

Oportunidades de la fabricación aditiva para optimizar el diseño de productos

■ ■ ■ ■ ■
José Antonio Oriozabala-Brit ⁽¹⁾, María del Mar Espinosa ⁽²⁾ y Manuel Domínguez ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad del País Vasco UPV/EHU (España)

⁽²⁾ Universidad Nacional de Educación a Distancia – UNED (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7661>

1. INTRODUCCIÓN

El prototipado rápido se ha utilizado, desde su origen, para fabricar prototipos en el ámbito de los bienes de consumo, electrónica, automoción, maquinaria industrial, deporte, juguetes, arquitectura, entretenimiento, educación etc.

La impresión 3D ha permitido generar realidades físicas directamente a partir del modelo tridimensional. Los primeros sistemas, comercializados ya en 1980, producían prototipos con unas características geométricas y físicas que limitaban su aplicación a la visualización de diseños y órganos fundamentalmente. La evolución de la tecnología ha permitido incrementar la calidad de los productos fabricados de manera que se puede ya obtener directamente productos funcionales en determinados campos de aplicación. Se ha pasado del prototipado rápido a la fabricación aditiva (FA). La gran variedad de materiales utilizados actualmente (entre los metales pueden citarse aceros, titanio, aleaciones basadas en níquel, cobre, aluminio, etc.) permiten la fabricación de piezas funcionales con las características mecánicas y térmicas adecuadas. Manfredi [1] cita como ejemplo piezas de motores a reacción fabricadas por la NASA utilizando fabricación aditiva que soportan temperaturas de 3.300 °C. Como ejemplos pueden citarse:

- Industria aeroespacial. Un nuevo campo de aplicación es la impresora tridimensional instalada en la estación espacial internacional [2]. La NASA está estudiando la tecnología aditiva en microgravedad, habiendo obtenido resultados positivos en la fabricación de sistemas con elementos embebidos y canales conductores. La posibilidad de manufacturar piezas *in situ* es valorada

como esencial para plantear viajes a Marte, por ejemplo.

- Odontología. La empresa Align Technology utiliza impresión 3D para crear ortodoncias personalizadas [3]. La tecnología aditiva ha permitido sustituir ortodoncias metálicas por una serie de ortodoncias transparentes que progresivamente corrigen la posición de los dientes.
- Tecnología asistida. Siemens Hearing Inc. fabrica la mitad de las carcasas de sus audífonos en estados Unidos utilizando tecnología aditiva [4]. Se han reducido drásticamente los rechazos de los clientes que eran del 25%.
- Industria aeronáutica. Saab Avitronics ha utilizado láser sinterizado para fabricar la caja de antenas de telecomunicaciones para aviones, obteniendo un diseño más compacto y una reducción del 45% en masa frente a otros procesos de fabricación [5].
- Deporte. La empresa Británica Prior 2 Lever utiliza tecnología aditiva para crear calzado deportivo personalizado destinado a atletas profesionales [6].
- Prótesis. Adler Ortho group crea prótesis con unas características de integración ósea superiores a las convencionales [6].
- Industria automovilística. Bentley y Rolls-Royce utilizan fabricación aditiva para obtener de forma más económica determinadas piezas que luego son revestidas con cuero u otros materiales [7]. El equipo Renault Fórmula 1 utiliza alrededor de 900 piezas fabricadas por FA cada temporada [6]. Además los estudios aerodinámicos se verifican con modelos fabricados con tecnología aditiva [7, 8].
- Industria electrónica. Se han desarrollado tecnologías para fabricar productos con sistemas electrónicos embebidos [9].

La fabricación aditiva se está implantando en aquellas áreas con productos de

alto valor añadido, geometría compleja y altamente personalizada. Las líneas futuras de trabajo pasan por el desarrollo de materiales con propiedades mecánicas y térmicas mejoradas, el descenso del coste de fabricación y la extensión de la fabricación aditiva a la producción en masa.

El desarrollo económico en un entorno global ha concentrado la producción en ubicaciones geográficas muy concretas con grandes multinacionales que dominan ámbitos productivos concretos. Por otra parte, el consumidor es cada vez más exigente, quiere productos personalizados que lo distingan de la sociedad. La personalización es una oportunidad para encontrar nichos de mercado muy concretos dedicados a una clientela que no ve satisfechos sus deseos. La fabricación aditiva puede modificar la producción de bienes en el futuro; en vez de una fabricación en masa localizada geográficamente, la fabricación aditiva permite la personalización de los productos, lo que puede hacer volver a los sectores productivos de vuelta al primer mundo. Kianian [10] constata la creación de empleo en Suecia en torno a la fabricación aditiva, tanto en sectores productivos como servicios. Huang [11] destaca el impacto social de la tecnología aditiva en tres aspectos:

- Personalización de productos sanitarios para mejorar la salud de la población.
- Reducción del impacto medioambiental debido a la menor demanda de transporte y embalaje.
- Simplificación de la cadena de producción, que permite la fabricación bajo demanda.

Atzeni explora el aspecto económico de la fabricación aditiva frente al tradicional [12]. La fabricación aditiva puede ser ventajosa en caso de series cortas o medias por las siguientes razones:

- Reduce el tiempo y esfuerzo necesario para fabricar las piezas. No es necesario diseñar utillajes ni planificar la fabricación.
- Una vez diseñada la pieza la fabricación puede comenzar inmediatamente.

El diseño de piezas está altamente condicionado por los procesos de fabricación y montaje. La fabricación aditiva expande enormemente la libertad de diseño,

pudiendo fabricar casi cualquier geometría. Esta libertad de diseño se traduce en complejidad geométrica, topológica, funcional y de materiales utilizados. Se crean oportunidades para optimizar los productos en aspectos como geometría, topología y funcionalidad obteniendo productos más personalizados, atractivos y ligeros, simplificando el proceso de montaje y reduciendo el impacto medioambiental.

Gibson [13] señala que la fabricación aditiva incorpora libertad al diseño en varios campos: superficie, volumen, material y funcional. Como consecuencia aumenta la libertad del ingeniero para diseñar. La posibilidad de fabricar en una única etapa mecanismos funcionales y embeber elementos incrementa la funcionalidad de los diseños.

Conner [14, 15] identifica tres claves para determinar la idoneidad de un producto para ser fabricado mediante fabricación aditiva: complejidad, personalización y el volumen de producción. Aquellos productos que requieren elevada personalización y poco volumen de fabricación son idóneos para la fabricación aditiva. Un ejemplo son los implantes dentales personalizados.

Klahn [16] expone que no todos los diseños son adecuados para obtener mejoras mediante la fabricación aditiva. Los criterios son:

- Diseño integrado. Se incrementa el número de funciones que cumplen las piezas. Como consecuencia se

reduce el número de las mismas así como las necesidades de montaje.

- Individualización de piezas complejas mediante personalización.
- Diseño aligerado. La fabricación aditiva genera piezas porosas con características mecánicas adecuadas, pero más ligeras frente a la fabricación tradicional.

2. FABRICACIÓN ADITIVA

Entre las ventajas que ofrece frente a otras tecnologías de fabricación destaca la posibilidad de obtener geometrías más complejas y la relativa independencia entre formas geométricas y el método de fabricación. Entre las limitaciones iniciales destacaban:

- El alto coste para series grandes en comparación con otros procesos de fabricación.
- Reducido abanico de materiales colores y acabados superficiales.
- Menor precisión que otras tecnologías.
- Características mecánicas y térmicas limitadas.
- Dimensiones de los productos obtenidos limitadas.

Los campos de aplicación eran variados como medicina, educación, creación de moldes etc. Los desarrollos iniciales ofrecían ventajas de cara al diseño ofreciendo grandes posibilidades de personalización, mayor flexibilidad geométrica y reduciendo la necesidad de elementos de unión [17], pero adolecían de bajas tolerancias y pobres acabados superficiales, amén de limitaciones de tamaño y características de los materiales que no los hacían válidos para obtener productos finales.

Bak [18] planteaba en 2003 la disyuntiva entre prototipado rápido o fabricación rápida. Señalaba como elementos clave el coste de los equipos, el acabado superficial, las tolerancias y las características mecánicas de los materiales como elementos a mejorar para poder utilizar los sistemas de prototipado rápido para producción de series cortas.

El desarrollo de la fabricación aditiva ha estado determinado, por una parte, por la mejora de la tecnología empleada y, por otra, por la introducción de la misma en diferentes campos industriales lo que ha permitido valorar la posibilidad de fabricar objetos funcionales en determinados casos.

La Figura 1 muestra la evolución creciente de los ingresos generados por la fabricación aditiva, ingresos estimados en millones de dólares estadounidenses; la parte inferior de las barras

indica productos y la superior servicios (fuente: <http://wohlersassociates.com/growth2010.htm>).

Entre las mejoras tecnológicas se incluyen el aumento de las dimensiones de las piezas obtenidas, el notable incremento de materiales disponibles y la mejora de los tratamientos de postproceso que permite mejorar la textura y tolerancias dimensionales de los productos. Los sistemas modernos son capaces de fabricar piezas con varios materiales con diferentes características mecánicas y estéticas (Figura 2) [19].

Respecto a las limitaciones de tamaño hoy en día existen impresoras comerciales, como la Object1000 de Stratasys, capaces de crear modelos de 1.000x800x500 mm.

Un punto de avance importante ha sido el desarrollo de nuevos materiales con características mecánicas, térmicas y estéticas mejoradas. Hoy en día el abanico de materiales se ha extendido enormemente. Pueden utilizarse materiales flexibles, varios materiales de diferentes propiedades o detener la generación de una pieza para colocar un inserto.

Existen materiales basados en madera [20] y cobre [21]. Como aplicación para producción de productos funcionales podemos citar la generación de circuitos impresos [22]. Los últimos desarrollos permiten la impresión multimaterial [23, 24]. Asimismo, existen actualmente impresoras 3D, como la Connex3, que permiten imprimir cientos de colores.

Wang [25] muestra un claro avance con el diseño de una impresora híbrida que puede imprimir un material flexible, como silicona, y metal posibilitando la creación de productos funcionales. Además, se han desarrollado nuevos materiales con características térmicas mejoradas. Berman [26, 27] muestra resultados obtenidos con aluminio.

La precisión dimensional y el acabado superficial han mejorado notablemente. Modelos como la Connex1, basado en fotopolímeros, trabajan con capas horizontales de hasta 0,016 mm. El tratamiento químico permite mejorar aún más las superficies, de forma que mediante un recubrimiento adecuado se obtienen productos con una estética muy aceptable.

Una de las estrategias posibles para mejorar la precisión dimensional es combinar la tecnología aditiva con el mecanizado para incrementar la precisión de las superficies funcionales. El modelo LUMEX Avance-25 combina sinterizado láser, que permite generar geometrías y topologías complejas, con un fresado de alta velocidad para obtener acabados superficiales y

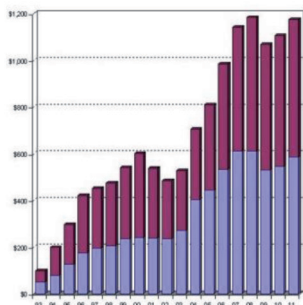


Fig. 1: Ingresos estimados

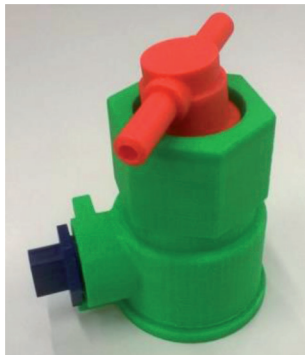


Fig. 2: Válvula fabricada en una única etapa utilizando diferentes materiales.

tolerancias dimensionales y geométricas también muy aceptables.

Las técnicas de postproceso también han mejorado notablemente. Incluyen diversos procesos como:

- Mecanizado, para mejorar textura y tolerancias.
- Curado, para mejorar las características mecánicas en el caso de usar fotopolímeros, por ejemplo.
- Mejora estética mediante pintado o deposición de capas metálicas.
- Mejora de las propiedades mediante tratamientos no térmicos. Los productos creados muchas veces son porosos. Dicha porosidad puede aprovecharse para infiltrar productos químicos que mejoren sus características mecánicas y químicas.
- Mejora de las propiedades mediante tratamientos térmicos. En el caso de usar metales, un tratamiento térmico permite obtener la microestructura deseada y aliviar tensiones.

Como muestra la Figura 3, actualmente pueden obtenerse productos de características estéticas muy logradas.

2.1. IMPLICACIONES SOCIALES

Las implicaciones de una mayor extensión en la utilización de esta tecnología pasan por el cambio de paradigma desde una producción en masa en puntos geográficos concretos a una fabricación personalizada y geográficamente distribuida. Esto puede implicar ahorros económicos y medioambientales por la disminución de las necesidades de transporte.

La posibilidad de fabricar los objetos de forma local favorece la iniciativa emprendedora y la interacción con el usuario final. Se reduce la necesidad de inventarios de materias primas y productos finales que quizá no se vendan; en vez de esto se fabrica bajo pedido. La relación más cercana con el cliente es un acicate para el constante desarrollo y mejora de los productos fabricados. El éxito depende del campo de aplicación, con muy diversos costos de fabricación, transporte y personalización. En los próximos años podrá

valorarse si la fabricación aditiva provoca realmente un cambio económico a nivel mundial.

3. IMPLICACIONES EN EL DISEÑO

Como indica Vayre [28], es necesario identificar las posibilidades de la fabricación aditiva para aprovechar las alternativas que ofrece. Los procesos de mecanizado generan con facilidad formas planas y cilíndricas. Sin embargo, la fabricación aditiva puede generar virtualmente cualquier superficie. Aunque la fabricación aditiva ha reducido drásticamente la necesidad de tener en cuenta los procesos de fabricación, existen limitaciones que deben de tenerse en cuenta.

Los materiales disponibles dependen de la tecnología utilizada. Los primeros materiales utilizados se limitaban a fotopolímeros, con unas características mecánicas y térmicas que limitaban mucho los campos de aplicación; los últimos desarrollos han permitido utilizar materiales (aceros, titanio, materiales cerámicos y plásticos) con características mecánicas y térmicas muy mejoradas.

La libertad para diseñar geometrías más sofisticadas se ha incrementado radicalmente pero, aun así, debe mantenerse un espesor mínimo de pared. Pueden generarse mecanismos funcionales pero ha de mantenerse un juego mínimo entre superficies.

La precisión dimensional y el acabado superficial han mejorado notablemente en los últimos desarrollos, pero aún es inferior a la que ofrecen otros procesos de fabricación, como el mecanizado. En caso necesario un tratamiento posterior mecánico o químico mejora los resultados. Algunos procesos requieren generar superficies de soporte que luego deben eliminarse, generalmente por medios químicos o mecánicos. La eliminación del material de soporte y el reciclado del material pueden generar problemas medioambientales.

Dependiendo de la tecnología utilizada, la necesidad de poder acceder a las superficies de soporte para poder eliminarlas después del proceso de fabricación limita

la posibilidad de fabricar piezas con huecos ciegos. Es necesario tener en cuenta estas estructuras optimizándolas.

Como consecuencia del método de construcción por superposición de capas el tiempo de producción es elevado frente a otros métodos de producción. Además, cuanto mayor precisión se requiere menor es la capa depositada, lo que incrementa el número de capas y, por tanto, el tiempo de construcción.

La orientación del modelo debe de ser tomada en cuenta por la influencia que tiene tanto en el tiempo de fabricación como en la precisión de las superficies obtenidas.

Recientemente se han desarrollado varias metodologías y sistemas que optimizan el peso de las piezas diseñadas mediante la generación automática de estructuras internas huecas.

El tamaño de las piezas que pueden generarse es limitado; si bien es verdad que existen soluciones comerciales que fabrican piezas de hasta un metro de longitud. Tradicionalmente se ha superado este escollo uniendo diferentes tramos de la pieza a generar. Esto implica diseñar adecuadamente la posición de las uniones para no perjudicar la resistencia de la pieza final y unir los tramos mediante adhesivos o geometría.

La fabricación aditiva actual soslaya muchas de las limitaciones que implican los procesos tradicionales de fabricación, incrementando la libertad del diseñador en el ámbito geométrico, topológico, funcional y material. Con la complejidad geométrica que posibilita puede generarse casi cualquier superficie imaginable. Las posibilidades de personalización se han incrementado notablemente.

El interior de las piezas es accesible durante su fabricación posibilitando la obtención de mecanismos funcionales ya montados o con elementos embebidos. También se posibilita la creación de piezas que adaptan su geometría a las condiciones operacionales (*morphing structures*) como, por ejemplo, los alabes de turbinas.

A diferencia de las tecnologías de fabricación tradicionales el coste no es función de la serie, la personalización de productos no se limita por la fabricación de lotes mínimos para alcanzar el umbral de la rentabilidad.

4. LIBERTAD GEOMÉTRICA

La propia naturaleza del proceso de fabricación aditiva permite el acceso a todos los puntos del producto fabricado. Las superficies que pueden fabricarse no



Fig. 3: Carcasa de ratón fabricada con tecnología aditiva. A la izquierda resultado de la tecnología aditiva. A la derecha mismo elemento sometido a postproceso.

tienen prácticamente limitaciones. Como fuente de superficies pueden destacarse las superficies inspiradas en el mundo real, las generadas mediante herramientas de diseño asistido por ordenador (DAO) y las obtenidas a partir de imágenes médicas.

El entorno, tanto urbano como natural, es una fuente inagotable de geometrías interesantes para incorporar al diseño. Puede optarse por un escaneo mediante láser, que requiere un equipamiento específico, o también, mediante programas gratuitos como 123D Catch, podemos obtener vía teléfono móvil una superficie de la geometría deseada. La calidad de una y otra opción no son comparables, como tampoco lo es el coste; pero por lo general la calidad obtenida por ambos sistemas es suficiente para la mayoría de diseños.

El desarrollo de paquetes de software comerciales, que permiten obtener modelos tridimensionales de pacientes a partir de imágenes médicas, así como los nuevos procedimientos para obtener piezas de elevada resistencia, a la vez que livianos, permiten fabricar prótesis personalizadas para cada paciente.

5. LIBERTAD TOPOLÓGICA

El acceso a todos los puntos del volumen permite la creación de estructuras internas en varios niveles de jerarquía, lo cual redundará en optimización del peso. Meisel [29] utiliza la fabricación aditiva para obtener piezas metálicas con estructuras internas huecas con muy buenas características mecánicas. Tal y como muestra Williams [14], la tecnología aditiva posibilita fabricar mesoestructuras metálicas con muy pocas limitaciones geométricas.

En la Figura 4 se presenta un ejemplo desarrollado a partir de la estructura tetraédrica de los minerales. Como desventaja puede señalarse la enorme cantidad de superficies generadas, que hace poco práctico el trabajo con dichas topologías con sistemas de DAO tradicionales.

Otra opción, es la generación de estructuras bioinspiradas, que consiguen optimizar la topología del producto y generar diseños atractivos y originales.

5.1. OPTIMIZACIÓN DE TOPOLOGÍA

La topología hueca interna ofrece indudables ventajas en cuanto a ligereza y ahorro de material. Es lógico pensar que diferentes topologías ofrecerán diferentes cualidades de resistencia, tiempo de impresión y facilidad para el diseño. De cara a optimizar las topologías en los siguientes apartados se analiza el comporta-



Fig. 4: Diferentes opciones topológicas

miento de diferentes opciones topológicas frente a diferentes parámetros mediante análisis por elementos finitos.

El análisis pretende valorar la previsible influencia de la topología en cuanto a resistencia. Indudablemente, los resultados deben tomarse como orientativos. Por una parte, las características anisotrópicas de los productos fabricados y, por otra, la influencia que pueden tener las posibles irregularidades, hacen necesario un estudio empírico. Las irregularidades geométricas durante la fabricación tienen importantes consecuencias en cuanto a la resistencia mecánica de las piezas. También en este aspecto se ha avanzado, así por ejemplo Campoli [30] presenta un modelo que predice con precisión el comportamiento mecánico de materiales porosos de titanio.

En este apartado se aborda la influencia que puede tener la topología sobre el tiempo de impresión. En concreto se han valorado diferentes geometrías de los vaciados (sección circular, cuadrada y hexagonal) y diferente densidad de mallado. Para ello se han generado diferentes modelos con las mismas dimensiones exteriores (100 x 100 x 100 mm), densidad de mallado, volumen (628 cm³) y diferentes topologías utilizando Solid Edge ST6.

El tiempo de impresión se evalúa empleando el programa CatalystEX, configu-

rado para una impresora Dimension Elite con una resolución de capa de 0,254 mm. Las características de resistencia se han evaluado empleando el programa NAXTRAN, aplicando esfuerzos de 10.000 N y, como material, se escogió el ABS de impacto medio. La influencia de la densidad de mallado se ha desarrollado empleando modelos de 4x4, 7x7 y 10x10 agujeros y mismas dimensiones exteriores y masa.

Como se ha observado en los apartados anteriores la topología puede tener una influencia notable sobre diferentes aspectos del producto final. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las topologías óptimas según determinado criterio de optimización.

Puede observarse que como criterio general es deseable una densidad de mallado pequeña, salvo cuando existen esfuerzos en dirección normal al mallado. La sección cilíndrica ofrece los mejores resultados excepto para el análisis mediante elementos finitos, donde es preferible la sección cuadrada.

Como se observa en la Figura 6, dependiendo del mallado se incrementa un 10% el tiempo de impresión. Los mallados cilíndricos o hexagonales son preferibles para optimizar el tiempo de impresión. La densidad de la estructura es un factor determinante en el tiempo de impresión. En el ejemplo desarrollado el tiempo de

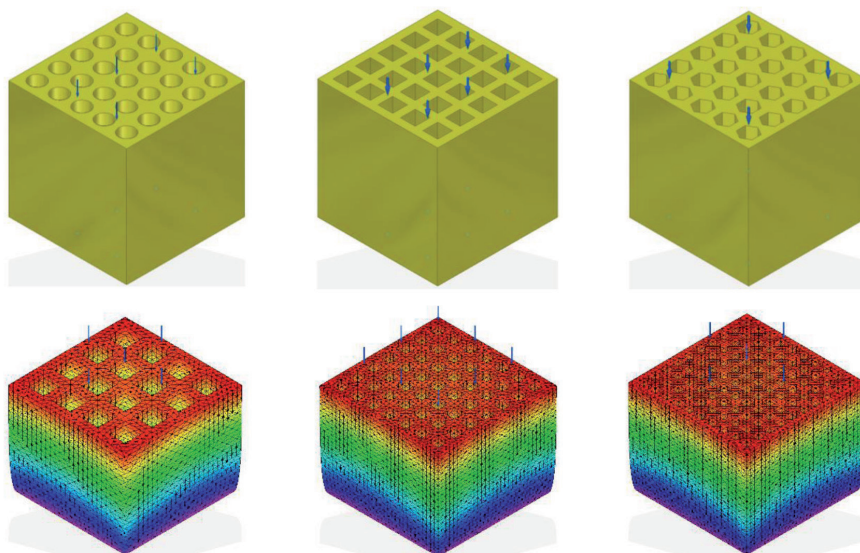


Fig. 5: Diferentes topologías

Los resultados obtenidos son:

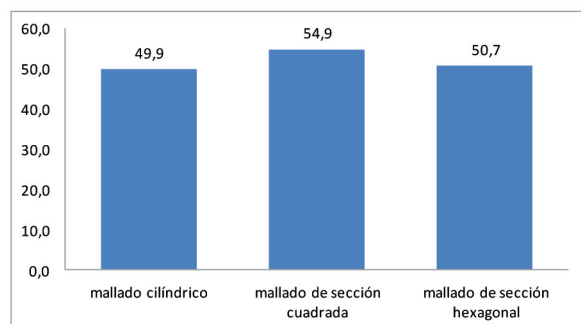


Fig. 6: Tiempo de impresión en función de la sección (s)

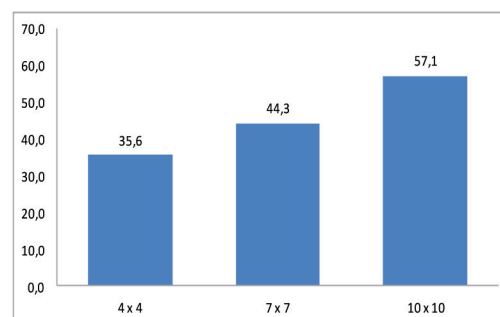


Fig. 7: Tiempo de impresión en función de la densidad del mallado (s)

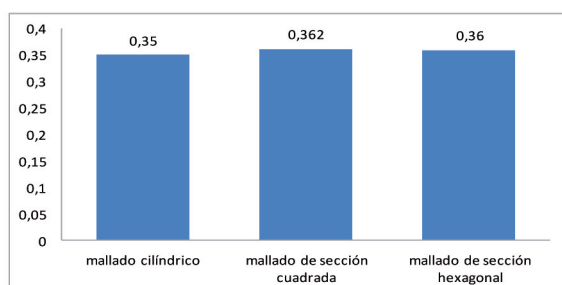


Fig. 8: Desplazamiento (mm) por compresión axial

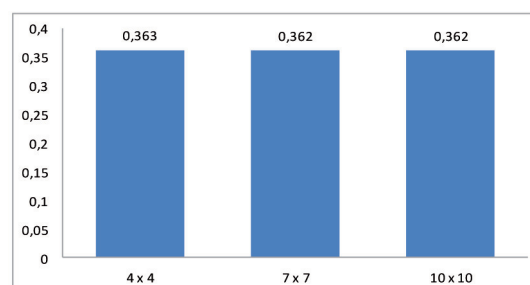


Fig. 9: Desplazamiento por compresión axial de diferentes densidades de mallado (mm)

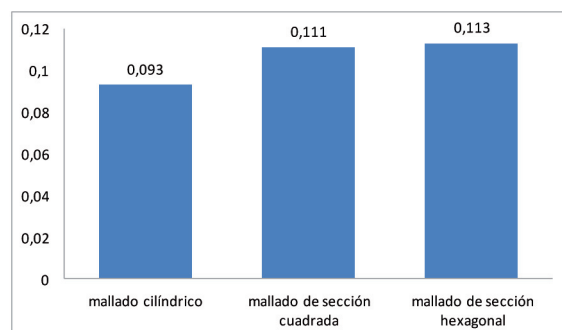


Fig. 10: Desplazamiento por compresión normal (mm)

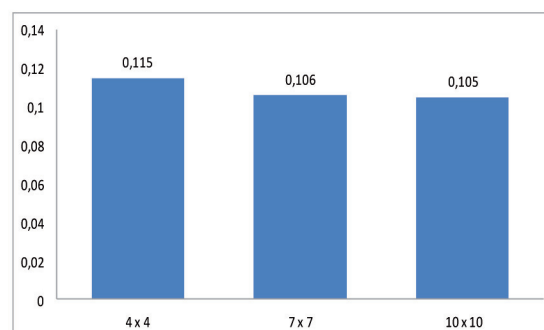


Fig. 11: Desplazamiento por compresión normal a mallado (mm)

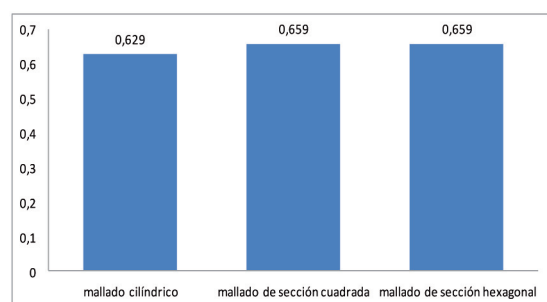


Fig. 12: Desplazamiento a cortante (mm)

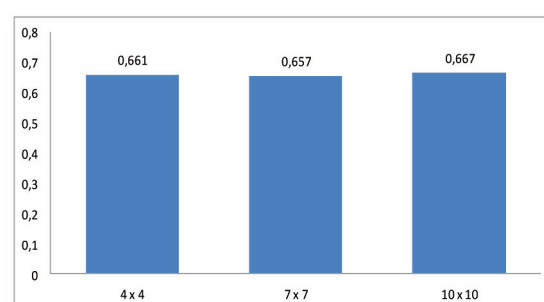


Fig. 13: Desplazamiento a cortante por esfuerzo cortante (mm)

impresión se incrementa un 60% dependiendo de la densidad como se observa en la Figura 7.

Los resultados de la Figura 8 muestran que la influencia de la geometría de la sección es mínima (un 3%) en el desplazamiento al someter los modelos a com-

presión en dirección del mallado. Como muestran los resultados de la Figura 9 es la influencia de la densidad del mallado poco significativa.

En la Figura 10 queda patente que el mallado cilíndrico es el que presenta mayor resistencia a compresión normal

al mallado. Como se observa en la Figura 11, una mayor densidad de mallado sí que incrementa la resistencia del modelo a esfuerzos de compresión normales al mallado.

La Figura 12 muestra que la sección cilíndrica ofrece una mayor rigidez, en con-

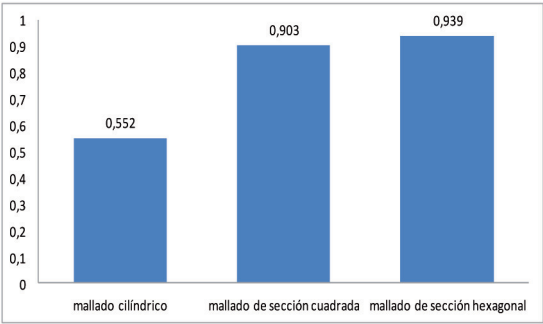


Fig. 14: Tamaño fichero (Mb)

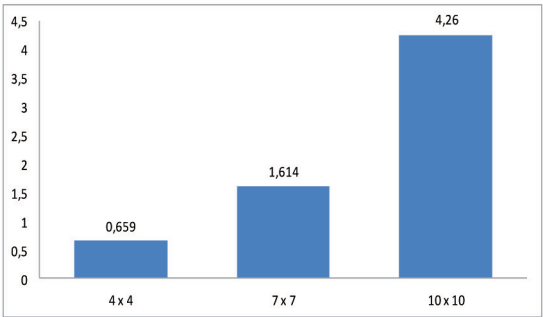


Fig. 15: Tamaño fichero (Mb) para diferentes densidades de mallado

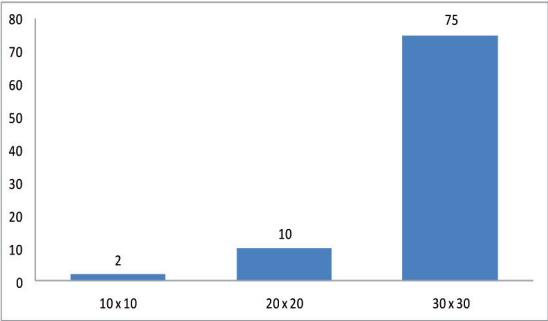


Fig. 16: Tiempo necesario para generar mallados de diferente densidad (s)

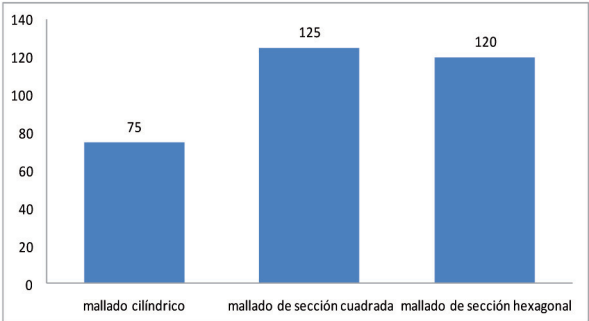


Fig. 17: Tiempo para creación de mallado 30 x 30 (s)

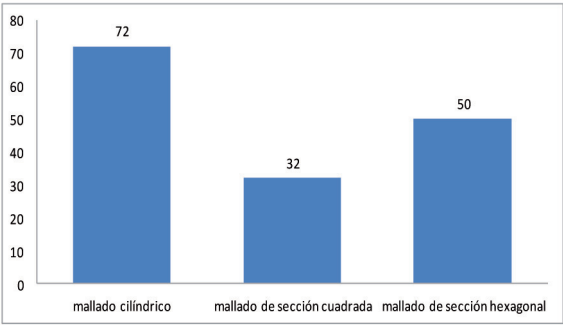


Fig. 18: Tiempo para resolución por FEA (s)

creto su desplazamiento es un 4% menor. La influencia de la densidad del mallado es mínima, un 1% según la Figura 13. Los resultados del análisis de elementos finitos muestran que la topología tiene una influencia escasa en la resistencia. En todo caso la estructura cilíndrica ofrecería algo más de resistencia y sería la preferible.

era de esperar (Figura 15) la densidad de mallado incrementa el tamaño del fichero. Como se muestra en la Figura 16 el tiempo para realizar la operación de mallado varía notablemente según el perfil del mallado. El mallado cilíndrico resulta el óptimo. Como se observa en la Figura 17 la densidad del mallado tiene una notable

Como muestra la Figura 14 la sección tiene una notable influencia en el tamaño del fichero. El mallado de nido de abeja es un 70% más pesado que el de sección cilíndrica, manteniendo constante la densidad de mallado.

influencia sobre el tamaño del fichero, como cabía esperar. Por último, la Figura 18 muestra que la sección cuadrada ofrece un tiempo de cálculo inferior a la mitad frente a la cilíndrica.

6. LIBERTAD FUNCIONAL

La fabricación aditiva permite fabricar mecanismos funcionales reduciendo el número de piezas, eliminando elementos de unión y simplificando el proceso de montaje. La posibilidad de fabricar en una única etapa mecanismos funcionales y embeber elementos incrementa la funcionalidad de los diseños.

En el ejemplo de la Figura 19 se ha sustituido el pasador por geometría incorporada a uno de los elementos, y se han modificado las superficies de manera que se obtengan los juegos necesarios entre piezas que garantizan el correcto desempeño de las funciones. Todo ello trabajando con el modelo de conjunto original y modificando las piezas sin grandes dificultades desde el punto de vista del DAO. Por último el modelo de conjunto se exporta a un único fichero para su impresión. De esta manera puede fabricarse el mecanismo funcional en una única operación con las dos piezas ya montadas.

En la Figura 20 se aplica la complejidad funcional para rediseñar un reductor de velocidad cuyas dos carcasas y elementos de unión se han sustituido por una única.

	Tipo de mallado	densidad
Tiempo de impresión	cilíndrico	mínima
Esfuerzo a compresión en dirección del mallado	cilíndrico	indiferente
Esfuerzo a compresión normal a mallado	cilíndrico	elevada
Esfuerzo a cortante	cilíndrico	indiferente
Tamaño de fichero	cilíndrico	mínima
Tiempo para resolución de FEA	cuadrado	mínima
Tiempo de generación del mallado	cilíndrico	mínima

Tabla 1: Topología óptima según diferentes criterios

7. LIBERTAD FRENTE AL PROCESO DE FABRICACIÓN

La fabricación aditiva permite superar las restricciones que muchas veces impone el proceso productivo al diseño. En la Figura 21 se presenta el diseño clásico de un eje de salida de un reductor de velocidad. Mediante fabricación aditiva es posible reducir el número de piezas y simplificar el montaje obteniendo, además, un mecanismo más equilibrado.

En muchas ocasiones el proceso de montaje restringe la libertad del diseño. En la Figura 22 se aprecia cómo la necesidad de montar los engranajes del diferencial en la fase de ensamblado condiciona el diseño. La carcasa debe fabricarse en dos piezas que deben unirse mediante tornillos. La fabricación aditiva posibilita obtener la carcasa en una única pieza sin necesidad de uniones mediante tornillos.

8. METODOLOGIA DE DISEÑO PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Fruto del análisis previo de los pros y contras que se presentan a la hora de diseñar para fabricación aditiva se propone a continuación una metodología que permitirá optimizar las ventajas y reducir las dificultades propias del diseño.

Los objetivos genéricos son:

- Incrementar la personalización.
- Minimizar material y peso, energía necesaria para el funcionamiento, consumo de material e impacto medioambiental.
- Disminuir el número de piezas y elementos de unión simplificando el proceso de montaje.
- Obtener productos funcionales.

La metodología propuesta queda definida en los siguientes siete pasos:

1. Definir las funciones necesarias para que el producto satisfaga las expectativas del cliente.
2. Determinar las superficies funcionales requeridas para cumplir las funciones definidas en el paso 1.
3. Valorar la posible personalización de las superficies para añadir atractivo estético o funcional al producto.
4. Generar las superficies y dotarlas de espesor.
5. Añadir los volúmenes y huecos adecuados para optimizar la cantidad de material.
6. Definir las tolerancias adecuadas para el desempeño de las funciones.
7. Analizar la validez del diseño. Si no se consigue el objetivo, rediseñar el producto.

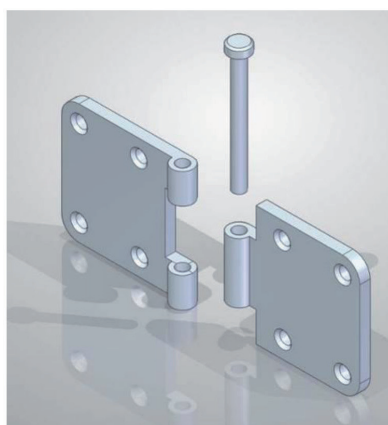


Fig. 19: Bisagra de diseño clásico y para FA

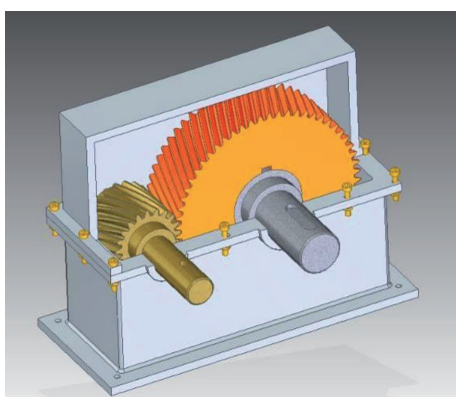
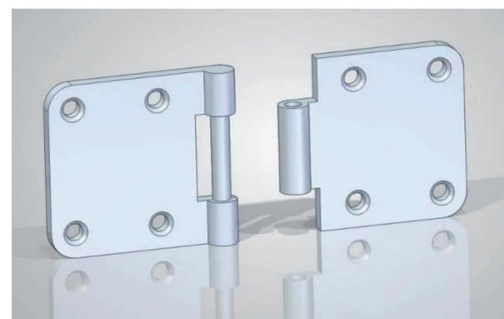


Fig. 20: Diseño de reductor que aplica la complejidad funcional reduciendo el número de piezas y simplificando el proceso de montaje

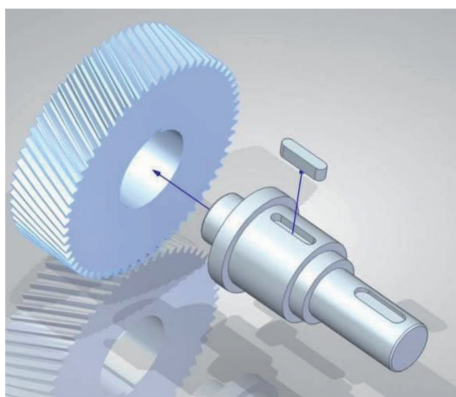
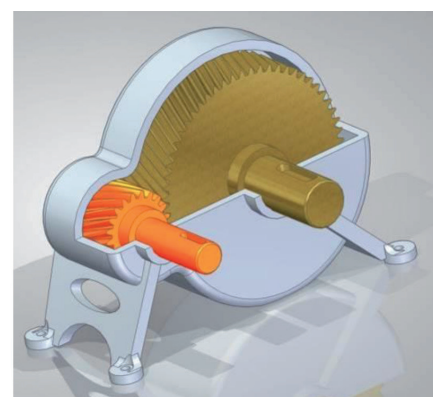


Fig. 21: Optimización funcional y topológica del eje de salida

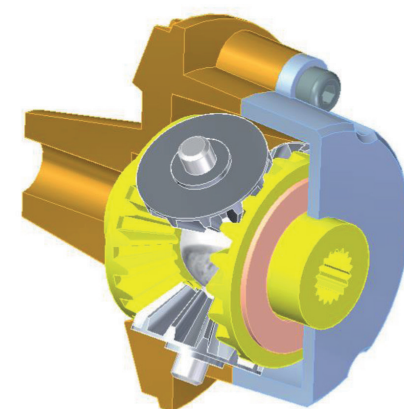
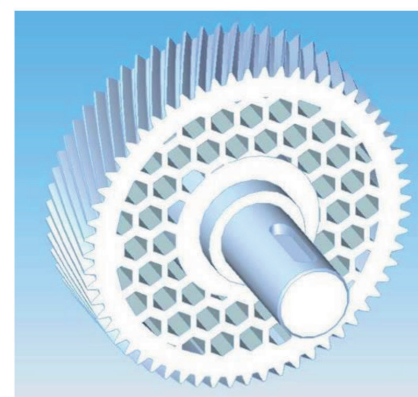
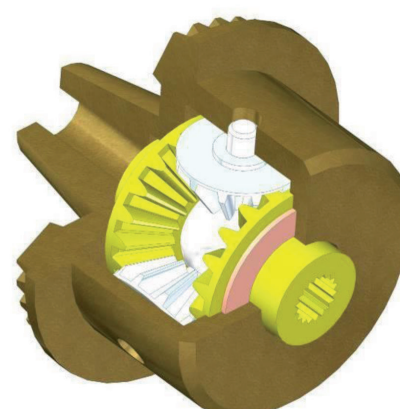


Fig. 22: Diferencial de automóvil



8.1. EJEMPLO DE OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA Y TOPOLÓGICA

Se parte del diseño de una maneta de freno para bicicleta (Figura 23). El objetivo es incrementar la personalización y ligereza del diseño para incrementar el valor percibido por el posible cliente. Como primer paso se analiza la geometría del diseño para determinar las superficies funcionales (Figura 24).

A continuación se explotan las posibilidades de optimización de las superficies con fines estéticos o de personalización. En este caso hay superficies en contacto con otras que no pueden modificarse. Sin

embargo la que está en contacto con la mano puede personalizarse utilizando, por ejemplo, un modelo 3D de la mano del cliente (Figura 25).

Una vez definidas las superficies se añade al diseño el volumen necesario para cumplir con los requerimientos. La parte del volumen no poroso se concibe para cumplir con los requerimientos (Figura 27).

El resto del volumen es hueco, para aligerar el diseño y economizar material. Las estructuras huecas utilizadas en el presente trabajo son homogéneas. Sin duda, utilizar estructuras interiores huecas que adapten su geometría a las sollicitaciones

mecánicas redundará en piezas optimizadas materialmente.

Por último la Figura 28 presenta el diseño final. Se ha logrado mejorar estéticamente el producto, personalizarlo y aligerarlo, manteniendo la funcionalidad. En cuanto al desarrollo cabe mencionar que el tamaño del fichero se ha multiplicado por 30. Es de esperar que la utilización de estructuras internas con geometrías menos complejas sea más favorable de cara al diseño. En este aspecto, el análisis por elementos finitos presenta dos problemas. Por una parte, la complejidad geométrica incrementa enormemente el tiempo nece-

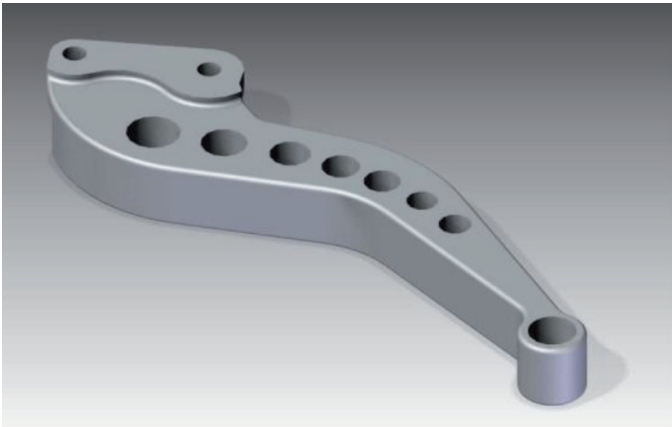


Fig. 23: Diseño para fabricación por moldeo

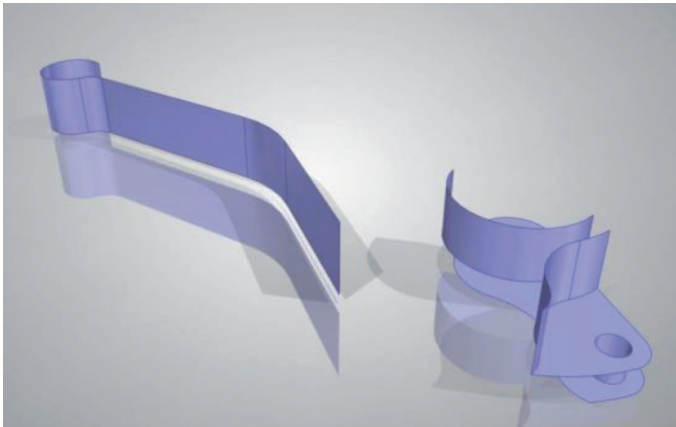


Fig. 24: Superficies funcionales



Fig. 25: Modelo tridimensional de la mano del cliente

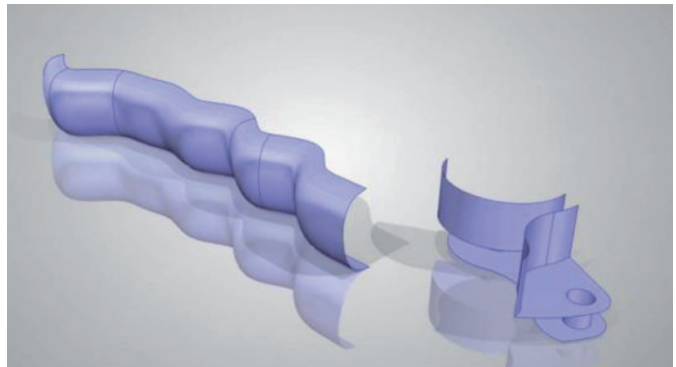


Fig. 26: Superficie personalizada

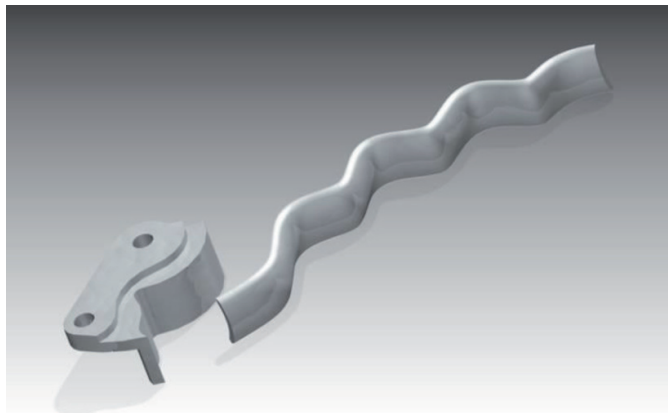


Fig. 27: Volúmenes no porosos

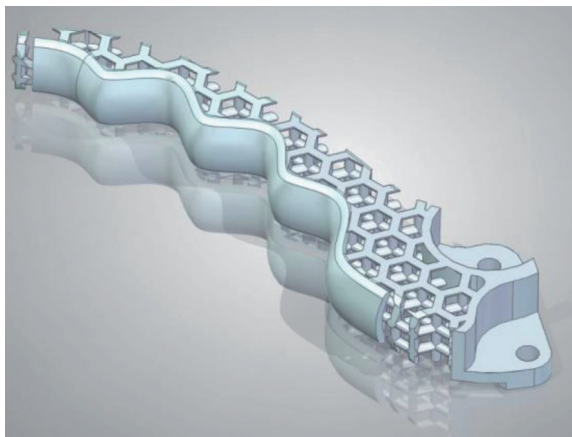


Fig. 28: Diseño final

sario para el análisis. Por otra, la fabricación aditiva produce irregularidades en el material depositado; pero el análisis por elementos finitos tradicional, de momento, no contempla este caso.

9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han analizado las posibilidades que ofrece la fabricación aditiva para optimizar el diseño de productos. La posibilidad de generar casi cualquier geometría permite incrementar la personalización de los productos incrementando el valor percibido por los clientes.

La generación de estructuras celulares permite aligerar los productos, reduciendo el consumo de material y energía. La topología influye en diferentes parámetros como la resistencia mecánica, el tiempo de impresión y la facilidad para su tratamiento mediante DAO. En principio son preferibles estructuras cilíndricas con densidad baja.

La complejidad funcional, con la consiguiente reducción del número de piezas y procesos de montaje, es fácilmente alcanzable con sistemas de DAO tradicionales; implica la modificación de los ajustes entre piezas para obtener piezas disjuntas después del proceso de fabricación. No implica modificaciones del flujo de trabajo habitual.

La elevada complejidad topológica de las estructuras huecas internas combinada con las posibles irregularidades del proceso de fabricación y la anisotropía de los productos obtenidos representan un reto para el análisis mediante elementos finitos.

PARA SABER MÁS

[1] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E.P. Ambrosio, S. Biamino, D. Ugues, M. Pavese and P. Fino, "Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs).",
[2] D. Espalin, D.W. Muse, E. MacDonald and R.B. Wicker, "3D Printing multifunctionality: structures with electronics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, no. 5-8, pp. 963-978.
[3] D. Freitag and T. Woh, *Rapid Prototyping: State of the Art Review*.
[4] M. Masters, T. Velde and F. McBagonluri, "Rapid manufacturing in the hearing industry," *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*, pp. 195-209.
[5] P. du Plessis, S. Avitronics and R. Arena, "A functional application of RM in a military environment".
[6] I. Gibson, D.W. Rosen and B. Stucker, "Direct digital manufacturing," pp. 378-399.
[7] H. Stahl, "3D Printing-Risks and Opportunities".
[8] A. Kochan, "Rapid prototyping helps Renault

F1 Team UK improve championship prospects," *Assem.Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 336-339.
[9] A. Joe Lopes, E. MacDonald and R.B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 129-143.
[10] B. Kianian, S. Tavassoli and T.C. Larsson, "The Role of Additive Manufacturing Technology in job creation: an exploratory case study of suppliers of Additive Manufacturing in Sweden," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 93-98.
[11] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar and L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 5-8, pp. 1191-1203.
[12] E. Atzeni and A. Salmi, "Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 9-12, pp. 1147-1155.
[13] I. Gibson, D.W. Rosen and B. Stucker, "Additive manufacturing technologies," 2010.
[14] C.B. Williams, J.K. Cochran and D.W. Rosen, "Additive manufacturing of metallic cellular materials via three-dimensional printing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1-4, pp. 231-239.
[15] B.P. Conner, G.P. Manogharan, A.N. Martof, L.M. Rodomsky, C.M. Rodomsky, D.C. Jordan and J.W. Limperos, "Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services," *Additive Manufacturing*, vol. 1, pp. 64-76.
[16] C. Klahn, B. Leuteneker and M. Meboldt, "Design for Additive Manufacturing-Supporting the Substitution of Components in Series Products," *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 138-143.
[17] Y. Zhai, D.A. Lados and J.L. LaGoy, "Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation," *JOM*, vol. 66, no. 5, pp. 808-816.
[18] D. Bak, "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter," *Assem.Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 340-345.
[19] N. Guo and M.C. Leu, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 215-243.
[20] K. Henke and S. Treml, "Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 71, no. 1, pp. 139-141.
[21] S. Hong, C. Sanchez, H. Du and N. Kim, "Fabrication of 3D Printed Metal Structures by Use of High-Viscosity Cu Paste and a Screw Extruder," *J Electron Mater*, pp. 1-6.
[22] M. Kim, W. Chu, Y. Kim, A.P.G. Avila and S. Ahn, "Direct metal printing of 3D electrical circuit using rapid prototyping," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 5, pp. 147-150.
[23] L. Wang and J. Liu, "Compatible hybrid 3D printing of metal and nonmetal inks for direct manufacture of end functional devices," *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no. 11, pp. 2089-2095.
[24] D. Espalin, D.W. Muse, E. MacDonald and R.B. Wicker, "3D Printing multifunctionality:

structures with electronics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, no. 5-8, pp. 963-978.
[25] L. Wang and J. Liu, "Compatible hybrid 3D printing of metal and nonmetal inks for direct manufacture of end functional devices," *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no. 11, pp. 2089-2095.
[26] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus.Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155-162.
[27] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E.P. Ambrosio, S. Biamino, D. Ugues, M. Pavese and P. Fino, "Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs).",
[28] B. Vayre, F. Vignat and F. Villeneuve, "Designing for additive manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 632-637.
[29] N.A. Meisel, C.B. Williams and A. Druschitz, "Lightweight metal cellular structures via indirect 3D printing and casting," pp. 162-176.
[30] G. Campoli, M. Borleffs, S.A. Yavari, R. Wauthle, H. Weinans and A.A. Zadpoor, "Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing," *Mater Des*, vol. 49, pp. 957-965.