a la hora de diseñar el producto supere las desventajas que tenga el proceso en cada momento, serán las que el propio mercado haga evolucionar hacia este tipo de fabricación digital.

Existen muchos más procesos de fabricación. Para cada uno de ellos sería necesario realizar una comparativa de las ventajas, inconvenientes y oportunidades que podrían ofrecer las tecnologías AM, bien de forma sustitutiva directa o de forma complementaria al introducirse en la cadena de valor del producto; pero siempre desde una perspectiva aséptica del diseño básico, último y funcional de la pieza

que hay que fabricar, sin tener en cuenta las limitaciones intrínsecas al proceso productivo.

La adopción de reglas para el ensamblaje, como *Design for Assembly* (DFA), permite en los procesos actuales reducciones importantes de coste y mejoras que facilitan el montaje. Entre estas reglas destacan la reducción de componentes innecesarios y de los tiempos de manipulación de los componentes durante el ensamblaje, y la facilidad en la inserción, lo que supone diseñar piezas que sean fáciles de alinear, insertar y autoposicionarse.



Ilustración 33: Ejemplo de pieza industrial.
A la izquierda pieza original de fundición. A la derecha
pieza rediseñada para AM. Cortesía de Loughborough
University, copyright Econolist

En muchas ocasiones los procesos de ensamblaje vienen a solucionar los problemas que un diseño limitado por los procesos de fabricación plantea para que un producto cumpla con su función final. Cuando un diseñador se enfrenta a la nueva concepción de un producto, el punto inicial de partida es la función última, los requerimientos y el pliego de condiciones que ese producto debe de cumplir. A partir de ahí se comienza a diseñar el producto, que en muchas ocasiones se acaba convirtiendo en un mecano compuesto por multitud de piezas adicionales necesarias para completar la función final del mismo. Limitado por los procesos de fabricación se hace necesario empe-

zar a diseñar cada una de las piezas para un proceso concreto (mecanizado, inyección, ensamblaje...).

Existe un gran número de componentes y procesos estándares que han surgido en la industria, necesarios para solventar y salvar este tipo de limitaciones. En cuanto a componentes, se puede hablar de elementos de sujeción y ensamblaje (tuercas, tornillos, remaches...), elementos de estanqueidad (anillos tóricos, juntas...), y en lo que concierne a los procesos de fabricación, principalmente cabe destacar los de unión (soldadura, pegado, remachado, atornillado...). Todos estos inconvenientes se pueden evitar aprovechando las ventajas del AM, que nos permiten en muchos casos fabricar en una sola pieza integrando funcionalidades.

Otro ejemplo podría ser un intercambiador de calor donde se deben manejar dos fluidos (líquido o gas) sin contacto entre ellos en un determinado componente, para lo cual se realiza un diseño basado en varias piezas que finalmente se ensamblan (atornillado, soldadura, juntas estancas...) aunque en algunos casos no se consigue la efectividad máxima que se podría obtener si se tuviera libertad en el diseño.

Se trata de dos claros ejemplos en donde, si nos fijamos exclusivamente en las posibilidades de libertad en el diseño que ofrece el AM, se ven enseguida las ventajas de este proceso frente a los sustractivos y conformativos.

anexo

2

**CADENA DE
OPERACIONES
EN LOS PROCESOS
DE AM**

El paso inicial es la obtención de un modelo tridimensional del objeto o producto que hay que fabricar. Este modelo se puede generar de forma tradicional mediante paquete software CAD 3D convencional. Según la complejidad del diseño o la necesidad de tener que integrarlo en conjuntos mayores (aeronaves, automóviles) se puede recurrir a software más o menos sofisticado. En otros casos y de una forma cada vez más habitual, se parte de datos provenientes de un escaneado tridimensional de un modelo en forma de nubes de puntos, que mediante procesos de ingeniería inversa se tratan para generar superficies CAD y posteriormente sólidos.

A continuación es necesario generar una malla de triángulos adaptada a las superficies CAD del objeto; en este paso se elimina toda la información de las superficies (radios, límites, tangencias, etc.) características de las definiciones matemáticas de los software CAD y se exporta normalmente en el formato conocido como *.stl*. Esta representación consiste en información matemática en forma de colecciones ingentes de triángulos definidos por la posición de sus vértices y de las relaciones entre ellos; típicamente describimos objetos con un número de triángulos de entre 20.000 para objetos sencillos hasta decenas de millones de ellos para objetos complejos, con estructuras internas esponjosas, texturas, etc.

Este formato *.stl* es prácticamente universal en todos los sistemas de AM. Cuenta con la ventaja de que es matemáticamente sencillo y útil para los pasos posteriores del proceso AM, pero tiene la desventaja de que, al haber perdido la información, hace muy difícil cualquier modificación precisa del modelo. Otra desventaja de este sistema de representación es que para obtener una representación precisa de los objetos se generan ficheros enormes, de modo que un objeto definido en CAD con 500KB de información puede requerir decenas o centenares de MB para su definición equivalente en mallas de triángulos. En la actualidad también existe software que permite realizar tareas de diseño y rediseño, bien partiendo de cero o bien partiendo de nubes de puntos, directamente en formato *.stl*, manteniendo cierto nivel de «inteligencia» y precisión, asemejando en ciertas funciones a un CAD paramétrico.

También sucede que la calidad del fichero *.stl* obtenido depende en gran medida de la calidad del trabajo CAD realizado (trimados, cierres, precisiones, acuerdos, etc.), de la complejidad del diseño y del propio paquete software empleado. Por ello es imprescindible un paso siguiente de revisión y corrección de la malla, de forma que se asegure que esta representa una única superficie, y que es topológicamente correcta. A veces se trata de una tarea relativamente compleja, que influye sobre la calidad de la pieza fabricada, tanto desde el punto de vista geométrico o estético como de las características mecánicas.

A continuación, se «bica» el objeto en un espacio virtual que replica el volumen de trabajo de la máquina que hay que emplear, se orienta adecuadamente y se posiciona dentro del volumen de construcción. Es en este momento cuando entra en juego una característica que afecta significativamente al proceso y que es común a muchas de las tecnologías de AM: la necesidad de construir estructuras de soporte para sostener aquellas zonas de pieza que por diseño quedan en voladizo. El material no se puede solidificar en el aire por ningún medio, por lo que de una u otra forma ha de haber algo que lo

sostenga. Hay distintas soluciones en función de la tecnología empleada, de las que hablaremos en el capítulo correspondiente, pero por el momento nos quedamos con la idea de que existe el problema. Es necesario en este punto un proceso de diseño de las estructuras de soporte, y los fabricantes suministran distintos paquetes software más o menos automáticos para esta labor. Una vez diseñados los soportes, se deben manejar juntos el fichero de pieza y el de su soporte.

El paso siguiente es la obtención de las «capas» a partir del modelo de triángulos, tanto para pieza como para soporte. Se define el espesor de capa con el que se va a fabricar de acuerdo con la tecnología que se va a emplear. El proceso se denomina slicing o rebanado, y consiste en dividir el objeto en lonchas de espesor igual al espesor de capa seleccionado, a partir de la posición inferior del mismo y de acuerdo a la orientación seleccionada. Cada capa define las líneas de contorno de la parte del objeto que a esa posición concreta es sólida. En cierto modo es como si se cortara una barra de pan en rodajas del mismo ancho.

En la ilustración siguiente se representa esquemáticamente los pasos mencionados:

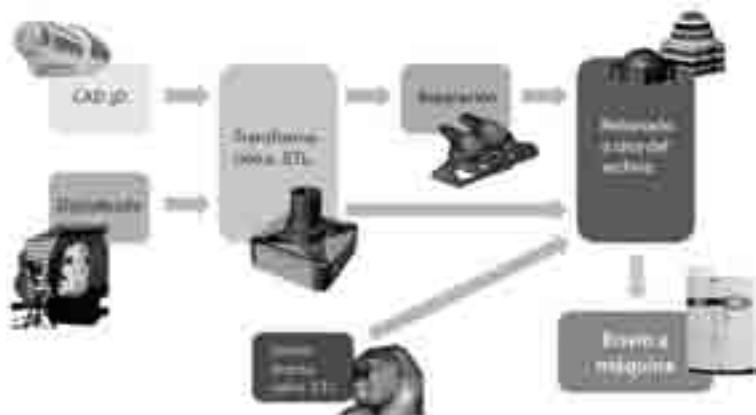


Ilustración 34: Proceso de fabricación. Del fichero CAD 3D a la máquina

Es importante notar que esta tarea no se puede hacer en ningún caso a mano, sino que es necesario el uso de ordenadores y programas adecuados. Este paso es crucial para determinar la fabricabilidad del objeto final y genera los datos que alimentan a las máquinas, es decir, a los sistemas de AM propiamente dichos. El proceso de rebanoado o *slicing* descrito anteriormente es el núcleo del que emanan las características diferenciales de los procesos AM. Es en este paso en el que se rompe un único problema de elevada dificultad (fabricar cualquier objeto de geometría compleja) en un número elevado de tareas sencillas (fabricar objetos de dos dimensiones y adherirlos en un determinado orden). Por muy compleja que resulte la geometría en una capa, el problema se reduce a definir contornos cerrados y a definir dónde es «dentro» o material sólido y dónde es «fuera», es decir, dónde no debe haber material.

Es interesante destacar en este punto que en el proceso de discretizado por capas de espesor homogéneo se pierde cierta información respecto a la geometría del objeto, de una forma similar a la simplificación que se hace para generar los mapas topográficos del terreno, en los que dependiendo de la resolución vertical se asigna a cada «oncha» una altura uniforme en toda ella; del mismo modo, al «rebanar» los objetos se hace una simplificación en la que este se divide en un número de capas (que resulta de dividir la altura total entre el espesor de capa, uniforme para todas ellas) y a cada capa se le aplica como curva de contorno la correspondiente al corte del objeto por el plano a la altura de la base de la capa, siendo las paredes de la capa verticales.

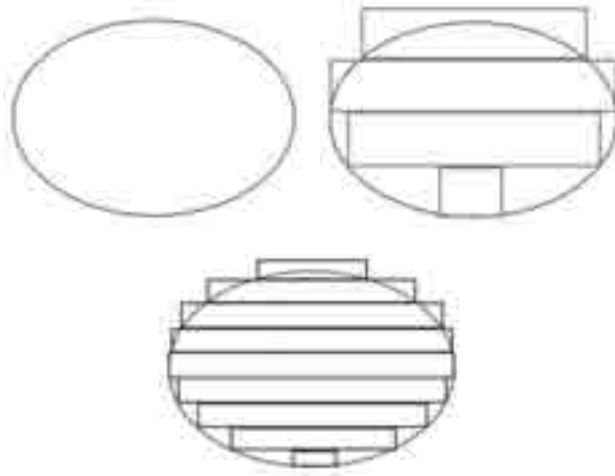


Ilustración 35: Ejemplos de *slicing*: al discretizar se pierde información geométrica, proporcional el espesor de capa

De aquí resulta obvio que cuanto menor sea el espesor de capa con el que se fabrique, con respecto a la altura del objeto, tanto mejor resulta el acabado de la pieza final. Este acabado de las piezas en los que es visible una cierta trama de líneas horizontales es característico de los productos fabricados por AM, y es muy evidente en los planos con poca inclinación respecto al plano horizontal, y tanto más cuanto mayor es el espesor de capa, no siendo así en las paredes puramente verticales respecto al plano de fabricación. Este efecto en ciertas zonas resulta similar a las vetas naturales de madera, con lo que incluso puede ser buscado a propósito y utilizado con fines estéticos.

El último paso de la cadena es la fabricación propiamente dicha en una máquina adecuada, de entre las distintas tecnologías disponibles, unas comerciales y con mayor o menor éxito, y otras que aún no lo son. Todas ellas tienen en común que crean una capa y a ella adhieren la inmediata superior, y así sucesivamente hasta completar el objeto.

Una vez terminado el proceso de fabricación, y según la tecnología empleada, es necesario extraer las piezas de la cuba, recuperar el material no empleado (en los sistemas de lecho completo), cortar los soportes que unen las piezas a la plataforma (según el caso), arrancar los soportes de las piezas (si procede), y posprocesar hasta obtener el acabado superficial requerido. Una vez más, dependiendo de la tecnología y material empleado, estas tareas pueden ser casi inexistentes o representar una carga de trabajo importante que hay que añadir al proceso. En algunos casos es imprescindible recurrir a tratamientos térmicos posteriores, infiltrado de otros materiales, etc.

anexo

3

**DESCRIPCIÓN
DE TECNOLOGÍA
DE AM**

En términos generales se trata de procesos de adición progresiva de material a la pieza y la consolidación del mismo en su posición. Se pueden clasificar las diversas tecnologías disponibles según dos criterios: por método de aporte de material y por el de aporte de energía para la consolidación.

El material de construcción se puede aportar en diversos estados: sólido en polvo, sólido en varilla o hilo, en lámina de espesor constante, o líquido. Según el método de aporte de material se distinguen tres sistemas:

- *Punto*: Aportan selectivamente el material punto a punto (que se consolida a continuación); emplean sistemas de boquillas de inyección o extrusión, de un solo orificio. El elemento aplicador o boquilla se desplaza en el plano mediante un sistema de dos ejes de movimiento coordinado (interpolado) dentro de los límites del área de trabajo, depositando el material en las posiciones requeridas, desplazándose por tanto en trayectorias rectas o curvas. Es equivalente a un plotter de plumilla.
- *Línea*: Aportan selectivamente el material en líneas o en conjuntos alineados de puntos (incluso matrices discretas de puntos) mediante inyector multicanal. El elemento aplicador realiza movimientos en secuencia de

barrido en el plano. En cada barrido los inyectores van depositando selectivamente el material en las posiciones, abriendo o cerrando individualmente los inyectores. Al finalizar el primer barrido el cabezal vuelve a la posición inicial y se desplaza a la siguiente zona, repitiendo el proceso hasta cubrir la superficie de trabajo. Es equivalente a una impresora matricial.

- *Lecho*: Aportan material en exceso y sólo consolidan el que ocupa la posición deseada; se denominan sistemas de lecho completo. En estos sistemas se produce una aplicación de una capa de material que ocupa y rellena perfectamente toda el área de trabajo, con un espesor igual a la altura de capa con la que el sistema trabaja y contenido por las paredes verticales del volumen de construcción. El elemento que aplica la capa se llama recoater y puede variar de unos sistemas a otros (una cuchilla rasante, una tolva con apertura inferior, un rodillo, etc.), pero la función es siempre la misma: aplicar y alisar una capa uniforme de material de aporte.

Por otro lado, la agregación del material para formar una capa sólida y la consolidación entre cada capa, y con las próximas a ella, requiere un aporte de energía o de adhesivo, lo que también es determinante de la calidad final del producto resultante y de sus características mecánicas, eléctricas, etc. Se pueden clasificar también los métodos de aporte de energía para la solidificación del material y consolidación de capas según la densidad de aplicación de la energía, de forma similar a como se ha hecho con los sistemas de aporte de material:

- *Sistemas 0D*: La energía se aplica focalizada en un punto y, describiendo trayectorias, este punto recorre toda la superficie que se debe solidificar en cada capa.
- *Sistemas 1D*: La energía se aplica en forma de líneas que, al desplazarse, cubren toda la superficie de la capa.

- *Sistemas 2D*: Se aplica la energía simultáneamente a toda una capa. En este caso hay dos variantes, a saber, aplicación a toda la capa cuando se ha depositado material selectivamente, o aportación en forma de máscara cuando el material se aplica en lecho completo.

En general el aporte de energía se realiza en forma de calor o de luz ultravioleta. Con calor se puede producir fusión de metales o termoplásticos, o polimerización de ciertos plásticos, mientras que otros materiales son fotosensibles y sufren un proceso de curado y solidificación al someterlos a radiación ultravioleta.

La combinación del método de aporte de material con el de aporte de energía determinan la rapidez esperada del sistema. Es fácil comprender que si la construcción aditiva debe ser selectiva en cuanto a qué puntos deben solidificarse y cuáles no, si empleamos sistemas de aporte de material en exceso, la energía se debe aplicar de forma selectiva y localizada, mientras que si aportamos el material de forma selectiva, el aporte de energía puede ser desfocalizado.

La fuente de energía y los sistemas de posicionamiento son los dos elementos que determinan en gran medida el coste de inversión de las máquinas de AM; y de la calidad de los sistemas físicos que posicionan el material en la localización deseada o que aportan la energía concentrada en las posiciones requeridas, depende la precisión y reproducción geométrica en la pieza fabricada.

Hay otro elemento más que es común a todos los sistemas y es el elemento mecánico de movimiento de cambio de capa. Como no se puede construir en el aire, se debe disponer de una plataforma sobre la que se deposita y adhiere el material correspondiente a la primera capa en los sistemas de aporte selectivo o que se cubre completamente de material en los sistemas de aporte masivo. Se suele denominar plataforma de construcción. Una vez finalizada la construcción de la primera capa sobre la plataforma,

esta desciende el espesor correspondiente al espesor de una capa, de modo que la máquina genera la siguiente, y así sucesivamente. La altura de construcción de piezas está, pues, limitada por la carrera máxima del sistema de desplazamiento de la plataforma de construcción. Es un elemento delicado porque de su precisión depende en gran medida la precisión geométrica de la pieza fabricada, y a la vez debe soportar todo el peso de la pieza y del material aportado para rellenar el volumen de fabricación en el caso de sistemas de lecho completo. En las máquinas de gran capacidad que existen actualmente (Mammoth de Materialise o la SLM 500 de MTT Group) este peso puede representar varias toneladas de material.

A continuación se explican brevemente los principales procesos de AM, que se resumen en la siguiente tabla con la clasificación atendiendo a los criterios definidos anteriormente.

	Aporte de energía		
Aporte de material	0D (punto a punto)	1D (línea)	2D (capa completa)
Punto	Laser Consolidation FDM	—	—
Línea	—	Polyjet	—
Lecho	SLA, SLS, EBM, DMLS, SLM Laser Cusing	ZCorp Araldite MLS	DLP SMS

ESTEREOLITOGRAFÍA-SLA. LECHO LÍQUIDO 0D

A esta se la considera la precursora del resto de tecnologías de prototipado rápido. La primera patente fue realizada por Chuck Hull en 1986, originando la primera máquina de 3D Systems en 1987. Esta técnica de fabricación consiste en solidificar resinas en estado líquido y

sensibles a la luz ultravioleta mediante un láser, capa a capa. El láser «dibuja» la parte que en cada capa corresponde a sólido sobre la superficie del material líquido contenido en una cuba, de modo que el material no afectado por la luz permanece líquido y el expuesto a la radiación se agrega y solidifica. La plataforma de construcción en el fondo de la cuba baja el equivalente al espesor de una capa y se rellena el nivel con líquido de aporte y, dada la viscosidad de este, se debe eliminar el exceso con un recoater. Los espesores de capa típicos son de unos cien micrómetros. Permite fabricar piezas con geometrías muy complejas y espesores muy finos, y existe una amplia variedad de resinas epoxi actualmente en el mercado para conseguir características muy diversas, como transparencia, flexibilidad, materiales biocompatibles, etc. No en vano es la tecnología más extendida y antigua. Uno de los problemas es el de las medidas de prevención de los trabajadores para el manejo de las resinas base epoxi.

Las características de los materiales se degradan en mayor o menor medida a lo largo de la vida del producto si está, por ejemplo, expuesto a la luz solar, lo que provoca un curado continuo, y no son resistentes a la temperatura, afectando ambos factores a las propiedades mecánicas. Durante la fabricación se necesitan estructuras de soporte para las partes en voladizo y para unir las piezas a la plataforma de construcción. Estos soportes y uniones son del mismo material, se fabrican a la vez y deben ser eliminados a posteriori de forma manual, ya que dejan marcas en la pieza, lo que obliga a un lijado posterior. Ese hecho puede imposibilitar la realización de ciertas piezas con cavidades internas de gran tamaño a las que no se pueda acceder al eliminar el soporte.

La empresa belga Materialise ha desarrollado la máquina de AM más grande del mundo, que está basada precisamente en tecnología de estereolitografía, con una capacidad de trabajo de 2100 x 700 x 800 mm.

ARALDITE DIGITALIS. LECHO LÍQUIDO 1D

Es el sistema de AM más reciente, y fue presentado en diciembre de 2008. Se trata de tecnología de lecho líquido de resinas fotosensibles, al igual que la estereolitografía. El curado selectivo se realiza de un solo paso mediante un brazo transversal que realiza un movimiento lineal de velocidad constante a lo largo de la cuba. En este brazo va alojada una fuente de producción de luz que es colimada y canalizada mediante fibra óptica hacia una placa en la que se distribuyen uniformemente un total de 40.000 microobturadores o *Micro Light Switches*. Estos elementos se accionan individualmente e interrumpen o no el paso de la luz, dando lugar a una matriz o máscara de una sola línea, de modo que realiza un solo barrido por capa. La resolución horizontal es de 10 micras en sentido transversal y es seleccionable ajustando la velocidad de barrido del brazo, de modo que a mayor velocidad los pixel resultan alargados hasta 10, 50 o 125 micrómetros. Se trata de sistemas muy rápidos comparados con SLA, aunque con los inconvenientes de los materiales. También se necesitan estructuras de soporte, con los mismos inconvenientes y problemas ya señalados. El movimiento descendente de la base de la cuba y el de rellenado de material hasta el nivel configuran el crecimiento vertical, en capas de 50 a 150 micrómetros.

DIGITAL LIGHT PROCESSING O PROYECCIÓN POR MÁSCARA-DLP. LECHO LÍQUIDO 2D

Es un sistema de resina líquida fotosensible con dos particularidades importantes. La primera, y de importancia tecnológica, es que realiza la exposición selectiva a capa completa mediante un proyector digital de tecnología DLP (de Texas Instruments) Esta tecnología se basa en una matriz de espejos (uno por pixel) movidos por microactuadores, de modo que según estén activados o no reflejan hacia la cuba la luz de una fuen-

te intensa. En aquellos puntos en los que incide la luz el material se solidifica, mientras que el resto permanece en estado líquido. Como indicamos, la exposición selectiva se produce de forma simultánea para toda la capa. La tecnología seleccionada es DLP porque, entre los sistemas de proyección, es la que da mayor contraste y definición del borde del píxel.

Los materiales son resinas acrílicas fotosensibles que imitan las prestaciones de los termoplásticos o materiales basados en ceras, ideales para procesos posteriores de micro-fusión. Se consigue con esta tecnología uno de los mejores acabados superficiales y precisión dimensional, y el tiempo de fabricación no depende de las dimensiones de las piezas como ocurre en otros procesos, precisamente por exponer toda la capa de una vez, aunque sí de la altura máxima (número de capas) y de la resolución.

La segunda particularidad tecnológica es que en estas máquinas el sistema de exposición está situado bajo una pantalla transparente en el fondo de la cuba de trabajo. La primera capa se expone sobre una plataforma a la que se adhiere; seguidamente la plataforma de construcción se mueve hacia arriba el equivalente al espesor de una capa, rellenándose el hueco con aporte líquido en exceso, que queda en contacto con el material ya solidificado. El proyector DLP proyecta entonces la imagen de la nueva capa, que se solidifica sobre la anterior, la plataforma asciende, y así sucesivamente hasta completar la pieza. Tampoco necesita un nivelado perfecto de la capa como el resto de sistemas de lecho completo, porque la zona a exponer está sumergida.

También existe la necesidad de estructuras de soporte para mantener las piezas sujetas a la plataforma y para sujetar a ella los elementos con voladizo.

POLYJET. LÍNEA 1D

Esta tecnología utiliza resinas líquidas, de formulación propia, de material sensible a la radiación ultravioleta.

Fue desarrollada por la empresa Objet Geometries Ltd., de Israel, quien comercializó la primera máquina en abril del año 2000. Permite imprimir el material mediante cuatro inyectores, con 96 orificios de actuación independiente en cada uno. Los inyectores están ubicados en un cabezal móvil en X e Y. La deposición se realiza en capas de 16 micrómetros, de manera similar a como lo hace una impresora convencional de chorro de tinta, con movimiento del cabezal de izquierda a derecha y sucesivos barridos hasta completar la superficie de trabajo, pero sobre una bandeja de construcción en lugar de sobre un papel. En ambos lados del cabezal móvil van instaladas dos lámparas ultravioleta, de modo que, al moverse el cabezal de izquierda a derecha depositando el material, se produce el curado del mismo instantes después de su deposición. El posterior descenso continuado de la bandeja de construcción y repetición del proceso permiten obtener finalmente la pieza.

En esta tecnología es necesario el uso de soportes; para ello el cabezal dispone de otros cuatro inyectores idénticos, que en cada capa depositan donde procede un material específico para esta función, de forma simultánea al material de aporte. El soporte curado es blando y se retira fácilmente con la mano o mediante chorro de agua, dejando poca o ninguna marca sobre la superficie de la pieza. Esta tecnología consigue uno de los mejores acabados superficiales de las descritas y se usa en muchas ocasiones para fabricar piezas máster con las que luego realizar copias por otras tecnologías como es el caso de moldes de silicona por colada al vacío, microfusión, etc. Además, el lanzamiento en 2008 de la primera máquina de fabricación multimaterial ha significado una gran innovación en el sector y confirma una de las principales tendencias en AM. Esta máquina puede trabajar con dos materiales diferentes de modo que ciertas partes de la pieza pueden ser de un material u otro, o de mezclas de ambos en distintas proporciones.



Ilustración 36: Piezas fabricándose mediante la tecnología
Objet Polyjet

IMPRESORAS 3D 3DP. LECHO POLVO 1D

Existe cierta ambigüedad en el uso de este término, ya que han sido varios los fabricantes que han posicionado sus máquinas en este sector, y por tanto distintas las tecnologías involucradas. La mención a *Impresoras 3D* pretende hacer llegar al mercado la imagen de que se trata de algo tan sencillo, limpio, económico y fácil como una impresora de papel, pero en tres dimensiones. Es más, algunas marcas han pasado a posicionar sus productos desde el original de «Prototipado Rápido» a «impresoras 3D» y, a continuación, cuando la nueva tendencia es la fabricación, cambian su marketing para llamarlos *Rapid Manufacturing*, tratándose del mismo fabricante y la misma tecnología.

Nosotros preferimos asignar este nombre a los sistemas desarrollados por el MIT en 1995 y licenciados en exclusiva a la compañía Z Corporation, quien comercializa la primera máquina en 1996.

Las impresoras 3D de Z Corporation utilizan inyectores estándar de impresoras de chorro de tinta para depositar selectivamente micro gotas de un adhesivo diluido sobre un lecho de polvo. Los materiales tienen base de yesos adecuadamente formulados y, en aquellos puntos en los

que se deposita adhesivo, se aglutina y reacciona para formar un cuerpo sólido. La plataforma de construcción baja el espesor de una capa y un *recoater* de rodillo aplica una nueva capa sobre la anterior. La humedad remanente permite fijar parcialmente el polvo de la nueva capa sobre ella. Un nuevo avance del brazo con el cabezal recorriéndolo continuamente genera una nueva capa, y así sucesivamente, como haría una impresora de chorro de tinta convencional.

La característica diferencial de estas máquinas es que existen modelos con cuatro depósitos de líquido, uno para el adhesivo y otros para tintas de colores, y el cabezal dispone a su vez de tantos inyectores como depósitos. Esto permite imprimir piezas directamente en color exactamente igual a cualquier impresora de chorro de tinta sobre papel. El modelo más reciente de Z Corporation dispone de sistema de cuatricomía (YCMB) lo que mejora el rendimiento de color y contraste.



Ilustración 37: Impresora 3D y prototipo a color.
Cortesía de Z Corporation

La desventaja de estos sistemas es que la resolución vertical no es muy buena (90 micrómetros por capa) y que las piezas salidas de máquina son frágiles, tienen un aspecto arenoso y colores apagados. Es necesario un procesado cuidadoso de limpieza y soplado, que según la compleji-

dad puede llegar a ser imposible (se rompen al manipular incluso con pinceles finos). A continuación se deben infiltrar con cianocrilatos (piezas en color), agua (piezas transparentes con baja resistencia) o incluso epoxi para mayor resistencia sacrificando el color.

Disponen también de materiales alternativos, como el *Zcast*, que permite imprimir moldes o machos para colada de fundición de aleaciones de materiales no férricos. El material más reciente (2010) se cura con agua aditivada con sales y mantiene el color vivo.

Aunque en esta tecnología se podrá prescindir de los soportes, estos pueden llegar a ser necesarios si los voladizos corresponden a elementos de paredes muy finas.

SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO DE MATERIALES POLIMÉRICOS SLS. LECHO POLVO OD

Esta tecnología fue inventada y patentada por Ross Householder en 1979, pero fue comercializada por la Universidad de Texas a final de los años ochenta, lo que dio lugar a la empresa DTM Corporation, quien lanzó su primera máquina en el año 1992. En 1994, la empresa alemana EOS GmbH lanzó al mercado la primera máquina EOSINT-P, que cubre una parte muy importante del mercado actual de este tipo de sistemas.

En este proceso un recoater aplica una capa de polvo homogénea y un láser dibuja las zonas que para esa capa deben ser sólidas, de forma similar a lo descrito en las de estereolitografía. Para mejorar el proceso el material se calienta en la cuba hasta la temperatura de transición, de modo que el láser solamente debe aplicar la energía necesaria para fundir el material (que ya se encuentra polimerizado) y volver a solidificarse. Una de las desventajas de este proceso es que el enfriamiento de toda la cuba (material sin solidificar envolviendo a las piezas) debe ser lento

para que no se produzcan deformaciones en la piezas de modo similar a la inyección de plástico. Este proceso puede requerir un tiempo igual al de producción, lo que va en detrimento de la productividad del sistema. Los espesores típicos de fabricación son de unas cien micras. En el año 2010 EOS GmbH empezó a comercializar sistemas con capas de 60 micrómetros.



Ilustración 38: Máquina de sinterizado láser en poliamida EOS Formiga en instalaciones de la Fundación Prodiotec

El material habitual es la poliamida 12 o poliamidas cargadas con fibra de vidrio, aluminio, fibra de carbono u otros aditivos para mejorar las características mecánicas del producto final. En el año 2009 EOS GmbH presentó el primer sistema del mundo para fabricar piezas en PEEK (*Poliéter éter ketona*), plástico técnico de muy altas prestaciones. La gran ventaja de esta tecnología es que no se necesita generar estructuras de soportes, permitiendo fabricar me-

canismos, ejes bisagras, elementos flexibles, muelles, etc., lo que unido a las excelentes características de los materiales, los convierten en sistemas de gran éxito comercial y para aplicaciones prácticas de fabricación en serie. Es probablemente el sistema que más fielmente representa y refleja todas las virtudes y ventajas de las tecnologías de AM.

SINTERIZADO SELECTIVO DE MATERIALES POLIMÉRICOS POR MÁSCARA SMS. LECHO POLVO 2D

En esta tecnología se sinteriza el material en polvo mediante radiación IR proyectada sobre una máscara, es decir, cada capa se expone en una sola vez. La nueva empresa Sintermask GmbH, fundada en 2009, aún varias patentes tecnológicas en la producción de máscaras y en la alimentación de polvo, y espera poner en venta sus sistemas «Zorro» en 2010. Este sistema proporcionará un volumen de trabajo de 300 x 200 x 800 mm con una resolución horizontal declarada de 20 x 20 micrómetros y espesores de capa de entre 50 y 150 micras, con capacidad de procesar materiales hasta 450 °C. La gran ventaja de estos sistemas, derivada de su funcionamiento por máscara, es su gran velocidad.

SINTERIZADO SELECTIVO LÁSER METÁLICO Y CERÁMICO. LECHO POLVO 0D

Durante los años noventa, tanto la empresa DTM como EOS GmbH desarrollaron esta tecnología orientada a la fabricación de núcleos complejos para fundición en arena. Para ello se utiliza arena o cerámicas con un ligante (resina) como material de aporte. Mediante un láser se funde el ligante en aquellas zonas en las que en la capa en

cuestión corresponde a sólido. Al fundirse solo uno de los materiales, se llama «selectivo». Durante la fase líquida moja y adhiere al material de aporte, que queda fijado al enfriar y solidificar el ligante. La bandeja de construcción baja el espesor de una capa, el *recoater* aporta y nivela más material, y el proceso se repite hasta la altura completa. La pieza obtenida es frágil (verde). En el caso de la arena para machos de fundición, ya se puede usar directamente.

DTM procesa metales con esta misma tecnología. La pieza en «verde» así formada se somete a un proceso térmico, en el que el ligante se elimina dejando un esqueleto poroso de metal, que se rellena por una infiltración con bronce, obteniéndose así la pieza definitiva formada por dos metales. Las características de los productos así obtenidos son pobres y el proceso resulta muy largo e impreciso, comparado con la fabricación directa de piezas que se indica a continuación.

DIRECT METAL LASER SINTERING: DMLS. LECHO POLVO OD

Durante los años noventa, la empresa alemana EOS GmbH desarrolló una variante del proceso de sinterizado selectivo, en el que tanto el ligante como el material de aporte son metálicos. El ligante es una aleación de bajo punto de fusión como el bronce. La máquina se carga con una mezcla homogénea pulverizada en grano fino del material ligante y los materiales de aporte, como Ni, u otros aceros de buenas cualidades. Al incidir el láser, la aleación ligera se funde y moja el material de aporte, para enfriar y solidificar a continuación. De este modo se evita el paso de la eliminación del ligante y la infiltración en horno de tratamiento. Los productos obtenidos de forma directa tienen más precisión geométrica, más densidad, menos porosidad y mejores propiedades térmicas que en el caso anterior.



Ilustración 39: Proceso de sinterizado láser y máquina EOS M270 Fundación Pro dintec

Posteriormente EOS GmbH presenta una nueva generación de máquinas dotadas con láser de estado sólido y fibra óptica, cuya longitud de onda es absorbida por los metales, lo que da lugar a que se puedan fabricar piezas directamente en aleaciones comerciales, como aceros de herramienta, aceros maraging, inoxidable, aleaciones de cromo-cobalto, titanio y aleados, aluminio, *inconel*, *hastelloy*, etcétera. Las propiedades de estos materiales equivalen en ciertos casos a las de las aleaciones comerciales con el mismo nombre, en cuanto a características mecánicas, eléctricas, composición química, etc.

El peor inconveniente de esta tecnología es la necesidad de un esmerado diseño de los soportes, que cumplen varias funciones:

- Mantener la pieza sujeta a la plataforma
- Soportar los voladizos
- Conducir y disipar parte del calor de fusión para reducir las tensiones internas.

La eliminación de los soportes es una tarea manual ardua que limita notablemente la expansión de esta tecnología; incrementa el coste de pieza en concepto de postprocesado, mecanizado, pulido, etc.

Hay varios fabricantes que emplean este proceso de fusión por láser de metales y le asignan distintos nombres: mien-

tras EOS GmbH mantiene el antiguo de *DMLS*, Concept Laser GmbH (grupo Hofmann) lo denomina Laser Cusing, MTT Technologies le da el nombre de *Selective Laser Melting* o SLM.

ELECTRO BEAM MELTING: EBM. LECHO POLVO 0D

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 200 μm (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.

Recientemente, la empresa ARCAM ha desarrollado la tecnología EBM MultiBeamTM, que utiliza la electrónica de control para dividir el haz de electrones en múltiples haces de electrones de menor potencia; esta estrategia permite fundir múltiples zonas del área de trabajo simultáneamente controlando la cantidad de energía suministrada en cada punto. Este avance permite obtener mejor acabado superficial, detalles y estructuras porosas 3D sin perjuicio de la productividad.

Como en otras tecnologías de AM, algunas regiones de la pieza pueden requerir soporte para asegurar una correcta

fabricación. En el caso particular de la tecnología EBM, este soporte es añadido para evacuar el exceso de calor de la zona de la pieza donde incide el haz de electrones, ya que se dispone de mayor potencia. Estos soportes se pueden retirar fácilmente y es deseable orientar la geometría, de forma que se añadan los soportes donde la pieza requiera un mecanizado posterior. Además, al procesar con alta temperatura, añade la ventaja de que el polvo no procesado se encuentra en un estado semisinterizado que tiene la capacidad de soportar algunas zonas geométricas; esta característica le permite ser la única tecnología de AM de metal que puede fabricar estructuras 3D sin necesidad de utilizar soportes.

El vacío en la cámara de trabajo le permite procesar materiales metálicos reactivos, como es el caso de las aleaciones de titanio o aluminio, y conseguir una alta pureza en el proceso de fusión.

La tecnología EBM se caracteriza por su alta productividad comparada con tecnologías SLM, pudiendo llegar a procesar hasta $60 \text{ cm}^3/\text{hora}$ de material gracias a los 3000 W de potencia del haz de electrones.

Esta tecnología fue por primera vez comercializada por la empresa sueca Arcam en Goteborg en 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 preci-

sión y acabado de las piezas. El proceso se encuentra limitado a materiales conductores y a superficies que como en otros procesos de este tipo necesitan un posprocesado 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.

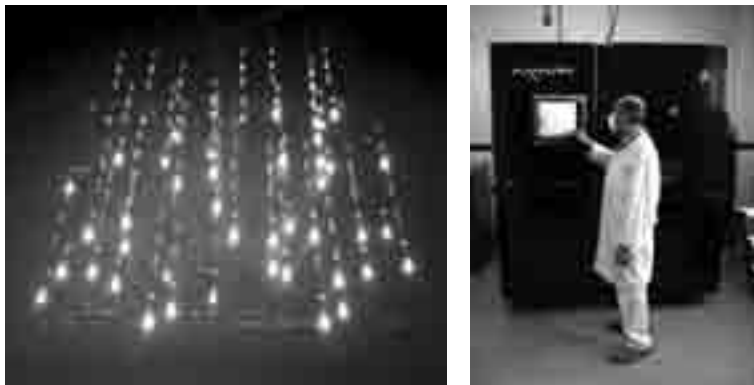


Ilustración 40: Imagen de proceso EBM MultiBeamTM y ARCAM: A2 en las instalaciones de AIMME

FUSED DEPOSITION MODELING: FDM. PUNTO OD

Este proceso, comercializado por primera vez por Stratasys en 1991, está basado en hacer pasar un hilo de material de aporte, normalmente ABS aunque se puede ajustar para otros termoplásticos, por una boquilla caliente. El material se funde y se extruye a través de dicha boquilla, de modo que cede parte de su calor al material ya enfriado depositado en la capa anterior sobre la que se apoya, y al que por lo tanto se adhiere, y se solidifica formando el aporte de la nueva capa.

La boquilla debe ir recorriendo en trayectorias más o menos complejas toda el área que en cada capa corresponde a material sólido. Hay máquinas que disponen de varias boquillas y varios cargadores de carretes de hilo, con lo que pueden fabricar piezas de distintos colores, aunque no pueden mezclarlos. Esta tecnología necesita soportes que se realizan en el mismo material y por tanto son tan resistentes como la propia pieza, que a posteriori deben ser eliminados, dejando marcas visibles. Los sistemas que se comercializan no requieren personal altamente cualificado, son bastante autónomos y necesitan un escaso mantenimiento. Son por otro lado lentos, lo que penaliza mucho su productividad, y la calidad superficial de los modelos es muy baja en comparación con otros procesos.



Ilustración 41: FDM máquina con prototipo fabricado y proceso de fabricación. Cortesía de Dimension uPrint

LASER CONSOLIDATION O LASER CLADDING. PUNTO OD

Podemos decir que estas tecnologías nacen como evolución de las de soldadura y recargue láser. Este grupo de tecnologías 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 concen-

trada 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 AM 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.



Ilustración 42: Proceso de *Laser Consolidation*. Pieza en proceso de fabricación. Cortesía de Accufusion

En principio no existen limitaciones a los materiales de aporte salvo las relativas a parámetros de proceso de sol-

dadura. No se realizan estructuras de soporte, aunque en ciertas geometrías pueden llegar a requerirse, y teóricamente se podrían construir. Estas tecnologías entran dentro del AM 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.

IMPRESORAS 3D EN PIEDRA D-SHAPE. LECHO POLVO 1D

Aplicando el principio de las impresoras de chorro de tinta o de las antes mencionadas impresoras 3D, el inventor Enrico Dini crea en la empresa D-Shape la primera máquina que construye edificios mediante un proceso capa a capa. El área de trabajo es actualmente de hasta 6 m x 6 m, y con alturas de hasta 9 m, convirtiendo este sistema en el más grande disponible. El material utilizado es arena con una serie de ligantes, y el adhesivo se deposita selectivamente en gotas, con base agua. El producto resultante después del fraguado presenta características mecánicas similares a mármol, con un agradable aspecto de vetas debido a las capas.



Ilustración 43: Máquina de fabricación aditiva en piedra para grandes construcciones. Cortesía de D-Shape

La diferencia principal con las impresoras 3D es que no utiliza cabezales de impresión estándar, sino que el cura-

do selectivo se realiza de un solo paso mediante un brazo transversal que realiza un movimiento lineal de velocidad constante a lo largo de la cuba. En este brazo van alojadas tantas electroválvulas como píxeles de resolución se tengan. La precisión geométrica ronda los 10 mm y se trabaja en capas de entre 5 y 10 mm según la velocidad de construcción deseada. El material no consolidado actúa de soporte y, una vez terminado el fraguado, se puede retirar y reutilizar en otras construcciones. El material fraguado se puede pulir.

anexo

4

**LA IMPORTANCIA
DEL DISEÑO
EN EL AM**

Merece especial atención hacer referencia a la importancia que tiene el proceso del diseño de productos en este tipo de tecnologías, cuya característica principal ha llevado a definirlo por cuanto supone de libertad de formas en el proceso de fabricación, denominándolo «fabricación libre de formas» o *freeform fabrication*.

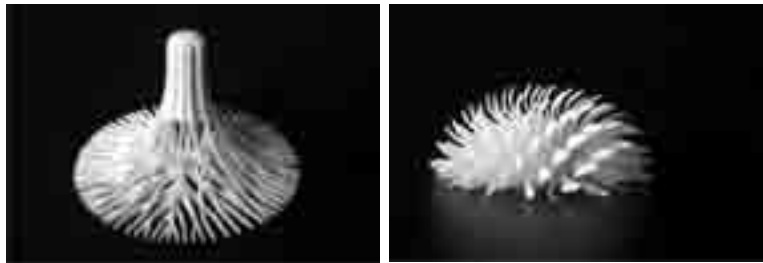
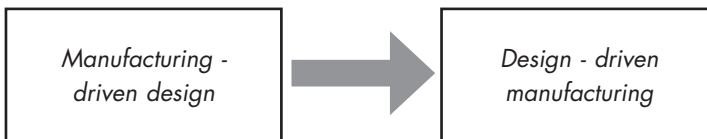


Ilustración 44: Cortesía de Moldkar y Axis.
Diseño KX designers y CloneNature

Esta característica se basa en la libertad que tiene el diseño a la hora de concebir un producto, al no estar este limitado por las restricciones existentes en los actuales procesos de fabricación. Este hecho queda muy bien reflejado en una frase acuñada por la empresa fabricante de maquinaria EOS GmbH, al afirmar que existe un cambio de paradigma frente a lo que se venía considerando hasta aho-

ra, donde los diseños se encontraban limitados por los procesos de fabricación: «...del diseño dirigido por la fabricación, a la fabricación dirigida por el diseño...». De manera resumida esto significa que siempre y cuando algo se pueda diseñar (concebir, imaginar...), será fabricable. El cuello de botella, la restricción, se sitúa ahora en el ingenio y las capacidades del diseñador y en los sistemas de diseño CAD 3D que tradicionalmente se han venido utilizando y que han sido concebidos para los procesos convencionales de fabricación, con todo lo que ello conlleva de inimaginables nuevas posibilidades que cambien radicalmente algunos productos tal y como los conocemos actualmente.



Esta libertad en el diseño ofrece algunas ventajas en distintas áreas de particular interés:

- *Complejidad y optimización en el diseño.* En procesos actuales de fabricación digamos aditivos, como es el caso de grandes estructuras (edificios, puentes...), es muy común la aplicación de técnicas de elementos finitos para optimizar el diseño y conseguir la mínima utilización de material para conseguir los requerimientos de esfuerzos solicitados. Este mismo principio es aplicable al diseñar piezas y componentes industriales mediante AM. Esto no ha sido posible hasta ahora al aplicar en la mayoría de los casos procesos de fabricación sustractivos. Cuando se utilicen procesos de AM, se tratará de situar el material allí donde sea posible y de realizar el diseño que cumpla con los requisitos finales del producto.
- *Integración de componentes.* La optimización del diseño también puede venir por la reducción de compo-

nentes innecesarios. Conociendo la función final de la pieza, es posible el diseño orientado a la fabricación, incluso en una sola pieza, cuando por métodos sustractivos o conformativos serían necesarios distintos componentes, al tener geometrías internas que requieren distintas piezas que luego han de ser ensambladas, aisladas entre sí..., todo esto supone diseñar un complicado mecano que posteriormente ha de ser montado. Mediante AM es posible fabricar la pieza directamente cumpliendo todas las funcionalidades de una sola vez.

El AM es ya una realidad cuando se trata de fabricar volúmenes de componentes bajos o medios. Para grandes volúmenes la tecnología no es aún competitiva frente a los métodos de fabricación sustractivos o conformativos, como son la inyección, estampación... Habrá que esperar a que la tecnología avance para poder ir ganando nichos de mercado en componentes de gran demanda. No obstante, hay que ir valorando en cada uno de los casos no solamente el aspecto de la cantidad, sino ir añadiendo las ventajas que este tipo de tecnología aporta a los productos y que son variables fundamentales a la hora de estudiar la viabilidad técnica y económica de un nuevo producto y, lo más importante, decidirse por un método de fabricación u otro.

El diseño del producto supone un factor clave en este proceso. La experiencia actual indica que en muchas ocasiones el intentar fabricar un producto, pieza, componente, diseñado para un proceso de fabricación convencional, no suele ser competitivo hacerlo mediante tecnologías de AM. La explicación es sencilla: no ha sido diseñado expresamente para este tipo de fabricación, muchas veces a causa del desconocimiento actual de las oportunidades que esta tecnologías ofrece al diseñador.

Una vez conocidas las ventajas y oportunidades que esta tecnología ofrece, el diseñador verá abrirse ante él un mundo de nuevas posibilidades de redefinir el producto, por lo que será capaz de realizar un cambio radical en la

concepción de nuevos diseños, al ser él el verdadero cono- cedor de la pieza o componente que hay que desarrollar, pero lo que es aún más importante, de la función que di- cha pieza tiene y del resto de componentes que forman parte del conjunto final. Este cambio se va a producir des- de la idea conceptual más básica del producto hasta el diseño de cada una de sus partes y su integración dentro del conjunto. Para ello es necesario realizar realmente una abstracción de la idea actual del diseño y liberarse de las restricciones que tradicionalmente han sido necesarias y se han tenido en cuenta para poder llegar a fabricar el pro- ducto, fruto de la realimentación constante entre diseñadores y fabricantes.

Cuando se cuestiona realmente cada concepto previo ad- quirido y se piensa únicamente en la mejor forma de dise- ñar para el usuario sin apenas restricciones formales en el diseño, se puede pensar en que el AM es una opción muy competitiva que acompañará nuestro objetivo. Se abren nuevas oportunidades que muy probablemente antes ni si- quiera se habían planteado, que hacen que se superen las dificultades que en estos momentos presentan las distintas tecnologías de AM, como son la limitación de materiales, acabado final de las piezas o el coste de producción.

A pesar de la libertad que supone en el diseño la posibili- dad de fabricar por medio de estos procesos, no hay que olvidar que seguirán existiendo restricciones en el mismo. En el caso del diseño para AM, a la hora de diseñar los componentes habrá que tener en cuenta que casi con toda seguridad y aunque se vaya reduciendo su número y con ello el montaje, seguirá existiendo la necesidad de seguir incorporando otros componentes, posiblemente fabricados por otros métodos que habrá que ensamblar. En muchos casos estos componentes estarán definidos a priori al ser estándar, por lo que el diseñador tendrá que mantener esta restricción ya actual y aunque en menor medida quan- do diseñe alguna de las partes de su producto para ser fabricado mediante AM.

La cada vez mayor integración de inteligencia a los productos mecánicos mediante electrónica embebida (productos mecatrónicos) supone una restricción más en las posibilidades de diseñar con total libertad; es necesario, por ello, tener en cuenta los procesos de ensamblaje, mantenimiento y reciclado de dichos sistemas embebidos en el diseño de productos que incorporen componentes electrónicos. Esto ha de ser así al menos mientras no se dé el paso siguiente, una vez consolidada la fabricación mecánica de componentes mediante estas técnicas, hacia la fabricación combinada de productos mecánicos y electrónicos mediante AM.

Otro aspecto básico hace referencia a las reglas del diseño. El AM supone un cambio radical a la hora de concebir ideas, y las reglas de diseño que existen actualmente y que fueron pensadas y desarrolladas para los procesos de fabricación convencionales, han de ser revisadas y adaptadas para estimular este tipo de fabricación.

Es en este punto donde queda aún mucho por hacer. En la actualidad la experiencia acumulada hasta ahora ha ido permitiendo generar indicaciones generales orientativas a la hora de fabricar por estos métodos. Cada fabricante de maquinaria, cada centro tecnológico y cada empresa de servicios dedicada a estas tecnologías han ido acumulando conocimiento sobre la forma óptima de fabricar distintos tipos de pieza con distintos tipos de procesos. La novedad, unida a la escasa implantación en la industria y a la variedad de tecnologías y productos con los que se ha venido trabajando, hacen que no existan en este momento unas reglas de diseño perfectamente definidas que puedan orientar al diseñador a la hora de afrontar un nuevo diseño de producto con las garantías de que finalmente vaya a cumplir funcional y dimensionalmente.

Al igual que ocurre con las líneas de partición de los moldes, localización de expulsores y puntos de inyección en la inyección de plásticos, la estrategia de amarres en el mecanizado, etc., se hace imprescindible en el AM incluir

en el diseño de los productos la estrategia de fabricación, de manera que se pueda orientar la pieza de la forma más adecuada, bien para salvar posibles desviaciones dimensionales por tensiones generadas en la plataforma de construcción, bien por la orientación de la pieza para evitar daños durante la fabricación de paredes esbeltas o para optimizar los esfuerzos en los distintos ejes x, y, z motivados por la anisotropía inherente al proceso...

Un buen diseñador de producto para AM, al igual que para cualquier otro proceso, debe ser un buen conocedor del proceso de fabricación (conocer sus posibilidades, pero también sus limitaciones y restricciones) y trabajar desde las etapas más tempranas del desarrollo con los responsables de la futura fabricación. La ingeniería simultánea juega un papel fundamental en este tipo de procesos.

La estrategia de fabricación es un apartado muy importante, tanto por la orientación más idónea de la pieza en el espacio o los soportes necesarios en el caso de piezas metálicas, como en las trayectorias a seguir por el láser en el caso de fabricación por esta tecnología, así como en la evacuación del polvo no sinterizado (diseñar agujeros para la extracción de dicho material).

Es necesario asimismo conocer las limitaciones referentes a las dimensiones y tolerancias que cada proceso permite, como es el caso de espesores de pared mínimos, tolerancias que se pueden conseguir en cada uno de los ejes de construcción, etc.

Los requerimientos funcionales de la pieza son también un factor muy importante a la hora de definir la estrategia de fabricación de la pieza, teniendo en cuenta los espesores y gradientes de material dependiendo de los esfuerzos a que estará sometida la pieza.

Algunas reglas generales que se pueden tomar para el diseño orientado al AM son:

- Usar las ventajas que se encuentran incluidas en el proceso de AM.

- No fabricar simplemente las mismas piezas con otros procesos. Tomarse el tiempo necesario para pensar sobre el ensamblaje total, considerando la función básica del conjunto y, a partir de ahí, ir construyendo con total libertad en el diseño.
- No considerar los principios básicos tradicionales del diseño mecánico. No es necesario pensar en posibles dimensiones de material prefabricado, sistemas de coordenadas ni posibles ejes de simetría para las máquinas.
- Reducir el número de piezas en los ensamblajes mediante la integración inteligente de funciones. Esto reduce los costes de montaje.
- Prestar atención a la posibilidad de utilizar soluciones biómiméticas que se adapten a los requerimientos del producto. Esto puede aportar mejores soluciones al diseño.
- Sentirse libre para usar soluciones geométricas sin restricciones. En este sentido se están desarrollando sistemas CAD 3D que den respuesta a estas necesidades.
- Optimizar el diseño orientado a una mayor resistencia y menor peso. Una de las mayores obsesiones en el diseño en ingeniería es utilizar el menor material posible y por ello emplear la menor energía posible. Pensar en piezas que integren dos o más funcionalidades con los requerimientos de resistencia y optimizando el peso.
- Utilizar estructuras huecas y espesores variables de pared allí donde sea posible y útil. No perder tiempo pensando en cómo podrá ser fabricado ese diseño.
- No pensar en el utillaje, ya que no será necesario gastar tiempo y dinero en su planificación y fabricación. Las modificaciones y mejoras introducidas posteriormente en el diseño no son problemáticas al no estar condicionadas por un utillaje existente. Las modificaciones se hacen de manera sencilla sobre el modelo CAD.

- Partir de las cargas y esfuerzos para una superficie óptima. A partir de ese momento ir añadiendo material allá donde sea necesario en función de las necesidades de diseño.
- Finalmente, ir directamente a por la mejor solución.

La reducción de peso no supone comenzar a realizar vaciados y agujeros en las piezas, lo que en los procesos sustractivos y conformativos supone un aumento de la complejidad y por lo tanto un mayor coste en procesado y en material. La reducción de peso en el diseño orientado al AM supone una reducción del coste de materia prima, al utilizar únicamente lo necesario para cumplir con los requerimientos de esfuerzos y cargas a los que está sometida la pieza.

De la misma manera bajan los costes de montaje y costes de no calidad por errores en la producción, al reducir el número de componentes y unificar funcionalidades.

anexo

5

**MATERIALES,
SOFTWARE Y
NORMALIZACIÓN
EN AM**

MATERIALES (METÁLICOS, PLÁSTICOS, CERÁMICOS...)

La variedad y flexibilidad de los materiales, junto con la precisión y el acabado superficial han sido desde los comienzos de las tecnologías de AM factores críticos para el desarrollo de la tecnología.

Al igual que existe con otros procesos de fabricación, la elección del material va muy ligada a las características del proceso. El desarrollo de los materiales también va muy unido a las necesidades de los clientes finales. Así, en el caso del AM, debido a los altos costes de lanzamiento y homologación de los materiales, estos van saliendo al mercado muy lentamente y con una clara orientación hacia aplicaciones concretas, donde se prevé una demanda potencial importante que sea rentable para la empresa comercializadora. Es el caso, por ejemplo, del desarrollo del cromo/ cobalto, cuya utilización en aplicaciones en implantes médicos y dentales fue el motor de su desarrollo para la tecnología AM.

Dependiendo de la tecnología AM de que se trate, se deberán tener en cuenta distintos parámetros críticos para su proceso de fabricación siguiendo estos métodos. Así, para tecnologías de FDM y SLS jugará un papel muy importante la viscosidad del material (polímero, por ejemplo). En el

caso de estereolitografía, la fotopolimerización del material es el parámetro fundamental a la hora de poder utilizar este tipo de materiales para estos procesos.

En los procesos de sinterizado, al estar directamente relacionado el grado de porosidad o de densidad conseguido con las propiedades mecánicas del material, se debe orientar el proceso hacia la consecución de grados máximos de densidad.

En cuanto a las características mecánicas de las piezas fabricadas por tecnologías AM, en aquellas en las que se obtengan estructuras solidificadas densas, tanto en polímeros como en metales, se puede decir de manera general que se obtienen propiedades similares al material obtenido por métodos convencionales (por ejemplo, por colado). En cuanto a los materiales poliméricos, existen diferencias entre las propiedades mecánicas obtenidas por métodos AM frente a la inyección clásica. Esto se debe principalmente a la porosidad y a las condiciones de ausencia de presión y consolidación durante el proceso.

Actualmente se siguen desarrollando nuevos materiales para cada uno de los procesos descritos. Se describen a continuación los principales materiales existentes en la actualidad para cada uno de ellos.

- *Estereolitografía*: Los materiales fotopoliméricos para esta tecnología son epoxis e híbridos epoxi acrílicos.
- *Sinterizado láser selectivo*: El material más extendido para esta tecnología es la poliamida, que se puede reforzar con fibra de vidrio. La empresa EOS GmbH ha desarrollado una poliamida con refuerzo de aluminio. El poliestireno también puede procesarse por sinterizado láser, así como el PEEK, este último con máquinas especiales que alcanzan altas temperaturas (alrededor de 350 °C). Dentro de los materiales para el sinterizado selectivo por láser cabe destacar también materiales como la poliamida combinada con fibra de carbono que permiten fabricar piezas más resistentes,

material *castfom* (especial para fabricación de moldes para fundición), materiales elastoméricos con una flexibilidad parecida a la goma (con infiltración se agregan colores y se mejora la resistencia a la rotura), plástico halógeno ignífugo, que reduce la toxicidad (específico para productos de consumo donde se requiere resistencia al fuego y el humo).

AJU ha desarrollado un material para SLS con base en grafito, que permite elaborar piezas con continuidad eléctrica cercana a 200 siemens por cm. Se están investigando materiales reciclables para sinterizado, como el desarrollado por AJU, que consiste en un material base poliamida combinado al 50 % con cascara de almendra.

-Sinterizado directo láser selectivo: Existe una variedad de materiales en este campo, desde aceros para herramienta, aceros inoxidable (15-5PH, 17-4PH...), aleaciones de níquel (inconel...), aleaciones de cobalto, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre y aleaciones de titanio (Ti-6Al-4V...), metales nobles (oro, plata...), etc. Por una parte es necesario comparar los resultados y características mecánicas de los materiales que se consiguen con estas tecnologías frente a los que se obtienen por procesos sustractivos y/o conformativos. Este aspecto es muy importante a la hora de su aplicación en determinados sectores y es objeto de numerosas publicaciones. En ocasiones las características de los materiales fabricados por AM son mejores que las que se obtienen por métodos convencionales y esto puede dar lugar a nuevas aplicaciones industriales hasta ahora no planteadas.

- *Impresoras 3D*: La empresa Z Corporation dispone de composites cerámicos.
- *Sinterizado selectivo de láser indirecto*: La obtención de piezas en acero mediante sinterizado selectivo indirecto se realiza de forma similar a la indicada previamente. A partir del fichero STL de la pieza, el sistema

de sinterizado transforma el polvo de acero inoxidable. Las partículas de esta aleación metálica basada en acero están rodeadas de un polímero que es fundido por el láser para conseguir lo que se denomina una pieza en verde. Tras este primer ciclo, la pieza sufre otro de calentamiento en un horno para altas temperaturas (a más de mil grados centígrados). Durante el ciclo de sinterizado en el horno se elimina el polímero que rodea las partículas metálicas y estas se unen; posteriormente se funde bronce y se infiltra en la pieza porosa mediante acción capilar. De este modo el bronce líquido ocupa los huecos dejados por el sinterizado de polvo. Tras el enfriamiento, se obtiene una pieza totalmente compacta con unas propiedades que permiten su utilización para diversos tipos de aplicaciones, pudiéndose incluir la de electrodo para electroerosión. El material existente en el mercado para este tipo de sinterizado indirecto es el *LaserForm™ A6 Metal*.

El desarrollo de nuevos materiales abre un campo de investigación muy atractivo para los próximos años, al orientarse el AM hacia la obtención del producto final. Es por ello que se esperan importantes avances en materiales cerámicos, así como sucesivamente en distintas aleaciones metálicas (titanio, níquel...), motivadas principalmente por sectores punteros que demandan este tipo de tecnología y materiales, como es el sector aeronáutico, médico, etc. Según vayan surgiendo las demandas de los consumidores por productos de alto valor añadido, geometrías complejas, personalización, etc., que deban ser fabricados por estas tecnologías, se irán desarrollando los materiales y se podrán colocar posteriormente en el mercado. Donde se espera que este tipo de tecnologías tenga un campo de expansión importante es en los procesos de micro y nanofabricación. Nuevos procesos con capacidad de fabricar formas libres se irán desarrollando dentro del campo de los sistemas microelectromecánicos (MEMS).

El desarrollo de materiales biocompatibles hará posible la introducción continuada de productos para el sector de las biotecnologías.

SOFTWARE PARA LOS PROCESOS AM

Los sistemas CAD existentes en la actualidad dan respuesta y se usan en las tecnologías de AM, aunque la mayoría de ellos tiene un gran número de limitaciones al haber sido desarrollados, como es lógico por otra parte, con una orientación hacia los procesos de fabricación convencionales (sustractivos y conformativos).

Las características especiales asociadas al AM hacen que sea necesario un replanteamiento de los sistemas CAD 3D existentes. Paradójicamente, estos nuevos sistemas CAD no están siendo desarrollados principalmente por las grandes empresas de software CAD 3D tradicionales, sino que están surgiendo nuevas compañías especializadas en estos programas especializados que dan respuesta a las exigencias y posibilidades que ofrecen las tecnologías de AM.

Aunque los actuales sistemas tradicionales de CAD están evolucionando en distintos aspectos como el fácil manejo, mejora de la interconexión entre diseñador y funcionalidades del producto, menor precio, etc., la adaptación a los requerimientos para AM ha de ser mucho más drástica. Esto se deriva de las posibilidades que ofrece la tecnología, sobre todo en lo referente a la libertad en el diseño.

La limitación y sencillez de las geometrías que se pueden fabricar por métodos convencionales ha hecho evolucionar los sistemas CAD en ese mismo sentido, dando la respuesta justa a lo que se podía fabricar.

Esta aproximación no es válida para los procesos AM. Con el objeto de maximizar las oportunidades que ofrecen las tecnologías AM, se hace necesario desarrollar nuevos sistemas CAD que tengan en cuenta los siguientes aspectos:

- *Modelización libre de características del producto:* Los sistemas CAD actuales, tanto los que están basados en modelado de superficies como el modelado de sólidos, están basados en el trabajo con geometrías primitivas (planos, cilindros, esferas, agujeros, chaflanes...), que mediante una serie de operaciones pueden disponer del modelo tridimensional de la pieza deseada. Esto responde a la forma de fabricar en muchos de los casos por métodos convencionales (sobre todo el de los modeladores de sólidos), lo que da una respuesta adecuada a los métodos de diseño y fabricación actuales. Pero, para el caso del AM, es necesario desarrollar un nuevo concepto de diseño donde el diseñador disponga de las herramientas que le permitan explotar al máximo la libertad geométrica que tiene a la hora de modelar cualquier geometría por compleja que esta sea.
- *La implementación de herramientas que permitan al usuario individualizar productos:* En el caso de poder fabricar productos en cuestión de horas, quizás minutos en el futuro, hace que el cuello de botella se traslade ahora al proceso de diseño del producto unitario adaptado a unas necesidades concretas. Existen ya algunos casos industriales, como, por ejemplo, para la fabricación personalizada de audífonos o implantes dentales. En este proceso, la fase crítica se encuentra en el diseño en sí de cada uno de los productos. El proceso de fabricación posterior por AM —fabricar por ejemplo, una bandeja con 50 o 100 productos distintos— es muy inferior en tiempo frente al proceso de diseño; por ello se están desarrollando productos de software específicos para estas aplicaciones, en las que va siendo ya una realidad este tipo de técnica. Estos programas automatizan al máximo el proceso de diseño para optimizarlo; es el caso de varios de los productos que ofrece la empresa Materialise. Se espera que este tipo de desarrollos conformen un mercado

importante en los próximos años, ya que tiene que ir muy relacionado con los avances y la introducción del AM en distintos sectores. En algunos casos será asimismo el motor que ayude a la implantación del AM.

- *Geometrías repetitivas*: Una de las ventajas que aporta el AM es la posibilidad de replicar geometrías y texturas a nivel micro o macro. Para poder fabricar este tipo de estructuras por AM es esencial primeramente poder definir las geométricamente y representarlas. En este caso la limitación radica en el elevado volumen de información que esto supone en el fichero CAD y STL. Esto supondrá un cambio radical y será necesario replantearse los fundamentos de este tipo de ficheros cuando se orienten al AM.
- *Gradientes de material*: La información que facilitan los ficheros CAD actuales de los productos diseñados para ser fabricados por métodos convencionales (sustractivos y conformativos) es muy básica y es la estrictamente necesaria para definir las características dimensionales de una pieza. Tanto si es un volumen como una superficie, se indican los parámetros de contorno que definen la geometría básica. Esto corresponde luego con los procesos de fabricación, donde se presupone que, una vez definido el volumen, el resto del material es homogéneo y queda perfectamente definido por los parámetros base del contorno.
- *Interfaces con software de análisis por elementos finitos* para comprobar la integridad de la pieza.

La posibilidad que ofrecen las tecnologías AM de ir fabricando por capas pudiendo indicar para cada una de ellas y para cada zona las características que debe tener el material en esa zona, hace que los sistemas CAD puedan almacenar y procesar esta información. Por una parte, dando la posibilidad al diseñador de tener esto en cuenta durante la fase del diseño y, por otra, de transmitir posteriormente esta información a la máquina para su procesamiento.

Los ficheros STL (*Standard Triangulation Language*), inicialmente utilizados para formato neutral entre los ficheros CAD y los sistemas de prototipado rápido mediante estereolitografía en los inicios de esta tecnología (1988), se han impuesto durante estos años y son aceptados como medio de conexión entre los distintos sistemas CAD y los sistemas AM. La principal causa es que la mayoría de los sistemas CAD usan triangulación interna para muchos de sus procesos por distintas razones. La calidad de estos ficheros en muchas ocasiones no es muy alta, pero existen ya en el mercado distintas herramientas que permiten su reparación y ajuste. A partir de estos ficheros, los sistemas de AM son capaces de generar los formatos propios de ficheros que serán lanzados al sistema productivo.

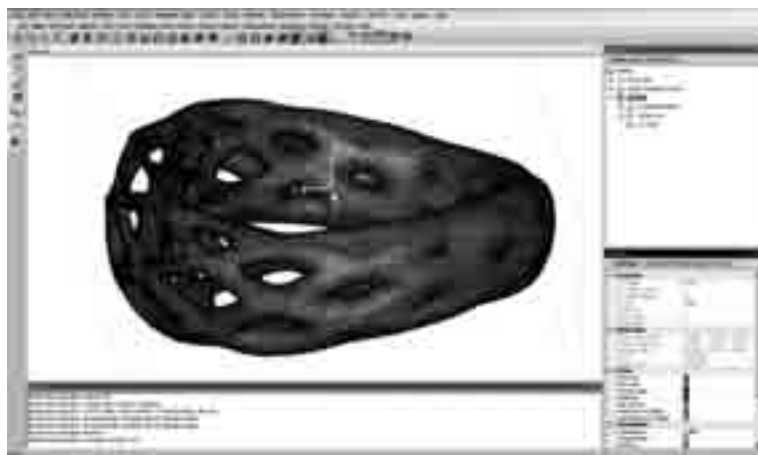


Ilustración 45: Archivos STL sobre software 3-matic (Materialise)

En julio de 2009 el organismo ASTM (Comité de los estándares en AM) puso en marcha la realización de un nuevo formato de archivo estándar para esta tecnología: el STL 2.0. El continuo avance de la tecnología hace insuficiente la información y los inadecuados métodos de trabajo de los actuales ficheros. Este nuevo estándar pre-

tende evitar el problema de la precisión en la representación de superficies curvadas, posibilitar la texturización de superficies, verificar la viabilidad en la fabricación e incluir metadato asociada al modelo (información del autor, *copyright*, etc.).

Existen ya empresas que desarrollan software específico para la creación de productos diseñados para ser fabricados por AM. Este tipo de sistemas tiene que permitir sacar todo el provecho y ventajas que aporta el AM.

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN PARA AM

Como ya se ha comentado anteriormente, el avance que en los años noventa se dio al pasar del prototipado rápido a la fabricación directa se vio acelerado desde el año 2000. En este tiempo muchas organizaciones en sectores muy diversos (aeroespacial, biotecnología, automóvil, bienes de consumo, etc.) han comenzado a usar tecnologías de AM para la fabricación de productos finales.

Desde hace aproximadamente una década, se ha reconocido la necesidad de llegar a un consenso de estandarización de estas tecnologías en términos de terminología, ensayos e informes sobre propiedades de los materiales, guías específicas de aplicación, especificaciones de proceso, etc.

Algunos grupos de trabajo han intentado desarrollar especificaciones comunes durante años. El resultado actual de consenso es muy limitado (AMS para deposición por láser de Ti y ISO para especificaciones de sinterizado láser).

Existe claramente una falta de coordinación para la estandarización mundial de este tipo de actividades. Ningún organismo especializado de estandarización se ha dedicado a tratar estos temas de manera organizada y sistemática.

Esto conlleva que no sean comparables las hojas de características de materiales de distintos fabricantes, se emplean

diferentes parámetros de fabricación para operar con cada una de las tecnologías, hay una baja repetitividad de resultados entre proveedores de la tecnología y existen en general, pocas especificaciones que puedan asegurar al cliente final que su producto ha sido fabricado según lo deseado.

Esto supone una clara limitación a la hora de poder aplicar estas tecnologías en nuevas aplicaciones y sectores emergentes.

En la reunión anual del año 2008 de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (SME) en Orlando, Florida, el comité de tecnologías de AM (*Rapid Technologies and Additive Manufacturing-RTAM*), decidió encontrar una solución a este problema. Para ello se buscó primeramente a la organización de desarrollo de estándar que mejor pudiera llevar a cabo esta tarea.

Se seleccionó a ASTM, una corporación sin ánimo de lucro formada en 1898, por su habilidad para consensuar la gran diversidad de necesidades en un entorno internacional. ASTM ofrece un sistema de gestión para el desarrollo de estándares e información técnica para materiales, productos, sistemas y servicios.

Se realizó un primer contacto con ASTM en julio del año 2008 y posteriormente y por unanimidad se eligió a este organismo en una reunión mantenida el 3 de noviembre del mismo año. En dicha reunión se estableció de manera general el alcance del trabajo y se definieron cuatro áreas prioritarias para la estandarización:

- Terminología
- Ensayos
- Materiales
- Especificaciones de proceso específicas.

Desde ese momento se hizo pública esta información y se utilizaron los principales medios de distribución para dar su conocimiento a las empresas y organismos relacionados

directamente con la tecnología (SME, GARPA, EURO-MOLD, lista de contactos de la asociación de Terry Woehlers...).

La primera reunión del comité ya creado (*New ASTM International Activity on Additive Manufacturing Technologies*, <http://www.astm.org/COMMIT/COMMITTEE/F42.htm>) tuvo lugar los días 13 y 14 de enero de 2009 en las instalaciones de ASTM. A dicha reunión acudieron 70 representantes de las principales compañías y organizaciones punteras de las tecnologías de AM a nivel mundial.

El objetivo de dicha reunión era, por una parte, llegar a un consenso sobre la necesidad de estandarización que la industria lleva demandando desde la última década y, por otra, identificar las áreas específicas para su puesta en marcha. De esta manera los usuarios futuros de estas tecnologías dispondría de estándares que les guíen durante el proceso de diseño y fabricación aditiva.

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

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

DOCUMENTOS COTEC sobre OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS

Documentos editados

- N.º 1: Sensores.
- N.º 2: Servicios de información técnica.
- N.º 3: Simulación.
- N.º 4: Propiedad industrial.
- N.º 5: Soluciones microelectrónicas (ASIC) para todos los sectores industriales.
- N.º 6: Tuberías de polietileno para conducción de agua potable.
- N.º 7: Actividades turísticas.
- N.º 8: Las PYMES y las telecomunicaciones.
- N.º 9: Química verde.
- N.º 10: Biotecnología.
- N.º 11: Informática en la Pequeña y Mediana Empresa.
- N.º 12: La telemática en el sector de transporte.
- N.º 13: Redes neuronales.
- N.º 14: Vigilancia tecnológica.
- N.º 15: Materiales innovadores. Superconductores y materiales de recubrimiento.
- N.º 16: Productos alimentarios intermedios (PAI).
- N.º 17: Aspectos jurídicos de la gestión de la innovación.
- N.º 18: Comercio y negocios en la sociedad de la información.
- N.º 19: Materiales magnéticos.
- N.º 20: Los incentivos fiscales a la innovación.
- N.º 21: Minería de datos.
- N.º 22: Wireless.

- N.º 23: Robótica y Automatización.
- N.º 24: Los informes tecnológicos en patentes.
- N.º 25: Diseño e innovación. La gestión del diseño en la empresa.
- N.º 26: Invernaderos de plástico.
- N.º 27: Claves para el nanomundo.
- N.º 28: Reutilización de la información del Sector Público.
- N.º 29: Innovación en Defensa y Seguridad.
- N.º 30: Fabricación aditiva.

DOCUMENTOS COTEC sobre NECESIDADES TECNOLÓGICAS

Documentos editados:

- N.º 1: Sector lácteo.
- N.º 2: Rocas ornamentales.
- N.º 3: Materiales de automoción.
- N.º 4: Subsector agroindustrial de origen vegetal.
- N.º 5: Industria frigorífica y medio ambiente.
- N.º 6: Nuevos productos cárnicos con bajo contenido en grasa.
- N.º 7: Productos pesqueros reestructurados.
- N.º 8: Sector de la construcción.
- N.º 9: Sector de la rehabilitación.
- N.º 10: Aguas residuales.
- N.º 11: Acuicultura.
- N.º 12: Reducción de emisiones atmosféricas industriales.
- N.º 13: El mantenimiento como gestión de valor para la empresa.
- N.º 14: Productos lácteos.
- N.º 15: Conservas vegetales.