

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

## Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

### Trabajo Fin de Máster

TÍTULO Estructuras auxéticas fabricadas con tecnologías aditivas  
y su interés en el sector aeroespacial

AUTORA Elena Torres Bandrés

TUTORA Amabel García Domínguez

CO-TUTOR Ana María Camacho López

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

## Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

TÍTULO Estructuras auxéticas fabricadas con tecnologías aditivas  
y su interés en el sector aeroespacial

AUTOR Elena Torres Bandrés

TUTOR Amabel García Domínguez

CO-TUTOR Ana María Camacho López

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

**COMISIÓN EVALUADORA**

PRESIDENTE: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

VOCAL \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

SECRETARIO \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**FECHA DEFENSA** \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

**CALIFICACIÓN** \_\_\_\_\_

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: \_\_\_\_\_ Fdo.: \_\_\_\_\_ Fdo.: \_\_\_\_\_

**CÓDIGOS UNESCO**

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

# Índice general

Índice de figuras	II
Índice de tablas	II
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción al trabajo . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
<b>2. Fundamentos teóricos de la fabricación aditiva</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción . . . . .	3
2.2. Proceso de utilización de la fabricación aditiva . . . . .	5
2.3. Tecnologías de fabricación aditiva . . . . .	11
2.3.1. Fotopolimerización en tanque . . . . .	13
2.3.2. Inyección de material y de aglutinante . . . . .	15
2.3.3. Fusión de lecho de polvo . . . . .	19
2.3.4. Extrusión de material . . . . .	20
2.3.5. Deposición de energía focalizada . . . . .	22
2.3.6. Laminación de hojas . . . . .	24
2.4. Ventajas y desventajas de la fabricación aditiva . . . . .	26
2.5. Materiales utilizados en la fabricación aditiva . . . . .	30
2.6. Oportunidades . . . . .	32
<b>3. Estructuras auxéticas</b>	<b>34</b>
3.1. Características y aplicaciones de las estructuras auxéticas . . . . .	34
3.1.1. Coeficiente de Poisson . . . . .	34
3.1.2. Características de las estructuras auxéticas . . . . .	36
3.1.3. Aplicaciones de las estructuras auxéticas . . . . .	37
3.2. Tipos de estructuras auxéticas . . . . .	39
3.2.1. Estructuras re-entrantes . . . . .	39
3.2.2. Estructuras quirales . . . . .	41
3.2.3. Estructuras rotantes . . . . .	42
3.3. Estructuras auxéticas para el sector aeroespacial . . . . .	43
<b>4. Fabricación aditiva de estructuras auxéticas para el sector aeroespacial</b>	<b>44</b>
4.1. Requisitos de componentes del sector aeroespacial . . . . .	44
4.2. Materiales empleados en el sector aeroespacial . . . . .	45



## ÍNDICE GENERAL

II

4.2.1. Materiales reforzados por fibras . . . . .	46
4.2.2. Aleaciones ligeras . . . . .	47
4.2.3. Estructuras tipo sandwich . . . . .	50
4.3. Fabricación aditiva de estructuras auxéticas . . . . .	51
4.3.1. FDM . . . . .	53
4.3.2. SLM y DMLS . . . . .	53
4.3.3. SLS . . . . .	54
4.3.4. EBM y SEBM . . . . .	54
4.3.5. SLA . . . . .	54
4.4. Aplicaciones . . . . .	55
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>58</b>

# Índice de figuras

2.1. Representación gráfica de la fabricación aditiva(FA) [26]. . . . .	4
2.2. Fases del proceso de fabricación aditiva [38]. . . . .	5
2.3. Modelo CAD [67]. . . . .	6
2.4. Escaneado 3D [57]. . . . .	6
2.5. Efecto del mallado del modelo [81]. . . . .	7
2.6. Resolución de la pieza en función de los triángulos de la malla [5]. . . . .	7
2.7. Modelo 3D donde se aprecia la colocación del material de soporte y su proceso de seccionado por capas. [38]. . . . .	8
2.8. Corte del modelo 3D en capas [41]. . . . .	8
2.9. Postprocesado de una pieza fabricada mediante tecnologías aditivas [60]. . . . .	10
2.10. Esquema ilustrativo de la clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva según el proceso seguido por la máquina en la fabricación [4]. . . . .	12
2.11. Esquema del proceso de fotopolimerización [38]. . . . .	13
2.12. Extracción de la pieza curada obtenida mediante fotopolimerización [2]. . . . .	14
2.13. Ejemplos de piezas obtenida mediante fotopolimerización [38]. . . . .	14
2.14. Esquema del proceso de inyección de material [38]. . . . .	15
2.15. Piezas obtenidas mediante proceso de inyección de material [18]. . . . .	16
2.16. Esquema del proceso de inyección de aglutinante [38]. . . . .	17
2.17. Pieza obtenida mediante proceso de inyección de aglutinante [18]. . . . .	18
2.18. Esquema del proceso de fusión de lecho en polvo [38]. . . . .	19
2.19. Pieza obtenida mediante proceso de fusión de lecho en polvo [38]. . . . .	20
2.20. Esquema del proceso de extrusión de material [38]. . . . .	21
2.21. Pieza obtenida mediante proceso de extrusión de material [18]. . . . .	21
2.22. Esquema del proceso de deposición de energía focalizada [38]. . . . .	23
2.23. Esquema del proceso de laminación de hojas [38]. . . . .	24
2.24. Materiales utilizados en el proceso de laminación de hojas [38]. . . . .	25
2.25. Pieza fabricada mediante laminación de hojas [18]. . . . .	25
2.26. Representación gráfica de la complejidad sin coste adicional [38]. . . . .	27
2.27. Reducción en la generación de residuos de la FA frente a la fabricación sustractiva [1]. . . . .	27
2.28. Representación gráfica de la independencia económica del número de piezas a fabricar [38]. . . . .	28
2.29. Diferencia de acabados según el espesor de capa y el tratamiento superficial de la pieza. [38]. . . . .	29
2.30. Demostración mediante ensayo de las propiedades anisotrópicas de una pieza fabricada mediante FA [38]. . . . .	29

2.31. Tipos de materiales en fabricación aditiva [15]. . . . .	30
2.32. Lista de metales más comunes utilizados en FA [15]. . . . .	31
2.33. Ejemplos de piezas metálicas fabricadas por fabricación aditiva. [28]. . . . .	32
2.34. El sistema de propulsión para el F-35, que contiene un número sustancial de componentes que pueden fabricarse mediante fabricación aditiva [28]. . . . .	33
2.35. Componentes estructurales de titanio en el Boeing 787 [12]. . . . .	33
3.1. Ensayos de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson positivo [76]. . . . .	35
3.2. Ensayos de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson negativo [76]. . . . .	35
3.3. Resistencia a abolladura de material convencional y material auxético [43]. . . . .	36
3.4. Dilatador que emplea una varilla auxética [25] . . . . .	37
3.5. Bala o proyectil que contiene componentes auxéticos y no auxéticos [25] . . . . .	38
3.6. Comportamiento de curvatura sinclástica (en forma de cúpula) de materiales con una relación de Poisson negativa [42]. . . . .	38
3.7. Panel reentrante 2D (a) Sin deformar (b) Deformado [85]. . . . .	39
3.8. Estructuras reentrantes: (a) Estructura de doble punta de flecha, (b) Estructura de panel en estrella, (c) Estructura de panel reentrante hexagonal, (d) Estructura formada a partir de rejillas de rombos, (e) Estructura formada a partir de rejillas cuadradas, (f) Estructura formada a partir de ligamentos sinusoidales [85]. . . . .	40
3.9. Célula tridimensional: (a) Célula convencional, (b) Célula reentrante [85]. . . . .	41
3.10. Estructuras quirales: (a) Formados con las mismas unidades quirales (b) Formados con unidades quirales simétricas. [85]. . . . .	42
3.11. Estructuras giratorias (a) Unidades triangulares, (b) Unidades cuadradas, (c) Unidades rectangulares, (d) Unidad tetraédrica. [85]. . . . .	42
3.12. Estructura tipo Sandwich [43]. . . . .	43
4.1. Principales piezas CFRP en aeronaves [55]. . . . .	44
4.2. Distribución de material en peso en el Boeing 787 [77]. . . . .	45
4.3. Esquema de la composición de las capas de GLARE [17]. . . . .	46
4.4. Tipos de fibras utilizadas como refuerzo en materiales compuestos [24]. . . . .	46
4.5. Esquema de los materiales de diseño del fuselaje del A350 XWB [16]. . . . .	47
4.6. Estructura de soporte del tren de aterrizaje del Boeing 757 [14]. . . . .	48
4.7. APU Honeywell GTC36 montada debajo de la cola de un avión comercial [82]. . . . .	48
4.8. Ejemplo de la aplicación de aleación de titanio para el motor V2500 empleado por el Airbus A320. [40]. . . . .	49
4.9. Esquema de los principales componentes estructurales del asiento [19]. . . . .	49
4.10. Esquema de una estructura tipo sandwich [61]. . . . .	50
4.11. Sistema prototipo utilizado durante las pruebas de impresión aditiva de estructuras auxéticas cilíndricas mediante robótica [11]. . . . .	51
4.12. Álabes de turbina [35]. . . . .	55
4.13. Modelo del álabe y distribución de los diferentes materiales [50]. . . . .	56
4.14. Modos del álabe de turbina: (a) primera flexión; (b) primera torsión; y (c) segunda flexión [50]. . . . .	57

# Índice de tablas

2.1.	Ventajas y desventajas del proceso de fotopolimerización. . . . .	14
2.2.	Ventajas y desventajas del proceso de inyección de material. . . . .	16
2.3.	Ventajas y desventajas del proceso de inyección de aglutinante. . . . .	18
2.4.	Ventajas y desventajas del proceso de fusión de lecho en polvo. . . . .	20
2.5.	Ventajas y desventajas del proceso de extrusión de material. . . . .	22
2.6.	Ventajas y desventajas del proceso de deposición de energía focalizada. . . . .	23
2.7.	Ventajas y desventajas del proceso de laminación de hojas. . . . .	26
2.8.	Ventajas y desventajas del proceso de inyección de material. . . . .	26

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción al trabajo

En los últimos años, la investigación sobre la influencia de la impresión 3D en la fabricación global se ha incrementado exponencialmente. Sin embargo, en comparación con otros campos de investigación, todavía es necesario fortalecer la investigación sobre las tecnologías de fabricación aditiva y sus aplicaciones [86].

Los términos empleados habitualmente alrededor de la fabricación aditiva, han ido evolucionando de forma paralela al desarrollo de la tecnología, siendo conveniente establecer un marco de referencia que permita analizar la evolución sufrida y una necesaria estandarización de cara al futuro [41]:

- ‘Rapid Prototyping’. Es el primer término que se utilizó para describir la creación mediante capas de objetos 3D. Actualmente, las tecnologías existentes, permiten conseguir algo más que un ‘prototipo’.
- ‘Impresión en 3D’. Es el término más utilizado. Es frecuente emplear el término de “Impresión en 3D de bajo coste” cuando empleamos máquinas de impresión de alcance doméstico o semiprofesional.
- ‘Fabricación Aditiva’. Es el último término aplicado y se utiliza para describir la tecnología en general. Es muy habitual cuando se hace referencia a aplicaciones industriales de fabricación de componentes y con equipos profesionales e industriales de altas prestaciones.

La industria aeroespacial siempre ha sido un referente para las demás industrias en cuanto a la adopción de innovaciones en todos los campos tecnológicos. El sector aeroespacial ha sido el pionero en la adopción e implementación de nuevas tecnologías, pues avances que la industria aeroespacial adoptó hace tiempo, ahora se han vuelto comunes en las demás, como por ejemplo el uso de materiales compuestos (fibra de carbono) o el empleo de herramientas CAD/CAM en el proceso de diseño [4]. La adopción de las tecnologías de fabricación aditiva en este sector permiten numerosas ventajas como la flexibilidad y facilidad en cuanto a la iteración en el diseño de las piezas como consecuencia de la fabricación directa y tiempo necesario para la entrega del producto al cliente entre otras [38].

Los principales requisitos de los componentes del sector aeroespacial son la reducción del peso de la aeronave, la tolerancia al daño y la resistencia a fatiga y a la corrosión [23]. El empleo de diseños intrincados y geometrías complejas para minimizar la masa y el volumen junto con volúmenes bajos de producción desembocan en altos costes y dilatados tiempos de producción cuando son fabricados de manera tradicional. De esta forma, la fabricación aditiva permitirá recortar el tiempo de fabricación de estas geometrías, en ocasiones imposibles de realizar mediante otros métodos de fabricación, optimizando el uso de materiales y reduciendo los costes en la aviación y la industria espacial [54].

Las estructuras auxéticas son una clase especial de componentes estructurales que exhiben una relación de Poisson negativa (NPR) debido a sus materiales constituyentes, microestructura interna o geometría estructural. Para realizar tales estructuras, se requieren procesos de fabricación especializados para lograr precisión dimensional, reducción del desperdicio de material y una fabricación más rápida. Por lo tanto, las técnicas de fabricación aditiva (FA) juegan un papel fundamental en este contexto. [44].

## 1.2. Objetivos

Debido a que la industria aeroespacial está a la cabeza de la adopción de nuevos avances técnicos y tecnológicos en sus procesos, el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es la realización de una investigación acerca de la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva en este sector. Más concretamente sobre la fabricación de estructuras auxéticas mediante estos procesos y el interés que este tipo de estructuras generan en la industria aeroespacial.

El diseño y la fabricación de materiales auxéticos y el análisis de sus relaciones negativas de Poisson han generado gran interés en el mundo de la investigación científica. Se pretende realizar un estudio en detalle sobre el estado del arte de la fabricación aditiva de este tipo de estructuras, explicando las diferentes tecnologías existentes. A su vez se analizan las propiedades de las estructuras auxéticas tales como la alta absorción de energía, tenacidad a la fractura y mejores módulos de cizallamiento, que pueden ser útiles en aplicaciones aeroespaciales.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos de la fabricación aditiva

### 2.1. Introducción

La fabricación aditiva es uno de los pilares de la denominada cuarta revolución industrial, la industria 4.0. Esta tecnología permite convertir modelos en digitales en objetos tridimensionales sólidos, sin necesidad de moldes ni utillajes de ningún tipo [83]. El principio fundamental de la fabricación aditiva es que el material (plástico o metal) es depositado capa a capa de manera controlada donde se requiere hasta completar la pieza. Mediante esta técnica, que conocemos como impresión 3D, se pueden producir formas geométricas personalizadas en función de las necesidades de cada sector. Las características de la impresión 3D rompen con la limitación de la fabricación sustractiva (torneado, fresado, rectificado, etc.) y la fabricación equivalente (forja, fundición, estampación, etc.). La impresión 3D puede producir cualquier producto complejo y de cualquier forma en cualquier campo con un coste independiente del tamaño del lote en cualquier lugar. La impresión 3D es especialmente adecuada para el procesamiento de productos en lotes pequeños y también puede impulsar la personalización personalizada de productos a bajo coste [8].

En la actualidad, existen diferentes tecnologías que permiten la fabricación por adición de un objeto tridimensional. Este tipo de procesos apenas genera residuos materiales, exige un mecanizado sencillo y permite obtener una pieza o un prototipo a partir de un modelo digital en 3D. Además, se reducen considerablemente los costes, tanto económicos como de tiempo, respecto a otras tecnologías como pueden ser la sustracción, la fundición y el amoldamiento, que siendo también efectivas, son bastante más costosas [32]. Por otro lado, es posible adaptar el prototipo a las especificaciones requeridas, simplemente modificando el modelo digital, por lo que hoy en día es posible fabricar casi todo tipo de formas diferentes para una gran variedad de sectores. Por tanto, se puede asegurar que se trata de una tecnología realmente efectiva y competitiva cuando se necesita fabricar piezas que requieren una personalización, presentan una complejidad geométrica o las cantidades requeridas no son muy altas. Esta tecnología también puede ser utilizada conjuntamente con otras tecnologías, ya que en la mayoría de procesos de fabricación industrial, las piezas pasan por diferentes fases [78].

La agregación del material para formar una capa sólida y la consolidación entre cada capa, requiere un aporte de energía o de adhesivo, lo que también determina la calidad final del producto resultante y sus características mecánicas. El material base puede estar en diferentes estados: sólido en polvo, sólido en hilo, lámina de espesor constante, o líquido. El aporte de energía se realiza en forma de calor o de luz ultravioleta. Este calor produce la fusión de metales o termoplásticos, o la polimerización de ciertos plásticos, mientras que otros materiales son fotosensibles y sufren un proceso de curado y solidificación al someterlos a radiación ultravioleta [70].

Para que esta tecnología sea funcional, necesita de las herramientas "CAD (computer aided design)", "CAM (computer aided manufacturing)" y "CAE (computer aided engineering)" orientadas a resolver los problemas que aborda la fabricación aditiva, de modo que estén integradas en el propio proceso de fabricación del producto [70].

La utilización de fabricación aditiva en el ámbito industrial es cada vez más representativa a nivel mundial [83].

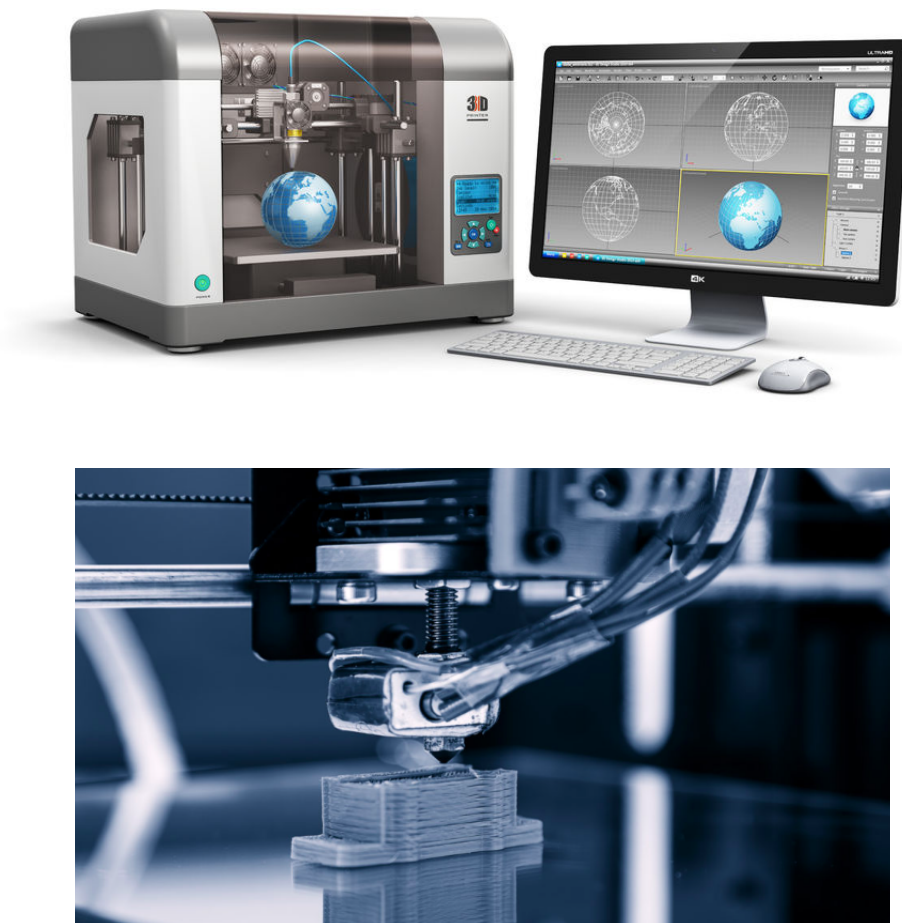


Figura 2.1: Representación gráfica de la fabricación aditiva(FA) [26].



## 2.2. Proceso de utilización de la fabricación aditiva

Como ya se ha comentado, el funcionamiento de la fabricación aditiva consiste en la adición de material por capas, cada capa es una delgada sección de la pieza original de un modelo previamente diseñado en CAD. Cuanto más finas sean esas capas mayor será su aproximación al modelo original.

En la Figura 2.2 se muestran los pasos genéricos a realizar para obtener una pieza mediante FA (a partir de ahora nos referiremos de esta manera a la fabricación aditiva) independientemente del tipo de tecnología que se utilice.

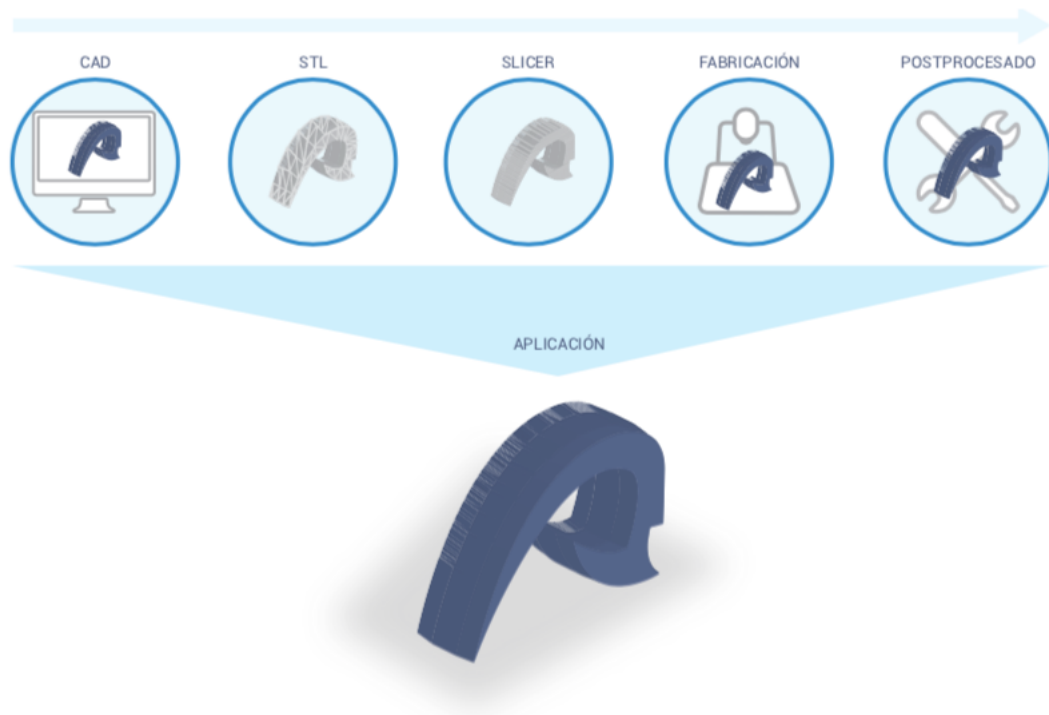


Figura 2.2: Fases del proceso de fabricación aditiva [38].

Se trata de 3 pasos previos a la fabricación y el posterior postprocesado de la pieza.

1. Modelo CAD
2. Archivo STL
3. Slicer
4. Fabricación de la pieza
5. Postprocesado
6. Aplicación

### Modelo CAD

El primer paso es tener un modelo 3D digital de la pieza u objeto que se desea fabricar mediante FA (Figura 2.3). Para obtener el modelo se utiliza principalmente un software de CAD. Existen numerosas opciones para la obtención de estos softwares tanto bajo licencia como gratuitos. Algunos ejemplos de estos softwares son: Autodesk Inventor, Solid Edge, SolidWorks, AutoCad, Catia V5 o Siemens NX [27].

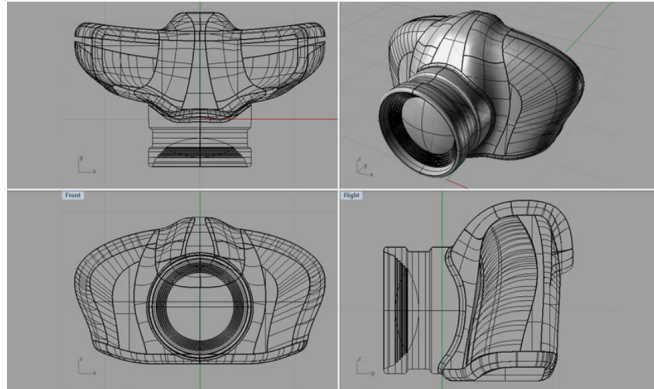


Figura 2.3: Modelo CAD [67].

La ingeniería inversa es uno de los métodos más utilizados para la obtención de estos modelos CAD. Consiste en obtener un modelo 3D a partir de un modelo físico ya existente. Para ello existen diversas técnicas de escaneado tanto por contacto como sin contacto (escaneado 3D, fotografía, láser, etc). En la Figura 2.4 se observa este proceso. Un escaner 3D se encarga de capturar digitalmente el objeto y de obtener el modelo 3D que será exportado al software de diseño CAD [38].



Figura 2.4: Escaneado 3D [57].

El objetivo de esta fase es obtener una nube de puntos para posteriormente generar una malla que los cubra y así obtener un modelo 3D [87].

### Archivo STL

Una vez se tiene el modelo CAD, se debe convertir a un tipo de fichero común que pueda leer la máquina que va a ser utilizada en función de la técnica elegida. Por lo general es un formato .STL, formato que se ha estandarizado para la FA ya que es simple, liviano y fácil de manejar por las máquinas.

Se está trabajando en la introducción de un nuevo formato de archivo de intercambio .AMF (Additive Manufacturing File) que además de permitir una mejor definición geométrica, puede incluir información adicional relativa al material, proceso de fabricación y acabados, entre otras [38].

El formato .STL es una representación mediante una malla triangular del archivo CAD. Esto creará un efecto de facetado en la superficie, que variará en función de los parámetros elegidos durante el guardado.

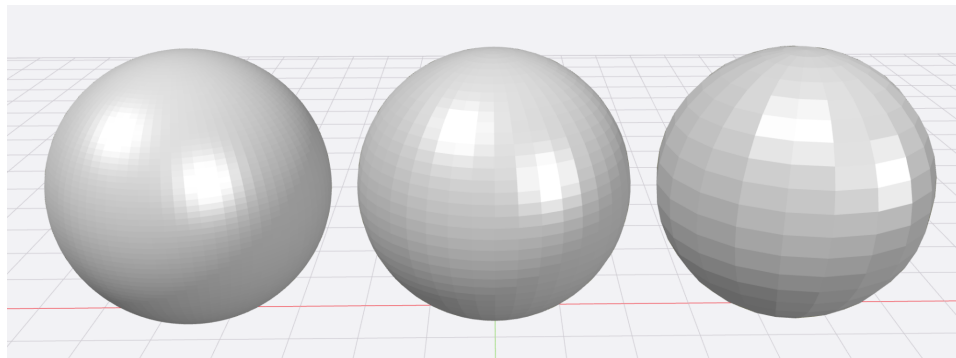


Figura 2.5: Efecto del mallado del modelo [81].

A mayor densidad de triángulos en la malla, mayor será la resolución y por tanto mejor será el resultado (Ver Figura 2.6). Por el contrario esto aumentará el tiempo de procesamiento requerido y puede que también el tiempo de fabricación, por lo que será fundamental adaptar los parámetros según las necesidades de la pieza y su funcionalidad.

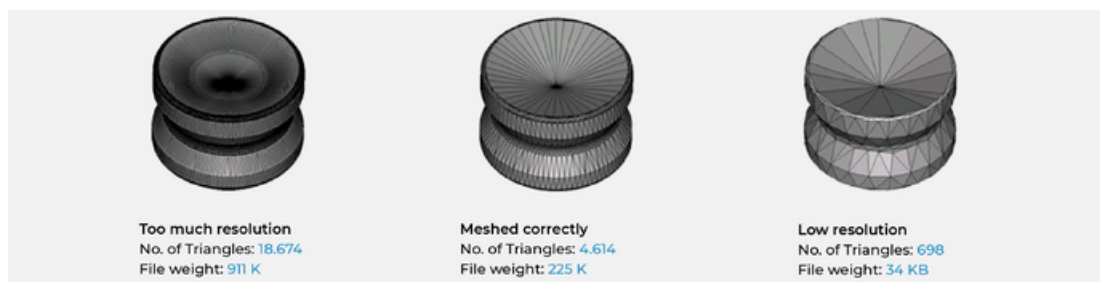


Figura 2.6: Resolución de la pieza en función de los triángulos de la malla [5].

La resolución de un archivo STL afecta a la calidad de la pieza impresa y al tiempo que tarda en procesarse en capas. Un modelo con una alta resolución tendrá una superficie suave con un alto nivel de detalle pero tardará más en procesarse.

### Slicer

En el siguiente paso, se prepara el archivo .STL para la fabricación de la pieza. El software utilizado para este procedimiento se conoce como "slicer", ya que su principal función es seccionar el modelo en capas o secciones planas, que serán las que se utilicen para conformar la pieza tridimensional. Este software permite modificar los parámetros relacionados con la fabricación: orientación de pieza, adición de material de soporte en caso de que sea necesario, velocidad de fabricación, tolerancia dimensional de las capas, temperatura de fabricación y cualquier otro parámetro relevante en función de la tecnología utilizada [38].

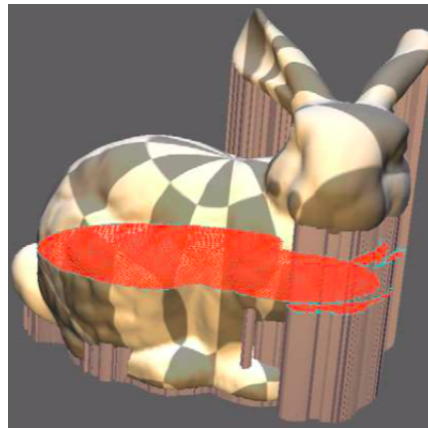


Figura 2.7: Modelo 3D donde se aprecia la colocación del material de soporte y su proceso de seccionado por capas. [38].

Por lo general cada máquina tiene su propio software para realizar este proceso. En la Figura 2.8 se observa la división por capas del modelo y sus respectivos cortes.

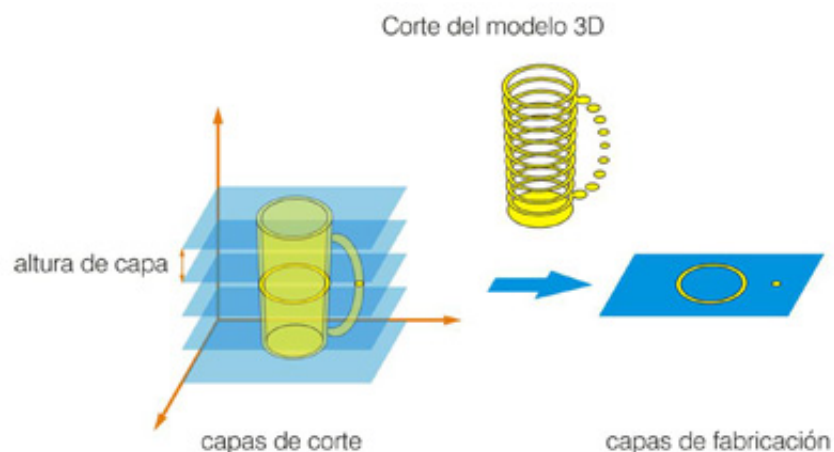


Figura 2.8: Corte del modelo 3D en capas [41].

A pesar de realizar los preajustes de los parámetros, cada tecnología y material tiene sus limitaciones y características, por lo que es fundamental elegir una correcta configuración para no obtener piezas defectuosas. En numerosas ocasiones y a pesar de poder realizar precisas simulaciones, la configuración idónea se consigue a base de ensayo y error.

### **Fabricación**

Una vez obtenido el fichero con toda la información necesaria para la correcta fabricación de la pieza, este es introducido en la máquina para su fabricación. Las máquinas cuentan con controles para variar los parámetros desde las mismas si fuera necesario. El proceso de adición de capas varía según la tecnología utilizada. Aquí es donde la máquina lleva a cabo la materialización de la pieza que hasta ahora sólo ha existido en un soporte informático.

Aunque todos los pasos previos han requerido de la intervención de uno o varios usuarios, tomando activamente decisiones, interactuando con programas informáticos para, en última instancia, indicarle a la máquina de fabricación aditiva cómo ha de fabricar la pieza que han diseñado o que necesitan, este paso es completamente automatizado. Todo lo realizado durante los pasos anteriores ha servido para que la máquina ahora lleve a cabo las órdenes que culminarán en la fabricación de la pieza deseada. La única intervención que se puede realizar durante este paso es proveer a la máquina de material base si ésta se queda sin u ocurrieran eventos no previstos que provoquen algún fallo que impidiese que la fabricación se completara (apagón, avería, etc.) [4].

Cada máquina de fabricación aditiva, dependiendo de la tecnología que posea, fabricará de una forma u otra la pieza y cuando complete el proceso de fabricación, alertará al usuario mediante señales auditivas y visuales o mediante avisos que presentará en la pantalla propia de la máquina [75].

### **Postprocesado de la pieza**

En función de la tecnología o máquina utilizada será necesario realizar distintas tareas de postprocesado. Una vez extraída la pieza, esta será sometida a diferentes procesos de acabado en función de su finalidad. Es posible que la pieza que se haya fabricado esté lista tras su extracción y limpieza, por lo que este paso no es de aplicación para todas. Sin embargo, dependiendo de la aplicación a la que vaya destinada o del material o materiales de los que haya sido fabricada será necesario un postprocesado acorde a las necesidades que se requieran [46].

Un rasgo en común que comparten las máquinas de fabricación aditiva actuales es que debido a la forma en la que la fabricación es llevada a cabo (la pieza es construida depositando capas de material que posteriormente se unen), las propiedades materiales y superficiales de la pieza obtenida tras la fabricación suelen ser fuertemente anisótropas.

Igualmente, puede que durante el proceso de unión de capas se hayan producido imperfecciones como la inclusión de huecos, capas que no se han unido o enlazado correctamente o cristalizaciones no óptimas. Todo ello contribuye a una degradación de las propiedades mecánicas o materiales de la pieza, por lo que se debe llevar a cabo un postprocesado para intentar subsanar alguno de estos fallos.

De esta forma, es posible que se lleven a cabo durante este paso procesos como los siguientes [4]:

- Acabados superficiales mecánicos o físicos (desbaste abrasivo, limado, pulido, etc.)
- Acabados superficiales químicos o electroquímicos (galvanizado, electropulido, anodizado, etc.)

- Recubrimientos electroquímicos (cromado, niquelado, etc.)
- Otros recubrimientos (pintado, barnizado, etc.)
- Tratamientos térmicos de metales (temple y revenido, recocido, carburización, etc.)
- Operaciones de secado o cocido.

En resumen, cualquier operación que se haya de llevar a cabo para que la pieza que se ha fabricado alcance unas características determinadas como puede ser el acabado superficial o las tolerancias se realiza durante este paso. Puede que sean operaciones sencillas o complejas, una o una combinación de ellas, pero todas requieren de un trabajo manual y un cuidado para que no se dañe la pieza que se ha fabricado, en especial si ésta posee una geometría compleja [62].

Éste es el último paso en el proceso genérico de la fabricación aditiva que se realiza antes de que la pieza esté lista para su puesta en servicio según la aplicación a la que se destina. Sin embargo, como nota adicional, cabe mencionar que el postprocesado necesario para las piezas fabricadas mediante las tecnologías de fabricación aditiva por lo general requiere de un menor esfuerzo que en piezas fabricadas por tecnologías de fabricación tradicionales [4].



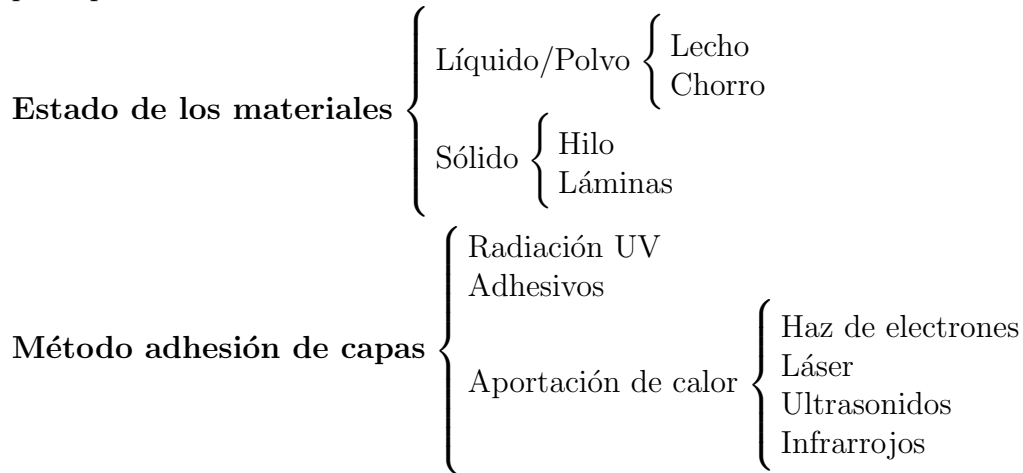
Figura 2.9: Postprocesado de una pieza fabricada mediante tecnologías aditivas [60].

### Aplicación

Terminadas todas estas fases ya se obtiene la pieza final para su utilización. La fabricación aditiva es utilizada para la fabricación de una amplia gama de componentes funcionales, que pueden ser desde piezas finales hasta prototipos que deberán ser sometido a pruebas visuales, de ensamble o a ensayos para comprobar sus propiedades mecánicas. Por último, una vez fabricada, extraída, limpiada y postprocesada, la pieza estará lista para su puesta en servicio. Si la pieza fabricada es un prototipo, su uso en ensayos será su puesta en servicio. De la misma forma con cualquier otra aplicación para la cual se haya fabricado la pieza [39].

## 2.3. Tecnologías de fabricación aditiva

Los rasgos distintivos que diferencian una tecnología de fabricación aditiva de otra son, principalmente:



Existen diferentes clasificaciones para las tecnologías de FA. Según las normas UNE-EN ISO/ASTM 52900 y en UNE-EN ISO17296-2:2017 los procesos de FA se definen y clasifican en siete categorías. En esta última norma, además de la definición se encuentran diagramas esquemáticos y ordenación según materia prima, mecanismo de unión, fuente de activación y procesado secundario [64]. Estos son:

- Fotopolimerización en tanque → Un fotopolímero líquido se cura selectivamente mediante la polimerización activa por luz.
- Inyección de material → Las gotas del material de fabricación son depositadas selectivamente para conformar un objeto.
- Inyección de aglutinante → Un adhesivo líquido es depositado selectivamente para unir partículas de polvo y así conformar el material.
- Fusión de lecho de polvo → Energía térmica que funde selectivamente regiones de un lecho de polvo, conformando así el material.
- Extrusión de material → El material de fabricación es dispensado selectivamente por un orificio.
- Deposición de energía focalizada → Energía térmica focalizada para fundir el material de fabricación, mientras está siendo depositado.
- Laminación de hojas → Se unen láminas del material de fabricación para formar un objeto.

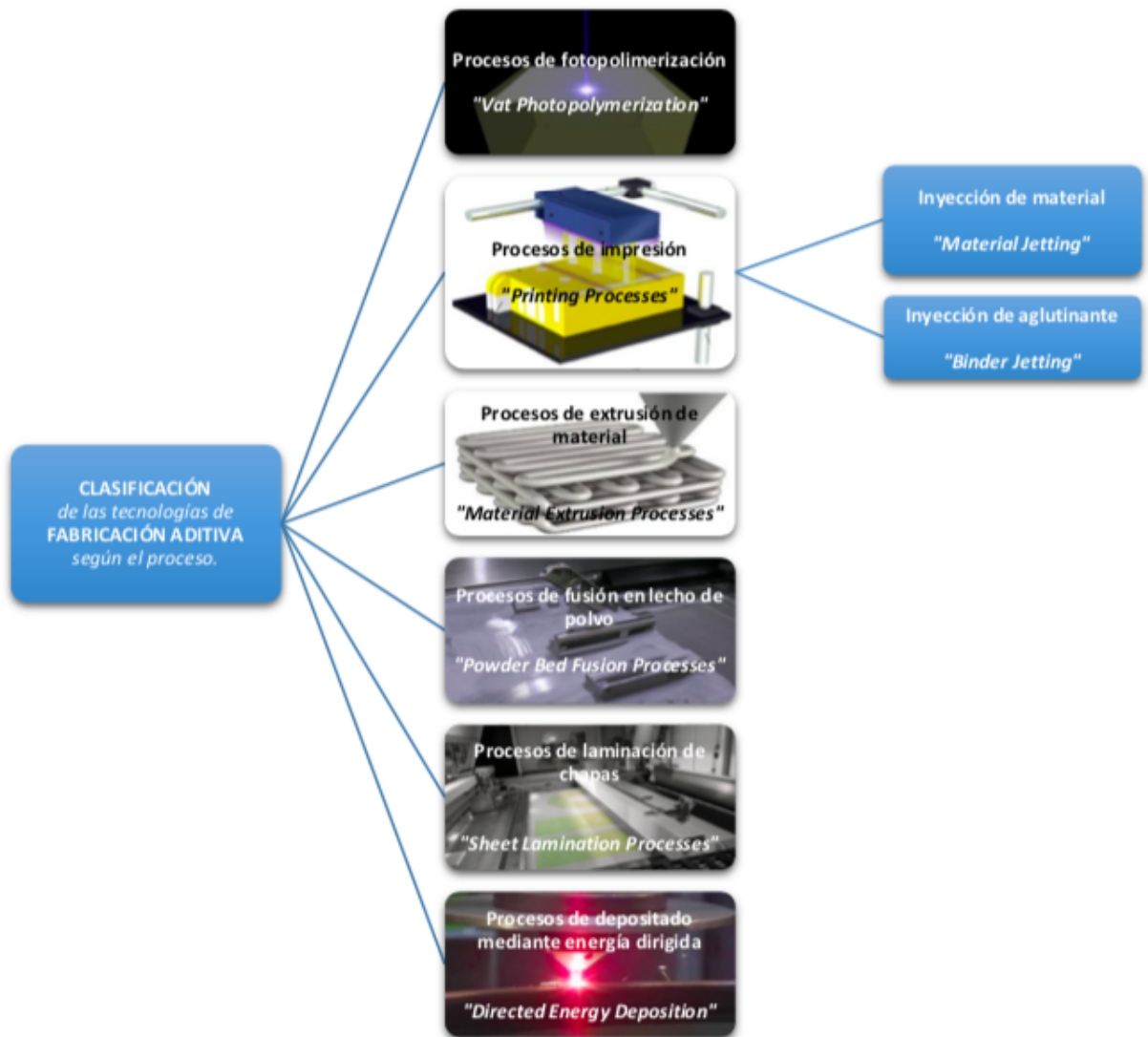


Figura 2.10: Esquema ilustrativo de la clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva según el proceso seguido por la máquina en la fabricación [4].

Por otro lado, en uno de los libros más emblemáticos de fabricación [45] clasifica los procesos de FA (denominados todavía como prototipos rápidos) de la siguiente manera:

- Estereolitografía
- Impresión tridimensional
- Manufactura de partículas balísticas
- Sinterización láser selectiva
- Modelado por deposición de material fundido
- Manufactura de objetos laminados



### 2.3.1. Fotopolimerización en tanque

Los procesos de fotopolimerización o estereolitografía engloban al conjunto de tecnologías de fabricación aditiva que fabrican la pieza utilizando una resina fotopolimerizable sin curar en estado líquido. La resina se encuentra dentro de un recipiente o tanque, junto con una plataforma que se desplaza en el eje vertical (eje Z). Dicha plataforma se encontrará siempre en una posición en la que por encima de ella (en el momento inicial) o por encima de la última capa de material polimerizado se encuentre una capa líquida del espesor indicado para la fabricación de la pieza. Una fuente de luz, normalmente proporcionada por un láser en el espectro visible o ultravioleta, será dirigida por un espejo o varios hacia la resina en estado líquido, proporcionando con su movimiento el control en el plano X-Y que se emplea para fabricar cada capa de la pieza, ya que esta luz inicia el proceso de curado de la resina, polimerizándola y solidificándola. Por lo tanto, el diámetro del haz de luz en la superficie de la resina proporciona de una forma aproximada la resolución en los ejes X-Y de la máquina. Por último, un elemento móvil de la máquina es el encargado de barrer la superficie de la resina fotopolimerizable para mantener la capa de líquido siguiente uniforme y desprender de la última capa polimerizada cualquier elemento que se haya polimerizado en exceso en el eje Z [52].

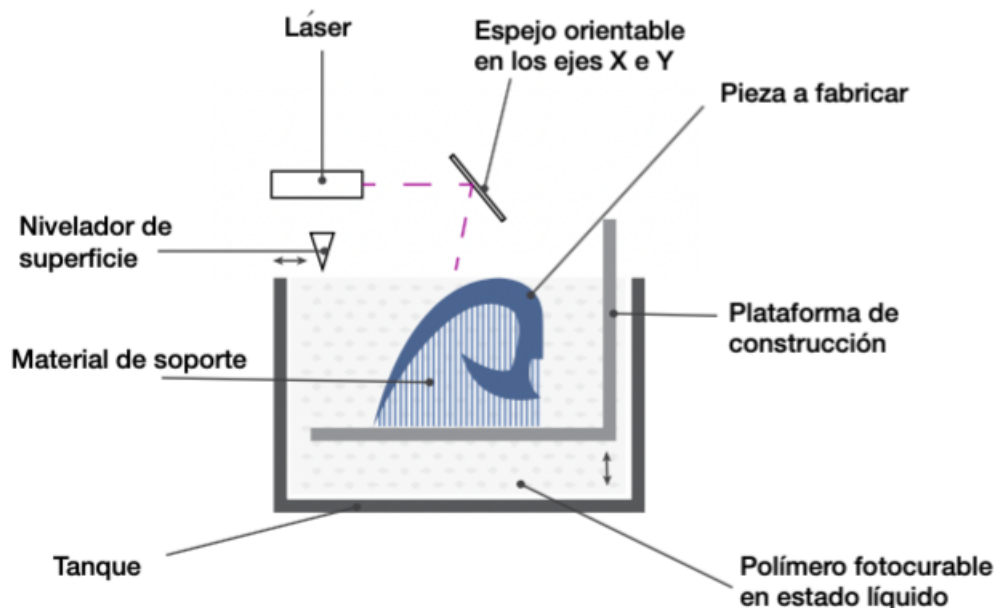


Figura 2.11: Esquema del proceso de fotopolimerización [38].

El post-procesado será el encargado de eliminar lo que se haya polimerizado en exceso en el plano X-Y durante la creación de cada capa. Obviamente, la pieza finalizada sumergida deberá ser extraída del recipiente.

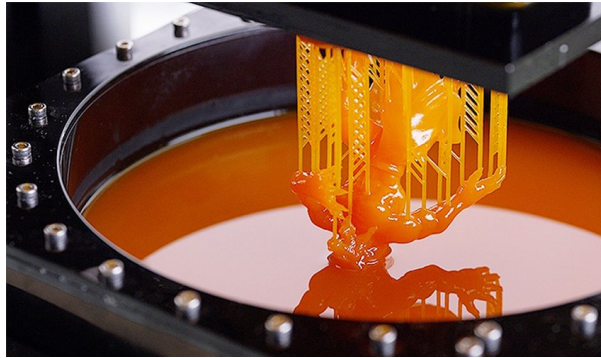


Figura 2.12: Extracción de la pieza curada obtenida mediante fotopolimerización [2].

En la Tabla 2.1 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de fotopolimerización [38].

VENTAJAS:	DESVENTAJAS:
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Áreas de construcción grandes</li> <li>★ Proceso relativamente rápido con respecto a los de otras categorías</li> <li>★ Buena tolerancia y buen acabado superficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Son procesos relativamente caros</li> <li>★ Requiere de largos tiempos de post-procesado y extracción</li> <li>★ Limitado sólo a materiales fotopoliméricos</li> <li>★ Suelen necesitar postcurados para mejorar sus propiedades estructurales</li> <li>★ Piezas sensibles a la luz, humedad y temperatura</li> </ul>

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas del proceso de fotopolimerización.



Figura 2.13: Ejemplos de piezas obtenida mediante fotopolimerización [38].

Algunas de las limitaciones del proceso son el riesgo al fotocurado de manera accidental y que el curado no sea completo durante el proceso ya que se desconoce la cantidad de material que podrán soportar las capas inferiores sin deformarse. Para evitar esto se orienta la pieza para que soporte mejor los esfuerzos a los que está sometida. Además si se quiere construir

una pieza con altura será un proceso más caro ya que construir capas en altura es más caro que hacerlo de manera horizontal en el tanque.

### 2.3.2. Inyección de material y de aglutinante

Estos procesos se denominan procesos de impresión ya que su funcionamiento es similar al de las impresoras de tinta convencionales. En la inyección de material se utilizan ceras, fotopolímeros o metales mientras que en la inyección de aglutinante se utiliza cualquier material en polvo (generalmente metales y cerámicos).

En los **procesos de inyección de material** se utiliza un cabezal que contiene en su interior el material que será utilizado para fabricar la pieza. En dicho cabezal existirán inyectores integrados que forman una ranura por la cual se eyectada el material que contiene el cabezal. Estos materiales son fotopolimerizables por lo que una luz UV los va curando a medida que se inyectan, para ello, la plataforma de construcción descende y se repite el proceso para seguir construyendo capa a capa la geometría deseada. Una vez construida la pieza se extrae de la plataforma de construcción y se realiza el postprocesado. El movimiento del cabezal se realiza en el plano X-Y mientras que el movimiento en el eje vertical (eje Z) lo realiza la plataforma de construcción.

Se pueden usar multitud de materiales en un mismo proceso puesto que este sistema permite el cambio de cabezales. Así mismo, un mismo cabezal puede contener también varios materiales que serán inyectados a la vez. Sin embargo, estos materiales tienen que ser fotocurables, por lo que sólo permite utilizar materiales plásticos y resinas [4].

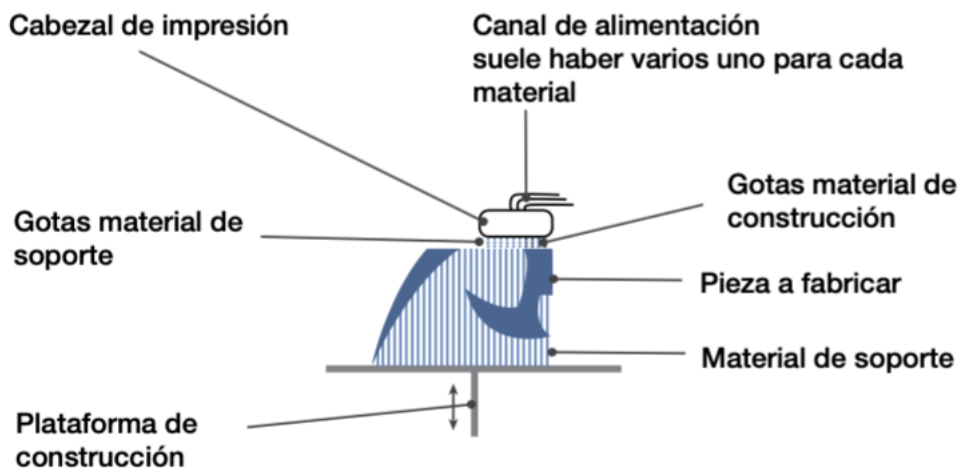


Figura 2.14: Esquema del proceso de inyección de material [38].

En la Tabla 2.8 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de inyección de material [38].

VENTAJAS:	DESVENTAJAS:
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Gran libertad geométrica y excelente grado de precisión.</li> <li>★ Gran acabado superficial.</li> <li>★ Alta velocidad de fabricación, en <math>15 \text{ mm}^3</math> es la más rápida.</li> <li>★ A mayor volumen aumenta porque los cabezales tienen que recorrer mayor espacio.</li> <li>★ El material de soporte se genera con otro material fácilmente eliminable.</li> <li>★ Permite gran variedad de materiales poliméricos con diferentes propiedades.</li> <li>★ Permite construir las piezas en multimaterial y multicolor de una sola vez. También conjuntos ensamblados.</li> <li>★ No requiere fotocurado posterior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ La incapacidad de utilizar materiales metálicos.</li> <li>★ Inversión en material mayor.</li> <li>★ A menudo requiere material de soporte que habrá que eliminar posteriormente.</li> <li>★ Pobre estabilidad dimensional debido a su sensibilidad a agentes externos: luz y temperatura.</li> </ul>

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas del proceso de inyección de material.

Los sistemas de inyección de material también son capaces de imprimir materiales múltiples y graduados piezas de material. La Figura 2.15 muestra una impresora 3D de inyección de material y las piezas obtenidas a través de la misma.

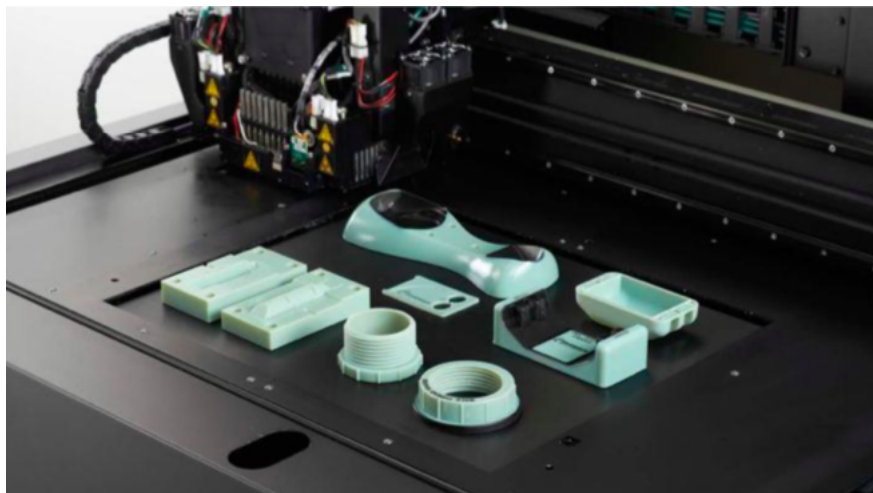


Figura 2.15: Piezas obtenidas mediante proceso de inyección de material [18].

En los **procesos de inyección de aglutinante** lo que el cabezal inyecta al sistema es un material aglutinante o adhesivo en forma líquida, que es suministrado mediante un depósito al cabezal, en vez del material del que será fabricada la pieza que es lo que se inyecta en los procesos de inyección de material mencionados anteriormente. El material del que será

fabricada la pieza se encuentra en forma de polvo, por lo que no hay tantas restricciones en cuanto al material que se utiliza para fabricar la pieza. Sin embargo sólo puede ser utilizado un tipo de polvo de material a la vez, por lo que es complicado fabricar piezas de varios materiales utilizando la inyección de aglutinante.

En la Figura 2.16 se puede observar el proceso. Generalmente las máquinas del proceso se encuentran en una disposición de dos recipientes. Uno de ellos contiene el material en forma de polvo con el que será fabricada la pieza y el otro será donde se fabrica la misma. Sobre este última se coloca el cabezal que se desplaza en el plano X-Y depositando el aglutinante. En cada recipiente existe una plataforma que se desplaza en el eje vertical (eje Z), sin embargo tendrán movimientos verticales opuestos, es decir, la plataforma del recipiente que suministra material irá ascendiendo conforme avanza la fabricación de la pieza para seguir suministrando material, mientras que la plataforma del recipiente donde se fabrica la pieza irá descendiendo conforme avanza el proceso para permitir la introducción de más material para construir la siguiente capa. Es por esto que previo al comienzo del proceso, la plataforma del recipiente del material se encuentra en su nivel más bajo mientras que la plataforma del recipiente donde se fabrica la pieza estará en su posición más alta.

El espacio entre la superficie de la plataforma y el borde del recipiente representa el espesor de capa inicial y el espesor de cada capa será el espacio entre la capa anterior y el borde del recipiente. Por tanto, el espesor de las capas se controla mediante la elevación de la plataforma del recipiente [4].

Como se observa en el esquema del proceso, existe un distribuidor de material entre las dos bandejas, se trata de un elemento nivelador y homogeneizador que se encarga de arrastrar el material en polvo hacia la bandeja donde el cabezal depositará el aglutinante y definirá la geometría de esa capa. Para fabricar la siguiente capa, la plataforma se desplaza hacia abajo, se distribuye más material en polvo y se repite el proceso. Cabe mencionar que a diferencia de otros procesos donde es necesario un soporte, en el proceso de inyección de aglutinante es el propio material en forma de polvo que no ha sido aglutinado el que actúa como soporte [38].

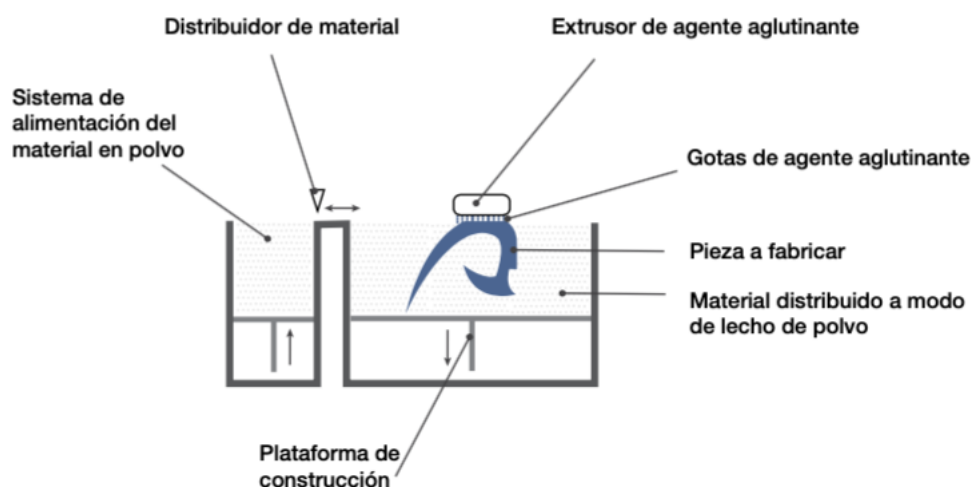


Figura 2.16: Esquema del proceso de inyección de aglutinante [38].

Una vez finalizada la pieza, deberá ser retirada de la bandeja de construcción de entre el material en polvo no aglutinado. Dicho material será devuelto a las bandejas de suministro de materia prima para realizar otra construcción posterior, siempre limpiando y dejando libre de material la bandeja de construcción. Con este proceso, se suele proceder a realizar operaciones de post-procesado orientadas a aumentar la integridad de la pieza, ya que su resistencia es escasa debido a su estructura interna, aglutinada mediante adhesivos. Por ejemplo, en el caso de materiales cerámicos se realizan cocidos en hornos mientras que para materiales metálicos se puede proceder a fomentar la unión de dichos granos mediante la sinterización en un horno. Tampoco es raro que se empleen materiales de sellado para aumentar la resistencia y el acabado superficial.

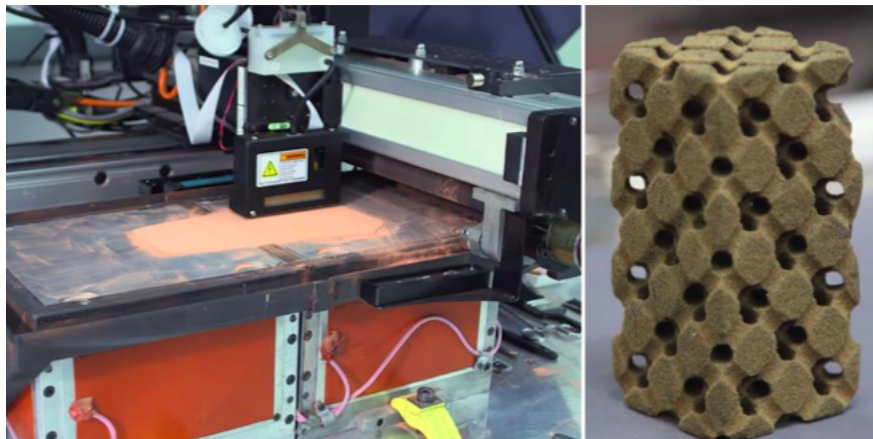


Figura 2.17: Pieza obtenida mediante proceso de inyección de aglutinante [18].

En la Tabla 2.3 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de inyección de aglutinante [38].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Las piezas se pueden producir en una amplia gama de colores mediante la adición de tinta al aglutinante.</li> <li>★ Permite utilizar todo el volumen de fabricación mediante la anidación de piezas.</li> <li>★ Permite gran variedad de materiales.</li> <li>★ Es más rápido que otros procesos de FA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ El postprocesado suele ser tedioso y consume mucho tiempo.</li> <li>★ Las piezas obtenidas también suelen tener un acabado poroso y requerir de la adición de resinas para mejorar sus propiedades mecánicas y estructurales.</li> </ul>

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas del proceso de inyección de aglutinante.



### 2.3.3. Fusión de lecho de polvo

El proceso que se lleva a cabo es muy similar a los procesos de impresión mediante inyección de aglutinante. El material que se empleará para construir la pieza se encuentra en forma de polvo en una disposición idéntica a los descritos para dichos procesos, es decir, un recipiente para la construcción de la pieza y otro donde el material en forma de polvo se almacena y suministra al recipiente de construcción mediante el empleo de un elemento que barre la superficie de dichos recipientes para suministrar y homogeneizar el material. Sin embargo, la diferencia fundamental con el proceso de impresión mediante la inyección de aglutinante se encuentra en la forma en la que la máquina une el material en forma de polvo de forma selectiva, ya que en este proceso es realizado mediante el empleo de un láser para calentar (proveer de energía térmica) localmente la zona donde el haz es dirigido para realizar o bien la fusión o sinterización <sup>1</sup> del material, enlazándolo y así creando sucesivamente las capas y la geometría de la pieza [59].

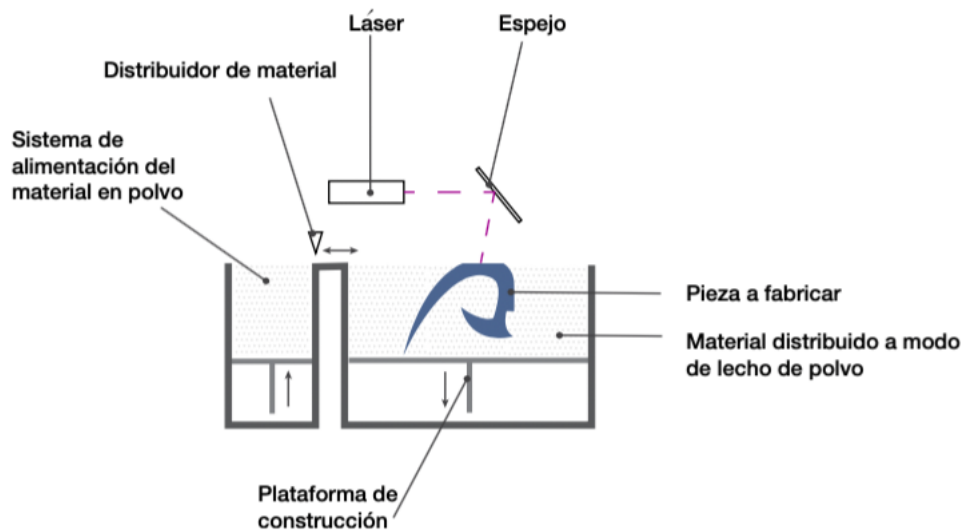


Figura 2.18: Esquema del proceso de fusión de lecho en polvo [38].

Debido a la naturaleza del proceso, es más indicado para la fabricación de piezas metálicas (sinterizándolas o fundiéndolas) o poliméricas (mediante la sinterización) aunque también es posible emplear polvo de cerámicas que puedan ser sinterizadas. Las piezas producidas de esta forma suelen requerir de algunos procesos específicos de postprocesado para eliminar algunos de los desperfectos en su estructura interna (principalmente porosidades).

Ninguna requiere de soporte auxiliar, ya que al igual que en el proceso de inyección de aglutinante, el lecho de polvo donde se encuentra la pieza es el que actúa de soporte. Sin embargo es importante manejar de manera adecuada los tiempos de enfriamiento entre capas para evitar inconsistencia en las propiedades del material en determinadas zonas.

<sup>1</sup>Proceso por el cual se forma una masa sólida a partir de partículas de un mismo material mediante la aplicación de calor y/o presión sin llegar a fundirlo. Estando las partículas en contacto, a altas temperaturas ocurre un proceso de difusión atómica entre ellas, fusionando y formando un nuevo sólido con continuidad física y química. Este fenómeno ocurre en metales, cerámicas y algunos polímeros, entre otros materiales.

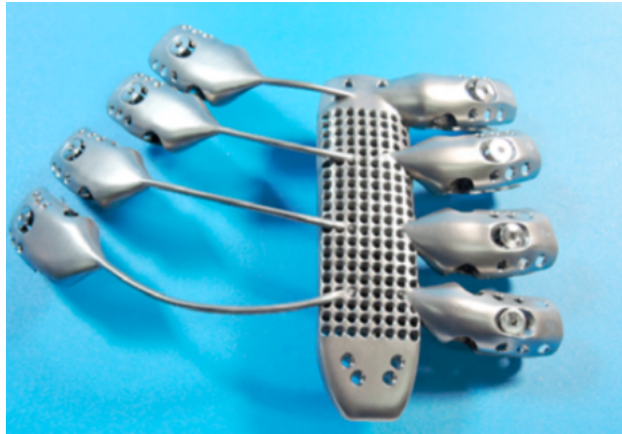


Figura 2.19: Pieza obtenida mediante proceso de fusión de lecho en polvo [38].

En la Tabla 2.4 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de fusión de lecho en polvo [38].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Son procesos relativamente económicos.</li> <li>★ Tanto los procesos para plásticos como para metales, son competitivos en series cortas frente a los procesos de fabricación tradicionales, obteniendo piezas con propiedades mecánicas muy similares.</li> <li>★ Existen procesos para tener una amplia variedad de materiales.</li> <li>★ No requieren de material de soporte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Son procesos relativamente lentos.</li> <li>★ Suponen un consumo energético alto.</li> </ul>

Tabla 2.4: Ventajas y desventajas del proceso de fusión de lecho en polvo.

### 2.3.4. Extrusión de material

El principio fundamental del proceso de extrusión es darle una cierta viscosidad y fluidez al material del que se va a fabricar la pieza al hacerlo pasar a través de un difusor e inyector (extrusión) depositándolo sobre una plataforma donde se irá fabricando la pieza capa por capa. Se utilizan materiales como ceras, termoplásticos u otros polímeros que se calientan mediante resistencias justo antes de pasar por el difusor en el interior del cabezal. Este material se encuentra enrollado formando hilos o filamentos en bobinas. Dichos hilos se acoplan al cabezal donde se lleva a cabo la extrusión. La rotación de la bobina de cada suministra al cabezal de forma continua el material durante el proceso de fabricación. Dependiendo del diseño de la máquina el material también puede ser suministrado en forma granular, que se hace llegar al cabezal mediante una tolva de alimentación, se calienta en su interior y sale por los inyectores homogeneizado y de manera continua o en gotas. El cabezal



se mueve libremente en el plano X-Y, e inyecta el material de manera continua o discreta según las necesidades de la capa que se esté fabricando [59].

Como en la mayoría de procesos, la pieza se fabrica sobre una plataforma móvil que se desplaza verticalmente (eje Z) sobre la cual se deposita el material viscoso por el cabezal capa por capa. Las capas se adhieren unas a otras al solidificarse el material debido a que el plástico se encuentra en estado fundido. Una vez finalizada una capa, la plataforma desciende una distancia equivalente al grosor de la siguiente capa y así sucesivamente hasta la finalización de la pieza. Una vez finalizado el proceso, se extrae la pieza de la plataforma de construcción y se realiza el postprocesado [4].

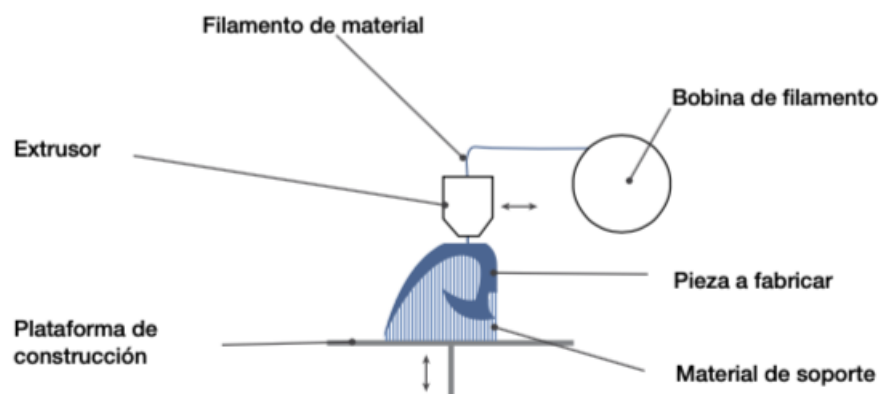


Figura 2.20: Esquema del proceso de extrusión de material [38].

En este proceso se requieren estructuras auxiliares de soporte, por lo que se añade una complejidad adicional tanto al proceso de diseño como al paso de extracción y limpieza de la pieza ya que deben desprenderse fácil de la pieza final. Es común utilizar una base de polipropileno expandido en la plataforma constructora para realizar el depositado de la primera capa, de esta manera se impide que se quede adherida en la superficie y se evitan daños en la pieza final durante su extracción.

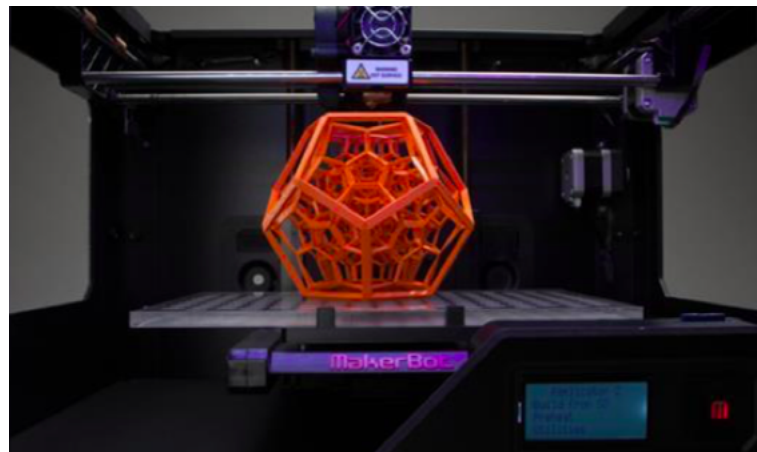


Figura 2.21: Pieza obtenida mediante proceso de extrusión de material [18].

En la Tabla 2.5 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de extrusión de material [38].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Las piezas obtenidas presentan propiedades mecánicas similares a las obtenidas por procesos convencionales.</li>   <li>★ Funcionan con materiales estándar por lo que existe una gran variedad de materiales disponibles.</li> <li>★ Es un proceso altamente extendido y con un precio de entrada bajo.</li>   <li>★ Permiten postprocesados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ La dirección de construcción de las capas causa que la resolución de la máquina haga que se puedan apreciar escalones entre capas. Al ser esta dirección en X-Y hace que la pieza presente anisotropía en Z.</li> <li>★ La calidad y la altura de capa de la pieza vendrá definida por el diámetro del extrusor.</li> <li>★ En comparación con otros procesos, la velocidad y precisión de construcción son inferiores.</li> <li>★ Se requiere controlar constantemente las condiciones de temperatura durante el proceso, esto es imposible en máquinas de bajo coste abiertas, lo que se traduce en una peor calidad en la pieza.</li> </ul>

Tabla 2.5: Ventajas y desventajas del proceso de extrusión de material.

### 2.3.5. Deposición de energía focalizada

Este grupo de procesos es similar a los procesos de impresión con inyección de material. En lugar de emplear un cabezal que contiene el material o materiales del que será fabricada la pieza, esta tecnología se basa en suministrar el material en forma de polvo a través de un sistema de alimentación hacia un haz o rayo de energía dirigida, usualmente un láser, rayo de electrones o gas ionizado a alta temperatura, a través de unos inyectores.

Las corrientes de material en polvo se inyectan directamente al haz de energía o gas ionizado, fundiendo el material cuando entra en contacto con él y depositándolo sobre la bandeja de la máquina o sobre la última capa depositada. El haz térmico también funde localmente las últimas capas depositadas por lo que el enlace químico metálico entre ellas se produce al solidificar éstas de nuevo, algo que ocurre de manera rápida ya que el interior de la máquina se encuentra en una atmósfera protectora idónea para el proceso y así mismo para evitar contaminaciones. La plataforma del sistema estará diseñada para que no pueda ser fundida por el haz de energía mientras deposita la primera capa, bien por su material o por su disposición.

El material que se le suministra mediante el sistema de alimentación puede ser cambiado rápidamente según las necesidades de la pieza. Así mismo, también permite la combinación de diversas fuentes de material durante la fabricación de una pieza, por lo que se puede emplear para crear piezas que presentan gradiente de materiales de manera volumétrica o incluso se pueden combinar varios materiales a la vez para crear otro y depositarlo. En cuanto a las

resoluciones y funcionamiento de estas máquinas se puede afirmar que esta tecnología ofrece actualmente una de las mejores resoluciones en cualquier eje, pudiéndose llegar a fabricar piezas con geometrías complejas y detalles definidos en la escala de las décimas de milímetro [59].

Algunas máquinas presentan el movimiento en los ejes X-Y del cabezal y una plataforma constructora desplazable en el eje vertical (eje Z) mientras que otras presentan un cabezal fijo y la plataforma constructora es la que se encarga de realizar los movimientos en todos los ejes.

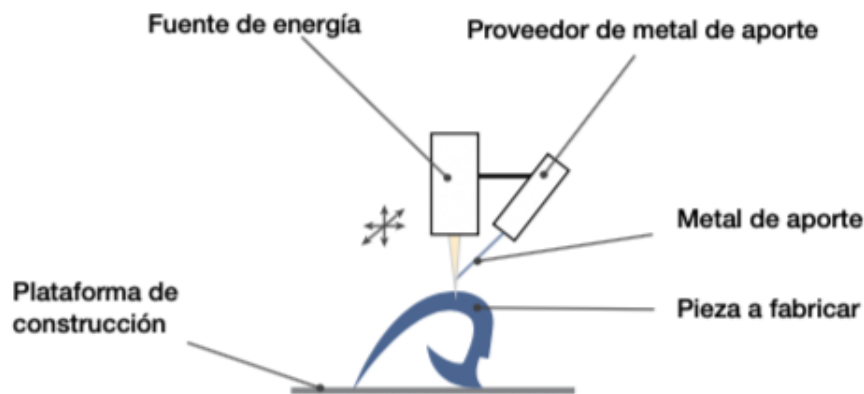


Figura 2.22: Esquema del proceso de deposición de energía focalizada [38].

Por su naturaleza y según el tamaño y complejidad geométrica de la pieza que se vaya a construir, es posible que sea necesario la construcción paralela de estructuras de soporte, que podrán ser del mismo material o de un material diferente que la pieza. Así mismo, por la naturaleza del proceso de fabricación de estas tecnologías, se puede afirmar que, en cuanto a metales, las propiedades mecánicas y materiales de las piezas fabricadas mediante esta tecnología presentan prestaciones altas, requiriéndose poco postprocesado para alcanzar los estándares necesarios para, por ejemplo, el sector aeroespacial [4].

En la Tabla 2.6 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de deposición de energía focalizada [38].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Permite reparar piezas funcionales y de gran calidad al permitir un alto control de la estructura del material depositado.</li> <li>★ Las máquinas son fácilmente escalables y no necesitan una atmósfera controlada por lo que se pueden fabricar piezas de gran tamaño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ El acabado superficial no es liso, por lo que requiere postprocesados.</li> <li>★ Requiere de una superficie de partida sobre la que depositar el material.</li> </ul>

Tabla 2.6: Ventajas y desventajas del proceso de deposición de energía focalizada.

### 2.3.6. Laminación de hojas

Los procesos de laminación de hojas difieren sustancialmente de los demás procesos de fabricación aditiva presentados anteriormente en que las capas que compondrán la pieza ya han sido fabricadas anteriormente mediante otros procesos, normalmente mediante métodos de fabricación convencionales y no serán fabricados por la máquina como en los demás casos. Esto es, el material es suministrado en forma de láminas o chapas (en el caso de metales) prefabricadas que compondrán las capas de la pieza y cuyo espesor será el espesor de la capa o resolución en el eje Z de la pieza final. La máquina será la encargada de cortar de cada sección de lámina la geometría de la pieza correspondiente a esa capa y unir las entre sí [33].

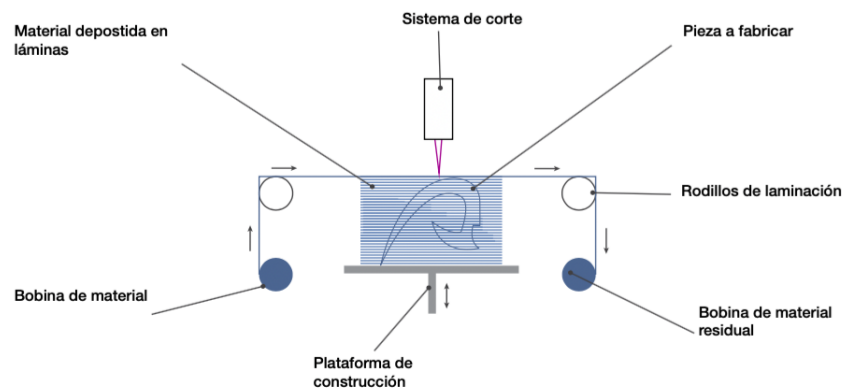


Figura 2.23: Esquema del proceso de laminación de hojas [38].

Existen multitud de diferentes tipos de máquinas y procesos para esta tecnología dependiendo del material que se emplee o del material del que están compuestas las láminas. Es decir, para máquinas que empleen láminas metálicas (chapas), usualmente éstas se suministran en tambores cilíndricos donde éstas se encuentran enrolladas y pueden ser conducidas a través de la máquina de manera continua hacia otro tambor donde de nuevo se enrollarán una vez que la máquina haya actuado en ellas. Puede que existan rulos o elementos que suministren calor a la lámina al pasar a su través para facilitar las operaciones de cortado o de unión entre capas que se llevará a cabo posteriormente, o puede que estos elementos simplemente tengan el objetivo de conducir la lámina a través de la máquina. Sin embargo, para otros materiales se suministran como láminas planas de unas dimensiones suficientes para ser usadas para que la geometría de cada capa se pueda delimitar en ella; posteriormente esta lámina es retirada y una nueva la reemplaza en la zona de construcción para la siguiente capa. En cuanto a las tecnologías de corte que la máquina pueda emplear, de nuevo depende del material del que estén fabricadas las láminas. Para máquinas que empleen chapas, un sistema de láser guiado por espejos y un cabezal óptico será el encargado de cortar la geometría que delimita cada capa en la chapa. Sin embargo, para capas formadas por papel o cartón el uso de un sistema de cuchilla es suficiente para cortar el material y definir la geometría de la capa en cuestión [4].

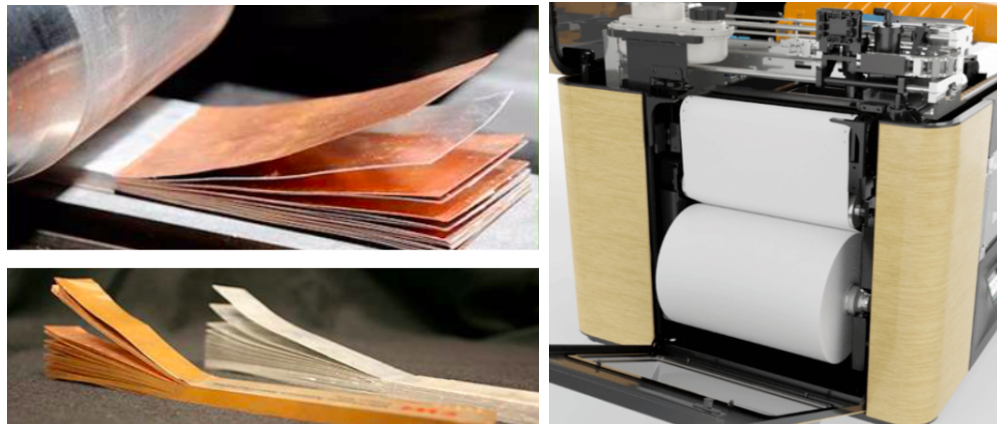


Figura 2.24: Materiales utilizados en el proceso de laminación de hojas [38].

Las uniones entre las capas que se han cortado de las láminas depende del material. Las láminas metálicas se unen mediante sistemas mecánicos tradicionales como remaches o tornillos y tuercas, mientras que los materiales compuestos como la fibra de carbono y los termoplásticos se unen aplicándoles calor. Para los demás plásticos y materiales como por ejemplo el papel o el cartón se suelen utilizar adhesivos para unir las capas de la pieza [4].

Esta tecnología necesita de la fabricación adicional de estructuras de soporte para la pieza mientras se fabrica, éstas estructuras normalmente son fabricadas a la vez que la pieza y están hechas del mismo material, aunque no unida a la geometría de la pieza, es decir, suelen estar adyacentes a la pieza pero no unidas a ella. Su inclusión añade un grado de complejidad adicional en el diseño de la pieza, como es de esperar. Un aspecto importante a tener en cuenta con esta tecnología que no presentan las demás es debido a su naturaleza: se suele generar un cierto volumen de material desperdiciado. Debido a esto, es común que se intente maximizar el área de cada lámina que se emplea para fabricar las capas, por lo que no es raro encontrarse con la fabricación simultánea de varias piezas.

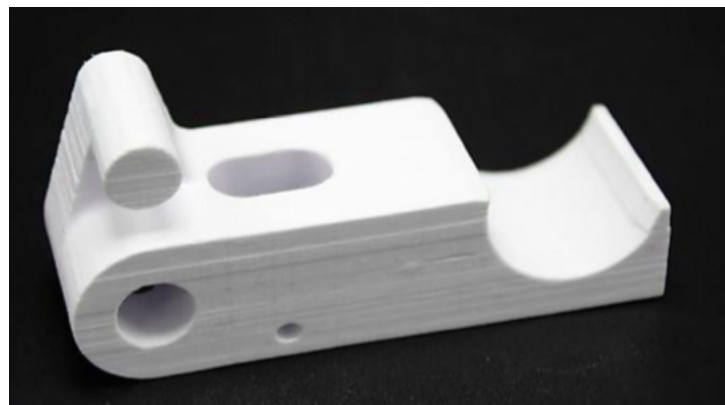


Figura 2.25: Pieza fabricada mediante laminación de hojas [18].

En la Tabla 2.7 se muestran las ventajas frente a las desventajas del proceso de laminación de hojas [38].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Se puede conseguir objetos a color mediante la adición de tinta a la vez que se suministra el adhesivo.</li> <li>★ Es un proceso rápido y de bajo coste que ofrece buenos acabados.</li> <li>★ Es un proceso limpio, en el que no se requiere de contornos controlados o sustancias químicas para el postprocesado.</li> <li>★ Permite utilizar materiales reciclados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Está limitado a materiales en formato lámina.</li> <li>★ Requiere de postprocesados para obtener un buen acabado final.</li> </ul>

Tabla 2.7: Ventajas y desventajas del proceso de laminación de hojas.

## 2.4. Ventajas y desventajas de la fabricación aditiva

Comparando la FA con procesos de fabricación tradicionales, podemos apreciar una serie de ventajas competitivas que hacen que sean de vital interés para la industria y comunes a todas las tecnologías de FA. sin embargo, la libertad de diseño que ofrece la FA tiene una serie de desventajas desde la perspectiva de la industria. [63].

<b>VENTAJAS:</b>	<b>DESVENTAJAS:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Piezas muy complejas sin sobrecoste.</li> <li>★ Libertad de diseño.</li> <li>★ Piezas personalizadas.</li> <li>★ Optimización del material.</li> <li>★ Capacidad de innovación.</li> <li>★ Reducción del "time to market".</li> <li>★ Rentabilidad de fabricación en series cortas.</li> <li>★ Acelerador para la Industria 4.0.</li> <li>★ Democratización de la fabricación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Baja capacidad productiva.</li> <li>★ Bajos ratios de producción.</li> <li>★ Requerimiento de postprocesado.</li> <li>★ Limitaciones de tamaño de fabricación.</li> <li>★ Limitación de materiales y formatos.</li> <li>★ Inmadurez y falta de desarrollo.</li> <li>★ Falta de Sistema de Normalización desarrollado.</li> </ul>

Tabla 2.8: Ventajas y desventajas del proceso de inyección de material.

Una de las principales ventajas es la posibilidad de producir piezas muy complejas sin sobrecoste (Figura 2.26). Esto se debe a la capacidad de producir directamente las piezas desde el CAD, simplificando la planificación del proceso, sin necesidad de fabricar utillajes, dividir el proceso en varias fases o utilizar diversa maquinaria y su consiguiente personal cualificado. Además en ocasiones estas piezas serían directamente imposibles de fabricar por métodos convencionales. Esta capacidad se traduce en una libertad en el diseño sin precedentes, ya que se pueden fabricar piezas personalizadas o piezas fácilmente escalables gracias al diseño paramétrico [38].



Figura 2.26: Representación gráfica de la complejidad sin coste adicional [38].

La creación de productos mediante tecnología aditiva muestra una clara ventaja en sostenibilidad y economía frente a las técnicas sustractivas. En este caso, tan solo se emplea el material necesario para la creación del objeto, minimizando así la generación de residuos (Figura 2.27). Además en muchas ocasiones estos residuos son reutilizables.

Todo ello supone una reducción del "time to market", debido a la facilidad de realización de prototipos y posibilidad de ajustar el modelo 3D hasta llegar al producto final. Además, la posibilidad de reducir los pasos en la cadena para la producción final contribuye a la reducción del tiempo [38].

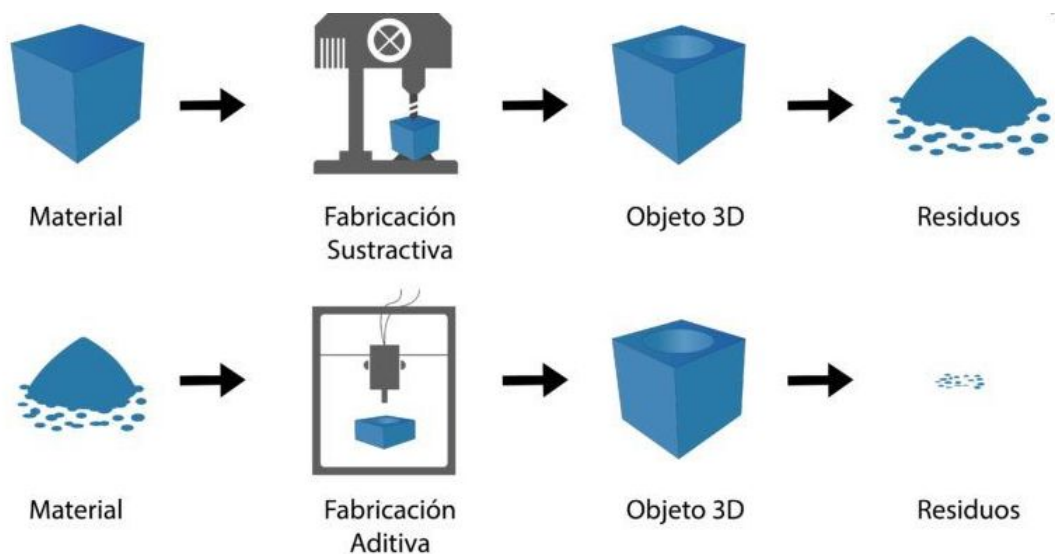


Figura 2.27: Reducción en la generación de residuos de la FA frente a la fabricación sustractiva [1].

Así mismo, permite rentabilizar la fabricación de series cortas, sin economía de escalas, ya que el coste de fabricación suele ser prácticamente independiente del número de piezas a fabricar (Figura 2.28).

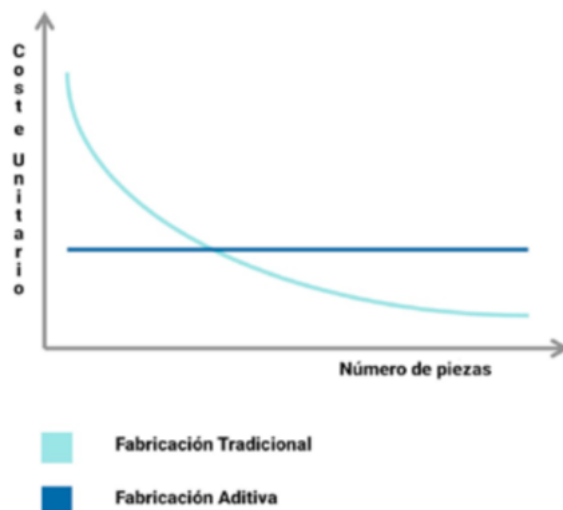


Figura 2.28: Representación gráfica de la independencia económica del número de piezas a fabricar [38].

Otro de sus principales puntos fuertes es la capacidad de poder ofrecer un servicio postventa sin fecha de caducidad, ya que a pesar de que la pieza esté descatalogada, basta con recuperar el archivo CAD de la base de datos y volver a producir la pieza de repuesto.

A pesar de suponer una gran cantidad de ventajas, y parecer sobre el papel mucho más viables que los procesos de fabricación convencionales, a día de hoy los procesos de FA cuentan con una serie de limitaciones que hacen que su elección sea la adecuada según el caso particular. La principal limitación es su baja capacidad productiva. Como se ha visto anteriormente la FA no permite la economía de escala, lo que hace que su precio sea muy elevado para la producción de grandes series de piezas.

A pesar de reducir las etapas del proceso productivo y recortar mucho tiempo en la producción de prototipos, el proceso de fabricación en sí es lento. Mientras que por inyección se pueden producir piezas en cuestión de segundos estas podrían tardar horas por fabricación aditiva, por lo que los ratios de producción son bajos. Además de ser una desventaja, la velocidad tiene una incidencia directa en la calidad del acabado, ya que al ser un proceso de producción por capas, cuanto menor sea el espesor de las mismas, mejor será el acabado superficial. Por tanto, si se quiere mejorar el acabado superficial se requerirá de capas más finas, lo que se traduce en la necesidad de un mayor número de capas para generar la geometría y por tanto el proceso requerirá más tiempo.

El acabado superficial también es por lo general un inconveniente. La calidad del mismo variará según la tecnología utilizada, los parámetros, el material y la geometría a fabricar. Pero por lo general todas requieren de postprocesado para ser extraídas de la base de fabricación. En la Figura 2.29 se observan los acabados de una misma pieza en función del



espesor de capa y el tratamiento superficial que se le ha aplicado durante el postprocesado. En caso de requerir material de soporte, su eliminación no es siempre sencilla, por ello se están desarrollando materiales de soporte hidrosolubles. También existen restricciones en el tamaño de fabricación, ya que estará limitado al tamaño de la plataforma de fabricación.



Figura 2.29: Diferencia de acabados según el espesor de capa y el tratamiento superficial de la pieza. [38].

Por otro lado, la necesidad de un formato determinado y la compatibilidad limitada con algunos materiales en las diferentes tecnologías hace que el precio de las mismas se encarezca. Así mismo, la propia inmadurez y falta de desarrollo de las tecnologías son un gran hándicap. Esto propicia un desconocimiento profundo del comportamiento anisotrópico de los materiales y por tanto el resultado no es tan controlable y homogéneo como en los procesos tradicionales [38].

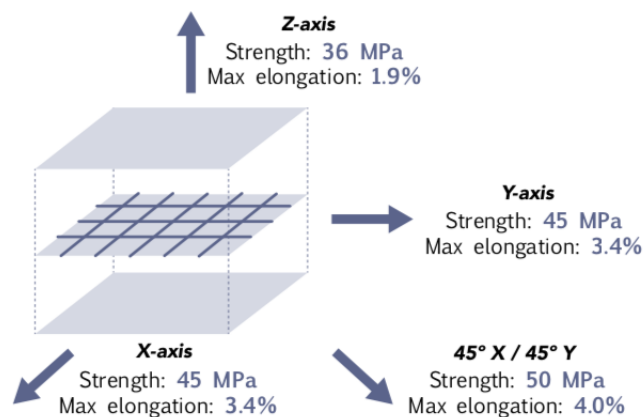


Figura 2.30: Demostración mediante ensayo de las propiedades anisotrópicas de una pieza fabricada mediante FA [38].

## 2.5. Materiales utilizados en la fabricación aditiva

Como ya se ha visto en los apartados anteriores, existen varias técnicas o procesos disponibles para la obtención de piezas por FA, que se aplican a la obtención de piezas funcionales con una amplia variedad de materiales de partida, clasificados en materiales metálicos, cerámicos, polímeros y sus aleaciones. La Figura 2.31 muestra una gráfica hecha con datos proporcionados por Senvol [72], una de las mayores y más robustas bases de datos relacionadas con la fabricación aditiva. En esta gráfica se observa que el número de materiales metálicos disponibles es el segundo mayor después de los materiales poliméricos en fabricación aditiva.

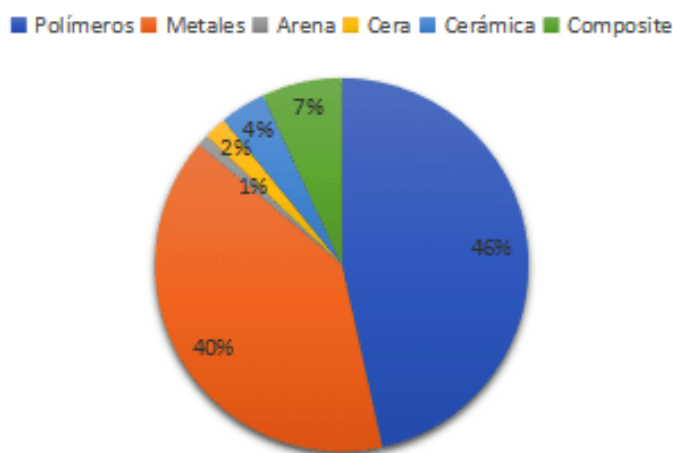


Figura 2.31: Tipos de materiales en fabricación aditiva [15].

En este trabajo, al tratarse de un estudio relacionado con el sector aeroespacial, se van a tener en cuenta los materiales más comunes que se emplean en dicha industria, aleaciones metálicas y materiales compuestos. Los objetivos principales de esta industria en cuanto a la fabricación de piezas son: mejorar la eficiencia de las aeronaves, lo que se consigue mediante una disminución del peso y reducir la contaminación ambiental y el ruido. Debido a las características especiales de los componentes aeroespaciales, normalmente complejos y fabricados en series cortas, la introducción de esta técnica representa una disrupción que ha cambiado el modo en que se diseñan y construyen los aviones del futuro [22].

El metal en base polvo es la materia prima más utilizada por la mayoría de las tecnologías de fabricación aditiva. Se distinguen dos grupos principales, las tecnologías que emplean lecho de polvo, y las que lo inyectan directamente sobre la pieza. Las propiedades del polvo metálico son fundamentales para determinar la eficiencia y calidad del proceso y las piezas. Las principales características del polvo de metal son, entre otras [15]:

- Densidad o compresibilidad.
- Tamaño o distribución de tamaños.
- Capacidad de llenar huecos.

Una vez fundido, se utiliza para imprimir la capa de metal y aleación según el modelo CAD 3D para formar modelo sólido. El método más utilizado para la impresión de metales y aleaciones

es fusión de lecho de polvo y deposición de energía focalizada. La fabricación aditiva de metales y aleaciones se utiliza principalmente en prototipos, investigación y también para la fabricación a pequeña escala en industria aeroespacial [10].

En la Figura 2.32 se observan los principales metales empleados en forma de polvo metálico en fabricación aditiva, siendo de especial interés las aleaciones de aluminio, níquel o titanio.

<b>Denominación</b>	<b>Material</b>
Aleaciones de Aluminio	AlSi10Mg
	AlSi7Mg
	AlSi12
Aleaciones de Cobalto	ASTM F75
	CoCrWC
Aceros herramienta	AISI 420
	Marage 300
	H13
	AISI D2
	AISI A2
	AISI S7
Aleaciones de Níquel	Inconel 718
	Inconel 625
	Inconel 713
	Inconel 738
	Hastelloy X
Aceros Inoxidables	SS 304
	SS 316 L
	SS 410
	15-5 PH
Aleaciones de Titanio	Titanium Grade 2
	Ti6Al4V
	Ti6Al4V ELI
	TiAl6Nb7
Aleaciones de metales preciosos	Oro de joyería
	Plata
Aleaciones de Cobre	CC 480 K

Figura 2.32: Lista de metales más comunes utilizados en FA [15].

En cuanto a los materiales poliméricos, las principales tecnologías y los tipos de materiales aptos para este tipo de fabricación incluyen termoplásticos (amorfos y semicristalinos), materiales plásticos termoestables, elastómeros termoestables y elastómeros termoplásticos (TPE) [54]. Al igual que los materiales metálicos, estos también son ampliamente utilizados en este sector en los componentes de composites avanzados.

Un ejemplo ampliamente utilizado en impresión 3D para aplicaciones que requieren resistencia, una ágil procesabilidad y la opción de integrar procesos de acabado superficial es el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), un termoplástico muy resistente al impacto y que soporta altas temperaturas [56].

Para cualquier proceso de fabricación, incluidas las tecnologías de FA, la materia prima debe encontrarse en un estado compatible con el proceso en cuestión a realizar (por ejemplo, polvo, chapa, alambre o líquido) [13]. Los polímeros son el material más común y básico utilizado para la impresión 3D debido a su facilidad de disponibilidad, bajo coste, buenas propiedades mecánicas y facilidad de adaptación a los diferentes procesos. A continuación se enumeran algunos de los polímeros más utilizados en la fabricación aditiva aparte del Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), ya mencionado con anterioridad: Nylon, Acrilonitrilo-estireno-acrilato (ASA), Poliestireno de alto impacto (HIPS), Polietileno tereftalato de leno (PET), ácido poliláctico (PLA), policarbonato (PC), Polietileno tereftalato glicol (PETG), Poliéter éter cetona (PEEK), poliéster termoplástico (TPC) y metilo metacrilato-acrilonitrilo-butadienoestireno (MABS). Aunque los comúnmente utilizados para la impresión 3D son el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA).

Además de estos materiales, también se pueden utilizar materiales cerámicos que se caracterizan por ser duros, quebradizos, resistentes al calor y a la corrosión por lo que son de utilidad en las industrias aeroespacial y automotriz. En estos materiales se parte de materia prima a base de lodo, base de polvo o a granel en base sólida [32].

## 2.6. Oportunidades

Una gran oportunidad está en las aplicaciones aeroespaciales y de combate en el Departamento de Defensa (DOD), Departamento de Energía (DOE), Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la comunidad de inteligencia. La fabricación aditiva tiene un potencial significativo en el sector aeroespacial debido a las tiradas de producción relativamente bajas, la importancia del aligeramiento (producir productos livianos que usan material de menor peso) para muchas aplicaciones, y el potencial para reemplazar los inventarios físicos con inventarios de piezas digitales cuando el espacio es fundamental, como en misiones submarinas o espaciales. Además, la FA puede reducir la necesidad de herramientas, lo que ayuda a acelerar el ciclo de desarrollo de piezas nuevas [36].

En las Figuras 2.33 y 2.34 se muestran ejemplos de piezas y componentes del sistema de propulsión del F-35 fabricados por FA.



Figura 2.33: Ejemplos de piezas metálicas fabricadas por fabricación aditiva. [28].

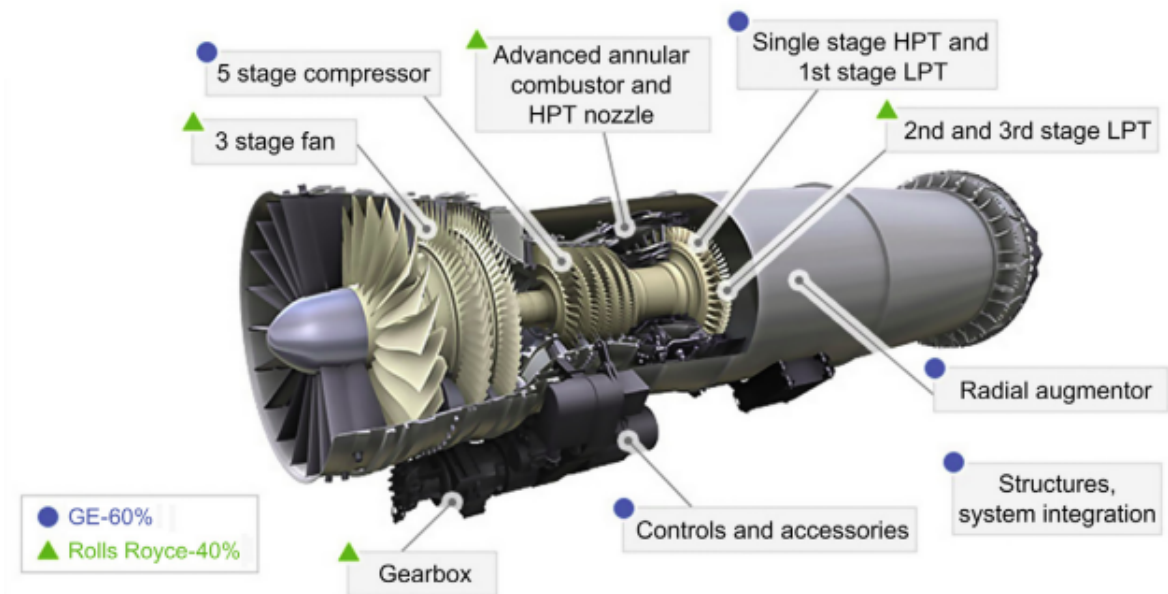


Figura 2.34: El sistema de propulsión para el F-35, que contiene un número sustancial de componentes que pueden fabricarse mediante fabricación aditiva [28].

Boeing ha utilizado componentes impresos en 3D hechos de titanio o de aleaciones de titanio. El 787 (Dreamliner) ha sido el primer avión comercial en despegar con piezas de titanio fabricadas mediante tecnologías aditivas aprobadas por la FAA [12]. En la Figura 2.35 se observan los componentes estructurales de la aeronave hechos de titanio.

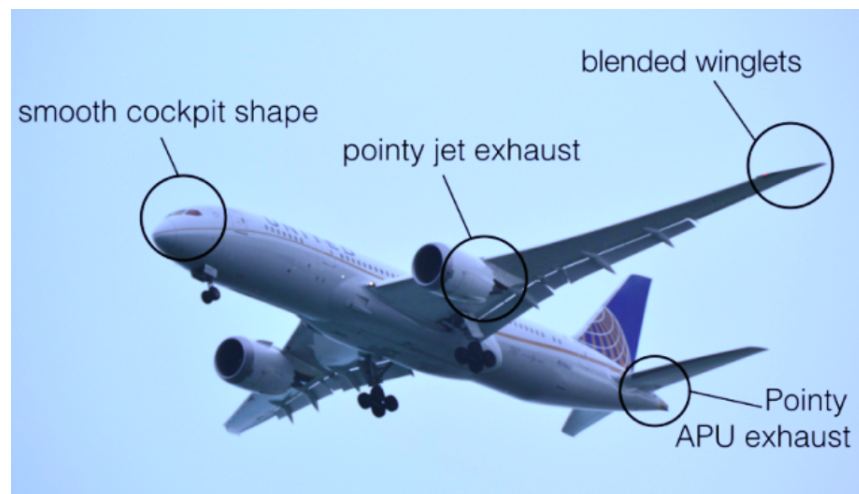


Figura 2.35: Componentes estructurales de titanio en el Boeing 787 [12].

# Capítulo 3

## Estructuras auxéticas

### 3.1. Características y aplicaciones de las estructuras auxéticas

Las estructuras auxéticas son estructuras deformables con coeficiente de Poisson negativo que se han venido presentando en los últimos años como una alternativa interesante para los sectores industrial, automotriz y aeroespacial, así como para la fabricación de componentes con altas solicitaciones mecánicas. Estas estructuras se caracterizan por tener una alta resistencia a esfuerzos cortantes, permitir deformaciones considerables y tener una baja densidad relativa [9].

La principal diferencia de este tipo de materiales respecto a materiales comunes con coeficientes de Poisson positivos es que el alargamiento transversal es inverso. Es decir, al traccionar o estirar el material la sección transversal ensancha, mientras que al comprimirlo éste área disminuye [43].

#### 3.1.1. Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) es el parámetro a través del cual se mide el comportamiento elástico de los materiales cuando son sometidos a una carga de tracción y se define como la relación negativa de la deformación transversal y la deformación axial (longitudinal) en la dirección de la carga, según se muestra en la siguiente fórmula [43]:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (3.1)$$

Basándose en la teoría de la elasticidad y las restricciones termodinámicas de los sólidos deformables, el coeficiente de Poisson puede variar dentro del rango de  $-1 < \nu < 0,5$  [29].

En términos generales, todos los materiales de uso común tienen coeficiente de Poisson positivo, lo que significa que cuando son estirados en una dirección, se contraen en la dirección opuesta. Este mismo comportamiento también lo sufren cuando el material se somete a una fuerza de compresión [76].

En la Figura 3.1 se muestra de una forma gráfica un ensayo de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson positivo.

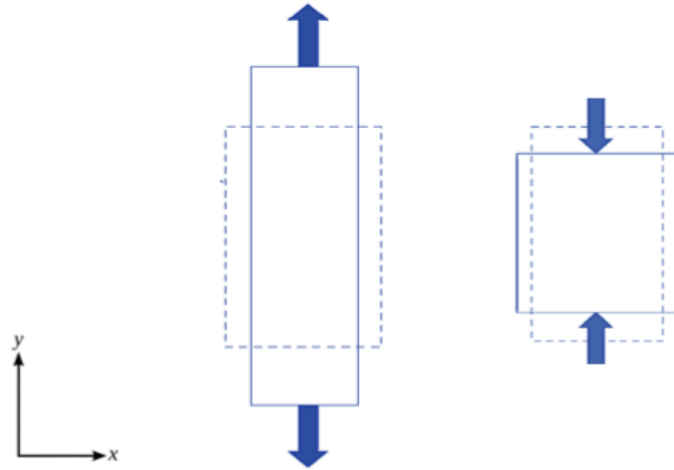


Figura 3.1: Ensayos de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson positivo [76].

A pesar de que no es lo común, en la naturaleza existen algunos materiales que muestran coeficiente de Poisson negativo, como el grafito pirolítico o algunos cristales al ser observados a escala microscópica [48]. El hecho de que este valor sea negativo implica que, al estirar un material en un eje, este aumentará su tamaño también en el eje opuesto, por lo que sufrirá una expansión en todas sus direcciones. Por otro lado, si el material es comprimido en una dirección, sufrirá también una contracción en el sentido opuesto.

En la Figura 3.2 se muestra de una forma gráfica un ensayo de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson negativo.

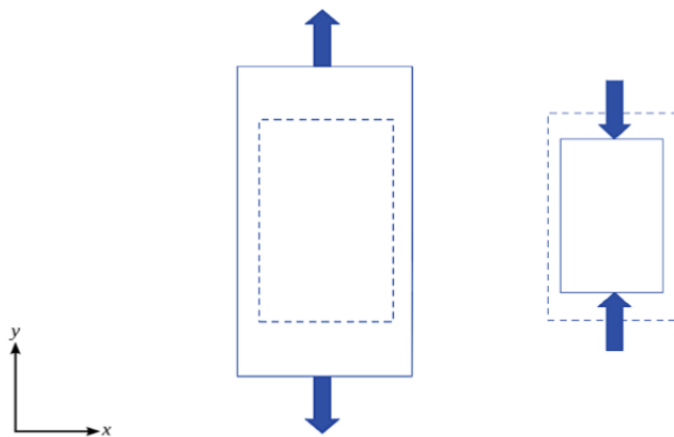


Figura 3.2: Ensayos de tracción y compresión de una probeta cilíndrica con coeficiente de Poisson negativo [76].

### 3.1.2. Características de las estructuras auxéticas

Debido al efecto de la relación de Poisson negativa, los materiales auxéticos presentan una serie de propiedades ventajosas en comparación con los materiales convencionales, tales como un mayor módulo de cizallamiento, mayor resistencia a la indentación, mayor resistencia frente a fracturas o abolladuras y mayor absorción de energía [66].

El coeficiente de Poisson es una de las cuatro constantes que se emplean junto con el módulo de cizalladura ( $G$ ), el módulo de Young ( $E$ ) y el módulo de compresibilidad ( $K$ ), para analizar y caracterizar el comportamiento elástico de los materiales isótropos lineales.

- **Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ):** Relación negativa de la deformación transversal y la deformación axial en la dirección de la carga.
- **Módulo de cizalladura ( $G$ ):** Caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.
- **Módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ):** Constante elástica dependiente del cociente entre la tensión y deformación resultante en un material sometido a un ensayo a tracción.
- **Módulo de compresibilidad ( $K$ ):** Mide la resistencia de un material a compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen.

La relación entre ellas es la siguiente [66]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.3)$$

Observando estas ecuaciones, los efectos producidos por un coeficiente de Poisson negativo cuando se mantiene el módulo de Young constante, provocan un aumento sustancial del módulo de cizalladura respecto al módulo de compresibilidad; en estas condiciones el material sería fácilmente deformable, pero su resistencia a ser cortado se vería incrementada [66].

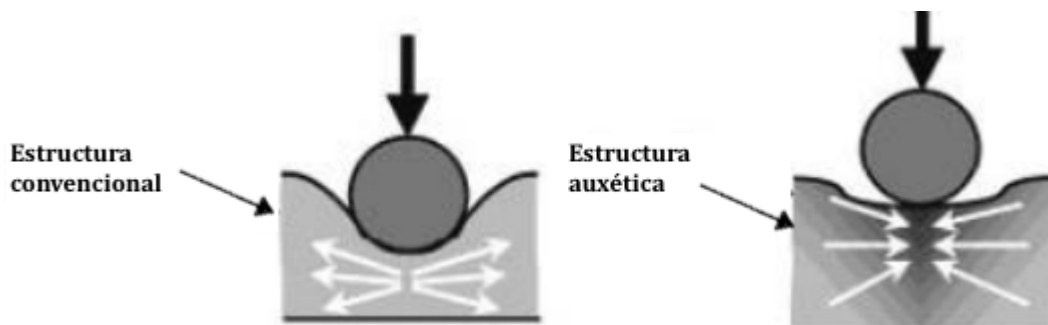


Figura 3.3: Resistencia a abolladura de material convencional y material auxético [43].



### 3.1.3. Aplicaciones de las estructuras auxéticas

Además del interés científico puro de tener materiales que muestren una propiedad tan poco convencional, la relación de Poisson negativa le da al material otros efectos beneficiosos, como una mayor rigidez al corte, una mayor tenacidad a la fractura por deformación plana y una mayor resistencia a la indentación. Estas propiedades hacen que los materiales auxéticos sean superiores a los materiales convencionales para muchas aplicaciones prácticas. Se han propuesto aplicaciones desde tapones de botellas de vino hasta núcleos de paneles sandwich [71] (un componente típico utilizado en aplicaciones aeroespaciales).

Las estructuras auxéticas podrían ser utilizadas como absorvedoras de grandes golpes, cojines de asientos, sujecciones, filtros de aire y filtros de masa [6]. También podrían utilizarse en dispositivos piezoeléctricos para maximizar la conversión de energía acústica a eléctrica en aplicaciones de sensores y actuadores [73], estos consisten en varillas cerámicas piezoeléctricas dentro de una matriz de polímero pasivo y se utilizan en generadores de imágenes ultrasónicas médicas y receptores de hidrófonos de sonar naval [58].

En el campo biomédico, los materiales microporosos y celulares auxéticos se pueden utilizar como un dilatador para abrir la cavidad de una arteria, o un vaso similar utilizados en angioplastia coronaria y procedimientos relacionados. La arteria se abre mediante la expansión lateral de una varilla hueca de politetrafluoroetileno auxético flexible (PTFE) bajo tensión. También se utilizan en la fabricación de vendajes inteligentes y filtros inteligentes ya que una de las propiedades de los materiales auxéticos es que una vez que se les aplica tensión, cuando se tira de ellos, sus poros se agrandan. Si se hace un filtro con estas espumas auxéticas, con solo estirar la espuma en una dirección, los poros se agrandan. Estas espumas auxéticas también se pueden impregnar con medicamento ya que el efecto de una herida hinchada empujando contra dicho apósito liberaría el medicamento [58].

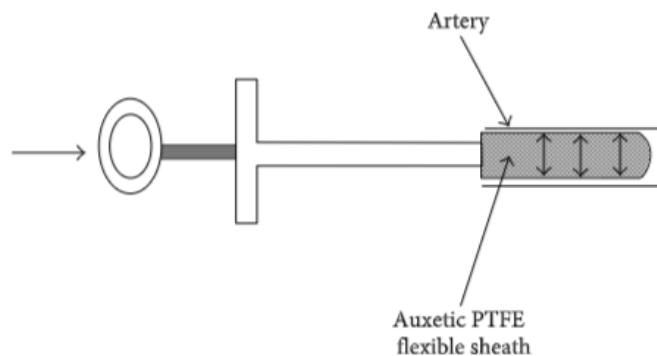


Figura 3.4: Dilatador que emplea una varilla auxética [25]

Se están investigando numerosas aplicaciones tecnológicas materiales auxéticos en balas o proyectiles en los que un componente está hecho de material auxético, de modo que el proyectil general tiene una relación de Poisson de cero. En este caso, el movimiento del proyectil por un cañón se ve facilitado por una reducción en la expansión lateral debido al componente auxético bajo la fuerza de empuje. Los materiales auxéticos también se han identificado como materiales candidatos para su uso en la tecnología de lanzadores electromagnéticos,

### 3.1. CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LAS ESTRUCTURAS AUXÉTICAS 38

donde en el futuro se requerirá una reducción de masa para muchos componentes, que pueden usarse para propulsar dichos proyectiles. Por otra parte, se fabrican chalecos antibalas y otros equipos de protección personal hechos con materiales auxéticos debido a las mejoras en las propiedades de impacto [58].

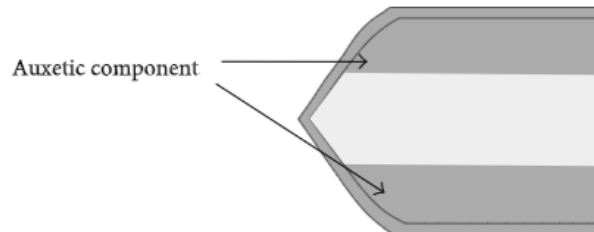


Figura 3.5: Bala o proyectil que contiene componentes auxéticos y no auxéticos [25]

Las estructuras auxéticas también podrían ser potencialmente usadas en estructuras a gran escala. La rigidez superior de la estructura auxética frente a otras estructuras convencionales hace que sean deseables en el diseño de puentes y edificios de gran altura [43].

En general las estructuras auxéticas debido a sus propiedades únicas, tienen un gran potencial para muchas aplicaciones diferentes. En este trabajo concretamente se estudia su aplicación al sector aeroespacial, siendo su módulo de cizallamiento, su curvatura sinclástica (Figura 3.6) y su mayor resistencia a la amortiguación, las propiedades que hacen de los compuestos auxéticos sean muy buenos candidatos para las aplicaciones de ingeniería aeroespacial [80].



Figura 3.6: Comportamiento de curvatura sinclástica (en forma de cúpula) de materiales con una relación de Poisson negativa [42].

## 3.2. Tipos de estructuras auxéticas

Los materiales auxéticos basan su comportamiento en una geometría particular. Esta geometría hace que el mecanismo de deformación que sigue la estructura cuando es sometida a alguna carga, provoque que el estiramiento o la contracción sea sufrida en ambos ejes en la misma dirección. Los diferentes tipos de estructuras auxéticas se pueden clasificar en tres grandes grupos [85]:

1. **Estructuras re-entrantes** → Los elementos situados en posición diagonal provocan el efecto auxético cuando son deformados, debido a que sufren una flexión al someterse a una carga axial.
2. **Estructuras quirales** → El efecto auxético se consigue mediante la rotación de los nodos, lo cual hace que los elementos rectos se recojan alrededor del círculo al cual están unidos.
3. **Estructuras rotantes** → La rotación de los elementos que componen la estructura hasta formar un bloque sólido, ocupando los espacios huecos entre ellos, es lo que genera el comportamiento auxético deseado.

Además de estas estructuras principales se han desarrollado otras como las compuestas por laminados de capas angulares, las basadas en moléculas "libres" rígidas, en polímeros microporosos o en polímeros cristalinos líquidos. En general, todos estos modelos moleculares utilizan la estructura de panal macroscópica reentrante como plantilla [85].

### 3.2.1. Estructuras re-entrantes

Las estructuras re-entrantes son estructuras celulares auxéticas macroscópicas en forma de panales re-entrantes 2D. En la Figura 3.7 (a), el panal se forma con hexágonos re-entrantes 2D. Puede deformarse mediante la articulaciones de las paredes diagonales en respuesta a una carga uniaxial aplicada (Figura 3.7 (b)). Teóricamente, la alineación de las paredes diagonales a lo largo de la dirección horizontal cuando se estiran hace que se separen a lo largo de la dirección vertical, lo que da como resultado el efecto auxético. Pero en realidad, la mayoría de los panales de este tipo de estructura se deforman predominantemente por la flexión de las barras diagonales, ocurriendo la articulación y el estiramiento axial de las barras simultáneamente. De igual manera, la flexión de las paredes conduce a un comportamiento auxético en el sistema de panal de abeja reentrante [6].

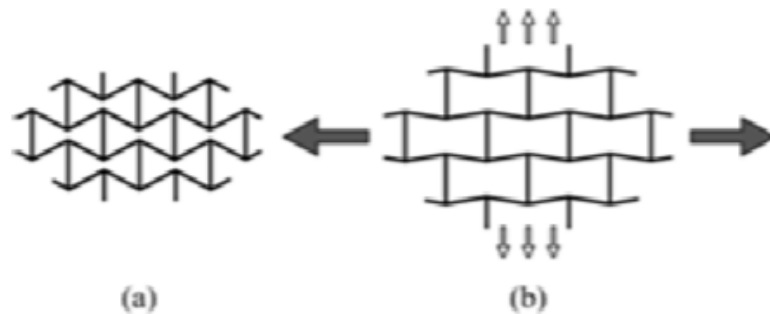


Figura 3.7: Panal reentrante 2D (a) Sin deformar (b) Deformado [85].

Los efectos auxéticos también se pueden obtener de otras estructuras reentrantes, como se muestra en la Figura 3.8.

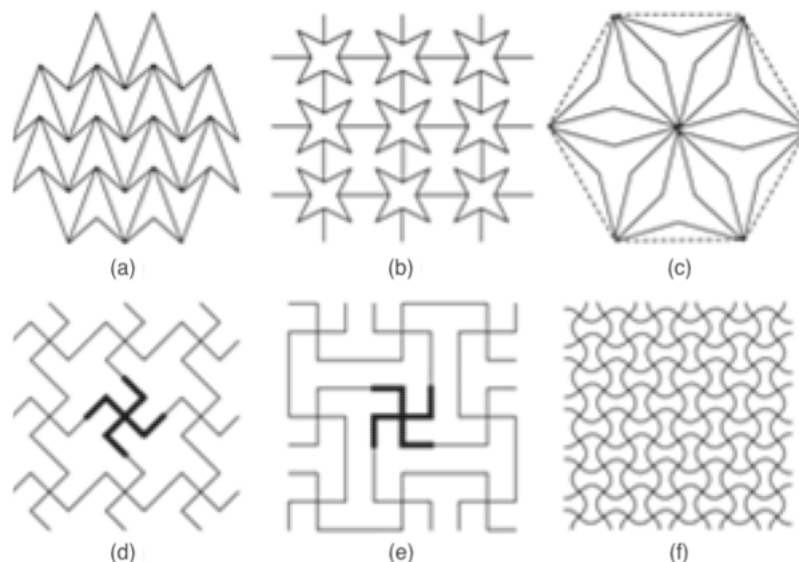


Figura 3.8: Estructuras reentrantes: (a) Estructura de doble punta de flecha, (b) Estructura de panal en estrella, (c) Estructura de panal reentrante hexagonal, (d) Estructura formada a partir de rejillas de rombos, (e) Estructura formada a partir de rejillas cuadradas, (f) Estructura formada a partir de ligamentos sinusoidales [85].

En la Figura 3.8 (a), es la apertura o cierre de las puntas de flecha respectivamente lo que provoca el comportamiento auxético de la estructura, en la Figura 3.8 (b) es la apertura o cierre de las estrellas. En la Figura 3.8 (c) se muestra un panal re-entrante estructuralmente hexagonal para obtener mejores propiedades isotrópicas planas que la estructura reentrante 2D que se muestra en la Figura 3.7 debido a la simetría estructural a lo largo de las direcciones radicales. Sin embargo, aún no se ha fabricado ningún material con esta estructura [85].

En las Figuras 3.8 (d) y 3.8 (e) , respectivamente, se muestran otras dos estructuras reentrantes formadas respectivamente a partir de rejillas en forma de rombos y cuadradas mediante la eliminación de algunas líneas laterales en cada rejilla. Sus unidades repetitivas están resaltadas en negrita. Los efectos auxéticos en estas estructuras se obtienen debido a la rotación y extensión de cada lado en las celdas unitarias. La estructura de la Figura 3.8 (e) exhibe un efecto auxético mayor que el de la estructura de la Figura 3.8 (d) bajo la misma tensión [31]. Otra estructura es la estructura formada con los ligamentos sinusoidales (Figura 3.8 (f)), cuyo efecto auxético proviene de la apertura de las células re-entrantes en células casi rectangulares.

Utilizando elementos re-entrantes, también es posible generar estructuras auxéticas en 3 dimensiones, donde el tercer eje también se comporta bajo deformación de la misma manera que los otros dos.

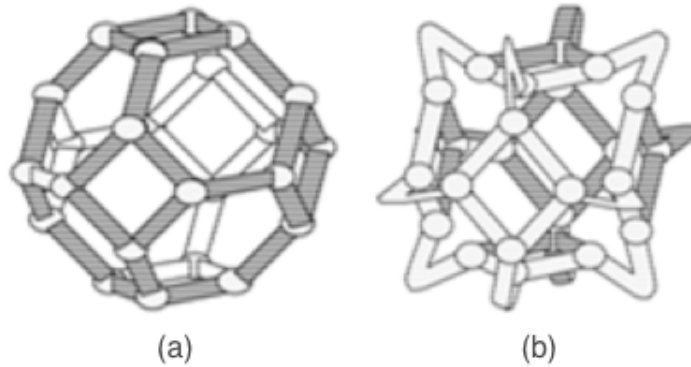


Figura 3.9: Célula tridimensional: (a) Célula convencional, (b) Célula reentrante [85].

En la Figura 3.9, se ha utilizado una célula de re-entrada 3D para explicar el comportamiento auxético de las espumas auxéticas. Esta célula se produjo mediante la transformación de la estructura de célula convencional (Figura 3.9 (a)) en una estructura de célula re-entrante (Figura 3.9 (b)) en la que las barras sobresalen hacia adentro. Cuando las líneas de la estructura que sobresalen verticalmente están bajo tensión, las de las direcciones laterales tenderán a salirse, lo que provocará una expansión lateral.

### 3.2.2. Estructuras quirales

Las estructuras quirales son otro tipo de estructuras que se han desarrollado para materiales auxéticos. Como se muestra en la Figura 3.10, en este tipo de estructuras, las unidades quirales básicas (resaltadas en negrita) se forman primero conectando los ligamentos rectos a nodos centrales que pueden ser círculos, rectángulos u otras formas geométricas. Las estructuras quirales completas se forman uniendo las unidades quirales. Los efectos auxéticos se logran envolviendo o desenvolviendo los ligamentos alrededor de los nodos en respuesta a una fuerza aplicada. Según las investigaciones teóricas y experimentales, la relación de Poisson de la estructura quiral en la Figura 3.10 (a) bajo deformaciones en el plano es de alrededor de -1. A diferencia de la mayoría de las otras estructuras auxéticas, esta estructura puede mantener un alto efecto auxético en un rango significativo de deformaciones.

Sobre la base de esta estructura, se ha desarrollado una nueva clase de estructura denominada "metaquiral" (Figura 3.10 (b)). En este tipo de estructura, las mismas unidades quirales (también denominadas bloques de construcción quirales) o las unidades simétricas se pueden conectar entre sí para formar diferentes estructuras quirales. La estructura de la Figura 3.10 (b) se forma conectando los bloques simétricos donde el nodo en cada bloque de construcción quiral es un rectángulo. Aunque hay una cantidad infinita de ligamentos unidos a cada nodo para formar un bloque de construcción, solo los bloques de construcción unidos con 3, 4 o 6 ligamentos pueden usarse para construir estructuras periódicas que llenan el espacio. Es evidente que los efectos auxéticos dependen de la forma del nódulo y de la longitud de los ligamentos adheridos [85].

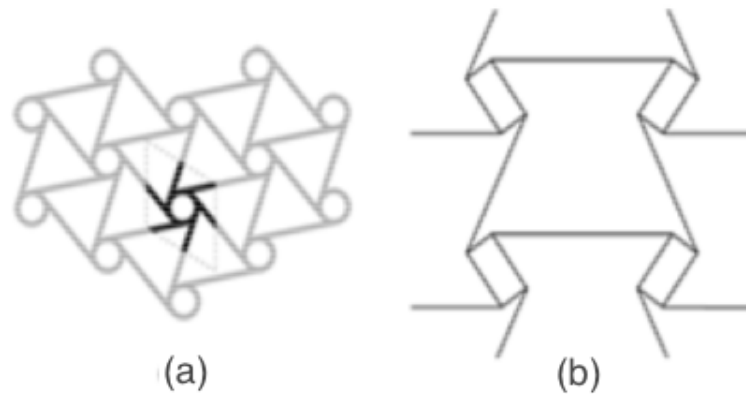


Figura 3.10: Estructuras quirales: (a) Formados con las mismas unidades quirales (b) Formados con unidades quirales simétricas. [85].

### 3.2.3. Estructuras rotantes

Este tipo de estructura se ha desarrollado para reproducir el comportamiento auxético en espumas y polímeros en red de nanoestructuras al unir los triángulos rígidos o semirrígidos (Figura 3.11 (a)), cuadrados (Figura 3.11 (b)), rectángulos (Figura 3.11 (c)) y tetraedros (Figura 3.11 (d)) en vértices seleccionados. Los vértices pueden estar articulados o conectados por resortes. Los efectos auxéticos provienen de la rotación de los triángulos, cuadrados, rectángulos y tetraedros cuando son sometidos a fuerzas.

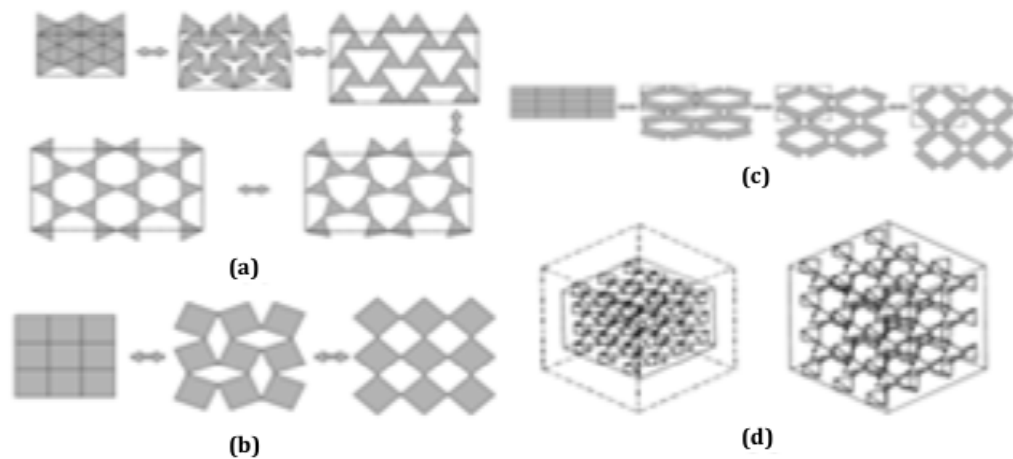


Figura 3.11: Estructuras giratorias (a) Unidades triangulares, (b) Unidades cuadradas, (c) Unidades rectangulares, (d) Unidad tetraédrica. [85].

### 3.3. Estructuras auxéticas para el sector aeroespacial

Los materiales auxéticos tienen muchas ventajas frente a los convencionales, gracias al comportamiento auxético que poseen. Como ya se ha detallado en los apartados anteriores, poseen alta rigidez específica, alta resistencia específica, ligero peso, módulo de cizalladura más alto, curvatura sinclástica, mejor resistencia al agrietamiento, mayor resistencia a la amortiguación, etc. Debido a estas características, los materiales auxéticos son muy adecuados para su uso en estructuras de altas prestaciones, como las requeridas en la industria aeroespacial [51].

El alto módulo de cizalladura hace que los compuestos auxéticos sean muy adecuados para la industria aeroespacial porque la mayoría de las partes de la aeronave soportan grandes fuerzas de cizalladura, como por ejemplo las alas. La propiedad de curvatura sinclástica permite que los compuestos auxéticos tengan una mejor formabilidad que los convencionales, lo que los hace particularmente útiles en lugares donde se requiere una forma compleja, como en algunas partes del fuselaje. Además tienen una alta relación resistencia-peso, lo que supone un factor importante ya que el ahorro de peso es extremadamente importante para los aviones, ya que el consumo y la contaminación generada pueden reducirse reduciendo el peso de la aeronave [80].

Los sólidos celulares auxéticos en forma de panales de abeja y espumas son utilizados en el sector aeroespacial como materiales centrales en componentes compuestos de paneles sándwich (Figura 3.12), un material compuesto ampliamente utilizado en la industria aeroespacial por sus características de bajo peso y alta resistencia [6].

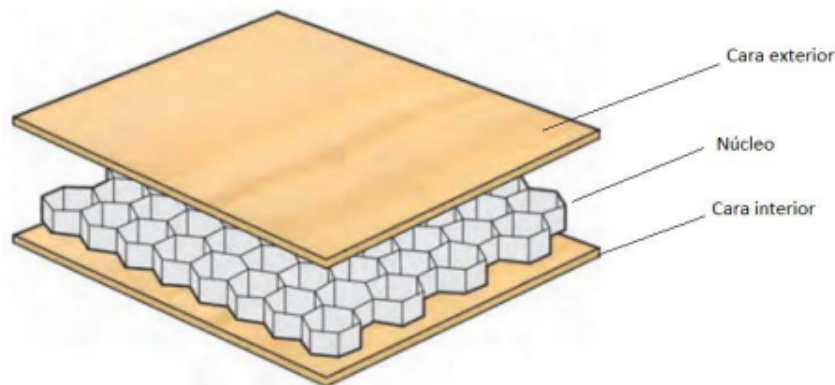


Figura 3.12: Estructura tipo Sandwich [43].

Las estructuras sándwich están compuestas por dos caras y el núcleo. Las diferentes configuraciones del núcleo tienen grandes efectos sobre las propiedades mecánicas de las estructuras sándwich. Debido a sus aplicaciones en el sector aeroespacial, es muy deseable que las estructuras de este tipo absorban más energía cuando se someten a momentos de flexión. Las estructuras auxéticas podrían proporcionar todas las ventajas de sus propiedades aún siendo configuradas en paneles o estructuras tipo sandwich, lo que las convierte en candidatas ideales para las estructuras del núcleo de estos materiales compuestos [30].

# Capítulo 4

## Fabricación aditiva de estructuras auxéticas para el sector aeroespacial

### 4.1. Requisitos de componentes del sector aeroespacial

El rápido crecimiento de la industria aeroespacial da un impulso al desarrollo de nuevos materiales aeronáuticos. La principal fuerza impulsora de este desarrollo es el requisito de la reducción de costes mediante la reducción del peso de las aeronaves y la prolongación de la vida útil de sus piezas o estructuras. El diseño del fuselaje y el motor de las aeronaves utilizando materiales con propiedades mecánicas mejoradas puede mejorar eficiencia del combustible, aumentar la carga útil y aumentar el rango de vuelo, lo que reducir directamente el coste operativo de la aeronave [23]. Por lo tanto, las investigaciones se centran en desarrollar materiales que optimicen sus propiedades para reducir el peso, mejorar la tolerancia al daño, la fatiga y resistencia a la corrosión. En la Figura 4.1 se observan diferentes tipos de piezas de una aeronave fabricadas con materiales compuestos reforzados con fibra.

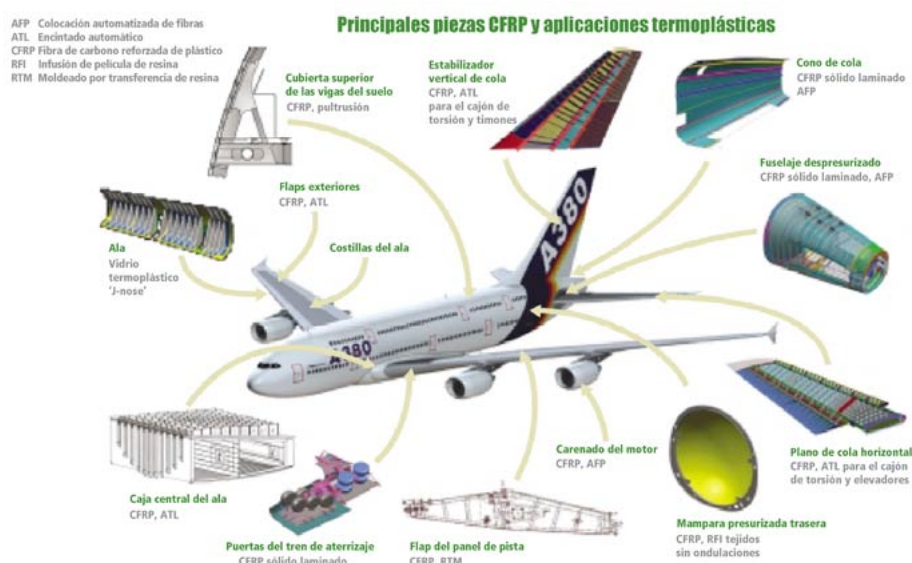


Figura 4.1: Principales piezas CFRP en aeronaves [55].



## 4.2. Materiales empleados en el sector aeroespacial

El uso creciente de materiales compuestos ha surgido debido a su alta resistencia y rigidez específicas, en comparación con los materiales más convencionales que se utilizan en el sector (aleaciones metálicas de aluminio, titanio y magnesio), y la capacidad de adaptar su estructura para producir configuraciones estructurales aerodinámicamente más eficientes. En este sector se utilizan principalmente aleaciones ligeras, materiales compuestos, generalmente polímeros reforzados con fibra, como los plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP) o fibra de vidrio (GLARE) o estructuras tipo sandwich, ya que son los materiales que cumplen los requisitos de esta industria. Existen aeronaves en las que un 50 % de la masa estructural de la misma son materiales compuestos [74].

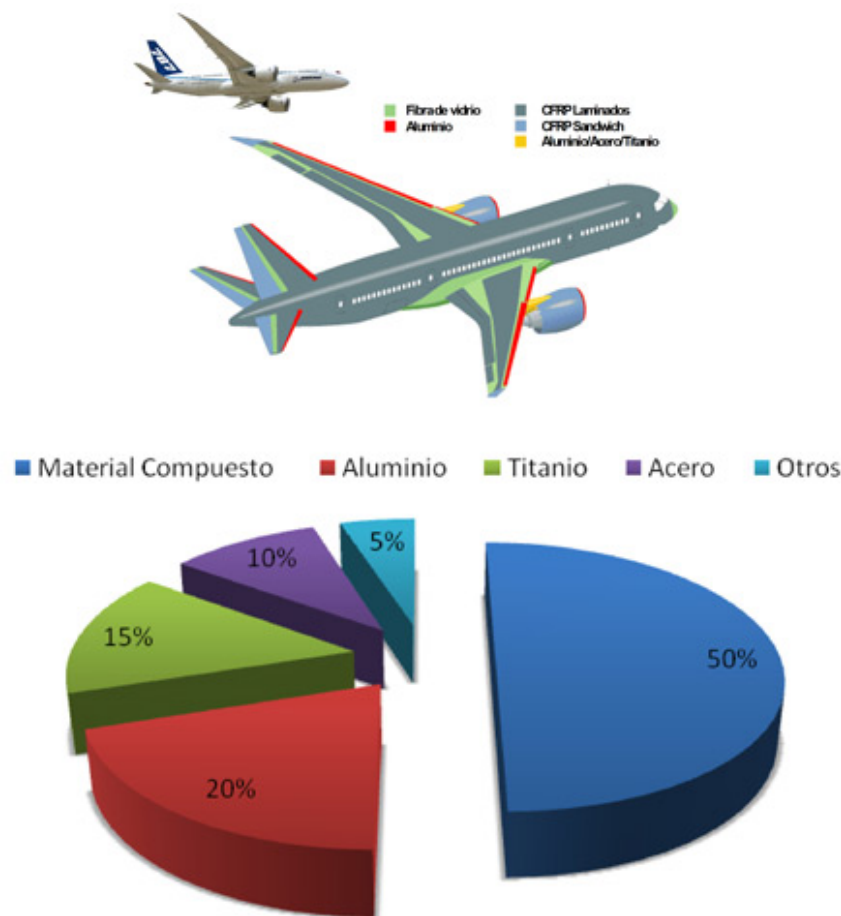


Figura 4.2: Distribución de material en peso en el Boeing 787 [77].

El empleo de los materiales compuestos de matriz orgánica está cada vez más extendido y su porcentaje de presencia en las aeronaves es cada vez más elevado. Inicialmente, los materiales compuestos se utilizaron solo en las partes secundarias de las aeronaves, pero conforme ha aumentado el conocimiento y desarrollo sobre los mismos, su uso se ha incrementado también en la estructura primaria como alas y fuselaje [68].

El atractivo de los composites en la fabricación de estructuras de alto rendimiento se basa

en sus mejores propiedades mecánicas en comparación con los metales, como mayor rigidez específica, resistencia específica, resistencia a fatiga y a la corrosión.

#### 4.2.1. Materiales reforzados por fibras

Aparte del CFRP (Material compuesto reforzado de fibra de carbono), otro de los composites más utilizados para aplicaciones aeroespaciales es el laminado de fibra de metal o "GLARE" (Figura 4.3) que combina capas de aluminio con capas de fibra de vidrio unidos mediante resina epoxy que presenta buenas propiedades como resistencia a la tracción, tolerancia al daño, resistencia a fatiga y a la corrosión [23].

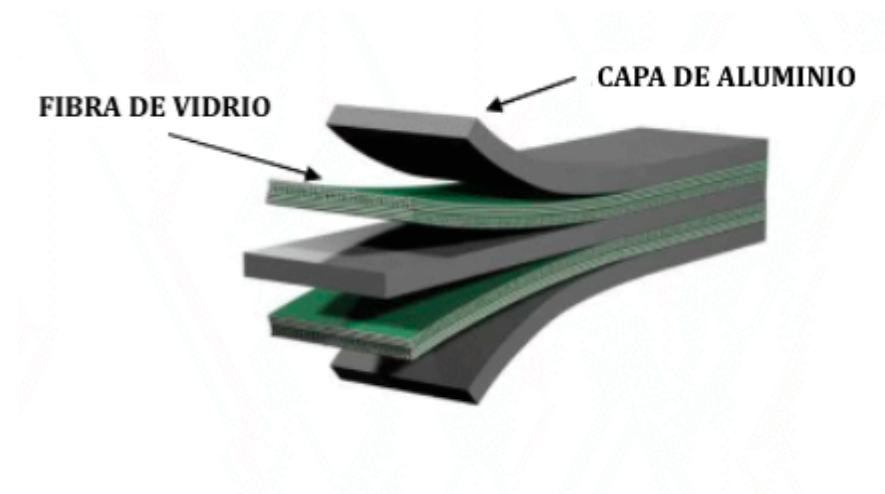


Figura 4.3: Esquema de la composición de las capas de GLARE [17].

La resistencia en los materiales compuestos depende de la naturaleza de las fibras utilizadas como elementos de refuerzo, su disposición y orientación en la matriz, y de la efectividad de la interfase fibra/matriz. El refuerzo en forma de fibras es el que más se utiliza, debido a que las fibras presentan un mejor comportamiento en cuanto a rigidez y resistencia, que si ese mismo material de refuerzo se utilizara en otras formas (laminados o tejidos) [65]. En la Figura 4.4 se observan fibras de vidrio, de aramida y de carbono.



Figura 4.4: Tipos de fibras utilizadas como refuerzo en materiales compuestos [24].

### 4.2.2. Aleaciones ligeras

Las aleaciones ligeras, como pueden ser las aleaciones de aluminio, titanio o magnesio en particular, se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial debido a que cumplen con los requisitos de servicio específicos de esta industria como es la reducción del peso de las aeronaves, lo que a su vez significa un menor consumo de combustible, y una menor emisión de productos de combustión a la atmósfera [37].

El aluminio se usa con frecuencia en esta industria debido a su bajo peso. Por sí solo, el aluminio no es increíblemente fuerte, pero cuando se combina en aleaciones con otros metales en se vuelve mucho más resistente. Las aleaciones de aluminio suelen ser lo suficientemente fuertes y ligeras para ser funcional en estructuras aeroespaciales y algunos satélites (aleaciones tipo AA 2XXX y 7XXX). Algunas de sus aplicaciones aeroespaciales son: las persianas de las ventanas de la Estación Espacial Internacional para proteger las ventanas de los impactos, estructuras de módulos lunares, partes del fuselaje de las aeronaves y transbordadores, como el pilar del tanque, las alas y la cola vertical debido a que es soldable y tiene buena resistencia y tenacidad a la fractura. Ha habido importantes avances recientes en las aleaciones de aluminio para aeronaves que pueden competir efectivamente con los materiales compuestos modernos [3].

Los expertos de la industria aeroespacial tienen una perspectiva positiva sobre el futuro de las aleaciones de aluminio en la industria aeroespacial y proyectan que la demanda de aluminio se duplicará durante la próxima década. Para el año 2025, habrá una demanda global de 80 millones de toneladas métricas, por lo que la industria aeroespacial busca cada vez más aleaciones recicladas para satisfacer la alta demanda. También hay un impulso por la innovación en los materiales utilizados, así como en la estructura de diseño de las aeronaves. Por ejemplo, las aleaciones de aluminio y litio recientemente desarrolladas podrían reducir el peso de las aeronaves y mejorar su rendimiento. Las aleaciones de aluminio y litio son materiales avanzados debido a su baja densidad, alto módulo específico y excelentes propiedades de fatiga y tenacidad criogénica [3].

Uno de los ejemplos de aplicación de estas aleaciones se ilustra en la Figura 4.5 donde se observa el modelo de aeronave A350 XWB de Airbus, que utiliza una mezcla de 55 % de aluminio/aleaciones de aluminio-litio, el 40 % por ciento de materiales compuestos y 5 % de titanio.



Figura 4.5: Esquema de los materiales de diseño del fuselaje del A350 XWB [16].

En cuanto a las aleaciones de titanio, existen tres tipos basadas en la composición de la aleación y los constituyentes predominantes:  $\alpha$ ,  $\alpha/\beta$  y  $\beta$ . Cada una de estas familias de aleaciones de titanio cumple una función específica. Las principales justificaciones para usar titanio o aleaciones de titanio en la industria aeroespacial son el ahorro de peso, la limitación de espacio, su temperatura de funcionamiento y su resistencia a la corrosión. Las aleaciones de titanio presentan una alta relación resistencia-peso.

La resistencia de las aleaciones de titanio y su temperatura de funcionamiento son significativamente mayores que las aleaciones de aluminio. Por lo tanto, cuando se tienen estos requerimientos en estructuras de fuselaje, como por ejemplo en las áreas de la unidad de potencia auxiliar (APU) (Figura 4.7) y de los sistemas antihielo del ala, se utilizan este tipo de aleaciones. El acero y las aleaciones con base de níquel son alternativas a estas aleaciones cuando se tienen temperaturas elevadas de funcionamiento pero tienen una densidad de aproximadamente 1,7 veces la del titanio, por tanto se limita la restricción del bajo peso.

Otro ejemplo de utilización de aleaciones de titanio es en la estructura principal del tren de aterrizaje en el Boeing 747 y 757 (Figura 4.6). La del 747 es una de las piezas forjadas de titanio más grandes que se han producido [14].

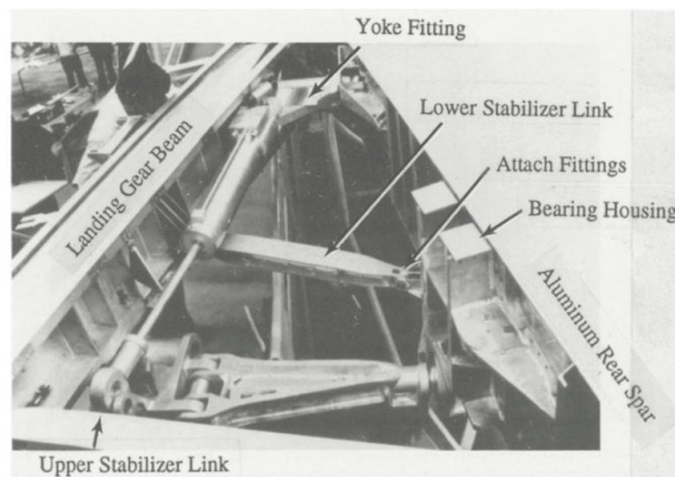


Figura 4.6: Estructura de soporte del tren de aterrizaje del Boeing 757 [14].



Figura 4.7: APU Honeywell GTCP36 montada debajo de la cola de un avión comercial [82].

La aleación de titanio Ti-6Al-4V es la más extendida y está diseñada para cumplir un equilibrio de ciertas características, que incluyen: resistencia, ductilidad, tenacidad a la fractura, resistencia a altas temperaturas, características de fluencia, soldabilidad, y procesabilidad térmica. Por lo tanto, esta aleación se utiliza para muchas piezas del fuselaje y motor de la aeronave [40].

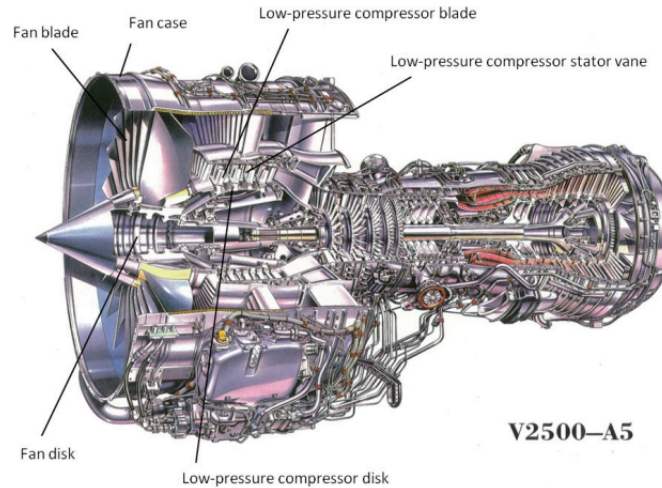


Figura 4.8: Ejemplo de la aplicación de aleación de titanio para el motor V2500 empleado por el Airbus A320. [40].

El magnesio y las aleaciones de magnesio son uno de los materiales metálicos más ligeros. Su baja densidad de  $1,73g/cm^3$  y la alta resistencia específica resultante los convierte en una perfecta alternativa a las aleaciones de aluminio ligeramente más pesadas. En las décadas de 1940 y 1950, los investigadores vieron las ventajas del uso de aleaciones de magnesio en la aviación e identificaron nuevos campos de aplicación en la misma. Dado que las densidades de las aleaciones de magnesio y los plásticos son similares, las aleaciones de Mg suelen sustituir a los plásticos en según que estructuras para garantizar una mayor rigidez [47]. En la Figura 4.9 se observa un ejemplo del uso de aleaciones de magnesio en componentes del interior de la cabina de pasajeros.

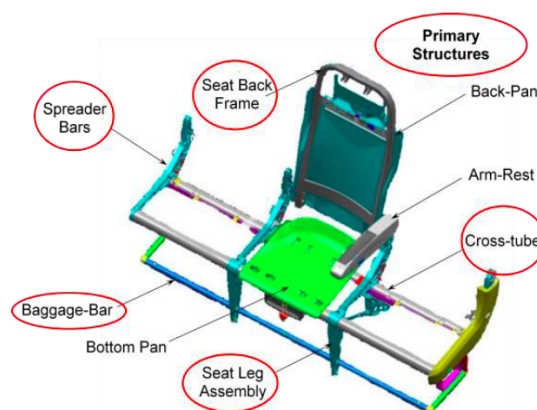


Figura 4.9: Esquema de los principales componentes estructurales del asiento [19].



### 4.2.3. Estructuras tipo sandwich

Los compuestos sándwich típicos consisten en dos revestimientos delgados, rígidos y de alta resistencia separados por un núcleo grueso y ligero. Las pieles o revestimientos están unidas al núcleo usando adhesivos estructurales lo suficientemente fuertes para transferir las cargas entre las dos caras [34].

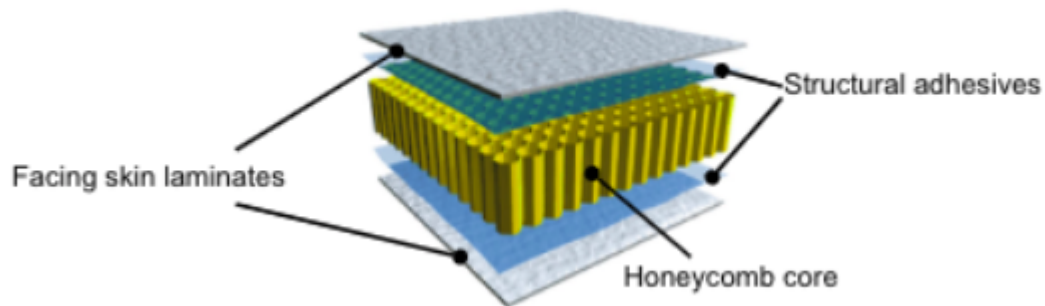


Figura 4.10: Esquema de una estructura tipo sandwich [61].

Las pieles de revestimiento suelen consistir en láminas compuestas reforzadas con fibra a base de matriz polimérica como las nombradas anteriormente. La selección de la matriz debe ser cuidadosamente considerada para lograr las propiedades superficiales requeridas como la resistencia a corrosión. Comúnmente se utilizan resinas termoendurecibles como matriz. La resina epoxi, el poliéster insaturado y viniléster son los termoestables más utilizados. Los epóxicos casi siempre se prefieren para aplicaciones avanzadas, como es el caso de la industria aeroespacial, donde el menor peso y la alta resistencia son propiedades críticas [79].

Para reforzar las pieles de los revestimientos de las estructuras tipo sandwich es común utilizar fibras de carbono, debido a su peso extremadamente bajo, alta rigidez y alta resistencia a la tracción. La fibra de vidrio y aramida son otro tipo de refuerzo que se pueden utilizar como alternativa. Las fibras de vidrio se suelen utilizar en piezas que requieran menos rigidez debido a que su coste es mucho menor [61].

En las estructuras sándwich los revestimientos deben resistir en el plano los esfuerzos de flexión, mientras que el núcleo debe soportar cargas transversales de corte y los esfuerzos de compresión. El núcleo también debe garantizar una transferencia adecuada de cargas entre los dos revestimientos a través de los adhesivos estructurales utilizados. Los núcleos de espuma, sólidos y de nido de abeja son relativamente económicos y pueden consistir en madera de balsa, madera contrachapada y una selección casi infinita de termoplásticos como espumas plásticas y termoendurecibles.

Las arquitecturas de nido de abeja se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial, y los dos tipos más comunes son hexagonales y estructuras celulares de forma cuadrada. Consisten en una serie de células, anidadas juntas para forman paneles de apariencia similar a la sección transversal de una colmena. El aluminio es casi siempre el único metal utilizado en la fabricación de núcleos de nido de abeja [61].

### 4.3. Fabricación aditiva de estructuras auxéticas

La fabricación aditiva tiene el potencial de ayudar a fabricar y desarrollar estructuras auxéticas con distintas funcionalidades y propiedades mejoradas que las fabricadas mediante procesos convencionales ofreciendo una flexibilidad y versatilidad para la producción de estos composites. La adopción de los procesos de FA en la fabricación de composites con estructuras auxéticas ofrece una compensación sostenible entre el coste y la eficiencia de las estructuras resultantes [44].

El crecimiento de la fabricación de estructuras auxéticas mediante FA ha sido incremental. Las técnicas FA se han utilizado para fabricar estructuras auxéticas tanto en 2D como en 3D. Existen numerosos estudios de fabricación de estructuras auxéticas mediante FA, un ejemplo de ello es la fabricación de estructuras celulares octaédricas usando técnicas de FA a través de una ruta de diseño asistido por experimentos [84]. El proceso de mecanizado por haz de electrones (EBM) se ha utilizado para fabricar estructuras auxéticas de  $Ti_6Al_4V$  (aleación de titanio más utilizada, tanto en aplicaciones biomédicas como industriales) con diferentes tamaños de celdas. Para el mismo proceso pero compuestos poliméricos, se realiza a través de la técnica de FA de modelado por deposición fundida (FDM) [7].

Este proceso se simplificó posteriormente mediante la adopción de sistemas robotizados para la escritura directa de estructuras auxéticas con tinta. El uso de estos robots para la impresión 3D permite superar alguna de las limitaciones de los sistemas tradicionales de fabricación aditiva como la baja calidad superficial o las propiedades anisotrópicas no deseadas y permite imprimir geometrías complejas en superficies curvas [11].

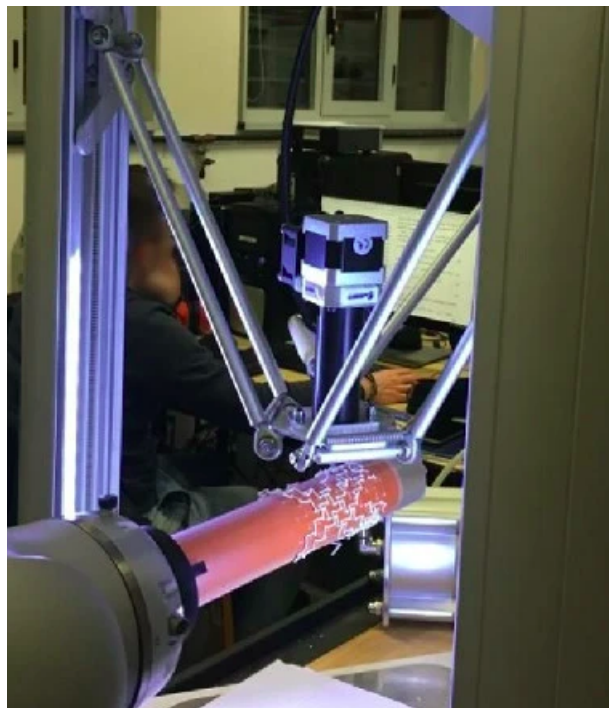


Figura 4.11: Sistema prototipo utilizado durante las pruebas de impresión aditiva de estructuras auxéticas cilíndricas mediante robótica [11].

Estos desarrollos han ayudado mejorando las perspectivas de automatización consiguiendo una mayor eficiencia y un mejor acabado superficial. Además, la ausencia de un sistema de ensamblaje y el movimiento relajado de estos robots permiten una configuración más simple y una producción más rápida. Estos procesos también se han utilizado en la producción de sistemas de metamateriales <sup>1</sup> auxéticos y tienen características de geometría reentrante.

Las modificaciones de los parámetros geométricos pueden ayudar al control de los coeficientes de expansión térmica (CTE) y de Poisson de estas estructuras tanto para valores positivos como negativos en el caso de las estructuras auxéticas.

Las técnicas de FA basadas en láser son conocidas por su excelente resolución y buen acabado superficial. Estas técnicas se pueden utilizar para fabricar estructuras poliméricas y metálicas con alta precisión. Además, estos métodos permiten utilizar diferentes materiales. Se introduce así la impresión de estructuras auxéticas metálicas mediante técnicas de FA basadas en láser [21].

Estas tecnologías de FA ayudan a la producción de materiales más duraderos y estructuras auxéticas más fuertes a través de un control eficiente, error mínimo y precisión dimensional excelente. De manera similar sucede con las estructuras auxéticas avanzadas que se realizan a través de sinterizado selectivo por láser (SLS) o fotopolimerización. Es posible realizar mejoras como obtener estructuras auxéticas con personalización de sus propiedades mecánicas y alta permeabilidad, gracias al análisis de dichas estructuras mediante aplicación de optimizaciones y estudios avanzados de elementos finitos [20]. La variación del tamaño y la forma de las celdas gobiernan las propiedades de las estructuras resultantes.

Otro gran avance en FA es el desarrollo de la fabricación aditiva curva. Esta técnica es muy beneficiosa para la fabricación rápida de estructuras auxéticas con desperdicio mínimo de los materiales de soporte. La fusión selectiva por láser (SLM) es otro tipo de tecnología FA utilizada para producir estructuras auxéticas metálicas realizadas a partir de polvos de un solo metal o aleados.

Los materiales compuestos que más se utilizan para realizar estas estructuras en el sector aeroespacial, como ya se ha visto en apartados anteriores suelen ser polímeros reforzados con fibra de carbono de alto rendimiento. Diversos estudios experimentales recomiendan el uso de estas estructuras en aplicaciones donde se requieren alta rigidez, tenacidad a la fractura, curvatura sinclástica y absorción de energía.

A continuación se describen los diversos procesos FA utilizados en la fabricación de estructuras auxéticas. Se detalla entre otras cosas el funcionamiento básico, las ventajas y las limitaciones de tales procesos junto con su importancia en la fabricación de estructuras auxéticas.

---

<sup>1</sup>Material artificial que presenta propiedades electromagnéticas inusuales, propiedades que proceden de la estructura diseñada y no de su composición, es decir, son distintas a las de sus constituyentes



### 4.3.1. FDM

El FDM o modelado por deposición fundida, clasificado en el Capítulo 2 como un proceso de extrusión de material es uno de los métodos más comunes de impresión 3D. Consiste en depositar el material en capas hasta conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos (bobinas), es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material del filamento y se desplaza en los 3 ejes para crear las capas. Una ilustración representativa de este proceso se muestra en la Figura 2.20.

Algunos polímeros utilizados en la impresión 3D de estructuras auxéticas son el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y existen estudios que demuestran la viabilidad de utilizar un polímero básico para producir un comportamiento auxético [83]. La incorporación de técnicas FA en la fabricación de estructuras auxéticas ha facilitado una fabricación más fácil de las mismas. Este sistema de extrusión basado en boquillas se adapta a la impresión 3D de estructuras auxéticas, que de otro modo sería difícil para imprimir en 3D usando filamentos de polímeros. Se utiliza para fabricar estructuras auxéticas que refuerzan compuestos para lograr mejoras del rendimiento mecánico. Esta tecnología se utiliza además en la fabricación de álabes de turbina con configuración auxética en su núcleo para los motores aeronáuticos [50]. Los núcleos de las piezas fabricadas con esta técnica se imprimen en 3D para obtener estructuras de diferentes ángulos de costilla y tamaños de celda. El espesor y el número de celdas en la estructura afectan a la relación de Poisson y al módulo de dichas estructuras. Las estructuras muestran importantes reducciones de peso con un aumento de la rigidez específica a la flexión. Entre las diversas estructuras auxéticas impresas mediante tecnologías aditivas, las estructuras reentrantes han mostrado la relación de Poisson más alta [49].

### 4.3.2. SLM y DMLS

El sinterizado de metal por láser de metales clasificado en el Capítulo 2 como un proceso de fusión de lecho de polvo es un proceso de fabricación aditiva basado en láser a través del cual se pueden obtener estructuras auxéticas metálicas. Los términos SLM (sinterizado de metal por láser) y DMLS (sinterizado directo de metal por láser) a menudo se usan indistintamente. La diferencia radica en los materiales que se utilizan. En el SLM se derriten metales puros mientras que en el DMLS son aleaciones metálicas. El proceso consiste en aplicar una capa de metal en polvo sobre una plataforma y aplicar un láser de  $CO_2$  de alta potencia para derretir el metal en polvo. Una vez una capa está completa, la plataforma desciende una altura equivalente al espesor de la capa, y el proceso se repite hasta que la pieza esté completamente formada. El proceso se lleva en una atmósfera controlada para evitar la oxidación. La representación de este proceso se muestra en la Figura 2.18.

Esta técnica ofrece grandes perspectivas en la fabricación de estructuras auxéticas. El proceso es rápido y se puede utilizar para producir formas complejas con una variedad de metales. Las estructuras auxéticas fabricadas mediante esta técnica soportan mayores cargas de compresión cíclicas que sus similares no auxéticas [53]. Las estructuras auxéticas fabricadas mediante esta tecnología presentan algunas desventajas como que tienen propiedades mecánicas variables en función de la dirección en la que fueron fabricadas, que la fragilidad del material de la pared de la estructura parcialmente inducido por un calentamiento ex-

cesivo puede provocar fallos en la misma y algunas inconsistencias en cuanto a la porosidad y la presencia de granos sin fundir en estructuras [44].

### 4.3.3. SLS

El sinterizado selectivo mediante láser clasificado en el Capítulo 2 como un proceso de deposición de energía focalizada ha demostrado ser otro método eficaz para la fabricación de estructuras con geometrías complejas. El SLS es similar a SLM, sin embargo, el SLS utiliza polvos termoplásticos en vez de polvos de metal o aleación metálica. El funcionamiento de una impresora SLS sigue el mismo principio que el de una impresora SLM. Se estima que se obtienen buenas propiedades de absorción de energía e impacto en las estructuras auxéticas fabricadas por SLS. El SLS se utiliza para fabricar compuestos auxéticos tetraquirales de paneles de nido de abeja. El número reducido de ligamentos de estos en comparación con las estructuras hexaquirales reduce la densidad de la estructura y conduce a una fabricación más fácil. Estas estructuras pueden considerarse candidatas potenciales para diversas aplicaciones en ingeniería aeroespacial [44].

### 4.3.4. EBM y SEBM

Las técnicas de fusión por haz de electrones (EBM) y fusión selectiva por haz de electrones (SEBM), clasificadas en el Capítulo 2 como procesos de deposición de energía focalizada, se han generalizado en la producción de estructuras metálicas auxéticas con alta precisión y exactitud. La fuente de energía y la elección del material son las dos principales diferencias con respecto al SLS. EBM utiliza un haz de electrones en lugar de un láser de  $CO_2$  como se ve en SLS y es capaz de sintetizar estructuras hechas de metales conductores (típicamente aleaciones de Ti). La aleación  $Ti_6Al_4V$  es la más adecuada para los procesos de EBM. Esta técnica ayuda a producir estructuras con una resistencia mecánica superior y densidades más altas debido a vacíos mínimos dentro de la estructura. Las estructuras auxéticas fabricadas de  $Ti_6Al_4V$  han sido analizadas experimentalmente para confirmar su viabilidad para aplicaciones de alta absorción de energía y han exhibido una auxeticidad prominente ya que los resultados experimentales observados han mostrado una buena correlación con las estimaciones teóricas.

### 4.3.5. SLA

La estereolitografía (SLA) clasificada en el Capítulo 2 como un proceso de fotopolimerización en tanque, es una técnica de impresión 3D de resina que convierte un líquido fotosensible en una pieza 3D sólida. Los métodos SLA se pueden utilizar para el desarrollo de estructuras auxéticas 3D hechas de fotopolímeros líquidos. El proceso consiste en un tanque que contiene una resina de fotopolímero líquido. Un láser apunta hacia el fotopolímero y dibuja la primera capa de la impresión sobre la resina, esta se solidifica en las regiones donde incide el láser. Una vez que se fabrica la capa, la plataforma se mueve hacia arriba por una distancia igual al espesor de la capa de la estructura y se imprimen las capas posteriores. Las ventajas que ofrece la SLA ayudan en la producción de estructuras auxéticas novedosas y de alta calidad con una importante reducción de peso en comparación con las estructuras auxéticas reentrantes. Además es un proceso extremadamente beneficioso en la fabricación de estructuras auxéticas cerámicas con geometrías complejas [44].

## 4.4. Aplicaciones

Más del 80 % de todas las innovaciones en la industria aeroespacial se deben su existencia al uso de nuevos materiales y nuevas tecnologías. Las tecnologías de fabricación aditiva que son utilizadas para fabricar piezas tanto de plástico como de metal son un ejemplo de las tecnologías que se han desarrollado desde la década de 1980. En la actualidad, las tecnologías FA se aplican cada vez más para la fabricación de piezas prefabricadas en el sector [47].

Las propiedades mecánicas de las estructuras auxéticas las hacen adecuadas para aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad, por lo que las estructuras auxéticas macroscópicas y microscópicas se utilizan en la industria aeroespacial en componentes tales como piezas de carrocería curvadas, conos de nariz de aeronaves, y paneles de alas de aeronaves entre otros [69].

Se va a analizar en detalle un ejemplo de aplicación de estructuras auxéticas fabricadas mediante FDM o modelado por deposición fundida en álabes de turbina. Para ello se utiliza el estudio de un núcleo celular basado en configuraciones auxéticas para los álabes de turbina de un motor aeronáutico.

Los diseñadores de turbomaquinaria se enfrentan al desafío constante de identificar soluciones de estructuras ligeras para las futuras generaciones de álabes de turbina de motores aeronáuticos. Sin embargo, el aumento de las cargas estáticas debido a la velocidad de rotación, la temperatura y las fuerzas aerodinámicas constantes representa un desafío significativo para el diseñador en términos de selección de materiales.

Además, los diseños de motores aeronáuticos modernos ofrecen una mayor variedad de fuentes de carga potencialmente no deseadas, como espacios axiales más pequeños entre los estatores y los rotores, y espacios más pequeños en las puntas que inducen contactos entre el rotor y la carcasa [49].



Figura 4.12: Álabes de turbina [35].

La mayoría de los diseños de álabes de turbina existentes están constituidos por una piel externa formada alrededor de las secciones del perfil aerodinámico, con la sección transversal rellena con un material sólido. Los revestimientos de las álabes de turbina pueden ser metálicos o estar fabricados con compuestos reforzados con fibra de carbono.

En los álabes de turbina de los motores aeronáuticos, una posible alternativa al uso de un relleno sólido es la adopción de un núcleo de estructura celular, con su peso ligero intrínseco y su alta rigidez transversal específica para aumentar la rigidez a la flexión. Los núcleos celulares se fabrican típicamente con configuraciones simétricas de centro de tipo hexagonal (panales de abeja clásicos). Los panales hexagonales regulares tienen propiedades mecánicas isotrópicas transversales y una relación de Poisson en el plano de alrededor de 1.

Un subconjunto especial de estructuras celulares está representado por las auxéticas (o relación de Poisson negativa). Los materiales con relación de Poisson negativa o auxéticos, como ya se ha visto en el Capítulo 3 se expanden en todas direcciones cuando se someten a una carga uniaxial, por lo que se comportan de manera opuesta a los sólidos más convencionales” (relación de Poisson positiva).

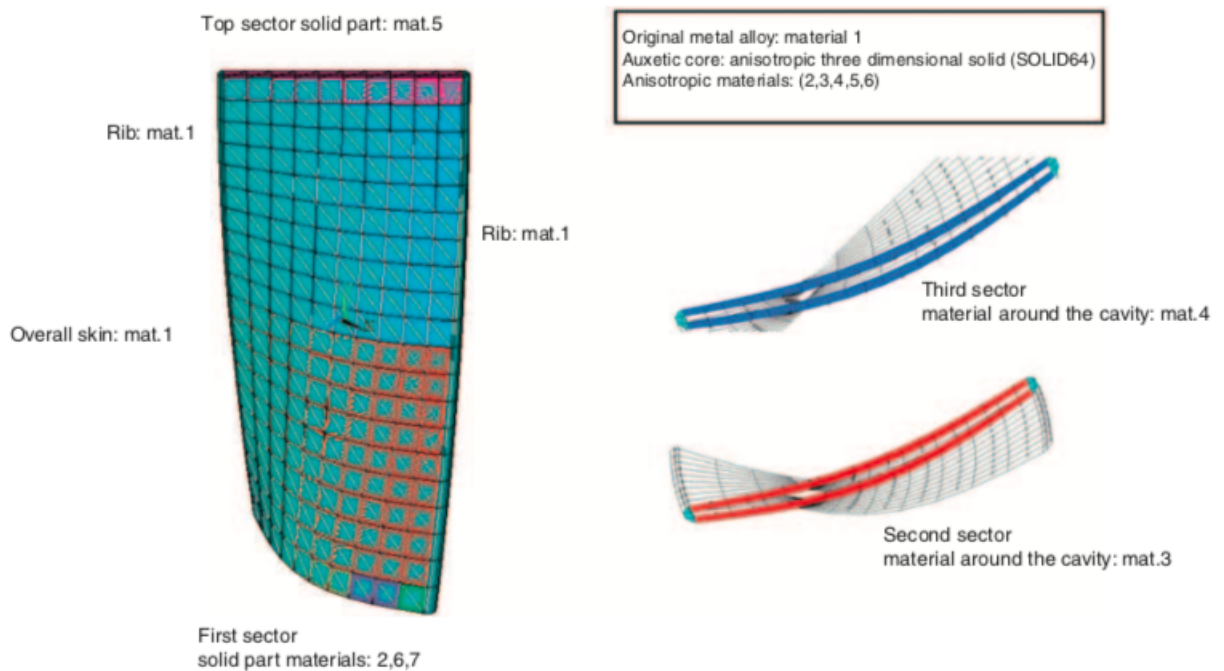


Figura 4.13: Modelo del álabes y distribución de los diferentes materiales [50].

En la Figura 4.13 se muestra un diseño en ANSYS del álabes que se caracteriza en el estudio [49]. El núcleo se ha dividido en cuatro sectores a lo largo de la dirección principal donde en cada uno se utiliza un tipo de material.

Uno de los parámetros dinámicos estructurales clave para el diseño de álabes de turbina de motores aeronáuticos es también el mantenimiento de una secuencia específica para los tres primeros modos naturales de los álabes (primero de flexión, primero de torsión y segundo de flexión).

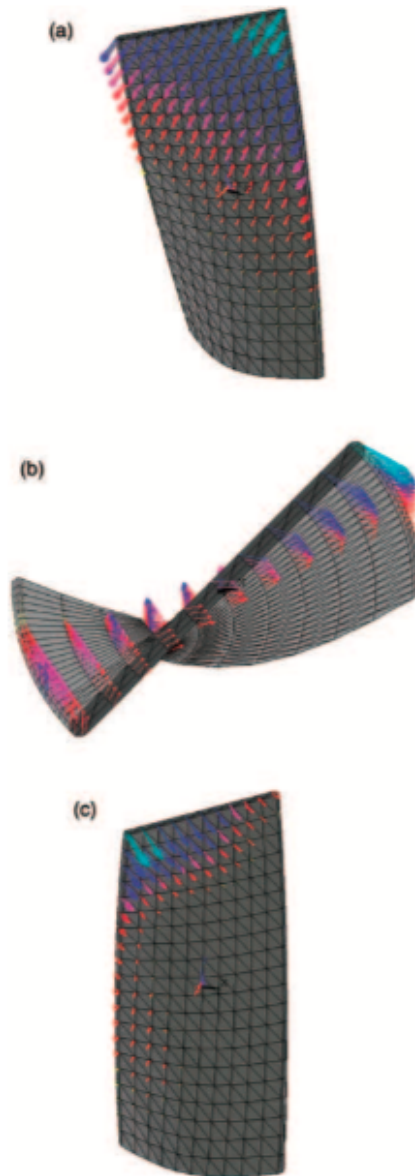


Figura 4.14: Modos del álabes de turbina: (a) primera flexión; (b) primera torsión; y (c) segunda flexión [50].

El uso de una estructura auxética en el núcleo del álabes proporcionaría una distribución variable de la rigidez y las deformaciones, lo que haría posible variar la distribución de la curvatura y aportar rigidez. El aumento de la rigidez específica a la flexión de las configuraciones auxéticas conduce a unas propiedades similares a las que se pueden encontrar en las estructuras con configuraciones hexagonales, pero con una disminución del peso de la estructura [49].

# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

La fabricación aditiva ha sufrido grandes desarrollos para atender a la producción de estructuras auxéticas tanto de materiales poliméricos como metálicos. La incorporación de técnicas FA en la fabricación de estructuras auxéticas ha facilitado una fabricación más fácil de las mismas. Como ya se ha visto, la fabricación aditiva de estructuras auxéticas encapsula las siguientes técnicas: modelado por deposición fundida (FDM), sinterizado de metal por láser (SLM), sinterizado selectivo mediante láser (SLS), técnicas de fusión por haz de electrones (EBM) y estereolitografía (SLA).

La industria aeroespacial fue una de las primeras industrias en adoptar las tecnologías de fabricación aditiva y aun contribuye intensamente en su desarrollo. Con la aparición de estas tecnologías capaces de crear piezas metálicas o compuestos que cumplan los estándares de calidad de la industria aeroespacial cada vez más componentes son fabricados con estos métodos.

Las estructuras auxéticas poseen alta rigidez específica, alta resistencia específica, ligero peso, módulo de cizalladura más alto, curvatura sinclástica, mejor resistencia al agrietamiento entre otras características, y debido a esto son muy adecuadas para su uso en componentes de altas prestaciones, como los requeridos en la industria aeroespacial.

Se concluye con que la fabricación aditiva tiene el potencial de ayudar a fabricar y desarrollar estructuras auxéticas con distintas funcionalidades y propiedades mejoradas que las fabricadas mediante procesos convencionales ofreciendo una flexibilidad y versatilidad para la producción de estos composites que pueden ser utilizados en aplicaciones aeroespaciales.

Un aspecto interesante a considerar en trabajos futuros de investigación en esta línea está relacionado con los comportamientos térmicos de estas estructuras, como por ejemplo, como varía la conductividad térmica en función de la geometría de la estructura.

# Bibliografía

- [1] 3Dalia. <https://3dalia.com/las-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/>, 15 de Agosto de 2022.
- [2] 3dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia/>, 16 de Agosto de 2022.
- [3] Afaf M Abd El-Hameed and YA Abdel-Aziz. Aluminium alloys in space applications: A short report. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 22(1):1–7, 2021.
- [4] Francisco Manuel Acevedo Vallejo. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, estudio sobre la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva al sector aeronáutico y espacial. Impresión 3D. 2016.
- [5] Ajuste de la resolución del STL. <https://support.bcn3d.com/resolution-stl>, 16 de Agosto de 2022.
- [6] Alderson Alderson and KL Alderson. Auxetic materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4):565–575, 2007.
- [7] M Usman Aslam and Saied M Darwish. Development and analysis of different density auxetic cellular structures. *Int J Recent Innov Trends Comput Commun*, 3:27–32, 2015.
- [8] Mohsen Attaran. The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5):677–688, 2017.
- [9] Daniel Alberto Baron Cangrejo et al. Análisis por elementos finitos de la respuesta de estructuras auxeticas hexaquirales y re-entrantes con coeficiente de poisson negativo bajo carga uniaxial en el plano xy.
- [10] Akash Bhatia and Anuj Kumar Sehgal. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [11] Lisa Biasetto, Giovanni Boschetti, and Riccardo Minto. Robotic additive printing of cylindrical auxetic structures. In *The International Conference of IFToMM ITALY*, pages 394–402. Springer, 2020.
- [12] Boeing relies on 3D-printed components made of titanium, 20 de Septiembre de 2022.

- [13] David Bourell, Jean Pierre Kruth, Ming Leu, Gideon Levy, David Rosen, Allison M Beese, and Adam Clare. Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 66(2):659–681, 2017.
- [14] Renee R Boyer. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2):103–114, 1996.
- [15] Alexandra Balbás Calvo, María del Mar Espinosa Escudero, and Manuel Domínguez Somonte. Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos. *Lámpsakos*, (19):47–54, 2018.
- [16] Características del nuevo Airbus A350 XWB, 20 de Septiembre de 2022.
- [17] Qi Chen, Zhidong Guan, Zengshan Li, Zhaojie Ji, and Yue Zhuo. Experimental investigation on impact performances of glare laminates. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(6):1784–1792, 2015.
- [18] JA Costa. Procesos de manufactura con tecnología 3d. *CTS Cafe*, pages 40–49, 2019.
- [19] Bruce Davis. The application of magnesium alloys in aircraft interiors—changing the rules. In *Magnesium Technology 2015*, pages 5–5. Springer, 2015.
- [20] Cícero R de Lima and Glaucio H Paulino. Auxetic structure design using compliant mechanisms: A topology optimization approach with polygonal finite elements. *Advances in Engineering Software*, 129:69–80, 2019.
- [21] Yaoyu Ding and Radovan Kovacevic. Feasibility study on 3-d printing of metallic structural materials with robotized laser-based metal additive manufacturing. *Jom*, 68(7):1774–1779, 2016.
- [22] División de Manufactura Aditiva y Componentes. <https://www.icamcyl.com/es/>, 5 de Septiembre de 2022.
- [23] Tolga Dursun and Costas Soutis. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 56:862–871, 2014.
- [24] El refuerzo en los materiales compuestos, 5 de Septiembre de 2022.
- [25] Kenneth E Evans and Andrew Alderson. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! *Advanced materials*, 12(9):617–628, 2000.
- [26] Fabricación aditiva en la industria 4.0. <https://grupogaratu.com>, 15 de Agosto de 2022.
- [27] FormaCad. <https://formacad.es/software-cad-cam-mas-utilizados/>, 15 de Agosto de 2022.
- [28] Francis Froes, Rodney Boyer, and B Dutta. Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. In *Additive manufacturing for the aerospace industry*, pages 1–6. Elsevier, 2019.



- [29] YC Fung, K Fronek, and P Patitucci. Pseudoelasticity of arteries and the choice of its mathematical expression. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 237(5):H620–H631, 1979.
- [30] Qiang Gao, Wei-Hsin Liao, and Chen Huang. Theoretical predictions of dynamic responses of cylindrical sandwich filled with auxetic structures under impact loading. *Aerospace Science and Technology*, 107:106270, 2020.
- [31] Neil Gaspar, XJ Ren, Chris W Smith, JN Grima, and Ken E Evans. Novel honeycombs with auxetic behaviour. *Acta Materialia*, 53(8):2439–2445, 2005.
- [32] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, and Mahyar Khorasani. Materials for additive manufacturing. In *Additive Manufacturing Technologies*, pages 379–428. Springer, 2021.
- [33] Ian Gibson, David W Rosen, and Brent Stucker. Sheet lamination processes. In *Additive manufacturing technologies*, pages 223–252. Springer, 2010.
- [34] JOSE TRINIDAD GALINDO GOMEZ. Manufactura y caracterización mecánica de estructuras tipo sándwich fabricadas por infusión al vacío para componentes aeronáuticos. 2019.
- [35] Gran avance de Siemens con la impresión de álabes de turbina de gas en 3D, 20 de Septiembre de 2022.
- [36] Nayanee Gupta, Christopher Weber, and Sherrica Newsome. Additive manufacturing: status and opportunities. *Science and Technology Policy Institute, Washington*, 2012.
- [37] A Heinz, A Haszler, C Keidel, S Moldenhauer, R Benedictus, and WS Miller. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1):102–107, 2000.
- [38] Pedro Hernández-Castellano, Alejandro Gutiérrez Barcenilla, María Dolores Martínez Rivero, María Dolores Marrero-Alemán, Rubén Paz Hernandez, Luis Adargoma Suárez García, and Fernando Ortega García. *Tecnologías de fabricación aditiva*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2018.
- [39] Timothy J Horn and Ola LA Harrysson. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, 95(3):255–282, 2012.
- [40] Ikuhiro Inagaki, Tsutomu Takechi, Yoshihisa Shirai, and Nozomu Ariyasu. Application and features of titanium for the aerospace industry. *Nippon steel & sumitomo metal technical report*, 106(106):22–27, 2014.
- [41] Interempresas. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva.html>, 15 de Agosto de 2022.
- [42] Wei Jiang, Xin Ren, Shi Long Wang, Xue Gang Zhang, Xiang Yu Zhang, Chen Luo, Yi Min Xie, Fabrizio Scarpa, Andrew Alderson, and Ken E Evans. Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: A state-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*, page 109733, 2022.

- [43] Raúl Jiménez Espada. Modelización de estructuras auxéticas. B.S. thesis, 2017.
- [44] Athul Joseph, Vinyas Mahesh, and Dineshkumar Harursampath. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: A review. *Advances in Manufacturing*, 9(3):342–368, 2021.
- [45] Serope Kalpakjian and Steven R Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [46] Nikhil Nivrutti Kumbhar and AV Mulay. Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 99(4):481–487, 2018.
- [47] T Kurzynowski, A Pawlak, and I Smolina. The potential of slm technology for processing magnesium alloys in aerospace industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(1):1–13, 2020.
- [48] Y Li and DY Chung. The anisotropic behavior of poisson’s ratio, young’s modulus, and shear modulus in crystals with different symmetries. *physica status solidi (a)*, 46(2):603–610, 1978.
- [49] Bin Ling, Kai Wei, Zhonggang Wang, Xujing Yang, Zhaoliang Qu, and Daining Fang. Experimentally program large magnitude of poisson’s ratio in additively manufactured mechanical metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 173:105466, 2020.
- [50] C Lira, F Scarpa, and R Rajasekaran. A gradient cellular core for aeroengine fan blades based on auxetic configurations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(9):907–917, 2011.
- [51] Qianchu Liu. Literature review: materials with negative poisson’s ratios and potential applications to aerospace and defence. 2006.
- [52] João Fiore Parreira Lovo, Italo Leite de Camargo, Rogério Erbereli, Mateus Mota Moraes, and Carlos Alberto Fortulan. Vat photopolymerization additive manufacturing resins: analysis and case study. *Materials Research*, 23, 2020.
- [53] VA Lvov, FS Senatov, AA Stepashkin, AA Veveris, MD Pavlov, and AA Komissarov. Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed metallic auxetic structure. *Materials Today: Proceedings*, 33:1979–1983, 2020.
- [54] Ángel Marín Requena. *Análisis del proceso de diseño para fabricación aditiva aplicado a componentes aeroespaciales*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [55] Materiales compuestos CFRP. <http://www.cienciamx.com/>, 5 de Septiembre de 2022.
- [56] Materiales poliméricos y tecnologías para la fabricación aditiva. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/>, 5 de Septiembre de 2022.

- [57] Milab 3D. <https://milab3d.com/escaneado-3d-2/>, 15 de Agosto de 2022.
- [58] Mariam Mir, Murtaza Najabat Ali, Javaria Sami, and Umar Ansari. Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 2014.
- [59] Michael Molitch-Hou. Overview of additive manufacturing process. In *Additive manufacturing*, pages 1–38. Elsevier, 2018.
- [60] Métodos de posprocesamiento. <https://www.3dnatives.com>, 16 de Agosto de 2022.
- [61] JP Nunes and João F Silva. Sandwiched composites in aerospace engineering. In *Advanced composite materials for aerospace engineering*, pages 129–174. Elsevier, 2016.
- [62] Xing Peng, Lingbao Kong, Jerry Ying Hsi Fuh, and Hao Wang. A review of post-processing technologies in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2):38, 2021.
- [63] Tanisha Pereira, John V Kennedy, and Johan Potgieter. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30:11–18, 2019.
- [64] M Puerto Pérez-Pérez, Miguel A Sebastián, and Emilio Gómez-García. Análisis y propuesta para la utilización de los contenidos en normas técnicas para la enseñanza de la fabricación aditiva. In *Proceedings of the Acta XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Madrid, Spain*, pages 19–21, 2018.
- [65] Sachhidan Prashanth, KM Subbaya, K Nithin, and S Sachhidananda. Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03):2–6, 2017.
- [66] Yunan Prawoto. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative poisson’s ratio. *Computational Materials Science*, 58:140–153, 2012.
- [67] Proind Ingenieria. <http://proind.com.ar/blog/2021/01/15/fabricacion-aditiva/>, 15 de Agosto de 2022.
- [68] Adam Quilter. Composites in aerospace applications. *IHS White Paper*, 444(1):264, 2001.
- [69] Sohel Rana, Rui Magalhães, and Raul Fangueiro. Advanced auxetic fibrous structures and composites for industrial applications. 2017.
- [70] José J Rodríguez-Moral. Simulación numérica del comportamiento mecánico de elementos para fabricación aditiva. 2019.
- [71] F Scarpa and FC Smith. Passive and mr fluid-coated auxetic pu foam—mechanical, acoustic, and electromagnetic properties. *Journal of intelligent material systems and structures*, 15(12):973–979, 2004.
- [72] Senvol Database. <http://senvol.com/additive-manufacturing/>, 5 de Septiembre de 2022.

- [73] Wallace Arden Smith. Optimizing electromechanical coupling in piezocomposites using polymers with negative poisson's ratio. In *IEEE 1991 Ultrasonics Symposium*,, pages 661–666. IEEE, 1991.
- [74] C Soutis. Introduction: Engineering requirements for aerospace composite materials. In *Polymer composites in the aerospace industry*, pages 1–18. Elsevier, 2015.
- [75] Panagiotis Stavropoulos and Panagis Foteinopoulos. Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification. *Manufacturing Review*, 5:2, 2018.
- [76] Alberto Taberero Salguero. Estudio de estructuras auxéticas sometidas a impacto. B.S. thesis, 2019.
- [77] Tecnologías para el taladrado de materiales aeronauticos avanzado, 5 de Septiembre de 2022.
- [78] Daniel Turmo Cortes. Optimización topológica experimental de piezas obtenidas por fabricación aditiva tipo dlp. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [79] Jack R Vinson. Sandwich structures. 2001.
- [80] Z Wang, Adeel Zulifqar, and Hong Hu. Auxetic composites in aerospace engineering. In *Advanced composite materials for aerospace engineering*, pages 213–240. Elsevier, 2016.
- [81] Weerg. <https://www.weerg.com/es/es/blog/>, 15 de Agosto de 2022.
- [82] Wikipedia. Unidad de potencia auxiliar — wikipedia, la enciclopedia libre, 2022. [Internet; descargado 25-septiembre-2022].
- [83] Kaufui V Wong and Aldo Hernandez. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- [84] Li Yang. Experimental-assisted design development for an octahedral cellular structure using additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2):168–176, 2015.
- [85] Liu Yanping and Hu Hong. A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 5(10):1052–1063, 2010.
- [86] Manuel Zahera. La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y el desarrollo de productos. 2012.
- [87] Botao Zhang, Archak Goel, Omkar Ghalsasi, and Sam Anand. Cad-based design and pre-processing tools for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 52:227–241, 2019.