

# Guía de diseño para Fabricación Aditiva

**Interreg**



**Sudoe**

**Samt**  **Sudoe**

European Regional Development Fund

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Resumen de los métodos de fabricación</b>	<b>5</b>
<b>Ventajas de la fabricación aditiva</b>	<b>10</b>
Piezas complejas. Libertad de diseño.	12
Productos aligerados	13
Productos multimateriales	14
Reducción del <i>time-to-market</i> de nuevos diseños	15
Instalación rápida	16
Reducción de costes y errores	16
<b>Limitaciones de la fabricación aditiva</b>	<b>17</b>
Grandes series de producción	18
Materiales	19
Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación	20
Calidad de producto y repetibilidad de proceso	20
Tamaño limitado de piezas	21
Coste de la maquinaria y productividad	21
<b>Cuándo usar Fabricación sustractiva o Aditiva</b>	<b>22</b>
Máquinas híbridas	25
Ventajas	27
Limitaciones	30
<b>Consideraciones generales de diseño</b>	<b>34</b>
Altura de capa	36
Contracción y deformación	38
Temperatura y curado	38
Estructuras de soporte	39
Mitigación de la contracción y voladizos	40
Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías	41
<b>Casos de éxito</b>	<b>42</b>

# Introducción

# Introducción

## sobre procesos de fabricación y el diseño

Para la fabricación de piezas, elementos, componentes, entre otros, existen diferentes medios de fabricación. Estos medios de fabricación influyen de forma directa en los aspectos relativos al diseño, es decir, hay una serie de cuestiones que se deben tener en cuenta al realizar un diseño, en función del modo de fabricación empleado.

En este documento se aborda principalmente los aspectos a tener en cuenta en el diseño cuando se trabaja con fabricación aditiva. Para entender estos aspectos a tener en cuenta, a continuación se resumen en primer lugar, los principales métodos de fabricación considerados.

Más adelante, se recogen las ventajas y las limitaciones de la fabricación aditiva. Aquellas características específicas que se deben tener en cuenta cuando se diseñan piezas para el uso de la fabricación aditiva.

En último lugar, se recogen reglas generales a tener en cuenta en el diseño, así como casos de éxito que han sido capaces de realizar diseños que aprovechan adecuadamente las tecnologías de fabricación aditiva.

# Resumen

## de los métodos de fabricación

### Fabricación sustractiva

- o Mecanizado
- o Electroerosión
- o Corte

### Fabricación conformativa

- o Moldeo por inyección
- o Forja / embutición
- o Termoconformado
- o Pulvimetalurgia

# Resumen

## de los métodos de fabricación



Ilustración 1 - Ejemplo de fabricación sustractiva (Fuente: Chris Ralston para Unsplash)

### **Fabricación sustractiva**

La característica principal de la fabricación sustractiva es que el origen es un bloque de material cuyas dimensiones son mayores que la geometría final que se pretende conseguir. Se va arrancando el material de forma sucesiva, eliminándolo así selectivamente y creando poco a poco la pieza deseada. Los principales procesos que engloba este tipo de fabricación son:

# Fabricación sustractiva

1

## Mecanizado

Aquí podemos englobar un conjunto de operaciones de conformado de piezas eliminando material por abrasión o a través del arranque de viruta.

2

## Electroerosión

Se basa en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo con un medio dieléctrico buscando arrancar partículas de la pieza para poder reproducir en la misma la forma del electrodo. Los dos elementos (electrodo y pieza) han de ser conductores, pues de otro modo, no sería posible crear el arco eléctrico que arranca el material.

3

## Corte

Por agua, láser, sierra, etc.

# Resumen

## de los métodos de fabricación



Ilustración 2 - Ejemplo de fabricación conformativa (Fuente: Fundación AITIIP)

### Fabricación conformativa

Otro tipo de método de fabricación es la conformativa. En ella se utiliza una matriz que cuenta con una cavidad con la forma de la pieza que se busca conseguir y en la que se introduce el material, que se va adaptando a esa forma y se procesa, obteniéndose finalmente la pieza mediante la extracción de la pieza de la matriz. Algunos ejemplos serían:

# Fabricación conformativa

1

## Moldeo por inyección

En la cavidad del molde se va inyectando material fundido. Esa cavidad puede considerarse como un “negativo” de la pieza, donde el material introducido se solidifica con la forma deseada.

2

## Forja / embutición

En este caso se produce una deformación plástica del material (mediante esfuerzos mecánicos), que se va adaptando a la cavidad de la matriz.

3

## Termoconformado

Una plancha o lámina de semielaborado termoplástico se calienta de forma que al reblandecerse puede adaptarse a la forma de un molde por acción de presión vacío o mediante un contramolde.

4

## Pulvimetarlugia

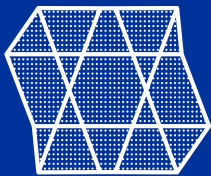
Con un material en polvo se va rellenando la cavidad del molde y tras un proceso de compactación y sinterización (con un tratamiento térmico), se procede a la extracción de la pieza.

# **Ventajas** de la Fabricación Aditiva

# Ventajas

## de la Fabricación Aditiva

En la Fabricación Aditiva, durante el proceso de fabricación se simplifican generalmente la cantidad de pasos: la pieza se crea de forma directa desde un archivo 3D, siendo el material añadido capa a capa.



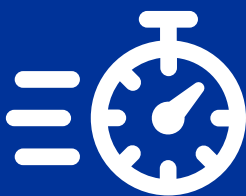
Piezas complejas. Libertad de diseño



Productos aligerados



Productos multimaterial



Instalación rápida



Reducción del time-to-market de nuevos diseños



Reducción de costes y errores

## Piezas complejas. Libertad de diseño

La FA permite obtener piezas de complejidad geométrica sin que el proceso presente un encarecimiento por ello. Canales internos, diversos espesores, líneas esbeltas, vacíos interiores, formas irregulares o que imitan a la naturaleza. Estos son desafíos que los otros métodos de fabricación han resuelto con mayor o menor acierto, generalmente a través de ensamblajes o acciones de elevado coste y que sin embargo no suponen cambios importantes en el proceso de FA.

Por consiguiente, la FA favorece la personalización, una de las tendencias actuales más crecientes para la creación de productos de alto valor añadido.

Otra gran ventaja de la libertad geométrica que confiere la FA a sus productos es la adaptación de las formas a la biomecánica humana, de manera que los diseños logren

una mejor interacción con el usuario sin necesariamente afectar los costes de fabricación. Además, debido a la capacidad previamente citada de la personalización, esa ergonomía en el diseño puede adaptarse no solo a unas tallas estándar, sino exactamente a las particularidades antropométricas de cada individuo.

Esta combinación de geometrías y materiales permite a la FA conseguir por ejemplo la fabricación de un mecanismo completamente integrado en la pieza en la que ha de funcionar sin que tenga que ser armado o ajustado con posterioridad. Sin embargo, debe puntualizarse que esto es algo que no todas las tecnologías de FA pueden conseguir y que es mucho más sencillo con las que no requieren soporte para su fabricación.

La Fabricación Aditiva proporciona una gran libertad de diseño especialmente en piezas complejas

## Productos aligerados

Cuando se busca reducir el peso de un objeto, la complejidad geométrica puede ser la solución, pues utilizando estructuras internas huecas o combinaciones en la densidad de los materiales se pueden obtener estructuras con resistencia similar y un peso menor.

Es cierto que a través de algunos procesos conformativos (como puede ser la fabricación por moldeo) es posible obtener piezas huecas, pero en este caso nos encontramos con las limitaciones que marca el proceso de desmoldeo, que provoca que a veces resulte inviable, ya sea económica o técnicamente, la realización de huecos complejos.

Cuando se usan métodos convencionales, a veces se opta por descomponer una pieza

en varias, pero ello siempre implica un proceso adicional (ensamblaje) y lo hace más complejo y limitante.

Con la FA se superan esas dificultades y se puede incluso materializar gradientes de porosidad en un mismo material, aligerando únicamente algunas partes de la pieza si el diseño así lo requiere.

En FA se usa comúnmente la optimización topológica. Se basa en el análisis mecánico de un componente o estructura con el objetivo de conseguir aligerar la estructura al tiempo que conserva las propiedades mecánicas de ese componente. Es una técnica que se encuentra principalmente centrado en aplicaciones donde la reducción de peso resulta esencial, como en el sector aeroespacial.



Ilustración 3 - En el sector aeroespacial el peso es una cuestión fundamental. (Fuente: Markus Bürkle para Unsplash)

## Productos multimateriales

Siguiendo con el ejemplo de la porosidad, algunas tecnologías de FA pueden, además de eso, aplicar simultáneamente diversos materiales durante el proceso de fabricación, reforzando así propiedades como la resistencia mecánica, reduciendo el peso, reduciendo costes o aportando nuevas características.

Mediante algunas tecnologías conformativas como el sobremoldeo también pueden combinarse diversos materiales en una única pieza, pero la distribución de estos a lo largo del volumen de la pieza es más reducida y las zonas interconectadas tienden a ser problemáticas debido a los diferentes comportamientos (térmico, de dilatación, etc.) de los materiales.



Ilustración 4 - Ejemplo de pieza multimaterial. Colección Vespers creada por Neri Oxman y Mediated Matter Group del MIT Media Lab en colaboración con Stratasy. (Fuente: Yoram Reshef)

## Reducción del *time-to-market* de nuevos diseños

El uso de la FA en la fabricación de prototipos ya ha permitido acelerar el acceso al mercado de muchos productos evitando posibles fallos y fracasos.

El siguiente paso lógico debería ser la utilización de la FA como proceso para conseguir producto final y no únicamente un prototipo.

Esto reduciría las fases de lanzamiento y validación actuales y permitiría adaptarse a las necesidades del mercado con mayor éxito pudiendo redefinir aspectos del diseño basados en los comentarios de los usuarios. Esto depende del progreso de esta tecnología en lo que a capacidades de fabricación en serie se refieren.



Ilustración 5 - Reducir el time to market hace innecesarios grandes periodos de almacenaje (Fuente: Ruchindra Gunasekara para Unsplash)

## Instalación rápida

Con los procesos de fabricación sustractivos, generalmente se tienen que crear moldes e instalar máquinas de producción pesada. Esto exige tiempo y extiende el ciclo de fabricación. Por el contrario, una impresora 3D puede instalarse con bastante rapi-

dez, dependiendo de la tecnología elegida. Además, puede realizar una pieza en unas pocas horas (dependiendo de su tamaño y complejidad), sin necesidad de herramientas especiales.

## Reducción de costes y errores

Si se crean los productos en una sola pieza, evitando ensamblajes se limita también la posibilidad de cometer errores durante el proceso productivo.

La eliminación de utillajes innecesarios puede suponer la disminución o supresión de gran número de costes y

procesos intermedios. En el caso de grandes series, donde no parece factible prescindir totalmente de los utillajes o moldes, la FA puede aportar libertad en el diseño, con la creación por ejemplo de canales de refrigeración o geometrías complejas.

La Fabricación Aditiva elimina proceso intermedios y por tanto también costes

# **Limitaciones de la Fabricación Aditiva**

## Grandes series de producción

Incluso aunque las tecnologías de FA reduce los tiempos de producción, no es adecuada para grandes series de producción. Todavía cuenta con velocidades de producción bajas para producir un conjunto grande de piezas a

la vez, limitada generalmente por el tamaño reducido de la plataforma de impresión de la impresora 3D. Por esta razón, actualmente, las técnicas de fabricación sustractiva se adaptan mejor a las grandes series de producción.

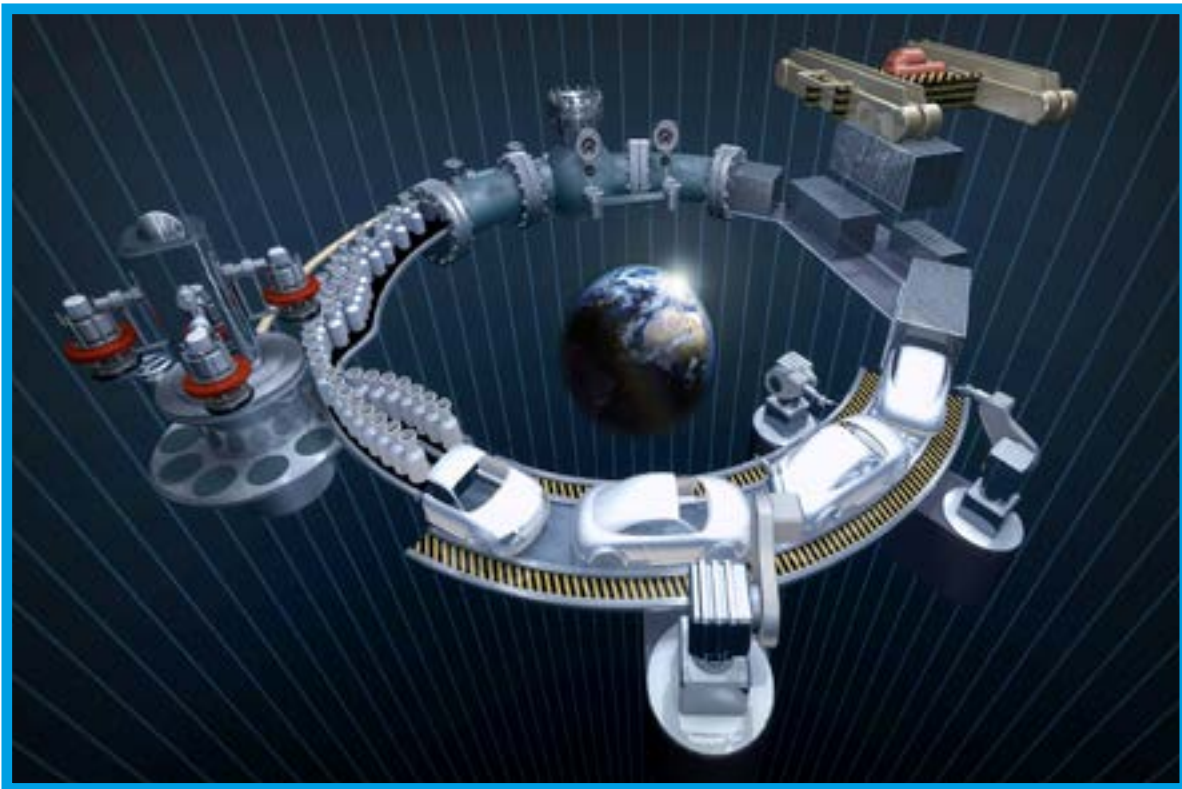


Ilustración 6 - Aunque reduce los tiempos en los ciclos de producción, la FA no es adecuada para grandes series (Fuente: PIRO4D para Pixabay)

## Materiales

La gama de opciones en materiales de las que dispone la FA tanto en metales como en otros materiales es muy amplia, pero no es comparable a la que se puede trabajar en la fabricación sustractiva y conformativa. Además, los costes de esos materiales

son actualmente superiores en la FA. Estos problemas giran alrededor de los mismos motivos: la escasa demanda no incentiva a los productores de nuevos materiales y los elevados costes de cada pieza dificultan el incremento del consumo.



Ilustración 7 - En FA la oferta de materiales metálicos es aún limitada.  
(Fuente: Samuel Zeller para Unsplash)

## Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación

Ambos aspectos se determinan mutuamente. Y también son posiblemente los desafíos más importantes a los que se enfrenta la FA para ser más utilizada en aquellos sectores más reticentes que se siguen limitando a los métodos de fabricación más tradicionales.

El proceso de fabricación capa a capa de la FA tiene un reflejo efectivo en la estética superficial de la pieza, pero la solución, que pasaría por una disminución del espesor de capa, influiría también en el tiempo total de fabricación (alargándolo).

## Calidad de producto y repetibilidad de proceso

No siempre en FA puede asegurarse la fiabilidad en la repetitividad del proceso, lo que repercute en que las piezas pueden no ser de la misma calidad. Esto es especialmente obvio en algunas tecnologías. Este resultado también influye en aspectos de las propiedades físicas de las piezas como la elasticidad o la dureza y consecuentemente tiene

un efecto negativo en su homologación en sectores como el médico o aeronáutico.

Una de las principales razones de las desviaciones dimensionales la encontramos en las tensiones que se crean entre capas tras la fabricación, provocadas por pequeñas contracciones del material durante el enfriamiento.

La Fabricación Aditiva no siempre es la mejor opción, especialmente si buscamos un acabado superficial óptimo

## Tamaño limitado de piezas

Hay limitaciones actualmente respecto volumen de pieza máximo que se puede fabricar (por el tamaño de la cama de impresión). Parale-

lamente, también lo hay en el mínimo y está condicionado por parámetros de la propia fabricación.



Ilustración 6 - Aunque reduce los tiempos en los ciclos de producción, la FA no es adecuada para grandes series (Fuente: PIRO4D para Pixabay)

## Coste de la maquinaria y productividad

Actualmente el coste de la maquinaria es relativamente elevado. Hay una gran variedad de precios dependiendo del equipo y de la tecnología. La previsión es que estos precios se vayan reduciendo conforme su uso se generalice en la industria

y se consigan economías de escala. El problema es que, especialmente para el metal, la lentitud del proceso genera una limitada productividad por pieza y eso se refleja en un alto coste del equipo por pieza producida.

# **Cuándo usar Fabricación Sustractiva o Aditiva**

Si bien existen diferencias clave, la fabricación sustractiva y la aditiva no se excluyen mutuamente. De hecho, a menudo se usan en paralelo y en diferentes etapas de desarrollo y fabricación de productos.

El proceso de creación de prototipos, por ejemplo, a menudo se basa en el uso de tecnologías aditivas y sustractivas. Los primeros modelos conceptuales y

prototipos son generalmente más económicos y más rápidos de producir con procesos de fabricación aditiva, como la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS). La FA ofrece una amplia variedad de opciones de materiales para la creación de prototipos funcionales de piezas. Las tecnologías aditivas suelen ser más adecuadas para piezas pequeñas y diseños muy complejos.

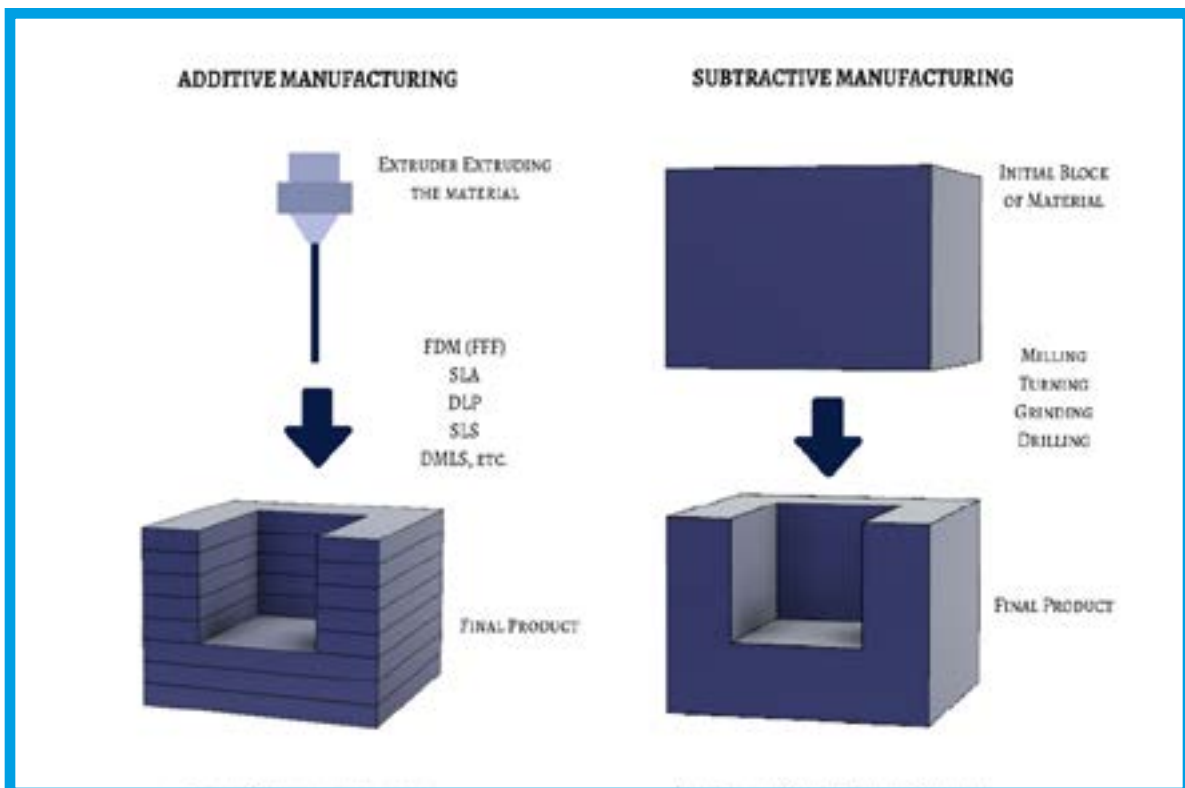


Ilustración 9 - Comparativa fabricación aditiva vs fabricación sustractiva (Fuente: <https://manufactur3dmag.com/wp-content/uploads/2018/01/Additive-vs-Subtractive.jpg>)

En las últimas etapas del proceso de desarrollo, como con lotes más grandes, los procesos sustractivos se vuelven más competitivos. Especialmente en objetos más grandes y más sencillos. Debido a la gran cantidad de opciones en acabados de superficie y la velocidad del proceso, la fabricación sustractiva suele ser la opción para fabricar piezas terminadas. Como las piezas metálicas impresas en 3D pueden llegar a tener un coste elevado, los procesos sustractivos suelen ser una mejor opción, excepto para los diseños más complejos.

En muchas ocasiones, en la fabricación los procesos sustractivos y aditivos se combinan en el desarrollo de herramientas, soportes, accesorios,

etc. La FA permite conseguir piezas impresas de plástico en 3D para obtener piezas de reemplazo rápidas, personalizadas, de bajo volumen u opcionales mientras que con métodos sustractivos se pueden conseguir series más largas o piezas con mejores funcionalidades mecánicas.

Cuando usamos ambos procesos, decimos que estamos empleando un proceso híbrido. De esta forma pueden combinarse los aspectos positivos de ambas técnicas de fabricación: versatilidad e inmediatez de la FA combinada con la fuerza y resistencia de las piezas de fabricación sustractiva.

Las máquinas híbridas permiten combinar la técnicas de Fabricación Aditiva y Sustractiva

# Máquinas híbridas

Ya hemos comentado previamente que mientras que la FA facilita la fabricación de geometrías muy complicadas e imposibles de realizar por otros medios, los procesos sustractivos permiten conseguir buenos acabados superficiales y el nivel de tolerancia requerido para la pieza (especialmente con metal). Por tanto, la solución obvia en muchos casos sería combinarlos. Así han surgido las máquinas híbridas.

Con el uso de las máquinas híbridas se eluden desventajas de la FA como un nivel de precisión bajo o superficies

rugosas. Su combinación, permite maximizar las ventajas de cada técnica.

Las máquinas híbridas son especialmente adecuadas para la fabricación de materiales de baja maquinabilidad, como aleaciones resistentes al calor y materiales de alta dureza, que se utilizan ampliamente en diversas industrias, (aeroespacial, de defensa, automoción y biomédica entre otras. Sin embargo, la integración completa de ambos procesos es una tarea compleja que aún debe superar muchas dificultades.



Ilustración 10 -INTEGREX i-400 AM de Mazak es la máquina de fabricación híbrida más grande actualmente disponible en el mercado (Fuente: [https://www.3dprintingmedia.network/wp-content/uploads/2019/02/INTEGREX\\_i-400SAM\\_LMD\\_AHC\\_800x600-536x402.png](https://www.3dprintingmedia.network/wp-content/uploads/2019/02/INTEGREX_i-400SAM_LMD_AHC_800x600-536x402.png))

## Ventajas



Obtenemos las ventajas de ambos sistemas de fabricación

## Limitaciones



Aún quedan limitaciones que afrontar para este tipo de máquinas

**Vamos ahora a repasar las ventajas y limitaciones que conlleva el uso de máquinas híbridas**

## Ventajas

Con las máquinas híbridas obtenemos las ventajas de ambos sistemas de fabricación: por una parte la posibilidad de obtener piezas complejas y flexibles (FA) y por otro la precisión y perfectos acabados propios de técnicas sustractivas como el mecanizado.

En el mercado se pueden encontrar diferentes variaciones de máquinas híbridas. La más generalizada es la combina láser y mecanizado en 5 ejes. Con ellas se consigue disminuir pérdidas de tiempo, perfeccionar la precisión y en definitiva conseguir un proceso de fabricación más sencillo.

Un resumen de las ventajas sería la siguiente:

- **Optimización de tiempos de proceso:** integrando ambos sistemas en un único

proceso se pueden mejorar los tiempos de proceso. Otros tiempos muertos que también pueden eliminarse son los que están provocados por los movimientos de piezas de una a otra máquina y su manipulación, así como los distintos trabajos preparatorios que deben hacerse con los otros sistemas.

- **Mejora de la precisión** debida al procesado de piezas de principio a fin en una misma máquina con un único amarre. El error de posicionamiento de la pieza se minimiza, lo que resulta en una mayor precisión final. Además, como se comentaba antes, como solo existe la necesidad de una configuración única por parte o conjunto de piezas, el tiempo no productivo se reduce a los valores mínimos.

Son numerosas las ventajas que aporta el uso de una máquina híbrida

## Ventajas

- **Reducción de los costes de material:** cuando se mecaniza es inevitable perder gran parte del material que se convierte en viruta. Con las máquinas híbridas esto se soluciona eligiendo que proceso utilizar en cada parte de la pieza. La integración de ambos sistemas puede conllevar un ahorro del material que puede alcanzar el 97%.
- **Intercalación de procesos de mecanizado/FA:** se consigue mayor libertad, puesto que la máquina híbrida proporciona una mayor adaptabilidad a la hora de alcanzar y mecanizar zonas de difícil acceso en la pieza.



Ilustración 11 - El ahorro en los costes en FA también incide en la reducción del impacto medioambiental (Fuente: Imagen de Nattanan Kanchanaprat para Pixabay)

## Ventajas

- **Fabricación de geometrías de mayor complejidad:** Con ellas, es factible mecanizar áreas que ya no son accesibles una vez que se termina la pieza. Esto da como resultado una mayor libertad y flexibilidad al diseñar la geometría óptima de la pieza.
- **Espacio más reducido:** una misma máquina permite realizar los procesos combinados, lo que disminuye el número de máquinas implicadas en el proceso. También se necesita menos espacio ocupado en los talleres.
- **Simplicidad para el operador:** La integración de ambos procesos en una sola máquina bajo una interfaz única significa que el operador solo debe ocuparse de una estación de trabajo. Esto simplifica la capacitación y el trabajo diario.
- **Menor inversión global:** aunque el precio de una máquina híbrida resulta mayor que el que una impresora 3D, el coste total es inferior al de tener que comprar dos máquinas.



Ilustración 12 - Ejemplo piezas complejas y utilajes (Fuente: Fundación AITIIP)

## Limitaciones

Sin embargo, aún quedan limitaciones que afrontar para este tipo de máquinas:

- **Recuperación y reciclado de polvo metálico:** el exceso de polvo conlleva problemas tanto para la máquina como para los trabajadores. En las máquinas debe ser eliminado para evitar daños e interferencias. Por otro lado, las aleaciones metálicas incluyen elementos potencialmente dañinos para las personas y deben ser manipulados con las precauciones necesarias.

- **Impacto ecológico:** puesto que tanto las máquinas de mecanizado como las de FA tenían un importante impacto medioambiental, es lógico suponer que ese impacto se unifica en una sola máquina en el caso de las híbridas. Un ejemplo, que ya se ha comen-

tado, es el polvo metálico y su manipulación.

- **Influencia de los fluidos de corte en el proceso de aporte:** casi todas las máquinas de mecanizado implican fluidos de corte. Como con la tecnología de aporte mediante láser generalmente no hay relación con los fluidos de corte, no se conocen detalladamente las consecuencias de esta combinación.

- **Influencia de los fluidos de corte en el proceso aditivo:** algo similar a lo explicado en el epígrafe anterior. Pueden surgir problemas si se mezclan con las partículas de polvo y crear humedad. La vaporización del fluido durante el proceso de FA puede incrementar la porosidad y dañar los sistemas ópticos de la máquina.



Ilustración 13 – Los trabajadores deben tomar precauciones en la manipulación de material (Fuente: Imagen de Fancyrave.com para Pexels)

## Limitaciones

• **El requisito de un tratamiento térmico de post-procesamiento.** Durante el proceso de adición, el material se somete a ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento, lo que conduce a la generación de tensiones residuales que podrían liberarse durante las operaciones de mecanizado posteriores. Esto da lugar a distorsiones de la geometría de la pieza y, por lo tanto, la herramienta de mecanizado puede encontrar diferentes profundidades de penetración a las programadas. Además, las propiedades mecánicas del material depositado, por

ejemplo la ductilidad, son muy sensibles a la presencia de defectos internos y porosidad. Para reducir las tensiones internas y resolver estos problemas, las piezas fabricadas de forma adicional suelen requerir un tratamiento térmico posterior al procesamiento. Por lo tanto, en caso de que la máquina híbrida no esté preparada para proporcionar el tratamiento térmico requerido, llevar el material a un horno externo es obligatorio, lo que elimina una de las principales ventajas de usar una máquina híbrida.



Ilustración 14 - Con muchas máquinas híbridas, el post procesado es obligatorio (Fuente: <http://addaero-mfg.com/wp-content/uploads/2018/01/addaero-spray-booth.jpg>)

## Limitaciones

- **Necesidad de un cambio de paradigma:** Los ingenieros de diseño deben aprender no solo cada proceso de manera independiente (aditivo y sustractivo), sino también las posibilidades que han surgido gracias a su combinación, lo que puede resultar en un cambio en el concepto completo de diseño de piezas. Sin embargo, no existe una metodología estándar o planificación de procesos dirigida a máquinas híbridas. Se puede abordar desde dos puntos de vista: impulsado por el diseño o por el procesado. El primero se centra en mejorar la geometría de la pieza fabricada, pero sin considerar la optimización del proceso de fabricación en sí, mientras que el segundo funciona a la inversa. Sin embargo, si se desean obtener resultados satisfactorios y se debe aprovechar todo el potencial de la fabricación híbrida, se requiere un nuevo punto de vista que combine ambas ideas.

- **Tratamiento de residuos**

**generados:** Las máquinas híbridas reducen la cantidad de material de desecho generado hasta en un 90%. Sin embargo, su tratamiento puede ser mucho más complicado, desde un punto de vista logístico, y económicamente costoso. Se debe prestar especial atención al manejo del polvo, el reciclaje de los desechos líquidos (por ejemplo, los aceites lubricantes utilizados para el movimiento de los ejes, los fluidos de corte empleados en el mecanizado). Dependiendo de la composición de las partículas de polvo utilizadas, los residuos son extremadamente peligrosos para la salud humana. Especialmente, los polvos con alto contenido de níquel o cobalto son carcinógenos. Todo esto obliga a la empresa a instalar medidas de protección especiales, así como un protocolo adecuado para tratar los residuos. Además, a pesar de los últimos avances, faltan conocimientos y estudios relacionados con la toxicidad y los efectos nocivos relacionados con las partículas de polvo.

## Limitaciones

- **Problemas de abrasión** en el interior del sistema de guiado de la máquina: Las máquinas híbridas requieren una protección especial que preserva el sistema de guía del polvo utilizado en fabricación aditiva. Por lo tanto, si la máquina no está correctamente sellada, las partículas de polvo podrían invadir e interferir con el movimiento suave del sistema de guía, así como con los codificadores utilizados para determinar la posición en la máquina.

- **La formación de los operadores es más complicada.** Los operadores requieren un mayor conocimiento de fondo para dominar ambos procesos. Esto se traduce directamente en un período de formación más largo. Además, debido a la amplia libertad de fabricación aditiva, las máquinas híbridas suelen requerir el uso de marcos computacionales para optimizar ambos procesos. Los operadores deben también estar capacitados en temas de seguridad, especialmente con respecto al manejo del polvo y al funcionamiento con láser.



Ilustración 15 - Los trabajadores deben formarse para el manejo de una máquina híbrida (Fuente: Imagen de Product School para Unsplash)

# Consideraciones generales de diseño

## Altura de capa



La altura de cada capa de deposición de material (a veces denominada resolución en el eje z).

## Contracción y deformación



Un problema comúnmente asociado con la FA es la deformación y la contracción.

**Vamos a analizar algunos elementos imprescindibles a la hora de emprender el proceso de fabricación mediante FA, como altura de capa o soporte.**

# Altura de capa

Aunque existe una serie de factores que influyen en la calidad y el acabado de la superficie de una pieza, la altura de cada capa (a veces denominada resolución en el eje z) suele ser el parámetro más sencillo de configurar.

En términos generales, cuanto más pequeña sea la altura de la capa en la impresión, más lisa será la superficie de

la pieza y los detalles a incluir podrán tener mayor precisión. Por el contrario, el tiempo de impresión se incrementa.

Esta relación entre el tiempo de construcción y la altura de la capa es lineal. Por poner un ejemplo, imprimir una pieza con una altura de capa de 50 micrones llevará el doble de tiempo que imprimir una pieza con una capa de 100 micrones.

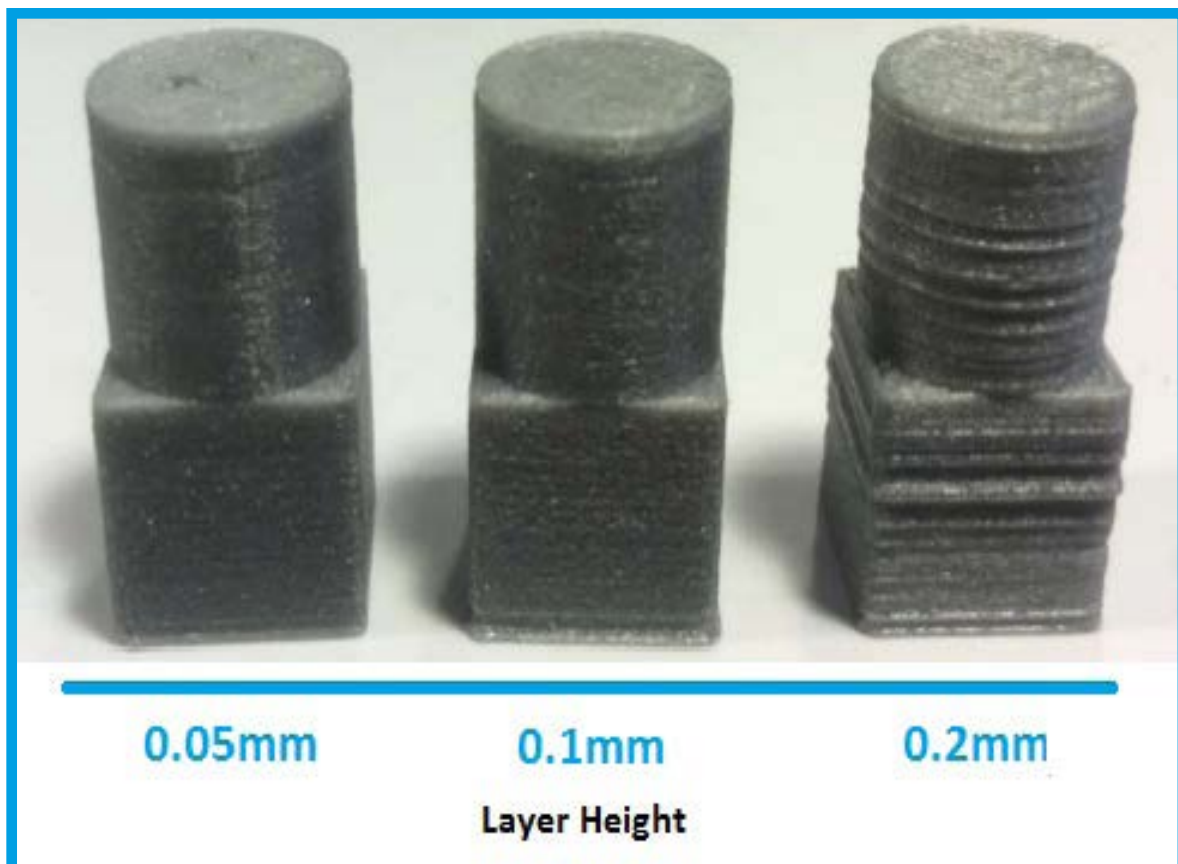


Ilustración 16 - Comparativa de acabado con diferentes alturas de capa (Fuente: <https://s3.amazonaws.com/makexyz/img/layer-height.ca7fdb11823b.jpg>)

## Altura de capa

La mayoría de las impresoras 3D tienen una altura de capa predeterminada (un rango en el que se suele trabajar) aunque con algunas máquinas y bajo ciertos requisitos es posible fabricar casos especiales que requieren parámetros fuera de estos valores predeterminados o habituales, como pudieran ser piezas con mucho detalle o cuando se necesite reducir mucho los tiempos de construcción.

Las alturas de capas más generalizadas se presentan en la tabla. Estos sirven como una referencia útil para medir la “suavidad de la superficie” para cada tecnología, siendo

Material Jetting el que proporciona una superficie más suave y FFF/FDM el que por lo general proporciona un acabado más rugoso.

Para la mayoría de las aplicaciones, las alturas de capa presentadas en la tabla serían las más adecuadas para cada tecnología. Si hay algún aspecto en la estética o el ajuste a destacar en el diseño de una pieza, como se ha comentado antes la altura de la capa se puede reducir para proporcionar una superficie más suave, aunque el tiempo de construcción y el coste aumentarán.

Tecnología	Grosor común de la capa (micras)
FFF/FDM	50-400
SLA/DLP	25-100
SLS	100
Material Jetting	16-30
Binder Jetting	100
DMLS/SLM	20

Fuente: 3D Hubs

# Contracción y deformación

## Temperatura y curado

- **Temperatura:** Las tensiones residuales son la principal causa de la contracción y deformación de las piezas. Las tensiones residuales se forman dentro de una pieza impresa debido al enfriamiento diferencial. Las tecnologías de Material Extrusion (FDM/FFF) y Powder Bed Fusion (SLS y DMLS/SLM) utilizan temperaturas muy elevadas para producir piezas y éstas son susceptibles a deformaciones o contracciones inducidas por el calor. Cuando se enfría el área de una impresión, se contrae. Esta contracción también tensa las áreas circundantes creando tensiones internas. Si estas tensiones son altas, la pieza se combará o, en casos extremos, se podría romper.

- **Curado:** Las tecnologías

que emplean fotopolímeros (SLA/DLP y Material Jetting) no requieren temperaturas elevadas durante la impresión (aparte del calentamiento inicial de la resina a una temperatura de trabajo ideal). Pero en cambio, se enfrentan a otro problema: la deformación y contracción de las piezas se producen a medida que las capas se curan.

Al exponerse a la fuente de luz de curado, cada capa se encoge durante la solidificación. Cuando una capa se encoge sobre una capa previamente solidificada (pre-encogida), hay tensión entre ambas capas. Como consecuencia, esas tensiones tiran de la capa sólida circundante iniciando el “curling” o combeo.

Un problema comúnmente asociado con la FA es la deformación y la contracción. La causa de la contracción y la deformación se asocia típicamente con dos mecanismos: temperatura y curado.

# Contracción y deformación

## Estructuras de soporte

Dependiendo de la tecnología de FA específica y la complejidad del modelo 3D, se requieren estructuras de soporte, ya que cada capa requiere una plataforma sobre la cual construir. Para la mayoría de las tecnologías, el soporte es esencial para garantizar que un modelo pueda imprimirse con éxito y con precisión.

Al decidir qué tecnología usar, es importante considerar las estructuras de apoyo y cómo pueden afectar al resultado final. La mayoría de las estructuras de soporte tendrán un impacto negativo en el acabado superficial, ya que

pueden requerir un procesamiento posterior para su eliminación ya que ocasionan manchas o rugosidad de la superficie. En algunas tecnologías como FFF/FDM y Material Jetting pueden usarse soportes solubles, lo que hace su eliminación mucho más fácil. Las tecnologías basadas en polvo o arena no requieren material de soporte, a menos que se imprima metal.

Si la estética o el ajuste de un modelo son importantes, lo mejor es orientar un modelo con las superficies más críticas hacia arriba (con la excepción de SLS).

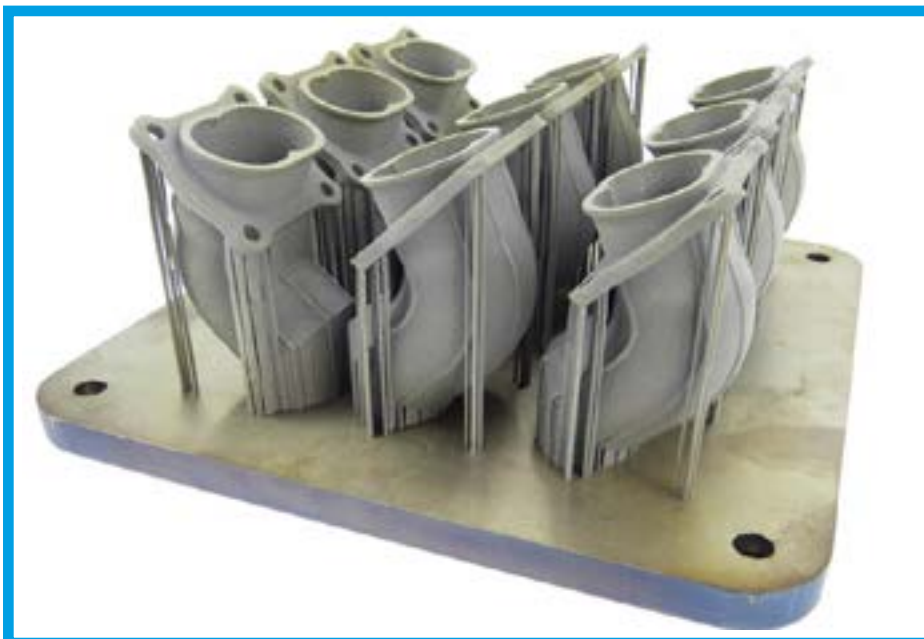


Ilustración 17 - Ejemplo de estructura de soporte (Fuente: <https://www.renishaw.com/media/img/gen/f115b9139cb4402bae59ab9e41351124.jpg>)

# Contracción y deformación

## Mitigación de la contracción y voladizos

- **Mitigación de la contracción y deformación:** Son diversas las maneras en que se puede reducir la probabilidad de que la deformación o contracción afecten de manera perjudicial a una pieza. La mayoría de los problemas de enfriamiento diferencial están asociados con áreas grandes y gruesas de una pieza que se encuentran conectada a otras delgadas. Las delgadas se enfrían mucho más rápido produciendo deformaciones. En un diseño, asegurarse de que los grosores de las paredes sean constantes ayudará a reducir la probabilidad de deformación.

La impresión en un entorno con temperatura controlada, como las que ofrecen la mayoría de las impresoras industriales, también ayuda a reducir la probabilidad de deformación o contracción. Las superficies grandes y planas son particularmente propensas a deformarse y, en la medida de lo posible, deben evitarse. Se

debe considerar el ensamblaje de múltiples componentes si las superficies grandes y planas son esenciales para el diseño.

Finalmente, el soporte es importante para ayudar a anclar piezas que corren el riesgo de deformarse en la placa de impresión. Esto es particularmente importante para SLA /DLP y DMLS/SLM.

- **Voladizos:** Los voladizos son áreas de un modelo que son parcialmente compatibles con la capa inferior o que no son compatibles en absoluto. Hay un límite en el ángulo que cada impresora puede producir sin la necesidad de material de soporte. Por ejemplo, para FDM y SLA, este ángulo es de aproximadamente 450 grados. Es una buena práctica limitar los voladizos de un modelo, ya que las capas impresas sobre el soporte generalmente tienen un acabado de superficie más áspero.

En la siguiente **tabla** puedes encontrar un resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías.

Puedes encontrar otro resumen, para impresión en metal, aquí: [https://www.researchgate.net/figure/The-DfAM-worksheet-is-designed-for-novices-and-intermittent-users-of-additive\\_fig3\\_318383972](https://www.researchgate.net/figure/The-DfAM-worksheet-is-designed-for-novices-and-intermittent-users-of-additive_fig3_318383972)

## Resumen de reglas de diseño generales para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	0,8 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	45°
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	0,6 mm de ancho / 0,2 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	10 mm
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø2 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	0,5 mm
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	2 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	3 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,5% (con límite bajo en ±0,5 mm)



**FDM**

Al realizar el diseño para impresión mediante FDM, es importante tener en cuenta, además:

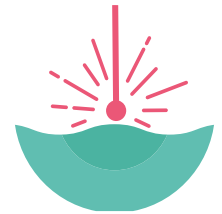
- Orientar adecuadamente la pieza. La orientación puede afectar a la resistencia y calidad superficial de las caras de la pieza. En una superficie inclinada respecto al plano horizontal pueden llegar a apreciarse las capas de impresión en el denominado efecto escalera.
- Para ahorrar material, los interiores de las piezas suelen vaciarse, utilizando una estructura que permite aportarle rigidez a la pieza y evita problemas durante la impresión.

Fuente: 3D Hubs/Materialise/Elaboración propia

Las tablas recogidas se deben considerar como recomendaciones de partida durante la fase de diseño, pero que están sujetas a la maquinaria, materiales y otras condiciones durante la fase de fabricación de piezas.

## Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	0,5 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte (para partes en voladizo, SLA siempre requiere de un soporte, pues se imprime en un medio líquido)	30°
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	0,4 mm de ancho / 0,4 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø2 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	0,5 mm
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	4 mm
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	2 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	3 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,5% (con límite bajo en ±0,5 mm)



**SLA**

Al realizar el diseño para impresión mediante SLA, es importante tener en cuenta, además:

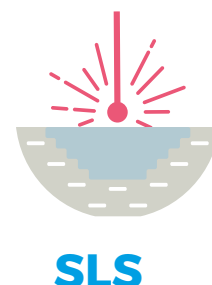
- Se suelen vaciar las piezas para evitar grandes deformaciones por contracción. Dado que el material líquido (sin curar) puede quedar atrapado dentro de la pieza, deben preverse unos agujeros que permitan la salida de material (el mínimo diámetro recomendado se indica en la tabla).
- Para reducir la cantidad de soportes necesarios, se pueden redondear las esquinas.
- Debe tenerse en cuenta de nuevo, la orientación de la pieza para aspectos de acabado superficial.

Fuente: 3D Hubs/Materialise/Elaboración propia

Las tablas recogidas se deben considerar como recomendaciones de partida durante la fase de diseño, pero que están sujetas a la maquinaria, materiales y otras condiciones durante la fase de fabricación de piezas.

## Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	0,7 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	1 mm de ancho / 1 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø1,5 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	0,5 mm
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	5 mm
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	0,8 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	0,8 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,3% (con límite bajo en ±0,3 mm)



- Al realizar el diseño para impresión mediante SLS, es importante tener en cuenta, además:
- Las grandes superficies planas en una pieza, corren un alto riesgo de contracción y deformación de la pieza.
  - Se suelen vaciar las piezas para evitar grandes deformaciones por contracción. Dado que el material en polvo puede quedar atrapado dentro de la pieza, deben preverse unos agujeros que permitan la salida de material (el mínimo diámetro recomendado se indica en la tabla).
  - Es posible aplicar tratamientos posteriores que reduzcan la porosidad de la pieza.

Fuente: 3D Hubs/Materialise/Elaboración propia  
 Las tablas recogidas se deben considerar como recomendaciones de partida durante la fase de diseño, pero que están sujetas a la maquinaria, materiales y otras condiciones durante la fase de fabricación de piezas.

## Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	1 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	Siempre requiere soporte
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	0,5 mm de ancho / 0,5 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø0,5 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	0,4 mm
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	0,5 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	0,5 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,1 mm - ±0,3 mm



### Material Jetting

Al realizar el diseño para impresión mediante Material Jetting, es importante tener en cuenta, además:

- Se utiliza un material (generalmente hidrosoluble) de soporte, que se retira una vez impresa la pieza.

## Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	2 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	3 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	0,5 mm de ancho / 0,5 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø1,5 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	5 mm
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	2 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	2 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,2 mm - ±0,3 mm



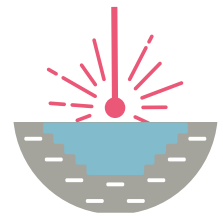
### Binder Jetting

Al realizar el diseño para impresión mediante Binder Jetting, es importante tener en cuenta, además:

- Se suelen vaciar las piezas para evitar grandes deformaciones por contracción. Dado que el material en polvo puede quedar atrapado dentro de la pieza, deben preverse unos agujeros que permitan la salida de material (el mínimo diámetro recomendado se indica en la tabla).
- Se pueden crear estructuras internas en la pieza para favorecer la rigidez, pero se recomienda contar con al menos 1 mm de huecos para facilitar la salida de material.

## Resumen de reglas de diseño para las principales tecnologías

	Valores
Mínimo ancho de pared recomendable (con soporte)	0,4 mm
Mínimo ancho de pared recomendable (sin soporte)	1 mm
Inclinación a partir de la cual se necesita soporte	Siempre requiere soporte
Detalles mínimos posibles (grabados y relieves en la superficie)	0,4 mm de ancho / 0,15 mm profundidad
Puentes horizontales (máximo posible sin soporte)	2 mm
Menor diámetro de agujero que se puede fabricar de forma satisfactoria	Ø1,5 mm
Espacio mínimo que se debe dejar entre dos partes móviles entre sí o conectadas	3-7 mm (dependiendo de la cavidad)
Diámetro mínimo para los agujeros que permitan vaciar el material interior	
Mínimo tamaño de los detalles para asegurar su correcta impresión	0,6 mm
Mínimo diámetro para imprimir un eje o perno	1 mm
La tolerancia que se puede esperar obtenida de la impresión	±0,1 mm



**SLM/  
DLMS**

Al realizar el diseño para impresión mediante SLM, es importante tener en cuenta, además:

- Se suelen vaciar las piezas para reducir la cantidad de material empleado. Dado que el material en polvo puede quedar atrapado dentro de la pieza, deben preverse unos agujeros que permitan la salida de material (el mínimo diámetro recomendado se indica en la tabla).

# Casos de éxito

En esta sección, se recogen algunos casos de éxito de piezas y aplicaciones de las tecnologías de fabricación aditiva, que aprovechan las ventajas comentadas de la tecnología, especialmente desde un punto de vista de diseño en diferentes sectores.

# Casos de éxito

Haz click en las imágenes para más información

## Repuestos

Mahou San Miguel  
Utilización de Mahou San Miguel de la FA

Ilustración 18 - Instalaciones Mahou San Miguel (Fuente: [https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/Entrevista\\_Mahou.jpg](https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/Entrevista_Mahou.jpg))



## Repuestos

Siemens  
Aplicación de la FA por Siemens en su centro de mantenimiento ferroviario digital

Ilustración 19 - Instalaciones de Siemens (Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/Siemens%20logo.jpg>)



## Prototipado

Audi  
Adopción por parte de Audi de la FA

Ilustración 20 - Logotipo de Audi (Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/Audi%203.png>)



## Reparación

Universidad de Swinburne  
Impresión 3D de piezas para faros de vehículos

Ilustración 21 - Pieza de repuesto de los faros de un coche (Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/Faros%201.jpg>)



# Casos de éxito

Haz click en las imágenes para más información

## Capacidades de diseño único

### Altavoces impresos

### Altavoces impresos en 3D con arena

Ilustración 22 - Altavoces impresos en 3D con arena (Fuente: [https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/deeptime\\_4.jpg](https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/deeptime_4.jpg))



## Capacidades de diseño único

### Moto impresa

### Una moto impresa en 3D de AITIIP Centro Tecnológico

Ilustración 23 - El ministro de Ciencia, Innovación y Universidades Pedro Duque examina la moto (Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/Moto%202.jpg>)



## Capacidades de diseño único

### HRE Wheels

### HRE Wheels y GE Additive crean la primera rueda impresa en titanio

Ilustración 24 - Rueda impresa en titanio (Fuente: <http://www.3ders.org/images2018/hre3d-unveils-titanium-wheel-3.jpg>)



## Utilillaje

### General Motors

### General Motors ahorra en coste de utillaje con la FA

Ilustración 25 - Utillaje metálico de General Motors (Fuente: <http://www.3ders.org/images2018/general-motors-saves-tooling-costs-using-3d-printing-3d-printed-tooling-2.jpg>)



# Casos de éxito

Haz click en las imágenes para más información

## Posibilidades de geometría compleja

Conformal cooling  
Toolcraft crea moldes con FA

Ilustración 26 - ToolCraft colabora con su socio, Siemens para desarrollar un molde impreso en 3D de metal (Fuente: <http://www.metal-am.com/wp-content/uploads/sites/4/2019/06/mam-mould-web.png>)



## Posibilidades de geometría compleja

Conformal cooling  
Software de Materialise

Ilustración 27 - Molde del juguete de Rayo McQueen impreso en metal (Fuente: <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2019/01/3D-printed-Cars-mold.png>)



## Posibilidades de geometría compleja

Conformal cooling  
FA en troqueles

Ilustración 28 - Ejemplo de troquel para estampación en caliente. (Fuente: <https://img.interempresas.net/fotos/1934861.jpeg>)



## Posibilidades de geometría compleja

Aeronáutica  
Primera pieza impresa en 3D en España para motores de cohetes espaciales

Ilustración 29 - Pieza para cohete espacial (Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/imagenes/Catec.jpg>)



# Casos de éxito

Haz click en las imágenes para más información

## Posibilidades de geometría compleja

Varios

Casos de éxito de CETEMET

Ilustración 30 - Ejemplo sector transporte  
(Fuente: [http://www.cetemet.es/wp-content/uploads/2016/03/automocion-impresion-3d\\_21-320x240.jpg](http://www.cetemet.es/wp-content/uploads/2016/03/automocion-impresion-3d_21-320x240.jpg))



## Posibilidades de geometría compleja

Medicina

Fabricación de pulmones con FA

Ilustración 31 - Piezas del pulmón de colágeno  
(Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/imagenes/Pulmones.jpg>)



## Nuevos diseños

Big Rep

Neumáticos sin aire con FA

Ilustración 32 - Neumáticos de Big Rep  
(Fuente: <http://imprimalia3d.com/sites/default/files/news/Neum%C3%A1tico%201.jpg>)



## Optimización topológica

Artículo

La optimización topológica en la impresión 3D

Ilustración 33 - Ejemplo de pieza optimizada topológicamente por Prodways (Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/optimisationprodways.png>)



# Casos de éxito

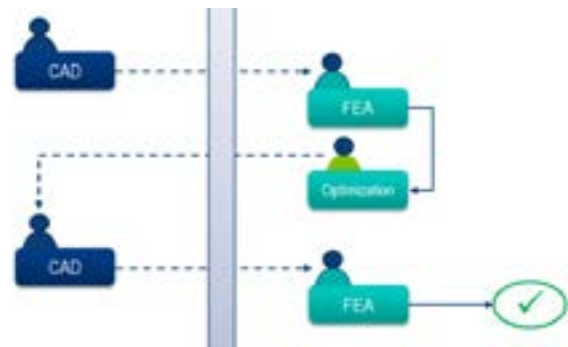
Haz click en las imágenes para más información

## Optimización topológica

Plataforma

Plataforma para optimización topológica combinando geometría y simulación

Ilustración 34 - Diseño guiado por la optimización, que reduce el número de interacciones entre CAD y FEA (Fuente: <https://img.interempresas.net/fotos/1694765.jpeg>)



## Optimización topológica

AMendate

AMendate, optimizando piezas impresas en 3D

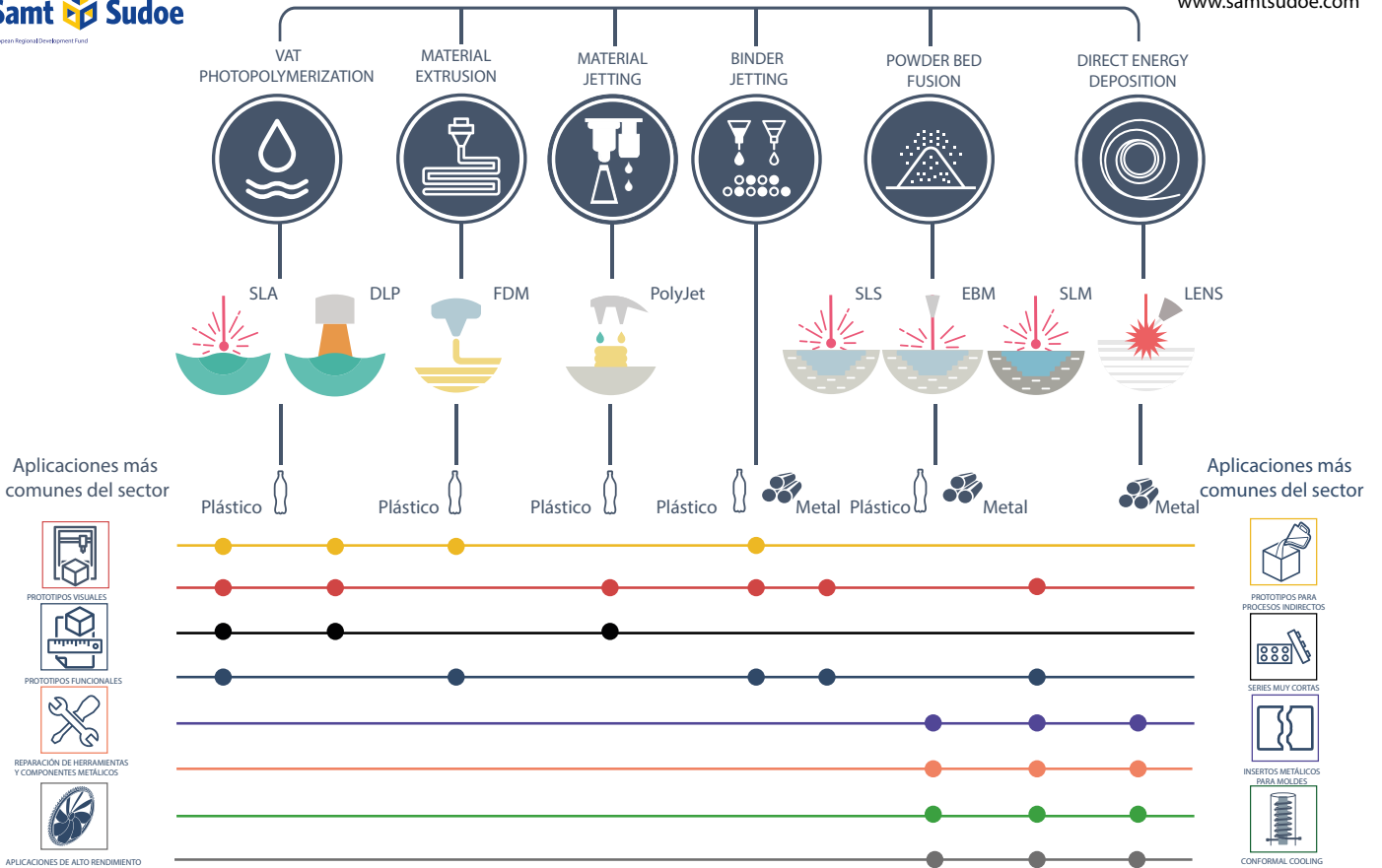
Ilustración 35 -Ejemplo de pieza optimizada con el software 3D (Fuente: [https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/Startup\\_AMendateCover.jpg](https://www.3dnatives.com/es/wp-content/uploads/sites/4/Startup_AMendateCover.jpg) )



## FABRICACIÓN ADITIVA para el sector del molde y el plástico

\* No se incluye la categoría Sheet Lamination por su reducida aplicabilidad actual

www.samtsudoe.com



[www.samtsudoe.com](http://www.samtsudoe.com)

La presente guía se ha desarrollado en el marco del proyecto SAMT Sudoe financiado por el programa Interreg SUDOE.

El Programa Interreg Sudoe apoya el desarrollo regional en el sudoeste de Europa financiando proyectos transnacionales a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

El Programa promueve la cooperación transnacional para resolver problemas comunes a las regiones del sudoeste europeo, como la baja inversión en investigación y desarrollo, la baja competitividad de la pequeña y mediana empresa y la exposición al cambio climático y a riesgos ambientales.

