

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
DE FABRICACIÓN.

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS  
PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PIEZAS  
OBTENIDAS MEDIANTE TÉCNICAS FDM**

AUTOR: ANA PILAR VALERGA PUERTA

Cádiz, julio 2015

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
DE FABRICACIÓN.

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS  
PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PIEZAS  
OBTENIDAS MEDIANTE TÉCNICAS FDM**

**DIRECTORES: MARIANO MARCOS BÁRCENA  
Y MOISÉS BATISTA PONCE  
AUTOR: ANA PILAR VALERGA PUERTA**

Cádiz, julio de 2015

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. Capítulo I: Introducción</b> .....	1
1.1. Objetivo .....	1
1.2. Alcance .....	1
1.3. Justificación .....	1
1.4. Metodología a seguir .....	1
<b>2. Capítulo II: Estado Del Arte</b> .....	3
2.1. Introducción.....	3
2.2. La Fabricación Aditiva (AM) .....	4
2.3. Evolución de las Tecnologías Aditivas .....	5
2.4. Fases para la fabricación mediante AM .....	9
2.4.1. Diseño o digitalización.....	9
2.4.2. Tratamiento del archivo .....	10
2.4.3. Fabricación .....	12
2.4.4. Acabado.....	13
2.5. Principales procesos de Fabricación Aditiva .....	13
2.5.1. Estereolitografía (SLA) .....	13
2.5.2. 3D Printing.....	16
2.5.3. Inkjet .....	17
2.5.4. Polyjet.....	19
2.5.5. Fusion Deposition Modelling (FDM).....	20
2.5.6. Laminated Object Manufacturing (LOM) .....	24
2.5.7. Sinterizado Laser Selectivo (SLS).....	26
2.5.7.1. Materiales poliméricos .....	26
2.5.7.2. Materiales metálicos y cerámicos .....	27
2.5.8. Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	28
2.5.9. Electron Beam Melting (EBM) .....	29
2.5.10. Laser Cladding .....	31
2.5.11. Construcción.....	33

2.5.12.	Tecnologías para materiales bio-orgánicos .....	34
2.5.12.1.	Tejidos, implantes, huesos .....	35
2.5.12.2.	Alimentación y nutrición .....	37
2.6.	Criterios de clasificación para la Fabricación Aditiva .....	37
2.6.1.	Estado del material .....	39
2.6.2.	Modo de aporte de material .....	40
2.6.3.	Energía aportada.....	40
2.6.4.	Propósito de las piezas fabricadas .....	42
2.6.5.	Naturaleza del material .....	42
2.7.	Ventajas de la Fabricación Aditiva .....	43
2.8.	Inconvenientes y limitaciones de la Fabricación Aditiva.....	44
2.9.	Consideraciones ambientales y ergonómicas .....	46
2.10.	Estandarización y regulación .....	47
2.11.	Costes de estas tecnologías.....	49
2.12.	Aplicaciones .....	52
2.13.	Conclusiones .....	58
2.14.	Bibliografía .....	60
<b>3.</b>	<b>Capítulo III: Metodología Experimental .....</b>	<b>67</b>
3.1.	Introducción .....	67
3.2.	Caracterización de probetas .....	68
3.2.1.	Material y dimensiones .....	68
1.1.1.1.	Probetas tipo I.....	69
1.1.1.2.	Probetas tipo II.....	70
3.2.2.	Nomenclatura .....	70
3.2.2.1.	Probetas tipo I.....	70
3.2.2.2.	Probetas tipo 2 .....	71
3.3.	Equipo utilizado .....	72
3.4.	Protocolo de ensayos .....	74
3.4.1.	Ensayos tipo I.....	74
3.4.2.	Ensayos tipo II.....	74

3.5. Protocolo de evaluación .....	77
3.5.1. Equipos utilizados.....	77
3.5.2. Evaluación de las probetas .....	79
3.2.2.3. Probetas tipo I.....	80
3.2.2.4. Probetas tipo 2 .....	82
3.6. Bibliografía.....	84
<b>4. Capítulo IV: Resultados.....</b>	<b>87</b>
4.1. Introducción.....	87
4.2. Ensayos tipo I.....	87
4.2.1. Evaluación macrogeométrica.....	88
4.2.2. Evaluación microgeométrica .....	96
4.3. Ensayos tipo II.....	97
4.3.1. Evaluación macrogeométrica.....	97
4.3.2. Evaluación microgeométrica .....	110
4.4. Conclusiones .....	117
<b>5. Capítulo V: Conclusiones .....</b>	<b>121</b>
5.1. Conclusiones generales .....	121
5.2. Propuestas de líneas de trabajo futuras .....	123
<b>6. Capítulo VI: Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>125</b>
6.1. Bibliografía utilizada .....	125



# Capítulo I: Introducción

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## Capítulo I: Introducción

### 1.1. Objetivo

Se llevará a cabo una búsqueda de información sobre la Fabricación Aditiva y la gran diversidad de procesos que existen dentro de la misma, centrándose en la técnica FDM. Por otro lado, se desarrollará una metodología para el estudio de los parámetros óptimos de dicho proceso. Se pretende que esta metodología sea trasladable a otras técnicas de AM.

### 1.2. Alcance

Se realizará el estudio de ciertos parámetros de fabricación (velocidad de avance y temperatura), así como de las dimensiones o tamaño de pieza a fabricar en un equipo concreto de FDM, Cubex®, utilizando los softwares licenciados disponibles.

Se obtendrán los parámetros óptimos para conseguir las mejores calidades superficiales y tolerancias dimensionales posibles dentro de los rangos definidos que dicha máquina y material permiten.

### 1.3. Justificación

Las técnicas de Fabricación Aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) han sufrido una gran expansión en los últimos años hasta encontrarse equipos de AM en ámbitos muy amplios, incluso muchos alejados del puramente industrial. Esto hace que en muchos casos estas técnicas no estén todo lo estudiadas que se desearía y más cuando estas se utilizan para la obtención de piezas donde los requerimientos de diseño están muy definidos.

Por ello, se plantea la necesidad de realizar un estudio sobre diferentes parámetros de fabricación y su influencia en las características finales de las piezas obtenidas. En este caso se ha seleccionado una técnica de amplio uso y bajo coste, como es el Modelado por Deposición Fundida (*Fused Deposition Modelling*) o FDM.

### 1.4. Metodología a seguir

El trabajo queda dividido en dos grandes partes: una aproximación al estado del arte de los procesos de Fabricación Aditiva y un experimental en el que se pretende conseguir el objetivo descrito en el apartado anterior.

En el estudio bibliográfico sobre el estado actual del tema, se hará uso de una metodología que permita contextualizar, clasificar y categorizar la documentación recabada para obtener una asociación documental estructural que permita analizar la información, identificando las perspectivas y tendencias de la Fabricación Aditiva. Se pretende contemplar la diversidad de procesos que existen dentro de estas tecnologías.

Dependiendo del material utilizado, de cómo sea aportado, de la fuente de energía empleada, de la máquina, etc, se distinguen procesos muy distintos. La existencia de tal variedad de métodos, materiales y aplicaciones a las que pueden ir destinados, hace que estas tecnologías estén en pleno auge y que estén siendo cada vez más expandidos en los últimos años. Sin embargo, son técnicas en las que aún queda mucho por investigar y por mejorar, ya que contemplan muchas limitaciones.

Esta falta de estudio para estas aplicaciones hace que se originen incertidumbres en los defectos encontrados durante la fabricación. Muchos tienen una explicación no demostrada y difundida en la red. Sobre todo, en FDM, puesto que es el proceso más barato y por tanto más utilizado en el mercado.

Por otro lado, una vez fijado un equipo FDM en concreto, se seleccionaran una serie de parámetros en función de lo obtenido en la aproximación al estado del arte, y se realizarán distintos ensayos donde se variarán los parámetros fijados para estudiar la influencia de estos en la calidad final de las piezas obtenidas.

Con los datos obtenidos se pretende establecer las posibles interferencias entre los factores estudiados que lleven a determinar un rango de uso del equipo.





# Capítulo II: Estado Del Arte

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## 2. Capítulo II: Estado Del Arte

### 2.1. Introducción

Se entiende como fabricación a la producción de objetos gracias a la transformación de un material de partida en un producto mediante la aplicación de energía [1, 2]. Con la llegada de la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII se cambió por completo la forma de ver la fabricación; se pasó a dejar la artesanía para poder utilizar procesos de fabricación y automatización en serie gracias en gran medida, a la aplicación de la máquina de vapor en la producción. Se considera que ésta es la primera Revolución Industrial, basada en la adquisición de energía a través del carbón. Se distingue una Segunda Revolución a finales del siglo XIX, con la utilización del petróleo y la electricidad, e incluso una tercera cuando se habla del uso de energía nuclear combinada con alguna de las anteriores (siglo XX). El resto de innovaciones se podrían considerar como una Revolución Tecnológica (robotización, energías renovables, etc).

Existen hoy en día gran cantidad de medios diferentes para fabricar, que trabajan de formas completamente distintas entre ellos. Básicamente se podrían clasificar en tres grandes grupos: por mecanizado de material, por conformación de material y por adición de material. Esta clasificación no era así nombrada, sino que en vez de adición de material existían las llamadas tecnologías de unión. Se podría considerar una Revolución Tecnológica con la invención de una nueva forma o proceso de fabricación, la Fabricación Aditiva o FA (*Additive Manufacturing, AM*). No se debe entender como Revolución Industrial ya que no varía las fuentes de sustracción de energía, pero ofrece la posibilidad de realizar piezas de alta complejidad prescindiendo de utillaje (ni de sujeción, ni moldes, etc).

En este trabajo se pretende conocer las técnicas y materiales más utilizados dentro de la Fabricación Aditiva, las ventajas e inconvenientes de los mismos, así como las posibles aplicaciones y otros aspectos de considerado interés.

Por otro lado, las Tecnologías Aditivas son procesos que, aunque en pleno auge, existe un déficit de estudio en ciertos aspectos. Por ejemplo existen variaciones dimensionales en los sólidos construidos que a priori no pueden predecirse. Los calentamientos y enfriamientos bruscos y de manera continua y cíclica en distintas geometrías del objeto en construcción, generan reacciones incontroladas y distintas en cada caso durante el proceso de fabricación. Estas situaciones deben ser controladas para poder evitar las posibles contracciones y dilataciones del sólido. Por este motivo, cada vez resulta más necesario el estudio de estos cambios, motivación principal del experimental de este trabajo.

El objetivo es determinar y establecer las relaciones entre ciertos parámetros, para así poder prever las consecuencias que tienen en las deformaciones, dimensiones finales y calidad superficial de la pieza. Todo esto debe de realizarse para uno de los procesos más utilizados, y se procura que pueda ser trasladado a otros procesos.

## 2.2. La Fabricación Aditiva (AM)

La Fabricación Aditiva se entiende como el proceso de fabricación, el cual hace uso de diferentes tecnologías, para la obtención de un objeto sólido tridimensional de cualquier geometría, a partir de un modelo digital computarizado. Esto quiere decir, que a partir de cualquier Modelo Virtual tridimensional se puede obtener su representación física mediante el uso de estas tecnologías. Esta fabricación se podría entender como una tecnología que reproduce cualquier objeto que se desee siempre que éste se pueda dibujar mediante CAD [3–6].

La Fabricación aditiva es el término formal para lo que solía ser llamado Prototipado Rápido y lo que popularmente se llama impresión en 3D, siendo esto último en cierto modo incorrecto. El término de Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping*, RP) se utiliza en una variedad de industrias para describir un proceso para crear rápidamente y de una vez la representación de un sistema o producto antes de la liberación final o comercialización. En otras palabras, el énfasis está en la creación de algo de forma rápida y que la salida es un modelo prototipo o base de la cual se derivan otros modelos y, finalmente, el producto final. La Fabricación Aditiva, sin embargo, es un término mucho más amplio que engloba muchas más aplicaciones.

Sinónimos de este término que se encuentran en la literatura pueden ser: Procesos Aditivos (*Additive Processes*), Técnicas Aditivas (*Additive Techniques*), Fabricación por Adición de Capas (*Additive Layer Manufacturing*), Fabricación por Capas (*Layered Manufacturing*), y la Fabricación con Forma Libre (*Freeform Fabrication*) [7–9]. Todas estas terminologías incluyen técnicas que se basan en utilizar un procedimiento de aportación en el que se van depositando, de manera diferente según la técnica utilizada, las capas sucesivas de un material de manera precisa, que corresponden con cada una de las secciones del modelo. Esta es la principal característica que las diferencia de otras técnicas de fabricación con conservación o adición de masa.

Además, estas tecnologías otorgan una serie de ventajas que provocan que los objetos que se obtienen mediante Fabricación Aditiva puedan abarcar cualquier etapa del ciclo vital de un producto. Se utilizan desde el punto de vista de la preproducción o prototipado (*Rapid Prototyping*, RP), la producción a gran escala (*Rapid Manufacturing*, RM), el mantenimiento o reparado de piezas en uso, además de la personalización de cualquier objeto.

De hecho, esta tecnología es ampliamente usada en numerosos sectores, y cada año se añaden nuevas aplicaciones

En comparación con otros procesos de fabricación, la Fabricación Aditiva crea o construye un elemento mucho más despacio que, por ejemplo el mecanizado convencional elimina material para alcanzar el mismo objeto [3–9]. Sin embargo estas tecnologías ahorran tiempos de diseño, programación y montaje, lo cual es un factor a tener en cuenta en la productividad. Además, otorgan una serie de ventajas que serán explicadas posteriormente como el alcance de geometrías complejas o la reducción considerable de pesos. Estas y otra serie de virtudes hacen que estas técnicas sean cada día más competitivas y estén en pleno auge.

### 2.3. Evolución de las Tecnologías Aditivas

Con unos 30 años de historia, los procesos de Fabricación Aditiva surgen primeramente con el nombre de Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping* o RP), ya que en un primer momento estas tecnologías se concibieron con el fin de realizar de prototipos, tanto conceptuales como funcionales [9–13]. Estos modelos físicos, ayudaron a acortar las etapas de desarrollo de producción. RP sigue siendo la aplicación de los procesos de AM que predomina, al menos en materiales poliméricos, y está ya bien establecida en el mercado. Sin embargo, muchas de estas técnicas que originalmente se crearon para la fabricación de prototipos, hoy en día se pueden concebir como técnicas de *Rapid Manufacturing* o *Additive Manufacturing* [14–18], es decir, Fabricación Aditiva en producción para un uso final de piezas. Estos términos están emergiendo, aunque siguen siendo muy inferiores a otros procesos de fabricación, teniendo todavía un impacto económico modesto. Hay que tener especial cuidado con el uso de estos términos, ya que no significan lo mismo como se ha mencionado. Sin embargo, como hoy en día la mayoría de las tecnologías es usada en varios ámbitos, dichas acepciones se nombran en muchas ocasiones indistintamente [4, 7].

Desde finales de los años 70 han sido inventados numerosos procesos de Fabricación Aditiva, sin embargo no fue hasta los años 80 en los que apareció la primera publicación aludiendo al uso de estas tecnologías [13]. No apareció en publicaciones el término *Rapid Manufacturing* hasta 1993 [19] y hasta 1995 ya las llamadas Tecnologías de Fabricación Aditiva o *Additive Manufacturing* [20].

La primera técnica de FA considerada fue la de Estereolitografía (*Stereolithography*, SL o SLA), aunque no fue distribuida por una gran empresa, 3D Systems®, hasta 1987. Esta técnica es la que otorga el nombre a los archivos propios con los que se trabajan en estas tecnologías (STL).

Otra de las primeras técnicas inventadas fue el Sinterizado láser selectivo (*Selective Laser Sintering*: SLS). Ésta fue patentada en 1979 y comenzada a comercializar distribuida por EOS GmbH® en 1990.

La tecnología de impresión 3D más común era y sigue siendo la de Modelado por Deposición Fundida (*Fused Deposition Modeling*: FDM) que fue inventada y patentada en 1989 por S. Scott Crump y comercializada en 1991 por la compañía que cofundó, Stratasys® [21]. Esta se fundió con una empresa líder del mercado, Objet®, y se convirtieron en la fábrica más grande de impresoras 3D y de materiales para impresión 3D que existe hoy en día. [21–24] Actualmente sigue siendo la técnica más extendida. Su alta expansión es debida al bajo coste y fácil uso e instalación. De hecho hoy en día cualquier persona puede acceder a tener una impresora de FDM en su casa, ya sea adquirida o fabricada por sí mismo. Esta es la técnica escogida para el estudio de este trabajo.

A partir de mediados de los 90 se han generado multitud de técnicas diferentes y de variantes de las mismas, admitiendo cada vez más tipos de materiales y mejores calidades, aunque sigue siendo un campo con mucha capacidad de mejora en tolerancias y calidades, así como en tiempos y costes de fabricación.

Originalmente las impresoras eran grandes, caras y muy limitadas en lo que podían producir. Por este motivo, ha sido y sigue siendo un campo muy estudiado y mejorado en pocos años, sobre todo en la última década.

Además, cabe mencionar que muchas patentes acaban de caducar y muchas otras están expirando. Desde octubre del 2013 hasta junio del 2015 han caducado 15 patentes clave de los procesos más utilizados como el FDM, SLS y SLA, entre otros. Esto ha provocado, y continuará haciéndolo, una mayor propagación de estas tecnologías para cualquier persona o empresa que quiera introducirla. Por este motivo, se ha alcanzado un mayor interés en el estudio y desarrollo de las técnicas de AM, apareciendo cada año mayor cantidad de estudios y publicaciones sobre el tema [5, 25–30]. Al mismo tiempo, se espera un aumento de empresas en cantidad de sectores que hacen uso de la Fabricación Aditiva.

En sus comienzos, como se ha mencionado, se denominaba a este conjunto de tecnologías *Rapid Prototyping*. Sin embargo, hoy en día existen diferentes nomenclaturas para estos procesos como pueden ser: *Rapid Manufacturing*, *Additive Manufacturing*, *3D Print (-ing)*, etc, que como también se ha mencionado, no significan lo mismo [14–18, 21–24, 31]. Por este motivo, para la búsqueda de información se han incluido todos los términos posibles [31], y se ha hecho distinción entre los mismos para poder observar la aparición y evolución de dichas terminologías debido a los rápidos avances en las tecnologías. Dicho aumento es reflejado en la siguiente Figura 2.1.

Como puede observarse en la gráfica, de existir poca cantidad de artículos comienza un auge en el siglo XXI que se ve fuertemente incrementado con la caducidad de varias patentes. A su vez, queda distinguido el aumento de estudios que mencionan la Fabricación Aditiva, siendo cada vez menos el porcentaje de investigaciones que hacen alusión al término Prototipado Rápido.

Entre los aspectos más estudiados, como en muchos otros tipos de procesos, es el aumento de la calidad o la reducción de tiempos y costes. La Fabricación Aditiva todavía no alcanza la calidad de otros procesos. Sin embargo, ya existen intentos de integrar procesos de AM y mecanizado, aunque son soluciones caras y lejos del mercado todavía.



**Figura 2.1.** Aumento del número de publicaciones sobre Additive Manufacturing [31]

Además, se ha comenzado a crear software libre, portales donde se comparten diseños, foros sobre Fabricación Aditiva, etc. Hoy se pueden encontrar planos de máquinas hechas con Lego®, perfiles de aluminio, madera, etc, o incluso comprar kits para fabricarse uno mismo su propia máquina. Todo lo anterior, sumado al gran auge que está adquiriendo, provoca un aumento del capital invertido por la sociedad en dicho ámbito.

Esta gran expansión en el mercado y el aumento de la competencia existente han provocado una marcada disminución en los costes de máquinas y fungibles, lo cual favorece a su vez mayor estudios, mayor inversión y, en general, un mayor interés de la sociedad.

Un ejemplo de esta disminución de costes viene incluida en la siguiente Figura 2.2, donde puede apreciarse el coste de máquinas de gama baja y sus fungibles (referido a material) que trabajan con materiales plásticos. La gráfica está realizada para valores de máquinas de la tecnología FDM. Esta disminución de precios a su vez provoca cada vez más ventas en dicha tecnología, aumentando de manera exponencial. Como se observa en la Figura 2.3, y de acuerdo a la Asociación Wohler, experta en el sector, el número de este tipo de impresoras personales FDM crecen alrededor de un 350% cada año desde 2008. A partir de un momento las unidades de venta comienzan a ser incalculables, ya que empiezan a generarse multitud de ventas y personas que se construyen sus propias máquinas.

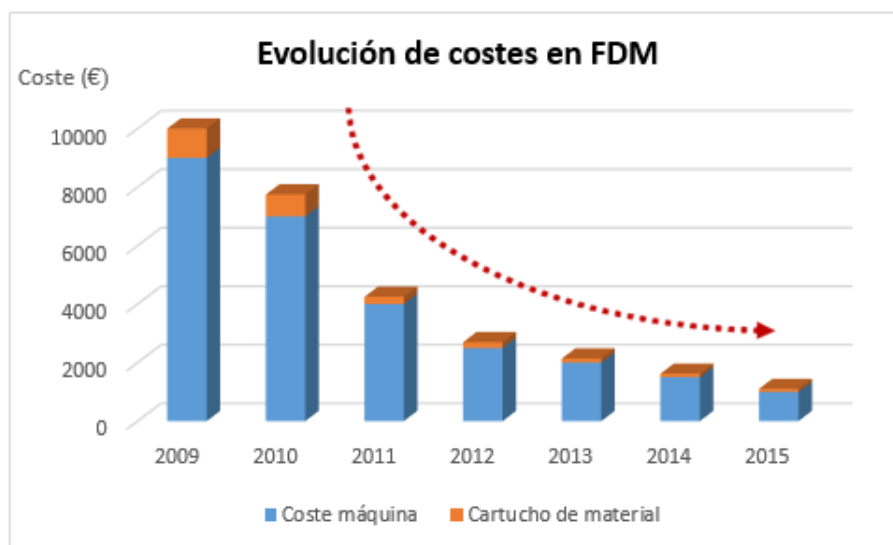


Figura 2.2. Evolución significativa del precio de las impresoras FDM y sus fungibles [29, 32–36]

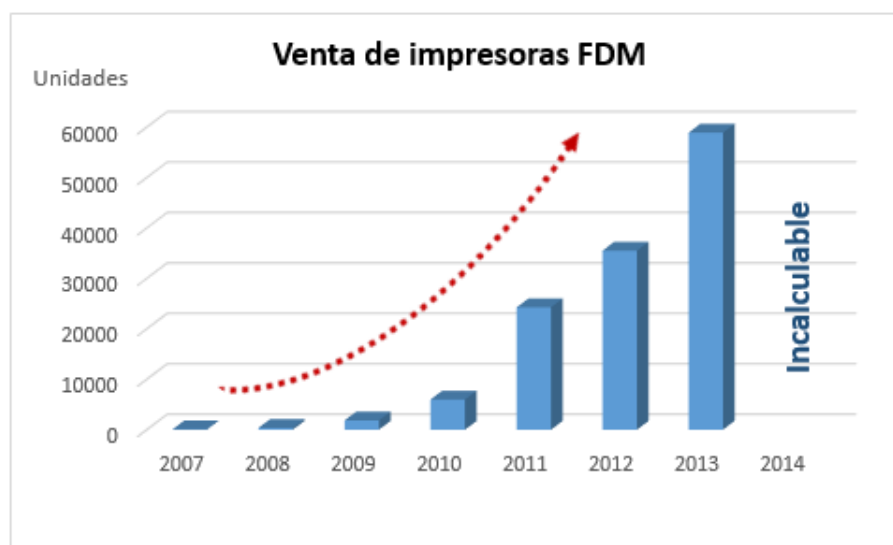


Figura 2.3. Aumento de unidades personales vendidas de impresoras FDM

Como se ha mencionado, la técnica más expandida hoy en día es la de FDM. Sin embargo, no es la más estudiada. La mayoría de los estudios están dedicados a materiales metálicos o a la industria médica (bio-orgánicos). Esto genera una necesidad en los procesos de FDM de estudiar en cada caso los parámetros necesarios casi desde 0. En este trabajo se pretende establecer ciertas relaciones que ayuden a la fabricación mediante esta técnica, y demostrar a su vez que existen muchos factores que intervienen en los resultados obtenidos.

## 2.4. Fases para la fabricación mediante AM

Para crear una pieza mediante cualquiera de estas tecnologías se sigue una serie de etapas comunes en todas ellas [4, 5, 8], ver Figura 2.4.

Es importante notar que estas tareas de diseño y tratamiento no se pueden hacer en ningún caso a mano, sino que es necesario el uso de ordenadores y programas adecuados. Únicamente la etapa de acabado es manual. Estos pasos son cruciales para determinar la posibilidad de fabricación que presenta el objeto final y generar los datos que alimentan a las máquinas, es decir, a los sistemas de AM propiamente dichos.



Figura 2.4. Diagrama de flujo la Fabricación Aditiva

### 2.4.1. Diseño o digitalización

Corresponde con las operaciones realizadas con el fin de conseguir el modelo en formato STL para que se pueda proceder a la comprensión por parte de la máquina de AM (y de los softwares específicos de tratamiento), es decir, todo el proceso de creación o diseño de la pieza en CAD 3D. También se agrupan aquí como alternativa, las tareas de Ingeniería Inversa. Estos procesos de Ingeniería Inversa parten de una pieza física para hacerle un escaneado tridimensional que se transforma en una nube de puntos y mediante diversas transformaciones, finalmente en un modelo CAD (Modelo Virtual) [37-40].



Hay que tener en cuenta dos aspectos generales, al igual que en otros procesos de fabricación, tanto en el diseño de una pieza desde 0 como de un modelo virtual, con objetivo de obtenerla mediante técnicas de AM [4, 5]:

- Diseño funcional. El desempeño que va a realizar, la resistencia a la fatiga, las tolerancias y acabados finales, las restricciones geométricas, etc, deben ser tenidas en cuentas para el diseño adecuado de un modelo, así como la elección de un proceso y material correctos.
- Diseño para la fabricación. Hay que tener en cuenta las tolerancias de la máquina a usar, el alcance de detalle que ofrece, las estructuras soporte, etc. Algunos de estos aspectos pueden considerarse como tratamiento del archivo si se desean diseñar a posteriori (estructuras soporte).



Figura 2.5. Optimización para el diseño en Fabricación Aditiva

#### 2.4.2. Tratamiento del archivo

En esta etapa se puede abarcar diversas consideraciones, desde el tratamiento del tamaño del archivo, hasta la modificación de los parámetros de fabricación.

La primera de ellas, influye sobre todo en los archivos obtenidos mediante digitalización, de manera que se puede disminuir o aumentar el número de puntos digitalizados, suavizar la superficie, etc. Una vez hecho esta primera consideración, se debe transformar el archivo en el formato utilizado en estas tecnologías: STL.

La segunda apreciación, ofrece una mayor gama de posibilidades de modificar el propio proceso y resultado: los parámetros de construcción (velocidad, temperatura, etc), la orientación del modelo sobre la plataforma de construcción, así como la aplicación de

colores, estructuras internas, etcétera, que se pueden llevar a cabo desde programas específicos de Fabricación Aditiva. De este modo, se deberán tener en cuenta en el siguiente orden:

- El posicionamiento y orientación del modelo en la plataforma. El posicionamiento influye únicamente para conseguir una mayor producción al poder incluir mayor cantidad de elementos a fabricar de una misma tirada. La orientación sin embargo, es un aspecto de mayor relevancia. Esta va a forzar en algunos casos el uso de estructuras soporte.
- Diseño de estructuras soporte. Estas estructuras son necesarias en muchos casos para los voladizos cuando existen más de 30° respecto a la vertical. Sin embargo, en ciertas ocasiones puede ser más interesante utilizar orientaciones que coaccionen la utilización de dichos soportes pero que a su vez puedan otorgar ciertas ventajas o propiedades mecánicas. En otras ocasiones, el soporte puede ir estructurado desde los inicios del diseño, puesto que no hay libertad en el diseño de estas estructuras en la mayoría de los programas de Fabricación Aditiva.
- Estructuras internas. Esto delimita la consistencia del elemento fabricado. Se puede fabricar desde el elemento vacío (puramente el STL o la superficie envolvente del objeto), hasta con un 100% de densidad. En este aspecto se puede incluso jugar con la porosidad de los elementos para favorecer el peso del mismo, o dar más consistencia si se precisa.
- Velocidad y temperatura de fabricación. Dichos parámetros son los más importantes en estas tecnologías. Son los que dictan el tiempo de fabricación de un producto, y dependen de la tecnología y el material que se esté utilizando. A su vez, en muchos casos van ligados, es decir, no puede modificarse el uno sin el otro para obtener buenos resultados.

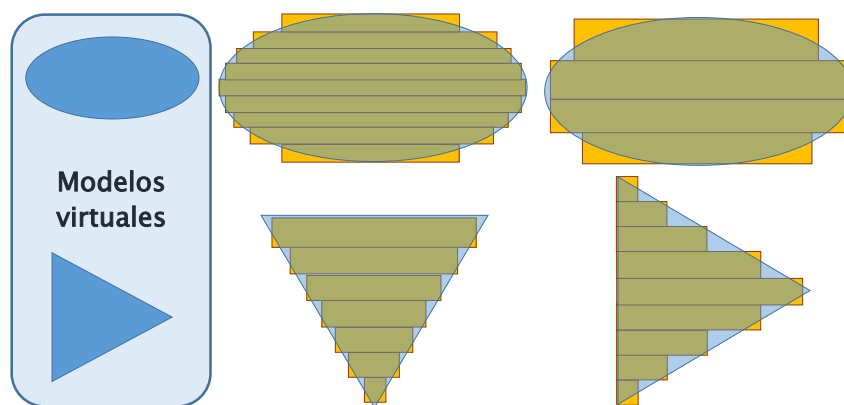
Existen otros parámetros más específicos a modificar dentro de cada tecnología en particular. Hay que tener en cuenta que no todas las tecnologías-máquinas-sofware permiten la modificación de ciertos parámetros [37-42]. Estas modificaciones afectan de manera trascendental en el acabado de un producto, no tanto en tolerancias geométricas, como en el detalle y acabado superficial. Además, influyen fuertemente en el tiempo de fabricación del producto.

Una vez realizado esto, el propio software de Fabricación Aditiva parte del modelo y lo corta o rebana (*slice*) en secciones cuyo espesor corresponde con el de cada capa. Este espesor marca ya un límite de detalle (resolución). Es aquí cuando se fundamenta la FA. Se simplifica una geometría 3D en un apilamiento de geometrías 2D (aunque la capa tiene un cierto grosor se considera despreciable). El hecho de realizar una capa implica que el borde de cada capa sea vertical, por lo tanto cualquier geometría que no sea completamente vertical respecto al corte no se reproducirá con su forma original, sino que se formará mediante un escalonado de capas.

Este escalonamiento será más acusado cuanto mayor sea la inclinación que presente el plano respecto a la vertical. Esto quiere decir que cuanto mayor sea dicho ángulo y/o el espesor de capa se obtendrá mayor desviación frente al modelo digital, Figura 2.6.

Es en este paso en el que se rompe un único problema de elevada dificultad (fabricar cualquier objeto de geometría compleja) en un número elevado de tareas sencillas (fabricar objetos de dos dimensiones y adherirlos en un determinado orden).

Por muy compleja que resulte la geometría en una capa, el problema se reduce a definir contornos cerrados y a definir dónde es “dentro” o perteneciente a la pieza (material sólido) y dónde es “fuera”.

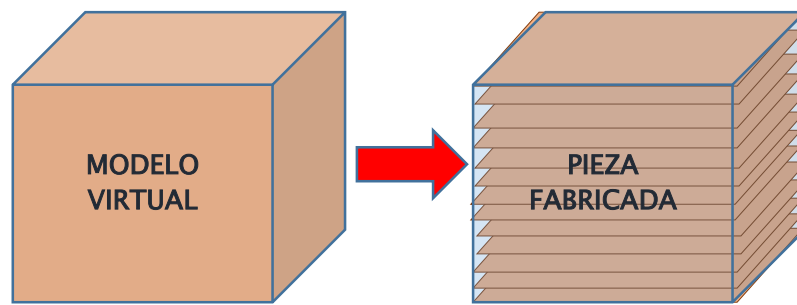


**Figura 2.6.** Influencia del espesor de capa (arriba) y del ángulo de voladizos (abajo) en la desviación respecto al modelo y la necesidad de soportes. A la derecha el caso más desfavorable

### 2.4.3. Fabricación

Esta etapa se corresponde con el proceso en el que la máquina está construyendo físicamente las capas del producto. Esta fase técnicamente es la más importante, pero es en la que no se puede intervenir [3–5]. Esto es una ventaja y a la vez un inconveniente: por un lado no precisa de mano de obra en la fabricación, a diferencia de otras tecnologías; por otro lado, un error o defecto indeseado detectado, puede provocar la parada de la fabricación o en la inutilización del elemento. Esto desemboca en el comienzo de esta etapa, o incluso de alguna anterior si el defecto es generado por algún equívoco en fases anteriores. Esto a su vez, es uno de los principales impedimentos o limitaciones de estas técnicas.

Este proceso se realiza de diferentes formas según la tecnología aditiva y la máquina elegida, pero todas ellas siguen el mismo proceso a la hora de fabricar: se crea una primera capa y a continuación se elabora la inmediatamente superior, y así sucesivamente una tras otra hasta la completa fabricación del objeto.



**Figura 2.7.** Principio básico de la Fabricación Aditiva.

Esta fase puede ser directamente la última si la pieza no precisa de una retirada de soportes o un acabado superficial mejor al ofrecido por el propio proceso y máquina, aunque generalmente como en la mayoría de procesos de fabricación, son necesarias etapas de acabado.

#### **2.4.4. Acabado**

En esta fase se agrupan los procesos de finalización de la pieza, tanto labores por exigencias de acabado superficial, como la extracción de los soportes. En algunas ocasiones existe un infiltrado de productos o incluso un vaciado y un posterior rellenado con un material como el cobre. También se realizan operaciones térmicas para una mejora de las propiedades de la pieza.

### **2.5. Principales procesos de Fabricación Aditiva**

Existen numerosos tipos de procesos diferentes y variaciones de los mismos en Fabricación Aditiva. Además, muchos de ellos trabajan con diferentes materiales.

En este apartado se van a desarrollar los métodos más importantes, que han sido o que son más utilizados actualmente.

#### **2.5.1. Estereolitografía (SLA)**

La estereolitografía es considerada la precursora del resto de tecnologías de Fabricación Aditiva, más bien generada como técnica de prototipado rápido. La primera patente fue realizada por Chuck Hull en 1986, originando la primera máquina de 3D Systems en 1987 [3-5].

Esta técnica de fabricación consiste en solidificar resinas en estado líquido y sensibles a la luz ultravioleta mediante un láser, capa a capa. El láser recorre la parte que en cada capa corresponde a la sección de la pieza a fabricar sobre la superficie del material líquido contenido en una cuba. De este modo que el material no afectado por la luz permanece líquido y el expuesto a la radiación se une y solidifica. La plataforma de construcción en el fondo de la cuba baja el equivalente al espesor de una capa y se rellena el nivel con líquido de aporte. El exceso de líquido es retirado con un *recoater*, que a su vez aplanar o alisa la superficie de la última capa depositada. Existen variaciones del proceso en las que la plataforma está situada sobre la cuba. Esta derivada del proceso suele ofrecer calidades más bajas (desviaciones dimensionales mayores).

El espesor de capa más usual es de unos 100  $\mu\text{m}$ , aunque existen algunos con resoluciones mayores y menores [3-5, 41-46].

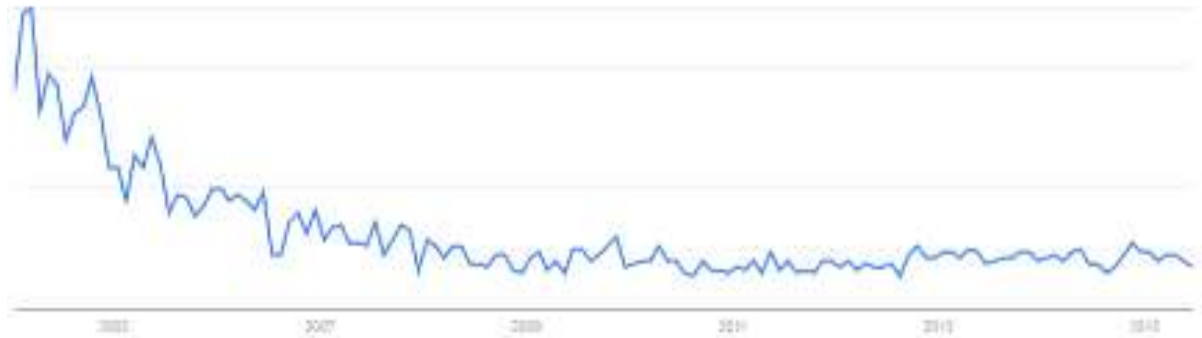
Permite fabricar piezas con geometrías muy complejas y espesores muy finos, y existe una amplia variedad de resinas epoxi actualmente en el mercado para conseguir características muy diversas, como transparencia, flexibilidad, materiales bio-compatibles, etc.

Es la tecnología más antigua, y comenzó por ser la más extendida. Sin embargo, hoy en día compite contra otras tecnologías que pueden conseguir propiedades y acabados parecidos siendo más baratas, como la tecnología de Modelado mediante Deposición Fundida (FDM), más usada actualmente.

En esta tecnología es preciso el diseño de estructuras soporte para la fabricación de voladizos en general, normalmente con ángulos mayores al  $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$  respecto a la vertical.



**Figura 2.8.** Figuras fabricadas mediante SLA



**Figura 2.9.** Decadencia de interés (referente a búsquedas realizadas on-line) respecto a la tecnología SLA una vez inventadas muchas otras [47]

Uno de los problemas es el de las medidas de prevención de los trabajadores para el manejo de las resinas base epoxi.

Otro de los principales problemas de esta tecnología es que las características de los materiales se degradan en mayor o menor medida a lo largo de la vida del producto si está, por ejemplo, expuesto a la luz solar, lo que provoca un curado continuo, y no son resistentes a la temperatura, afectando ambos factores a las propiedades mecánicas.

Aunque existen hoy en día máquinas capaces de realizar elementos de más de 2 m de longitud, esta tecnología sigue siendo muy lenta respecto a otras y por tanto no es rentable para piezas tan grandes. Fue concebida para realizar prototipos y, aunque su uso puede extenderse a piezas incluso funcionales y es la técnica más antigua, sigue estando bastante limitada para Fabricación a gran escala o para lotes medios y grandes.

**Tabla 1.** Resumen de características principales en SLA.

<b>Material</b>	Materiales poliméricos fotosensibles (epoxis). Estado del material y aportación: lecho líquido.
<b>Principio</b>	Fotopolimerización (Energía térmica: radiación ultravioleta).
<b>Soportes</b>	Necesarios. El lecho no es capaz de aguantar estructuras a partir de un cierto ángulo.
<b>Exactitud</b>	En torno a las 50 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Bajo (aun siendo aportación por capas).
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Muy bajo. Únicamente relacionado con la necesidad de fabricar estructuras soporte.
<b>Capacidad</b>	0,1 $\text{mm}^2$ – 2 $\text{m}^2$ cada sección

### 2.5.2. 3D Printing

Las impresoras 3D de Z Corporation utilizan inyectores estándar de impresoras de chorro de tinta para depositar selectivamente micro gotas de un adhesivo diluido sobre un lecho de polvo. Disponen también de materiales alternativos que permiten imprimir moldes o machos para colada de fundición de aleaciones de materiales no férricos [3-5].

Los mayoría de los materiales tienen base de yesos (formados por hasta 50 materiales diferentes), y suelen tener incluso fibra de vidrio, adecuadamente formulados y, en aquellos puntos en los que se deposita adhesivo, se aglutina y reacciona para formar el sólido.

La plataforma de construcción baja el espesor de una capa y un recoater de rodillo aplica una nueva capa sobre la anterior. La humedad remanente permite fijar parcialmente el polvo de la nueva capa sobre ella. Un nuevo avance del brazo con el cabezal recorriéndolo continuamente genera una nueva capa, y así sucesivamente, como haría una impresora de chorro de tinta convencional [8, 9, 35, 46].

La característica diferencial de estas máquinas es que existen modelos con varios depósitos de líquido, uno para el adhesivo y otros para tintas de colores, y el cabezal dispone a su vez de tantos inyectores como depósitos. Esto permite imprimir piezas directamente en color exactamente igual a cualquier impresora de chorro de tinta sobre papel [48].

En la siguiente Figura 2.10 aparecen ciertos modelos impresos con esta tecnología.



**Figura 2.10.** Ejemplos de piezas fabricadas mediante 3D-Printing.

Una vez impresas, las piezas deben permanecer un tiempo de secado dentro del propio lecho, para ayudar a su compactación. La principal desventaja de estos sistemas es que la resolución vertical no es muy buena (80  $\mu\text{m}$  por capa) y que las piezas son frágiles, tienen un aspecto arenoso y colores apagados.

Es necesario un pos-proceso cuidadoso de limpieza y soplado, que según la complejidad geométrica o espesor muy fino, puede llegar a ser imposible (se pueden romper). Además, las piezas deben ser infiltradas con cianocrilatos para mejorar el color, con aguas aditivadas (con sales), o incluso epoxi para mayor resistencia sacrificando el color. Esta fragilidad restringe el uso de estas tecnologías principalmente a prototipado y maquetado.

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

**Tabla 2.** Resumen de características principales en 3D-P

<b>Material</b>	Materiales poliméricos y cerámicos Estado del material y aportación: Lecho en polvo.
<b>Principio</b>	(Energía química: adhesión)
<b>Soportes</b>	No necesarios
<b>Exactitud</b>	En torno a 80 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Medio. Bastante rápida para el espesor de capa tan fino
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	No hay desperdicios. El material no usado se recoge y reutiliza. En raras ocasiones el soporte.
<b>Capacidad</b>	Tamaños pequeños y medios (Máxima longitud 500 mm)

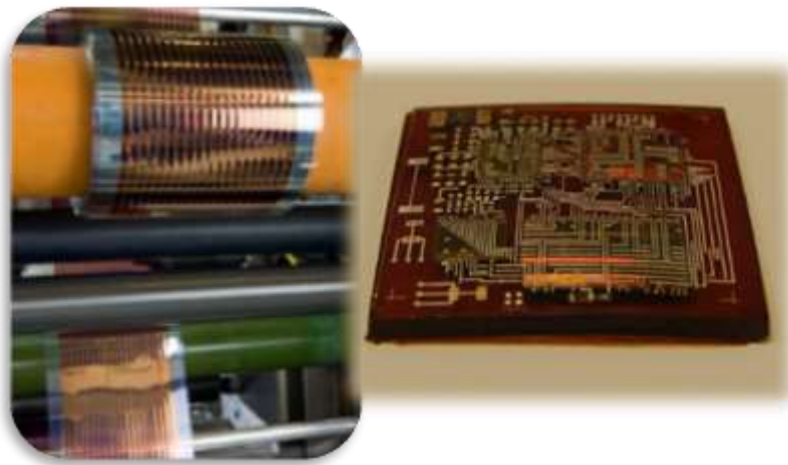
### 2.5.3. Inkjet

También conocida como Fabricación Aditiva mediante Inyección de Tinta. Para usar métodos de Inyección de tinta, el material debe ser convertido a partir de un volumen continuo de líquido, en un número de pequeñas gotas discretas. Esta función depende de una relación entre el material que se está usando, el hardware involucrado, y los parámetros del proceso [3–5].

Básicamente se va depositando el material punto a punto, gota a gota, a lo largo de cada sección a construir. Es uno de los procesos más antiguos y sencillos a nivel teórico. En la práctica sin embargo, la aplicación de la tecnología es compleja y requiere un conocimiento multidisciplinar.

En general las gotas se forman por la creación de impulsos de presión. El método particular usado para generar estos impulsos de presión lo definen las diferentes subcategorías de los procesos: térmicas, piezoeléctrica y electrostáticas.





**Figura 2.11.** Algunos ejemplos de objetos impresos con Inkjet [50]

En la inyección térmica de tinta las gotas se forman al calentarse rápidamente una resistencia en el interior de una cámara pequeña que contiene la tinta. La temperatura de la resistencia se eleva a 350 – 400 °C, causando la vaporización de una fina película de tinta. Esta vaporización crea rápidamente una burbuja, provocando una presión que fuerza a la gota de tinta a salir a través de la boquilla. La inyección de tinta piezoeléctrica es actualmente la tecnología preferida para la mayoría de las nuevas aplicaciones industriales. En esta tecnología, un cristal piezoeléctrico (habitualmente titanato de zirconio) sufre una distorsión cuando se le aplica un campo eléctrico. Esta distorsión se utiliza para crear un impulso mecánico que expulsa la tinta por la boquilla. Por último, la inyección de tinta electrostática se caracteriza por la deposición de gotas de tinta expulsadas por el inyector bajo la influencia de un campo eléctrico. Al tratarse de un proceso controlado por la atracción de cargas, se requieren tintas conductoras para obtener una impresión apropiada.

Cientos de organizaciones de todo el mundo utilizan esta tecnología [3, 8]. Es usada principalmente para formar complejos circuitos electrónicos sobre superficies planas, ya que por otro tipo de conformado se hace mucho más complejo. Otros ejemplos donde se utiliza dicha tecnología de impresión son transistores orgánicos de efecto campo, diodos orgánicos emisores de luz, células solares, estructuras conductoras, dispositivos de memoria, sensores, así como en materiales utilizados dentro del sector del envase y embalaje, textil, biológico y farmacéutico.

En la mayoría de aplicaciones, los sistemas de cabezales de impresión y el movimiento de control son optimizados para la impresión de las huellas electrónicas de alta precisión en relativamente pocas capas, y no para una acumulación tridimensional de objetos. Los principales beneficios de esta tecnología se relacionan con su velocidad y bajo costo. Pueden utilizarse series paralelas de cabezales para aumentar la productividad. Esto permite tratar áreas muy grandes rápidamente [49–52].

**Tabla 3.** Resumen de características principales en Inkjet

<b>Material</b>	Materiales poliméricos, cerámicos y metálicos, así como bio-orgánicos, textil, etc Estado del material y aportación: líquido, gota a gota
<b>Principio</b>	(Energía térmica o eléctrica: impulsos de presión)
<b>Soportes</b>	No se utilizan
<b>Exactitud</b>	Entre 5 y 5000 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Medio-alto. Tecnología rápida en comparación con otras. Simultaneidad posible de cabezales
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Mínimo, prácticamente nulo
<b>Capacidad</b>	Áreas de trabajo muy grandes (metros). Pocas capas

#### 2.5.4. Polyjet

Esta tecnología utiliza resinas líquidas, de formulación propia, de material sensible a la radiación ultravioleta [3–5]. La primera máquina fue comercializada en abril del año 2000.

Esta técnica permite imprimir el material mediante varios inyectores (normalmente 4), con muchos orificios (la primera máquina disponía de 96) de actuación independiente en cada uno. Los inyectores están ubicados en un cabezal móvil en X e Y. La deposición se realiza en capas de hasta 16 micrómetros, de manera similar a como lo hace una impresora convencional de chorro de tinta, con movimiento del cabezal de izquierda a derecha y sucesivos barridos hasta completar la superficie de trabajo, pero sobre una bandeja de construcción en lugar de sobre un papel [53–55].

En ambos lados del cabezal móvil van instaladas dos lámparas ultravioleta, de modo que, al moverse el cabezal de izquierda a derecha depositando el material, se produce el curado del mismo instantes después de su deposición.

El posterior descenso continuado de la bandeja de construcción y repetición del proceso permiten obtener finalmente la pieza.

En esta tecnología es necesario el uso de soportes. Para ello el cabezal dispone de otros cuatro inyectores, que en cada capa depositan donde procede un material específico para esta función, de forma simultánea al material de aporte. El soporte curado no polimeriza del mismo modo que el otro, por lo que permanece blando y se retira fácilmente con la mano o con ayuda de agua, dejando poca o ninguna marca sobre la superficie de la pieza si se realiza correctamente.

Esta tecnología consigue uno de los mejores acabados superficiales en este tipo de materiales y se usa en muchas ocasiones para fabricar piezas máster con las que luego realizar copias por otras tecnologías como es el caso de moldes de silicona por colada al vacío, micro-fusión, etc, lo cual es una de las aplicaciones principales de las Tecnologías Aditivas.

**Tabla 4.** Resumen de características principales en Polyjet

<b>Material</b>	Materiales: Resinas fotosensibles (polímeros) Estado del material y aportación: lecho líquido
<b>Principio</b>	(Energía térmica: luz ultravioleta)
<b>Soportes</b>	Necesarios
<b>Exactitud</b>	En torno a 10 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Medio. No es excesivamente lenta para el espesor de capa tan fino
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Solo se desperdicia el material soporte
<b>Capacidad</b>	Hasta el metro en cada dirección

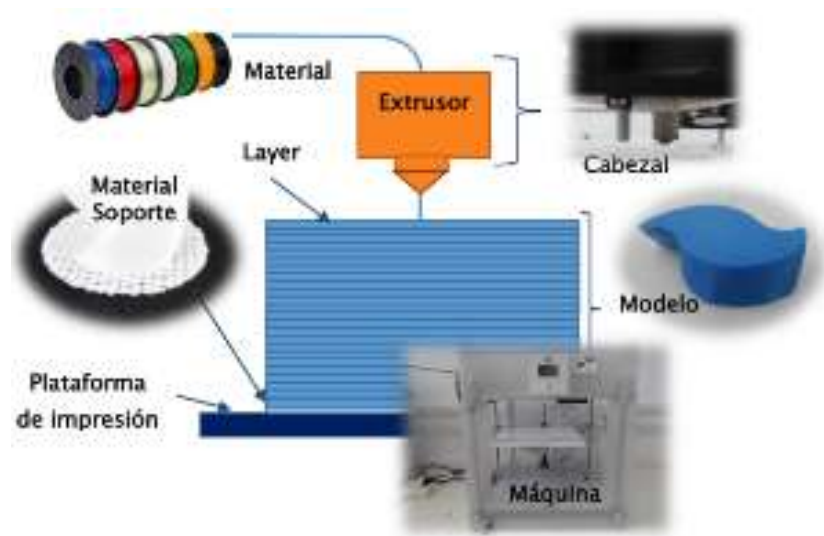
#### 2.5.5. Fusion Deposition Modelling (FDM)

El Modelado por Deposición Fundida es el proceso más utilizado, de menor coste, y por tanto el escogido como caso particular de estudio en la propuesta metodológica.

En este método se pasar un hilo de termoplástico por el interior de un inyector calefactable. Este hilo generalmente es PLA (poliácido láctico) o ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno, pero es posible la fabricación con termoplásticos diferentes, variando la temperatura del cabezal así como con determinadas ceras. De hecho cada vez existen más tipos de materiales utilizados en esta tecnología, ya que es la más expandida [3-5, 25, 46]. Se ha difundido tanto esta técnica por ser la de menor coste y por tanto de mayor accesibilidad.

Este proceso se comercializó por primera vez en 1991 por parte de la casa Stratasys que alimentaba su máquina con ABS.

El termoplástico en cuestión es extruido y avanza a lo largo de la boquilla calentándose hasta llegar a su fusión. El material es inyectado por el orificio del cabezal y seguidamente se deposita sobre la mesa, cama, plataforma o capa anterior [3-5, 56-59]. Se produce la adherencia entre capas debido a que el material se encuentra fundido y se solidifica por la mera diferencia de temperaturas.



**Figura 2.12.** Esquema del funcionamiento básico de FDM [Adaptado de 4].

Una característica de este tipo de procesos es la posibilidad de elegir materiales y colores diferentes; existen máquinas con diferentes cabezales, cada uno de ellos con una carga de hilo plástico de diferente color y/o propiedades. Esta combinación de materiales no es posible en otras tecnologías de FA.

En el caso del FDM es muy común la necesidad de estructuras de soporte en presencia de voladizos. Estos soportes obviamente, deben ser realizados en medida de lo posible con un material distinto que el resto de la pieza. Dicha combinación de materiales se realiza para que la extracción de los soportes resulte más sencilla. Sin embargo, la retirada de los mismos, provoca huellas, costuras, o en definitiva, defectos, en la superficie del elemento [60]. Los defectos más característicos de esta tecnología aparecen en la siguiente Tabla 5.

El punto débil de estos procesos es el hecho de que son bastante lentos en comparación a otras técnicas de fabricación aditiva. A esto hay que sumarle la limitada calidad superficial si se contrasta con otros procesos. Las máquinas más comunes que utilizan esta tecnología tienen una resolución de 0,1 mm. Las piezas fabricadas por tanto, tienen un tacto más bien rugoso.

Sin embargo, tanto la calidad superficial como las tolerancias geométricas, pueden ser mejoradas sin necesidad de realizar post-procesos. Para ello hay que realizar el estudio de la posible modificación de varios parámetros que afectarán directamente en el acabado de las piezas. Esta es la línea que se ha utilizado como motivación de este trabajo.

**Tabla 5.** Defectos característicos del Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Defecto	Comentario	Imagen
Costura	Acumulación de material al comienzo o final de cada sección o capa impresa	
Voladizos	Necesidad de uso de soportes para evitar el desprendimiento por gravedad	
Hendiduras, grietas, fisuras	Cambios de temperatura en el ambiente provocan la dilatación o compactación de las capas	
Protuberancias	Exceso de material puntualmente	
Hileras residuales	Arrastre de material en zonas huecas. Fácil retirada	

Los distintos aspectos que pueden ser variados en las tecnologías de este tipo son:

- Gap. Es el espacio o altura existente entre el cabezal y la mesa de trabajo o plataforma. Es conveniente que no sea demasiado grande para que el hilo se deposite correctamente. Tampoco debe ser menor de lo necesario, ya que puede impedir la salida del material, o incluso dañar el cabezal o la plataforma de impresión.
- Raft. Es la primera capa depositada sobre la plataforma, y se deposita para establecer una separación entre el objeto a realizar y la misma. Dicho Raft debe ser retirado una vez finalizada la fabricación.
- Espesor de capa. A mayor espesor, menor tiempo de fabricación pero peores resultados. Esta debe ser igual o menor al diámetro del hilo extruido.
- Diámetro de hilo extruido. A menor diámetro de hilo, mayor precisión de detalle.
- Velocidad de avance. Es la que corresponde con el movimiento del cabezal y determina el tiempo total del producto fabricado y se mide en mm/s.

- Velocidad de extrusión. No debe ser confundida con la velocidad de avance, puesto que esta corresponde con la velocidad a la que sale el hilo por la boquilla, y no a la que el cabezal se desplaza.
- Flujo o caudal volumétrico. Depende de la velocidad y diámetro de extrusión. En algunos casos (según software utilizado), es el que aparece sustituyendo a los otros dos apartados.
- Temperatura de trabajo. Siempre debe ser algo superior a la temperatura de fusión del material en cuestión.
- Relleno. La pieza se crea a partir de un archivo con extensión .Stl, el cual corresponde con la superficie que envuelve la pieza. Este apartado es para dar consistencia al objeto, eligiendo estructura y cantidad de material. El sólido podrá variar de completamente hueco, pasando por la densidad deseada, hasta compacto.
- Soportes. Si no se han diseñado soportes, los softwares propios de estos sistemas permiten la generación de los mismos. El impedimento principal es que, en la mayoría de los casos, estos softwares no te permiten utilizar el posicionamiento deseado de estas estructuras. Solo permiten decidir a partir de cuantos grados desde la vertical se desea construirlos, y la consistencia o densidad de los mismos.
- Ventiladores. Ayudan a homogeneizar la temperatura en el interior de las impresoras cerradas. En las abiertas provoca mayor disipación del calor.

Todos estos parámetros sumados a la temperatura y condiciones ambientales, así como el propio material y máquina, influyen en el resultado de las piezas impresas en mayor o menor medida.

En este aspecto, se intuye que la técnica no es muy estudiada por ser de bajo coste y no otorgar demasiadas buenas calidades. Por el contrario si hay estudios referente a los costes y alguno de los parámetros por separado [33]. La motivación del trabajo procura contemplar la combinación de diferentes parámetros y la repercusión de los mismos en varios aspectos o salidas (dimensiones, forma, calidad superficial, etc).

En cuanto a materiales de estudio, se están iniciando la inclusión o incorporación de partículas metálicas en los filamentos, para otorgar propiedades diferentes [46].

**Tabla 6.** Resumen de características principales en FDM

<b>Material</b>	Termoplásticos (PLA y ABS principalmente, aunque existen otros como Policarbonato, Cera, Polifenilsulfona, inclusión de partículas metálicas, etc). Estado del material y aportación: Hilo fundido punto a punto
<b>Principio</b>	Deposición del material fundido (Energía térmica: calor)
<b>Soportes</b>	Necesarios en voladizos
<b>Exactitud</b>	≈ 50 μm
<b>Rendimiento</b>	Bajo. Aunque es una tecnología rápida para ser deposición punto a punto.
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Se deposita el material preciso para fabricar el objeto. Únicamente se desperdicia el de las estructuras soporte.
<b>Capacidad</b>	Entre 5 y 500 mm (en cada dirección)

#### 2.5.6. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Una de las primeras Tecnologías Aditivas comercializadas (1991) fue la Fabricación de Objetos por Laminado (LOM). LOM involucraba la laminación de capa por capa de hojas de papel, cortadas usando un láser de CO<sub>2</sub>. Cada hoja corresponde con cada sección transversal del modelo virtual (CAD) de la pieza. En LOM, la parte de la hoja de papel que no está contenida dentro de la parte final se corta en cubos de material utilizando una operación de corte de rayado.

A partir de este principio, se ha expandido el nombre a un número de procesos desarrollados con la base de laminado, teniendo en cuenta más posibilidades de materiales y más estrategias para realizar el corte. Debido al principio de la construcción, sólo se cortan los contornos exteriores de las piezas, y las hojas se pueden cortar y luego ser apiladas o apiladas y luego se cortan [3–5, 7].

Estos procesos pueden además ser clasificados basándose en el mecanismo empleado para lograr la unión entre capas, existiendo:

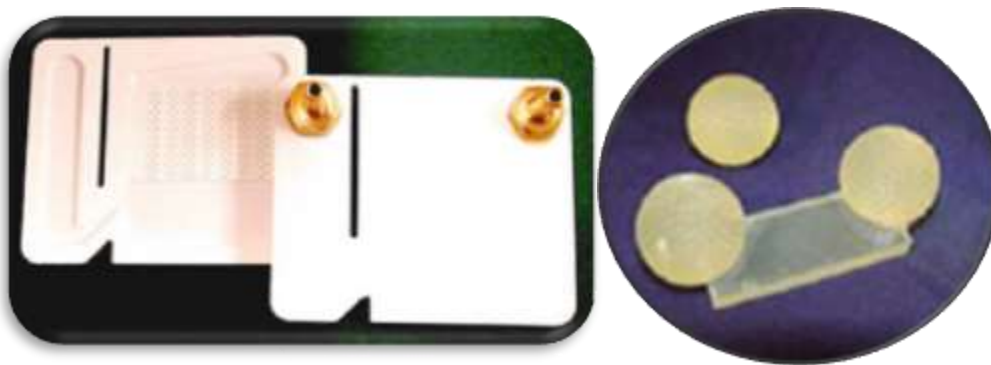
- Encolado o unión adhesiva
- Unión térmica
- Sujeción
- Soldadura por ultrasonidos

Evidentemente cada una de estas difiere en gran medida, pero todas ellas tienen el mismo principio básico. El proceso de construcción normalmente se compone de tres pasos en la siguiente secuencia: colocar el laminado, unir al sustrato, y corte de acuerdo con el contorno de la sección.

Las máquinas LOM originales utilizan este proceso con rollos con reverso adhesivo de material. Un rodillo caliente pasa a través de cada sección después de ser depositada, fundiendo el adhesivo y se produce una unión entre dichas capas.

Un láser, u otro elemento de corte en algunos casos, corta una profundidad de un espesor de capa conocido el contorno de la sección transversal sobre la base de la sección. El material no utilizado se deja en su lugar como material de apoyo y está picado utilizando un patrón de rayado en pequeños trozos rectangulares llamados tejas o cubos. Este proceso de unión y corte se repite hasta que se completa la pieza [3–8].

Las piezas sombreadas de material en exceso se separan de la pieza utilizando una serie de herramientas. Existe relativa dificultad para extirpar la parte del bloque que no pertenece a la pieza cuando esta está fría. Por tanto, a menudo se pone en un horno durante algún tiempo antes de este pos-proceso sino se realiza inmediatamente después de la fabricación.



**Figura 2.13.** Ejemplos de piezas fabricadas por LOM (a) dispositivo de destilación (b) pelotas de golf [8]

**Tabla 7.** Resumen de características principales en LOM

<b>Material</b>	Prácticamente cualquier material que pueda ser laminado (metales, papel, cerámicas, plásticos) Estado del material y aportación: sólido, capa a capa laminada
<b>Principio</b>	Unión entre capas laminadas (Energía adhesiva, térmica, mecánica o ultrasonidos)
<b>Soportes</b>	Necesarios
<b>Exactitud</b>	≈ 50 μm
<b>Rendimiento</b>	Medio-alto (capas completas)
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Se desperdicia más que en otros procesos de aditiva, ya que se realiza un corte 2D para cada lámina o sección de la pieza
<b>Capacidad</b>	Incluso más de 1 m en cada dirección X e Y



### 2.5.7. Sinterizado Laser Selectivo (SLS)

#### 2.5.7.1. Materiales poliméricos

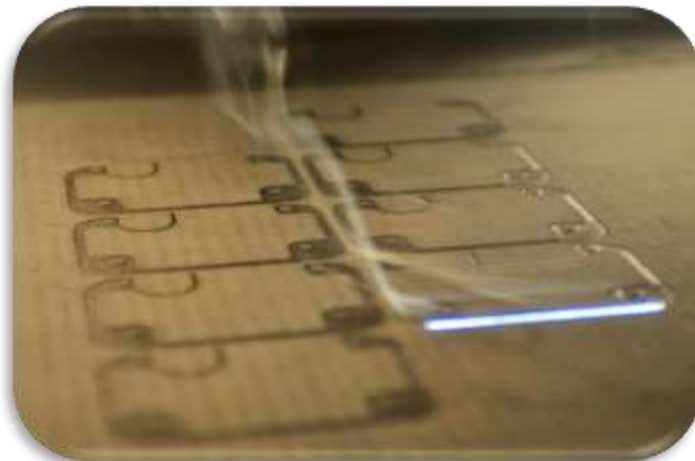
Esta tecnología fue inventada y patentada por Ross Householder en 1979, pero fue comercializada por la Universidad de Texas a final de los años ochenta [3-5, 16, 31].

En este proceso un recoater aplica una capa de polvo homogénea y un láser dibuja las zonas que para esa capa deben ser sólidas, de forma parecida a lo descrito en estereolitografía.

Para mejorar el proceso el material se calienta en la cuba hasta la temperatura de transición, de modo que el láser solamente debe aplicar la energía necesaria para fundir el material (que ya se encuentra polimerizado) y volver a solidificarse. Una de las desventajas de este proceso es que el enfriamiento de toda la cuba (material sin solidificar envolviendo a las piezas) debe ser lento para que no se produzcan deformaciones en las piezas de modo similar a la inyección de plástico. Este proceso puede requerir un tiempo igual al de producción, lo que provoca desventaja en la productividad del sistema.

Los espesores típicos de fabricación son inferiores a 100  $\mu\text{m}$ , hay máquinas con capas de espesor de 50  $\mu\text{m}$  actualmente.

El material habitual es la poliamida 12 o poliamidas cargadas con fibra de vidrio, aluminio, fibra de carbono u otros aditivos para mejorar las características mecánicas del producto final. En el año 2009 EOS GmbH presentó el primer sistema del mundo para fabricar piezas en PEEK (Poliéter éter ketona), plástico técnico de muy altas prestaciones.

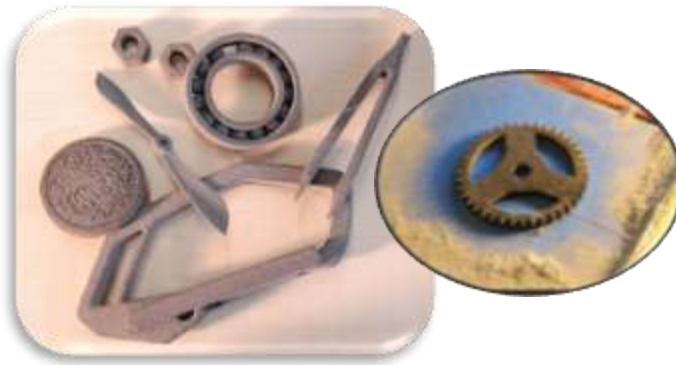


**Figura 2.14.** Proceso SLS con poliamidas [31]

La gran ventaja de esta tecnología es que no se necesita generar estructuras de soportes, permitiendo fabricar mecanismos, ejes bisagras, elementos flexibles, muelles, etc., lo que unido a las excelentes características de los materiales, los convierten en sistemas de gran éxito comercial y para aplicaciones prácticas de fabricación en serie. Es probablemente el sistema que más fielmente representa y refleja todas las virtudes y ventajas de las tecnologías de AM.

#### 2.5.7.2. Materiales metálicos y cerámicos

Durante los años noventa, se desarrolla esta tecnología orientada a la fabricación de núcleos complejos para fundición en arena. El proceso es similar al anterior.



**Figura 2.15.** Piezas fabricadas por SLS con materiales metálicos [61]

Para ello se utiliza arena o cerámicas con un ligante (resina) como material de aporte. Mediante un láser se funde el ligante en aquellas zonas en las que en la capa en cuestión corresponde a sólido. Como solo se funde uno de los materiales, se le llama selectivo. Durante la fase líquida moja y adhiere al material de aporte, que queda fijado al enfriar y solidificar el ligante. La bandeja de construcción baja el espesor de una capa, el recoater aporta y nivela más material, y el proceso se repite hasta la altura completa.

La pieza obtenida es frágil (verde). En el caso de la arena para machos de fundición, ya se puede usar directamente. La pieza en verde así formada se somete a un proceso térmico, similar al conformado por sinterización o la metalurgia de polvos, en el que el ligante se elimina dejando un esqueleto poroso de metal, que se rellena por una infiltración con bronce, obteniéndose así la pieza definitiva formada por dos metales.

Las características de los productos así obtenidos son pobres y el proceso resulta muy largo e impreciso, comparado con la fabricación directa de piezas (Direct Metal Laser Sintering o el Laser Cladding).

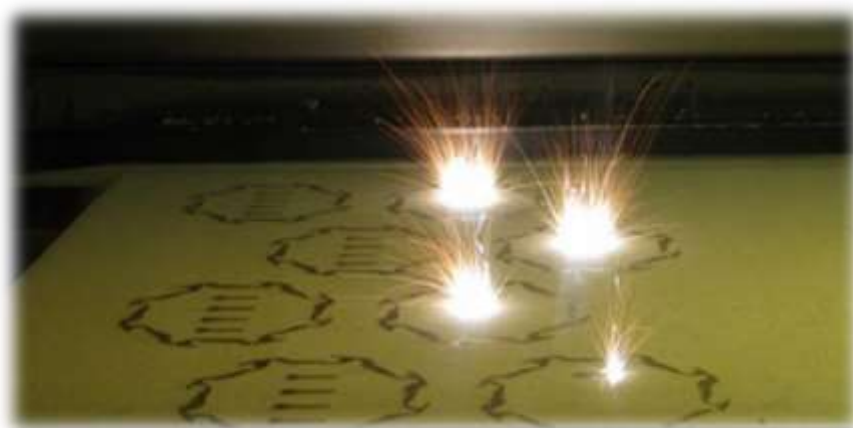
**Tabla 8.** Resumen de características principales en SLS

<b>Material</b>	Materiales plásticos: Poliamida (incluso combinada con vidrio o carbono), PEEK, Poliestireno, etc Materiales metálicos: Aluminio, Cromo-Cobalto-Molibdeno, Bronce, Acero, Titanio, Niquel, metales nobles, etc Estado del material y aportación: Lecho en polvo
<b>Principio</b>	(Energía térmica y química: Fundición de material adhesivo)
<b>Soportes</b>	No necesarios
<b>Exactitud</b>	Hasta 40 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Bajo, proceso lento
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	No hay desperdicios. El material no usado se recoge y reutiliza.
<b>Capacidad</b>	Hasta el metro en cada longitud

#### 2.5.8. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

También denominada según fabricante como Selective Laser Melting o SLM, y por otros Laser Cusing.

Durante los años noventa, la empresa alemana EOS GmbH desarrolló una variante del proceso de SLS, que difiere del anterior en que tanto el ligante como el material de aporte son metálicos [3-5]. El ligante es una aleación de bajo punto de fusión como el bronce. La máquina se carga con una mezcla homogénea pulverizada en grano fino del material ligante y los materiales de aporte, como Ni, u otros aceros de buenas cualidades.



**Figura 2.16.** Proceso DMLS [62]

Al incidir el láser, la aleación ligera se funde y rodea al material de aporte, para a continuación enfriar y solidificar en conjunto. De este modo se evita el paso de la eliminación del ligante y la infiltración en horno de tratamiento.

Los productos obtenidos de forma directa tienen más precisión geométrica, más densidad, menos porosidad y mejores propiedades térmicas que en SLS [61–64].

El principal inconveniente de esta tecnología es la necesidad de un esmerado diseño de los soportes, que deben cumplir varias funciones [4]:

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

La eliminación de los soportes es una tarea manual tediosa que limita notablemente la expansión de esta tecnología, ya que incrementa el coste de pieza en concepto de pos-procesado, mecanizado, pulido, etc.

**Tabla 9.** Resumen de características principales en DMLS

<b>Material</b>	Materiales: Gran variedad de metales como Aceros, Níquel, Aleaciones de Cromo-Cobalto, Titanio, Inconel, etc Estado del material y aportación: Lecho en polvo
<b>Principio</b>	(Energía térmica: fundición de materiales)
<b>Soportes</b>	Precisa de soportes
<b>Exactitud</b>	≈ 25μm
<b>Rendimiento</b>	Medio, mucho más rápido que la tecnología que lo deriva (SLS)
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Muy bajo. Únicamente relacionado con la necesidad de fabricar estructuras soporte.
<b>Capacidad</b>	Piezas hasta aproximadamente medio metro en cada longitud

### 2.5.9. Electron Beam Melting (EBM)

Este proceso es similar al sinterizado por láser y DMLS, pero en este caso la fuente de energía es un cañón de electrones acelerados hasta aproximadamente 0,8 veces la velocidad de la luz. Esta tecnología EBM funde polvo metálico en vacío por la acción de este haz de electrones [3–5].

El proceso EBM construye las piezas añadiendo el material por capas, es decir, el polvo metálico (con tamaño de partícula entre 40 y 100 micras) es repartido en una fina capa sobre el área de trabajo [65–67]. El haz de electrones funde el polvo metálico selectivamente siguiendo exactamente el patrón de la sección geométrica de la pieza para cada capa. Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha fabricado.

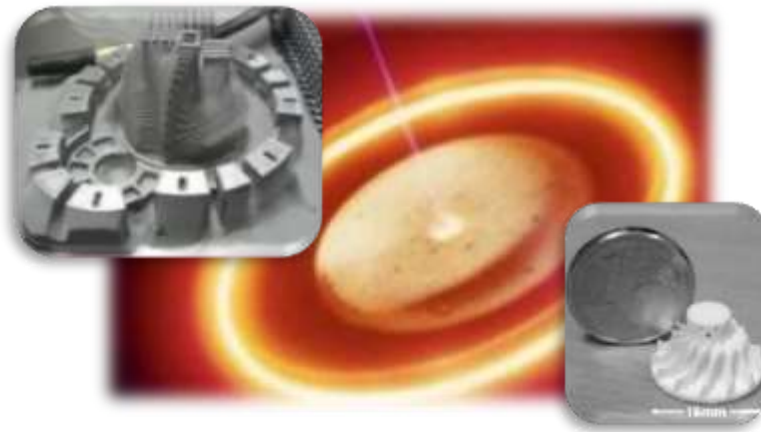


Figura 2.17. Proceso y ejemplos de piezas fabricadas por EBM [8]

El espesor de capa puede variar entre 70 (alta calidad), 100 y 200  $\mu\text{m}$  (alta productividad).

En cada capa el haz de electrones realiza un precalentamiento del área de trabajo para elevar la temperatura antes de fundir el polvo. Como resultado, las piezas obtenidas por EBM no tienen tensiones residuales ni sufren distorsión al enfriarse. Posteriormente se desarrolló el EBM MultiBeam<sup>TM</sup>, que utiliza la electrónica de control para dividir el haz de electrones en múltiples haces de electrones de menor potencia [3–5]. Esta estrategia permite fundir múltiples zonas del área de trabajo simultáneamente controlando la cantidad de energía suministrada en cada punto. Este avance ha permitido obtener mejor acabado superficial, detalles y estructuras porosas sin disminuir en productividad en esta tecnología.

Como en otras tecnologías de AM, algunas zonas de la pieza pueden requerir soporte para asegurar una correcta fabricación. En este caso este soporte es añadido para evacuar el exceso de calor de la zona de la pieza donde incide el haz de electrones, ya que se dispone de mayor potencia. Estos soportes se pueden retirar fácilmente y es deseable orientar la geometría, de forma que se añadan los soportes donde la pieza requiera un mecanizado posterior. Además, al procesar con alta temperatura, añade la ventaja de que el polvo no procesado se encuentra en un estado semisinterizado que tiene la capacidad de soportar algunas zonas geométricas [4]. Esto permitiría fabricar estructuras tridimensionales sin necesidad de utilizar soportes en el caso de que no exista una acumulación excesiva de calor.

El vacío existente en la cámara de trabajo permite procesar materiales metálicos reactivos y conseguir una alta pureza en el proceso de fusión. La tecnología EBM se caracteriza por su alta productividad comparada con tecnologías DMLS.

Una de las limitaciones de este sistema es que, al tratarse de partículas con masa, parte de la energía se transmite como cinética y el polvo se levanta de su lecho produciendo una pequeña nube que interfiere con el propio haz; este hecho limita el tamaño mínimo de polvo que se puede emplear y, en consecuencia, la precisión y acabado de las piezas. El proceso se encuentra limitado a materiales conductores y a superficies que como en otros procesos de este tipo necesitan un pos-procesado para su acabado definitivo.

Actualmente se está investigando el control de los parámetros, especialmente de la temperatura y velocidad, en estos procesos [65–67].

**Tabla 10.** Resumen de características principales en EBM.

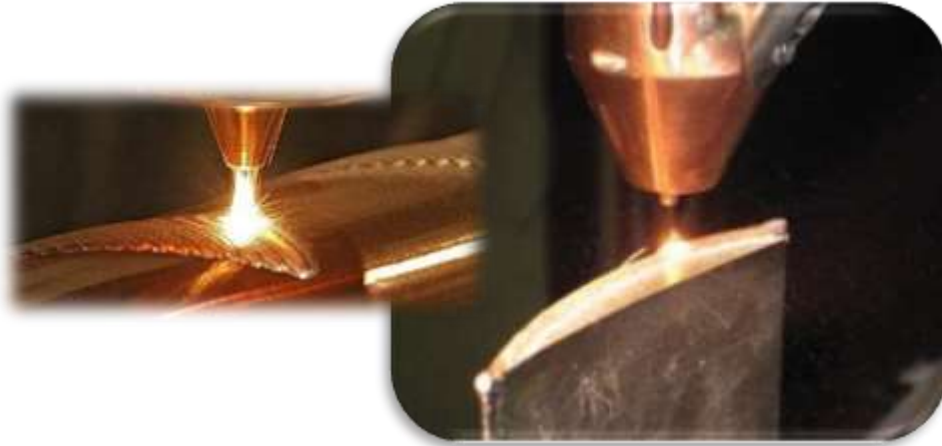
<b>Material</b>	Materiales conductores: Gran variedad de metales como Aleación de Titanio, Cromo–Cobalto–Molibdeno, Aluminio, etc Estado del material y aportación: Lecho en polvo
<b>Principio</b>	Haz de electrones (Energía eléctrica: fundición)
<b>Soportes</b>	Puede precisar de soportes (no en todos los casos)
<b>Exactitud</b>	Hasta 40 $\mu\text{m}$
<b>Rendimiento</b>	Medio. Puede variar notablemente según máquina y parámetros, y llegar a ser aún más productivo que DMLS
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Bajo o nulo. Únicamente relacionado con la fabricación de estructuras soporte.
<b>Capacidad</b>	Piezas hasta aproximadamente medio metro en cada longitud

#### 2.5.10. Laser Cladding

Este tipo de tecnologías se pueden ver como una evolución de los procesos de soldadura. La fabricación del objeto se lleva a cabo mediante una boquilla que deposita el material fundido, pudiendo provenir en forma de polvo o de varilla. Este se va depositando en las zonas requeridas según los criterios del diseño y se aplica una energía en forma de láser o plasma intensa y concentrada en ese punto depositado [4, 16, 61]. Al ponerse en contacto el material con la energía proveniente de la fuente éste se funde sobre la base (primera capa solamente) o la capa anterior y se solidifica de forma prácticamente inmediata.

La fuente de energía tiene mucha intensidad, por lo que el resto de la estructura ya construida debe ser protegida para evitar deformaciones durante el proceso de fabricación. Para ello se proyecta un gas inerte en las proximidades del punto de fusión [68–71].

En un primer momento este proceso fue concebido para la reparación de piezas de gran tamaño. Actualmente es usado también para mejorar las propiedades mecánicas o dar una mayor resistencia a la corrosión en piezas metálicas. Solo ocasionalmente se utiliza para la fabricación de elementos desde 0.



**Figura 2.18.** Proceso de Laser Cladding [71]

Existen 3 tipos según los movimientos posibles de la máquina: de cabezal fijo y mesa móvil, de cabezal móvil y mesa fija, y de cabezal y mesa móviles.

Al ser en términos más básicos un proceso de soldadura punto a punto automatizada, las limitaciones que se encuentran en este tipo de procesos son parecidas a las de un proceso de soldadura habitual. Sin embargo, se encuadran en procesos de Fabricación Aditiva ya que, aunque normalmente no se realizan capas de adición una encima de otra, el proceso consta de la adición de material en los lugares donde se requiere y que el aporte de material se realiza por capas aunque no sea de una forma continua. Es decir, se crea punto a punto y capa a capa aunque no sea, en la mayoría de las ocasiones, en toda la sección del diseño.

El Laser Cladding también es muy usado en todo tipo de geometrías para realizar revestimientos, ya que éstos son capaces de aumentar la vida útil de la pieza en 6 o 7 veces la original. Además, los elementos realizados mediante este tipo de proceso no tienen porosidad (o se puede controlar para utilizarla incluso como ventaja) ni fisuras, ya que al fundirse adquieren una gran compactación.

Se debe conocer que en esta tecnología, las capas de adición no son todas iguales y paralelas, sí es cierto que se construye aportando material allí donde se necesita y que, al menos localmente, el aporte se produce en capas. Por este motivo, aunque apenas es utilizado para fabricación de piezas desde 0, se considera AM.

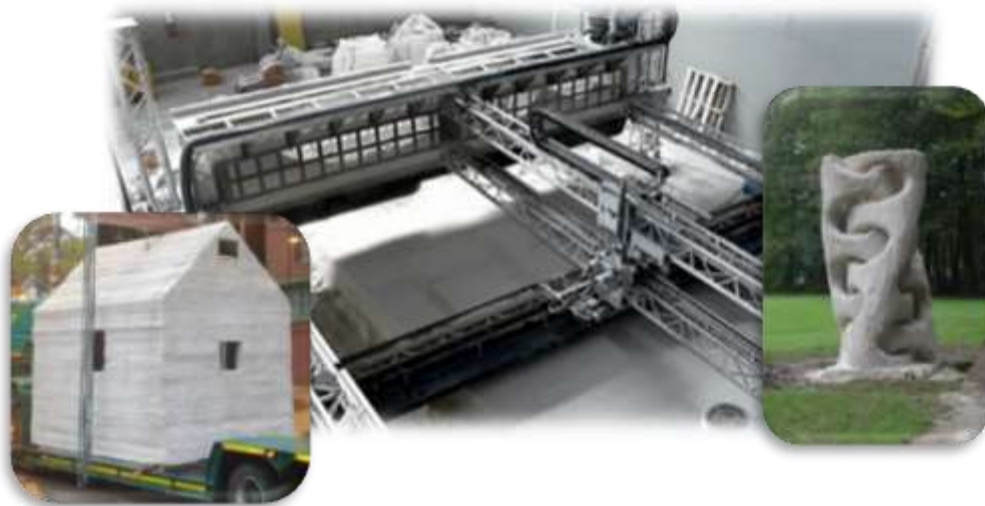
Al igual que en el resto de Tecnologías Aditivas con materiales metálicos, se está estudiando la influencia de los parámetros en ciertos aspectos, así como la comparación y mejora continua con respecto a otros procesos.

**Tabla 11.** Resumen de características principales en Laser Cladding

<b>Material</b>	Materiales metálicos exclusivamente Estado del material y aportación: Polvo o varilla punto a punto
<b>Principio</b>	Soldadura punto a punto (Energía térmica: calor)
<b>Soportes</b>	Necesarios en voladizos (casi no utilizados)
<b>Exactitud</b>	≈ 40 μm
<b>Rendimiento</b>	Media. Es más rápida
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Se deposita el material preciso para fabricar el objeto. Únicamente se desperdicia el de las estructuras soporte.
<b>Capacidad</b>	Amplia, desde fabricación de piezas pequeñas a reparación de otras de grandes dimensiones

### 2.5.11. Construcción

Aplicando el principio de las impresoras ya mencionadas como 3D-P, el inventor Enrico Dini crea en la empresa D-Shape. El área de trabajo es actualmente el más grande disponible, por este motivo es la primera máquina que construye edificios mediante un proceso capa a capa [4, 72-75].



**Figura 2.19.** Impresora D-Shape y algunas de sus posibles creaciones [72]



El material utilizado es arena con una serie de ligantes, y el adhesivo se deposita selectivamente en gotas, con base agua. El producto resultante después del fraguado presenta características mecánicas similares a mármol, con un agradable aspecto de vetas debido a las capas.

La diferencia principal con las impresoras 3D es que no utiliza cabezales de impresión estándar, sino que el curado selectivo se realiza de un solo paso mediante un brazo transversal que realiza un movimiento lineal de velocidad constante a lo largo de la cuba. En este brazo van alojadas tantas electroválvulas como píxeles de resolución se tengan. La precisión geométrica ronda los 10 mm y se trabaja en capas de entre 5 y 10 mm según la velocidad de construcción deseada. El material no consolidado actúa de soporte y, una vez terminado el fraguado, se puede retirar y reutilizar en otras construcciones.

Debido a las capacidades de esta tecnología, la Administración Espacial Europea (ESA) ha tomado interés en el uso de la impresora para construir bases lunares, porque la impresora puede construir la base en el lugar sin la intervención humana. Esto es ventajoso porque sólo tendría que ser llevada la máquina a la Luna, lo que reduce el costo de traer los materiales de construcción a la superficie lunar para crear las bases [75].

Por otro lado, en la construcción se están comenzando a incorporar otras tecnologías de las ya mencionadas, o derivadas de las mismas, para la construcción no solo de edificios, sino puentes y otras estructuras con materiales metálicos.

**Tabla 12.** Resumen de características principales en D-Shape

<b>Material</b>	Material: piedra, similar al mármol Estado del material y aportación: Lecho en polvo
<b>Principio</b>	(Energía química: adhesión)
<b>Soportes</b>	Necesario pero reutilizable
<b>Exactitud</b>	10 mm
<b>Rendimiento</b>	Alto. Espesores de capa grandes y velocidades medianamente elevadas
<b>Desperdicio y/o reciclaje</b>	Prácticamente nulo. El material no usado se reutiliza
<b>Capacidad</b>	Volúmenes grandes, varios metros en cada una de sus dimensiones

### 2.5.12. Tecnologías para materiales bio-orgánicos

Dentro de este apartado se hará distinción entre materiales para implantes (tejidos, órganos, etc) y alimentación. Por tanto, técnicamente este apartado va vinculado casi por completo a la medicina, abarcando dentro de la misma la odontología y la nutrición.

La medicina es el sector que hace más uso de estas tecnologías hoy en día, no solo para implantes sino para estudios y simulaciones (mediante prototipado), artefactos o útiles de cirugía, etc [3–5, 7–9]. Sin embargo, estas otras aplicaciones pueden ser incluidas en las tecnologías citadas anteriormente.

#### 2.5.12.1. Tejidos, implantes, huesos

La complejidad de formas de los distintos órganos del cuerpo humano, su singularidad y las a menudo urgentes necesidades de intervención son circunstancias que facilitan la aplicación del AM por delante de cualquier otro método de producción. Por ello, una de las prácticas que más se está extendiendo es la reproducción de partes (o totalidad) del cuerpo de un determinado paciente, a modo de prototipo, que permita al cirujano planificar a la perfección una compleja intervención quirúrgica. De uso ya habitual por ejemplo en traumatología, este tipo de aplicación reduce el riesgo de errores y cambios de planificación durante la propia operación, ya que el especialista ha podido ensayar antes de actuar sobre el paciente, y limita al mínimo el tiempo de exposición en el quirófano [4].

La ingeniería de tejidos, y la impresión final de órganos enteros o partes del cuerpo, es un área activa de investigación en todo el mundo [76–78]. Esta técnica es también conocida en algunos casos y para algunas aplicaciones como *3D Fiber Deposition*.

Estos procesos de AM han mejorado en su capacidad para procesar una gran variedad de materiales biocompatibles, por lo que también aumenta su variedad de aplicaciones. Desde su aplicación inicial de ser simplemente una ayuda visual para la planificación quirúrgica, ha crecido significativamente para incluir, entre otros, implantes ortopédicos y craneofaciales específicos o hechos para un paciente, guías para procedimientos quirúrgicos, ingeniería de tejidos, y sistemas de administración de fármacos para la administración farmacéutica. Sin embargo, los modelos anatómicos o médicos, siguen siendo la aplicación médica más comúnmente utilizada del proceso de 3DP. Estos modelos son réplicas físicas de fuerza con la anatomía de tejidos de los pacientes. Ayudan a los cirujanos a mejorar su planificación de procedimientos quirúrgicos complejos, lo que resulta en reducir tiempo quirúrgico y predicción más acertada de los resultados [3].

Actualmente se imprimen cantidad de órganos de animales, y vejigas para los seres humanos que se han diseñado a partir de las propias células madre del paciente []. También han utilizado la tecnología de impresión de inyección de tinta para imprimir las válvulas del corazón de ratones y están cerca de ser capaz de imprimir un riñón humano de trabajo.



**Figura 2.20.** La impresión Bio-orgánica da la capacidad de imprimir órganos, (a) implantes craneales, (b) implantes de huesos, entre otros [79, 80]

Varios investigadores han desarrollado diversos biomateriales utilizando el proceso de FDM para diversas aplicaciones en ingeniería biomédica. Los principales biomateriales utilizados en el proceso FDM incluyen PCL, PLGA, tereftalato de polibutileno (PBT), fosfato ácido / tricálcico poliláctico (PLA / TCP), PP / TCP, PCL / TCP, PCL / vidrio bioactivo (BAG), PCL / CaP, y polimetilmetacrilato (PMMA) [3].

Uno de los temas más estudiados y con más publicaciones a día de hoy, es la capacidad de generar una estructura porosa y uniforme mediante la manipulación de los parámetros del proceso FDM, que han hecho que el proceso sea altamente atractivo para generar estructuras de biomateriales. Tales estructuras son altamente deseables para dirigir la proliferación, crecimiento y desarrollo de las células.

Por otro lado se ha estudiado la morfología, la porosidad y propiedades de compresión de los huesos de diferentes tamaños, así como la respuesta celular a los implantes de los mismos [56–59]. También se han utilizado técnicas de Fabricación Aditiva para implantes de oído, la reconstrucción de defectos craneales muy complejos y delicados [79, 80]. Etc. Uno de los últimos avances ha sido la cura de la traqueobroncomalacia mediante la fabricación de unos dispositivos que tienden a cambiar de forma con el tiempo, y por tanto a adaptarse al crecimiento y desarrollo de un paciente.

Otras tecnologías aditivas han sido y son estudiadas en estos tipos de materiales (SLS, 3D-P, Inkjet, Polyjet, etc), pero casi siempre son leves variantes de las mismas, únicamente por el hecho del material con el que se trabaja.

### 2.5.12.2. Alimentación y nutrición

Existen proyectos actualmente de elaboración de una cadena alimenticia personalizada para las personas mayores en hogares de ancianos, hospitales, instalaciones de vida asistida o incluso en casa (servido por los servicios de enfermería). Este grupo de personas requiere de una cuidadosa suministración de determinados alimentos debido a su estado nutricional y de salud. Como resultado se obtiene una fabricación automática suministro de la nutrición personalizada, enfocando al alimento especialmente a la textura y apariencia [3–5, 82–85].

Además de esto, se utiliza esta idea de Fabricación Aditiva en la “nueva cocina” para dar distinción a los productos. En estos casos lo que importa no es los nutrientes, pero si la textura y apariencia como en el caso anterior. Existen hoy en día restaurantes dedicados a cocina creativa con estas tecnologías.



**Figura 2.21.** Ejemplos de Fabricación Aditiva aplicada a la alimentación: (a) nutrición controlada [4, 83]; (b) apariencia y textura controladas [83–84].

## 2.6. Criterios de clasificación para la Fabricación Aditiva

Existen diversas posibilidades para clasificar la multitud de procesos que existen dentro de esta tecnología atendiendo a diferentes criterios, aunque todos ellos presentan la misma idea inicial. En este apartado se procede a analizar las diferentes clasificaciones que pueden utilizarse según criterio de cada autor o según el interés de un posible fabricante o cliente. De este modo, y con carácter subjetivo, no todas las clasificaciones mencionadas posteriormente serán igual de acertadas y útiles. Algunas de ellas en principio parecen estar relacionadas, pero es conveniente establecer una distinción entre las mismas.

Además de las clasificaciones mencionadas a continuación, la mayoría de las publicaciones clasifican estas tecnologías sin establecer criterio alguno, sino una mezcla de los expuestos según interesa [3–5, 7, 8]. Esto ha surgido debido a que algunas personas establecieron en los comienzos de estas tecnologías ciertas clasificaciones en base a ningún criterio y que se han ido extendiendo. En algunos casos, estas clasificaciones ayudan a adquirir una idea más clara en una primera toma de contacto con estas tecnologías. Un ejemplo de una clasificación bastante utilizada sin criterio es la que se muestra a continuación en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Ejemplo de clasificación de los procesos de Fabricación Aditiva [5, 27, 86].

Tipo de proceso	Definición de la técnica	Tecnologías de ejemplo	Material
Fotopolimerización	Fotopolímero líquido dispuesto en un tanque se cura selectivamente mediante polimerización activada por luz.	SLA ( <i>Stereolithography</i> ), DLP ( <i>Direct Light Processing</i> )	Polímeros y cerámicas
Chorro de material ( <i>Material Jetting</i> )	El material de construcción se deposita de forma selectiva como pequeñas gotas.	Inkjet modelling	Polímeros y composites
Chorro de aglutinante (Binder Jetting)	Adhesivo líquido se deposita selectivamente para unir a materiales dispuestos en polvo.	Inkjet modelling, 3DP ( <i>3D Printing</i> )	Metales, polímeros y cerámicas
Extrusión ( <i>Material extrusion</i> )	El material se deposita selectivamente a través de una boquilla u orificio.	FDM ( <i>Fused Deposition Modelling</i> )	Polímeros
Fusión de lecho en polvo ( <i>Powder Bed Fusion</i> )	Mediante energía térmica se fusiona selectivamente zonas de un lecho de polvo.	SLS ( <i>Selective laser sintering</i> ), SLM ( <i>Selective laser melting</i> ), EBM ( <i>electron beam melting</i> )	Metales, polímeros, composites y cerámicas
Laminación de chapas ( <i>Sheet Lamination</i> )	Láminas de material se unen para formar un objeto.	UC ( <i>Ultrasonic Consolidation</i> )	Metales, cerámicas e híbridos
Deposición mediante energía dirigida (Directed Energy Deposition)	La energía térmica se localiza y fusiona materiales fundiendo a medida que se deposita el material.	LMD ( <i>Laser metal deposition</i> )	Metales y metales híbridos

### 2.6.1. Estado del material

El primer criterio de clasificación y a su vez uno de los más utilizados, es el estado material que va a conformar el producto [3]. De este modo estos procesos se clasificarían en, Figura 2.22:

- Tecnologías basadas en polvo. Se parte de materia prima en estado sólido pulverizado. Utilizadas para materiales metálicos, cerámicos, plásticos policristalinos, etc.
- Tecnologías basadas en líquido. La materia prima en este caso viene dispuesta en estado líquido. Utilizadas para resinas foto-curables, cera fundida, tintas rellenas, agua, etc.
- Tecnologías basadas en sólido. En este caso pueden generarse dudas, puesto que este material en estado sólido se calienta en algunos casos para ser inyectado o extrusionado. Utilizadas para chapas de metal, chapas de plástico, papel y alambres de plástico amorfos.

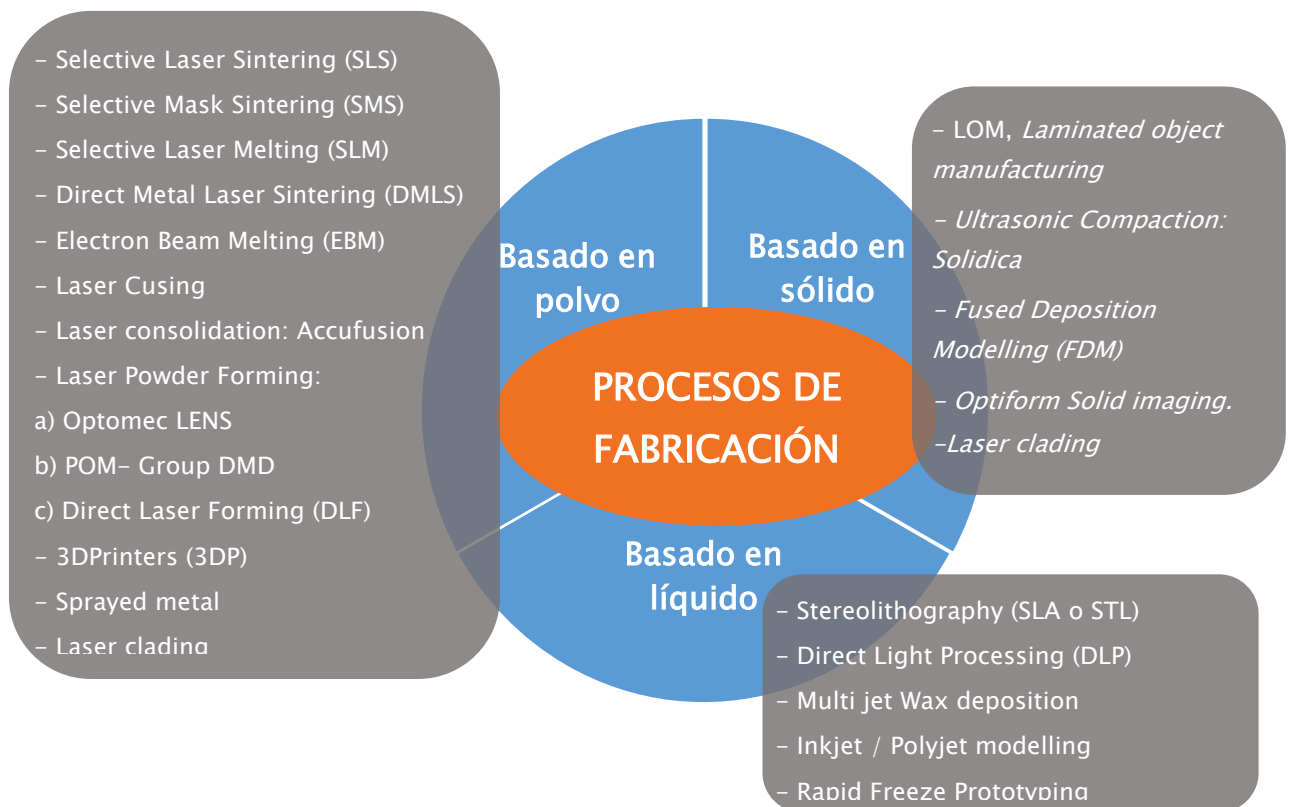


Figura 2.22. Clasificación de tecnologías de Fabricación Aditiva según el criterio del estado del material que se utiliza.

### 2.6.2. Modo de aporte de material

Otra forma de poder llevar a cabo esta clasificación es desde el punto de vista de cómo se lleva a cabo el aporte del material. El resultado no difiere en gran medida de la clasificación anterior, pero no coinciden en todos los casos, ya que, por ejemplo, no porque el estado del material de aportación sea polvo significa que deba fabricarse sobre un lecho del mismo.

Esta clasificación no abarcaría por completo todas las técnicas, ya que existen multitud de variantes de muchas de ellas y en la mayoría de los casos, el modo de aporte de material puede verse modificado. No obstante se incluye como posibilidad de catalogar esta variedad de procesos.

- Lecho de polvo. Algunas de las técnicas que se incluyen en este grupo son SLS, EBM, 3DP, etc.
- Lecho líquido. Este grupo abarca principalmente la SLA y la multitud de variantes de la misma que existen.
- Inyección. La técnica más expandida en la actualidad, el FDM, pertenece a esta categoría.
- Boquilla. Por ejemplo el Laser Cladding, también llamado *Direct Laser Forming*, se incluye en este grupo.
- Adición de láminas. La LOM y la compactación ultrasónica son propias de esta categoría.

### 2.6.3. Energía aportada

En esta clasificación se combinan en cierto modo dos aspectos: la aportación de energía y del material.

El aporte de energía es de gran importancia, ya que tras la fabricación de una capa se lleva a cabo una segunda, y así sucesivamente, hasta acabar la pieza por completo. Esas capas han de estar sólidamente unidas, ya que las características mecánicas de la pieza dependen en gran medida de ello. Además, la calidad final también está estrechamente relacionada con este aporte energético, así como otro tipo de características como la porosidad, la resistencia eléctrica, etc.

Este aporte de energía se suele realizar de dos formas diferentes: mediante calor, que permite la fusión de metales y termoplásticos así como la polimerización de ciertos plásticos, o mediante radiación ultravioleta, con lo que se consigue un proceso de curado de materiales fotosensibles (generalmente polímeros).

Podrían considerarse más categorías, por ejemplo, mediante unión química o adhesiva (*Binder jetting*), como en el caso de las impresoras 3D (3DP). Sin embargo, para este criterio de clasificación y en la bibliografía utilizada, solo se incluyen los dos grupos citados anteriormente (calor o radiación).

Esta clasificación está combinada en cierto modo con la anterior, desde el punto de vista de cómo se lleva a cabo el aporte del material. Es decir, el tamaño, cantidad o superficie de material que se va aportando. De este modo, los procesos quedarían clasificados en:

- Aportación por punto (0D). El material en este caso se aporta punto a punto. Se podría asemejar a un plotter; el mecanismo que aporta el material se mueve gracias a un sistema de dos ejes que se desplaza en la zona de trabajo, pudiendo describir trayectorias rectas o curvas en un plano XY.
- Aportación en línea (1D). Estos sistemas van aportando el material en líneas o conjuntos de puntos alineados gracias a inyectores con múltiples canales. El aplicador efectúa barridos a lo largo de la zona de trabajo depositando material donde se requiere (selectivamente) gracias a la coordinación de esa multitud de canales que funcionan independientemente.
- Aportación sobre lecho (2D). En este caso, se trata de una aportación de material en exceso, es decir, se añade material en una cantidad igual al espesor de capa que rellena toda la superficie de trabajo para, posteriormente, ser consolidado únicamente en las partes requeridas (sección de la pieza). Estos sistemas disponen de un elemento que barre (*Recoater*), que puede variar siendo una cuchilla, una tolva, un rodillo, etc, gracias al cual se aportan y alisan las capas de material. Son denominados habitualmente sistemas de lecho completo.
- Aportación en láminas (3D). Este grupo abarca aquellas técnicas en las que el material se aporta en estado sólido y en formato de láminas, que se van cortando y pegando sucesivamente hasta completar el sólido a fabricar. Es

Este tipo de clasificación ayuda a saber el tiempo que tarda en fabricarse una pieza. De esta manera, los procesos de aportación punto a punto serán más lentos que los de aportación en línea, y éstos a su vez que los de aportación sobre lecho.

El coste de una máquina de AM está directamente relacionado con la fuente de energía a utilizar así como con los sistemas de posicionamiento y aporte (energía-tiempo); y a su vez, el coste del producto se ve altamente influenciado por esta energía consumida, cosa que no se tiene muy en cuenta a la hora de valorar los procesos [3-5, 32-35].

De este modo esta clasificación quedaría resumida tal y como aparece en la tabla x.



**Tabla 14.** Clasificación de los procesos de AM según la energía y el modo de aportación.

		Aporte de material		
		Punto	Línea	Lecho
Aporte de energía	Punto (0D)	FDM, laser cladding	-	SLA, SLS, EBM, DMLS (SLM, laser cusing)
	Línea (1D)	-	Polyjet	3DP, MLS
	Capa (2D)	-	-	DLP, SMS

#### 2.6.4. Propósito de las piezas fabricadas

Una clasificación de gran interés puede ser también aquella que valora el propósito de las piezas que se fabrican, es decir, la aplicación a la que están destinadas. En esta clasificación quedarían diferenciados:

- Los procesos destinados a la realización de moldes, insertos y matrices (*RC o Rapid Casting*).
- Los procesos destinados a realizar prototipos, ya sean únicamente conceptuales como funcionales (*RP o Rapid Prototyping*).
- Los procesos destinados a productos finalizados (*RM o Rapid Manufacturing*).
- Los procesos destinados a la realización de punzones o cavidades para máquinas (*RT o Rapid Tooling*).
- Los procesos destinados a la reparación de piezas complejas.
- Los procesos destinados a la personalización de productos.

En realidad esta clasificación, aunque muy usada, genera posibles confusiones, ya que algunos métodos normalmente se trasladan de un grupo a otro. Esto es debido principalmente a que la precisión y el acabado no dependen de la tecnología, sino de la propia máquina seleccionada, el material utilizado y los parámetros establecidos para la fabricación.

#### 2.6.5. Naturaleza del material

Otro de los posibles criterios de clasificación es la naturaleza del material empleado. Aunque esté relacionado con la primera clasificación, en este caso quedan algunas técnicas repetidas en los diferentes tipos. Este criterio es menos utilizado por este mismo motivo, pero es más interesante y práctico a la hora de analizar, puesto lo que interesa al fabricar, es el material que se utiliza, no en el estado en el que se conforma.

Atendiendo a este criterio, los distintos procesos de Fabricación Aditiva pueden clasificarse en:

- Tecnologías para materiales metálicos. Generalmente parten de polvo metálico. Se pueden utilizar para cualquier metal que se pueda “pulverizar”. Son las más utilizadas actualmente en proyectos industriales.
  - o Polvos predepositados
  - o Inyección del material
- Tecnologías para materiales poliméricos y cerámicos. Existe una amplia gama de materiales en este campo. Se pueden fabricar materiales con las propiedades casi a medida que se necesiten.
  - o Polvos predepositados
  - o Extrusión del material
- Tecnologías para materiales bio-orgánicos. Estas abarcarían también materiales de muy distinto tipo, desde productos comestibles, hasta incluso tejido orgánico.

## 2.7. Ventajas de la Fabricación Aditiva

Existen numerosas ventajas en el uso de estas tecnologías, dependiendo el uso al que estén destinadas. Entre todas ellas se pueden encontrar [3-8]:

- La creación de geometrías muy complejas, prácticamente imposibles de obtener mediante otros procesos de fabricación, como pueden ser la creación de paredes muy delgadas, o características complejas en el interior de algunas piezas (canales de refrigeración en la industria del molde, ángulos interiores sin redondeo, etc).
- Reducciones de peso en productos gracias al diseño de estructuras internas tipo celosía.
- Reducción de las restricciones de diseño, como pueden ser los radios de acuerdo, ángulos de salida, etc. Esto permite optimizar ciertas propiedades del elemento.
- Flexibilidad. Solo se necesita el Modelo Virtual para su creación física. Aun así, existen programas tipo CAM para la mejora de los parámetros de fabricación y a su vez de los resultados, sin embargo hay un amplio campo de estudio y mejora de los mismos.
- Integración de varios componentes en uno solo, de manera que se eliminan operaciones posteriores. Esto significa eliminaciones de montaje, soldadura, elementos de unión, etc, es decir, disminuye el peso y tiempos de fabricación del componente.
- Disminución de las operaciones de acabado. Existen técnicas hoy en día que otorgan acabados tan buenos como los procesos de eliminación de material. Además, estas tecnologías relativamente nuevas tienen mucho por mejorar en este aspecto en relación con la modificación de los parámetros como pueden ser principalmente velocidad y temperatura.

- Reducción de contaminación. Las técnicas de AM no usan directamente productos químicos tóxicos en cantidades perjudiciales. Sin bien hay que tener en cuenta los post-tratamientos, los gases desprendidos o la utilización de EPIS en el caso de tecnologías de polvo, ya que la inhalación de los mismos puede ser perjudicial para la salud.
- Libertad de uso de materiales que se adapten a los requerimientos de la aplicación. Aunque no todos los materiales pueden ser usados en todas las tecnologías o no son capaces de otorgar los mismos resultados, actualmente existe una amplia gama de ellos tanto metálicos, como poliméricos, e incluso bio-orgánicos.

## 2.8. Inconvenientes y limitaciones de la Fabricación Aditiva

El principal impedimento en el desarrollo acelerado de estas tecnologías es la falta de conocimiento de lo que AM puede ofrecer. Hay poco conocimiento en general de estas tecnologías. La verdadera absorción de la AM tiene que ser impulsada por los tomadores de decisiones en las empresas y por los ingenieros y diseñadores que trabajan en la cadena de producción, que deben conocer bien estas tecnologías para poder tenerlas en cuenta a la hora de sustituir o mejorar ciertos procesos productivos.

El modo de pensar en términos de desarrollo y producción de estos procesos es necesario instaurarlo desde un nivel universitario, tal y como se explican procesos de mecanizado y conformado de material.

El resto de inconvenientes son derivados del primero. La falta de conocimiento de estas tecnologías ha provocado un desarrollo o mejora inicial lenta en sus orígenes. Por consecuente, aun son técnicas con mucha capacidad de mejora en cuanto a tiempos, calidades y costes. Como se ha mencionado, en estos últimos años parece aumentar este proceso de mejora de un modo más acelerado.

Inconvenientes más específicos deben considerarse en cada técnica en particular, sin embargo, a continuación se muestran algunos comunes:

- Disponibilidad y coste de materiales. Existe una amplia gama de productos tanto metálicos como no metálicos para utilizar en técnicas AM, sin embargo la gama disponible es muy inferior a la que se puede trabajar por procesos de fabricación por eliminación o conformado de material. Además, el coste de abastecimiento por unidad de medida suele ser también bastante superior, aunque es cierto que no se desperdicia apenas material. Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales. A su vez, existe una baja demanda, que no justifica las inversiones necesarias en los productores de nuevos materiales, y que favorece al alto coste unitario que se aleja del aumento del consumo.

Disponer de nuevos materiales que satisfagan requisitos concretos de la industria y los consumidores es un aspecto crítico para el futuro desarrollo del AM.

- Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación. Estos aspectos se presentan juntos, pues el aumento de la velocidad (y temperatura) de fabricación condiciona la calidad del acabado superficial. Estos son retos a corto plazo, ya que podría llegar a competir con procesos de fabricación convencionales. Las piezas son fabricadas por adición de capas, y este efecto se observa irremediablemente en la superficie. La principal mejora de esta característica consiste en la reducción del espesor de la capa, lo que tiene una influencia directa en el tiempo de fabricación final.
- Tamaño limitado de piezas. El tamaño o volumen de pieza se encuentra aún muy limitado. Existen límites según la tecnología-máquina. El volumen máximo es más subsanable y fácilmente ampliable en la mayoría de las técnicas existentes, sin embargo, existe también un límite inferior para las piezas más pequeñas que se pueden fabricar y está condicionado por parámetros como:
  - Tamaño del material. Ya sea tamaño de partículas en polvo o diámetro de hilo.
  - Diámetro o “*spot*” mínimo que es capaz de procesar las tecnologías láser. El detalle mínimo alcanzable estará en torno a 1.5 y 2 veces el diámetro del mismo.
  - Espesor de capa. No se debe confundir con el tamaño del material.
- Coste de la maquinaria. Análogamente al coste de la materia prima, el coste de la maquinaria supone una barrera de entrada en la mayoría de las tecnologías. No obstante, los precios varían mucho principalmente en base a la tecnología y material utilizados. Pueden oscilar desde unos 300 € que puede costar una pequeña impresora 3D de FDM, hasta máquinas de más de un millón de euros. Dentro de un mismo proceso de AM, también influye la calidad (y resolución) que se requiere para cada caso. La tendencia es que esta maquinaria, como ha ocurrido en los demás procesos de fabricación e incluso con otras tecnologías, vayan reduciendo su coste paralelamente a la introducción de las mismas en la industria y se alcancen economías de escala.

Para la Fabricación Aditiva, fundamentalmente en materiales metálicos, el factor que más influye en el coste de las piezas fabricadas es precisamente el precio/máquina que hay que repercutir en la fabricación de cada unidad. Estudios realizados demuestran que el material puede suponer únicamente entre el 5 y el 25 % del coste real de la pieza, siendo el resto coste de procesado. En este cálculo afecta notablemente la baja velocidad del proceso de deposición de capas, que hace que la productividad por pieza sea pequeña y, en consecuencia, el coste/máquina por pieza, muy alto.

- Desconocimiento de la dinámica del proceso. Ya no referido a la diversidad de procesos que existen y de materiales aptos para ello, sino a los parámetros que afectan directamente en la fabricación, especialmente en piezas metálicas. Son escasos los trabajos de investigación, desconociéndose por ejemplo, uno de los objetivos de dicho trabajo que son las relaciones de la calidad con la temperatura y velocidad, u otros como la relación del aporte de calor y disipación del mismo, etc.

La principal causa de muchos defectos en estas tecnologías radica en la aportación de calor necesario para el proceso y en su evacuación. La disipación del mismo se trasmite a la atmosfera pero gran parte permanece en la pieza. Por ello, muchas veces es preciso uso de soportes aun no haciendo falta por la propia geometría, así el calor focalizado se transmite al resto de la pieza, bien a través de los soportes hacia la plataforma o bien al polvo circundante.

Los calentamientos y enfriamientos bruscos y cíclicos en distintas geometrías de la pieza en construcción generan reacciones incontroladas y distintas en cada caso durante el proceso de fabricación, situaciones que a priori no se pueden predecir. Por ello, cada vez resulta más necesario el estudio de estos cambios, motivación principal del experimental de este trabajo. El objetivo es determinar y establecer las relaciones entre todos los parámetros, para así poder prever las consecuencias que la temperatura de la pieza, los soportes, la plataforma, las tensiones y sus dilataciones durante la fabricación tienen en las deformaciones y dimensiones finales y calidad superficial de la pieza. Este conocimiento podrá llevar incluso a introducir modificaciones en el diseño, de forma que se corrijan las desviaciones durante el proceso de fabricación y la pieza final corresponda a lo deseado.

El inconveniente en el diseño está relacionado con que la mayoría de los programas actuales CAD no están pensados para programas de adición sino de sustracción de material. Es decir, la verdadera innovación y distinción que se puede obtener con estos procesos no está adaptada en la gran mayoría de estos programas. Por ejemplo, la porosidad y/o densidad gradual de un sólido no está totalmente resuelta. Además, los programas de simulación y análisis actual llevan a cabo su actividad bajo la hipótesis de materiales homogéneos, no siendo este el caso para productos fabricados por capas, al presentar distintos comportamientos según el eje de construcción x,y,z (anisotropía) y posibilitar la fabricación de piezas con distintos gradientes de material.

## **2.9. Consideraciones ambientales y ergonómicas**

Hay algunos aspectos ambientales a tener en cuenta para las tecnologías de AM. Estas tecnologías pueden reducir el consumo de materiales, pero eso no significa que sean tecnologías de cero residuos.

Por ejemplo, existen desperdicios de material, tales como estructuras de apoyo. Además, con las máquinas de materiales poliméricos existe la necesidad de renovar el material, y existen tasas de reciclaje limitados.

Por tanto, la idea de que la tecnología es totalmente verde y limpia, sobre todo en la fase de fabricación, no es correcta en todos los casos [5, 87].

En otros casos, el material puede desprender en su conformación, gases perjudiciales para la salud.

Para el caso de tecnologías en polvo, se deben tomar precauciones con la inhalación de los mismos.

También debe tenerse en consideración, las máquinas que curan con luz ultravioleta (fotopolimerización), que deben mantenerse herméticas sin emitir radiación al entorno donde pueda haber operarios.

Un aspecto a tener en cuenta en la ergonomía, es el ruido emitido por este tipo de máquinas. Aunque no supera el límite por normativa, suelen ser molestos, como el ruido continuo de un robot.

En definitiva y sin lugar a dudas, AM ofrece la posibilidad de cambiar la esencia misma de diseño y fabricación, a partir de los procesos de montaje y transformación a la de síntesis de materiales avanzados en el producto final. Esta síntesis directa de materiales hace disminuir los residuos y tiene potencial de mejorar el rendimiento y la fiabilidad del producto. Sin embargo, se debe hacer un esfuerzo entre los ingenieros de control de procesos, diseñadores y especialistas en medio ambiente para llegar a la comprensión fundamental de los impactos ambientales posibles de AM, cambiar el diseño si es preciso, evaluar el grado en que podrían producirse, definir su distribución, y establecer los reglamentos que permitirán el control y la prevención del daño, así como estimar los costos para hacer frente a ellos [87-88].

## **2.10. Estandarización y regulación**

Existe una gran carencia de estandarización en este tipo de procesos. Esto es debido a que existe una falta de esfuerzos de normalización en la coordinación y la alineación con entre los avances en procesos, máquinas, materiales, ensayos, etc, existentes en la UE y en Estados Unidos.

El desarrollo de las normas está aún muy limitado, existiendo solamente muchos procedimientos (de programas de investigación o propias de empresas) sobre ciertas prestaciones que podrían ser transferidos para ayudar al desarrollo y estandarización de estas tecnologías [89].

Las regulaciones médicas y de los derechos de protección de los consumidores, tienen un efecto en la innovación y el desarrollo en el mañana, y por eso surge esta necesidad de estudiar estas tecnologías en detalle. Por ejemplo, en el sector médico no son críticos, y ciertos pacientes que podrían ser tratados fácilmente con soluciones de AM no pueden serlo debido a que la legislación necesita mucho tiempo para tener la certificación de un producto [4, 89–91].

Por tanto, existe un déficit de condiciones enumeradas a continuación:

- No existen pautas y normas para el marcado CE y el cumplimiento de los componentes fabricados por tecnologías AM.
- Es necesario mejorar la legislación para la certificación de productos.
- Se debe concentrar los esfuerzos del proceso de fabricación en el control de calidad (pruebas, medición, control de calidad), así como el procesamiento posterior.
- Establecer la calidad del material y los parámetros que están optimizados y adaptados para cada proceso–máquina, puesto que están aún muy lejos de los reales (poca experimentación).
- Se deben coordinar y alinear todos los esfuerzos de normalización con los ya existentes de la UE y de Estados Unidos.
- Hay que tener en consideración la regulación y normalización que pueden obstaculizar la innovación (IP, derechos de autor, protección de la patente, compromiso de responsabilidad con el cliente, etc)
- Control de seguridad y salud de la producción de materiales y procesos.

Las normas que se aplican actualmente en relación con otros procesos de fabricación (mecanizado, soldadura, fundición, etc.) o materiales (metales, plásticos, cerámica) no siempre son adecuados para las tecnologías de AM. La Fabricación Aditiva, que implica diferentes tecnologías, tiene características en materiales particulares, parámetros y operaciones que tienen gran influencia en la calidad y las propiedades de la pieza final [88–90].

Existe aún menos estandarización para los materiales metálicos construidos por AM que para los plásticos. Además, se debe saber que la mayoría de las pruebas no se corresponden necesariamente a una norma oficial (Organización Internacional de Normalización (ISO), ASTM, Deutsches Institut für Normung (DIN), etc.). De hecho, las empresas normalmente utilizan sus propias pruebas y, en algunos casos, la norma ni siquiera se menciona en la información proporcionada.

Algunos organismos nacionales o entidades de normalización han desarrollado sus propias normas, pero el principal esfuerzo por esta mejora se está llevando a cabo a nivel internacional (ASTM, ISO). Algunos ejemplos de normas AM aprobados a nivel nacional se muestran en la Tabla 15.

Existen comités sobre tecnologías de Fabricación Aditiva, los cuales a su vez están constituidos por varios subcomités:

- El comité ASTM F42 sobre tecnologías AM se formó en 2009. Está formado por aproximadamente 100 expertos principalmente de Estados Unidos y Europa. Su objetivo es la promoción del conocimiento, la estimulación de la investigación y la aplicación de la tecnología a través de la elaboración de normas para las tecnologías de AM.
- El comité ISO TC 261 sobre tecnologías AM fue fundado en 2011. Este comité está formado por 16 países participantes y cinco países observadores.

**Tabla 15.** Algunos ejemplos de las normas aprobadas por las organizaciones nacionales

Organización	Norma
AFNOR (Francia)	NFE 67-001:2011 (vocabulario) XPE 67-010:2012 (especificaciones polvo) XPE 67-030: 2013 (especificaciones y condiciones de aceptación)
AENOR (España)	UNE 116005:2012 (especímenes de ensayo para plásticos)
VDI/DIN (Alemania)	VDI 3404: fabricación aditiva, tecnologías rápidas (prototipado rápido), fundamentos, términos y definiciones, parámetros de calidad, acuerdo de suministro

El objetivo de estos comités es proporcionar una normalización en el campo de la AM en relación con los procesos, los términos relacionados y definiciones, las cadenas de procesos (hardware y software), los procedimientos de prueba, los materiales, los parámetros de calidad, y todo tipo de fundamentos.

A partir de estos comités ISO TC, la norma aprobada hasta ahora ha sido la norma [92]. No obstante, en colaboración con la norma ASTM, han sido aprobadas 2 normas por medio de la vía rápida, y existen otras en curso y proceso de aceptación.

## 2.11. Costes de estas tecnologías

El cálculo de costes, como para cualquier otra tecnología, sigue siendo complejo, teniendo que atender a distintos conceptos. Para determinar de forma correcta el coste real de una pieza fabricada con tecnologías AM se debe tener en cuenta en principio los siguientes fundamentos que seguidamente se relacionan:



- Coste del material. El material empleado en estas tecnologías, aun siendo similar o con características semejantes que el utilizado en procesos convencionales, es más caro, a falta de que se consigan economías de escala que los abaraten. No obstante, la tecnología AM evita o minimiza en gran medida el desperdicio de material, por lo que en ocasiones el balance puede ser favorable. En la mayoría de los casos no es así, puesto que el coste del material puede aumentar hasta 20 veces, por ejemplo para el caso de polvos pre-depositados frente a un tocho de metal del mismo peso.
- Coste de amortización de la maquinaria. Las máquinas, al igual que los materiales, siguen siendo muy costosas, y a mayor precisión se elevan exponencialmente dichos costes. Además, la mayoría de ellos, por no decir todos, tienen cantidad de fungibles que deben ser reemplazados debido a su continuo desgaste. El nivel de uso de estas máquinas debe superar el 80%, ya que el coste máquina suele superar el 60% del coste final del producto [3-5, 7, 8].
- Coste del personal. El personal dedicado debe tener gran experiencia y especialización para atinar con la correcta estrategia de fabricación, con la ubicación en la plataforma y la programación de parámetros adecuados, así como en las operaciones de pos-proceso requeridas en el acabado. Durante la fase de construcción en la máquina no es necesaria ninguna operación, por lo que, en comparación con los procesos convencionales, se necesita menos mano de obra, pudiendo aprovechar turnos de noche y jornadas no laborables, de forma que las máquinas trabajen en modo desatendido. Sin embargo, un error durante el proceso, desecha automáticamente el proceso, normalmente no pudiendo ser reparado y teniendo que comenzar la fabricación. El coste de personal por tanto, sería bastante inferior en relación a otros procesos, ya que contaría casi únicamente con el diseñador y alguien de mantenimiento.
- Coste de la tecnología periférica. La máquina y material no son los únicos elementos necesarios para utilizar dichas tecnologías, sino que es preciso el manejo de programas de diseño para crear los ficheros digitales (Modelos Virtuales) asegurando su coherencia, lo que incluye coste de software y personal cualificado. A su vez, es preciso disponer de maquinaria de pos-procesado, para poder retirar soportes o la placa base, mejorar suavizados o acabados superficiales, infiltrar ciertos materiales, etc.
- Costes indirectos. Estos son comunes a otras tecnologías, entre ellos se pueden encontrar los gastos de formación del personal, el consumo de energía, los costes de no calidad o inutilidades, los gastos generales asociados, etc. La variable clave en el proceso es el tiempo de fabricación, por lo que la imputación de estos costes indirectos debe ser proporcional al número de horas de trabajo, al igual que en los demás procesos de fabricación tanto convencionales como no.

A pesar de todo esto, y de que podrían ser comparados con un método tradicional, hay que tener en cuenta el valor añadido al producto en temas de diseño, mejora y avance en la viabilidad técnica, es decir, la disminución de pesos, la reducción de tiempos y componentes de montaje, homologaciones, etc. Por este motivo, no hay que hacer una evaluación económica concretamente, sino una visión más en profundidad de los resultados generales que otorga el producto.

Este es el principal impedimento de la expansión de estas tecnologías, no se ha aprendido a medir tanto su viabilidad técnica como la económica. Algunos sectores sí que han sabido explotar las ventajas que esta tecnología aporta, como el dental o la cirugía personalizada, pero se trata de sectores donde el coste no suele ser un factor limitante, al ser negocios de muy alto valor añadido.

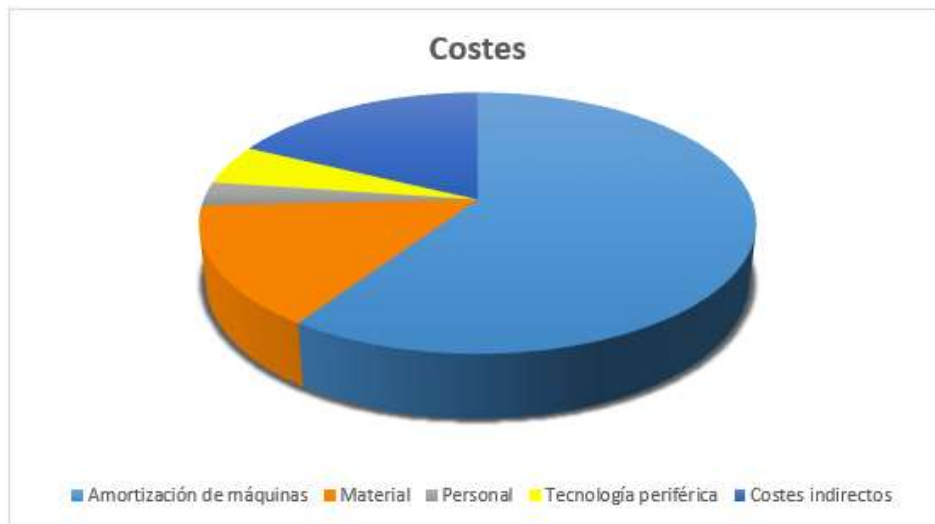


Figura 2.23. Esquema de costes, en % aproximado, influyentes en dichas tecnologías.

En algunas publicaciones se han hecho varias comparativas de coste frente a procesos de inyección de plásticos. En el caso de la inyección, es necesario la fabricación previa de un molde, que repercute de manera importante en el coste unitario de las piezas para volúmenes bajos de producción. Si esta cantidad de elementos fabricados aumenta, el coste unitario se reduce de manera exponencial, hasta llegar un momento en el que el coste del molde apenas afecta al coste del material y de la operación completa. Totalmente opuesto a esto se encuentran los procesos de Fabricación Aditiva, en los que el coste por pieza es independiente a la demanda, o lo que es lo mismo, se mantiene prácticamente constante. En la siguiente Figura 2.24 se puede observar que hay un punto que hay que calcular, que representa la cantidad  $Q$  a partir de la cual es más rentable fabricar por inyección que por técnicas de AM.

Por tanto, para pequeños lotes de productos, u otros que sean muy novedosos sin conocerse la aceptación que pueden tener en el mercado, es muy aconsejable el uso de estas tecnologías, no solo para prototipos conceptuales, sino también para funcionales.

Como se ha dicho, esto es solo teniendo en cuenta la rentabilidad económica. Si además se tienen en cuenta el factor funcional y los tiempos, estas tecnologías deben ser estudiadas en muchos más ámbitos para comprobar la rentabilidad que otorgan.

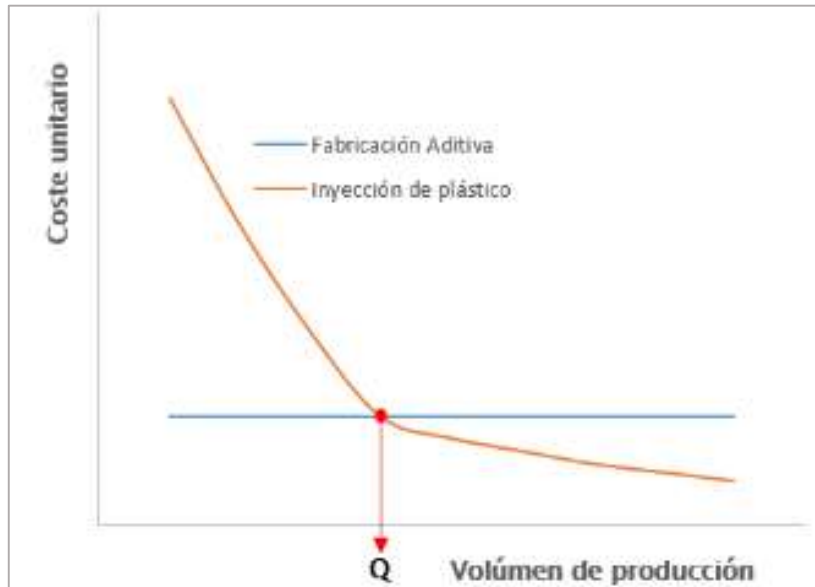


Figura 2.24. Comparativa coste unitario por inyección frente a AM [3]

## 2.12. Aplicaciones

Existe una amplia gama de aplicaciones para estas tecnologías, dependiendo del proceso, material y parámetros escogidos. Se puede emplear para recubrir objetos, para reparar zonas de piezas dañadas, para añadir material con características especiales en una zona, para crear prototipos, o directamente para crear piezas desde cero.

Sobre todo, estas tecnologías se utilizan en sectores donde es importante el valor añadido al producto, la personalización, productos difícilmente (o imposibles) de obtener mediante otros procesos o en la iniciación de un elemento novedoso en el mercado. Las principales áreas que usan estas tecnologías quedan reflejadas en la Figura 2.25.



Figura 2.25. Porcentaje de sectores que usan actualmente AM [3].

Varios estudios han identificado que los siguientes mercados son los más atractivos para la Fabricación Aditiva [3, 23, 92]:

- Medicina. La industria médica abarca aproximadamente el 23% de todo el uso de estas tecnologías, es por tanto el sector que aprovecha más las ventajas de estas tecnologías. Implantes médicos de titanio o polímeros personalizados y cerámica inteligente, órganos artificiales, productos ortopédicos, hueso bio-activo, estructuras para favorecer el crecimiento de los tejidos de la piel, como también herramientas quirúrgicas, son ejemplos de elementos fabricados actualmente con estas tecnologías.

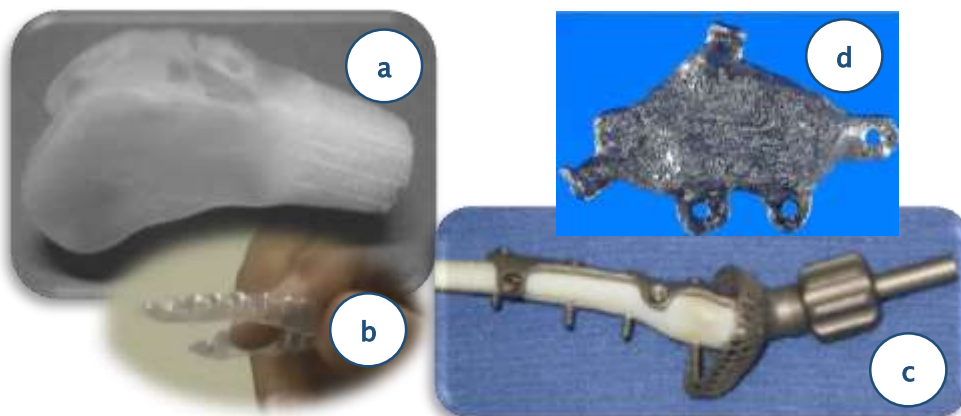
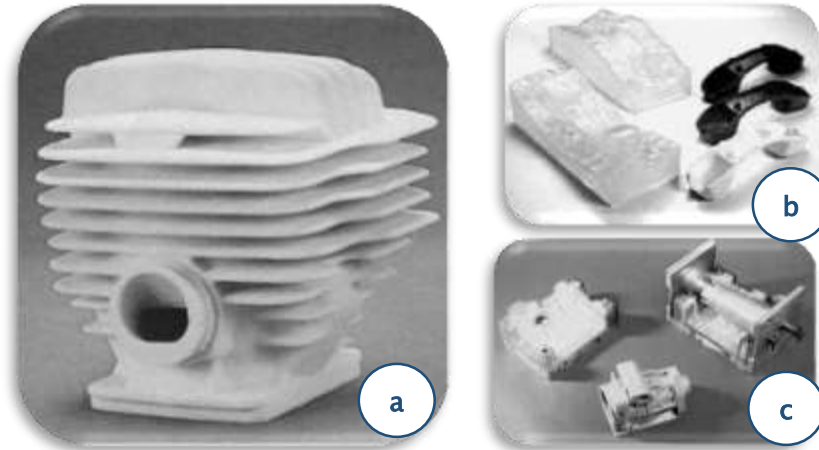


Figura 2.26. Ejemplo de aplicaciones médicas y dentales: (a) molde para hueso poroso, aparato dental [77]; o veterinarias: (c) radio polimérico y (d) mandíbula de titanio (SLS) [94].

- Moldes y matrices. También conocido como *Rapid Tooling*. En este sector destaca por su facilidad de realizar canales de refrigeración internos y con geometrías libres, moldes híbridos, etc. En ocasiones no se utiliza la tecnología para fabricar el molde en su totalidad, sino que se aplica a algunas zonas, insertos, puesto que de otra manera su fabricación sería muy compleja o el plazo no sería competitivo.



**Figura 2.27.** Rapid Tooling aplicado a diferentes sectores: (a) molde de fundición para una culata, (b) moldes de silicona, (c) molde epoxi para fundición de cera [95]

- Arquitectura: fabricación de maquetas prototipos. Aunque supone un coste más elevado que con el uso de otras tecnologías, es mucho más rápido, sencillo y altamente personalizado, para la creación de piezas únicas.



**Figura 2.28.** Planificación de una ciudad mediante impresión 3D (3DP) [96]

- Industria de la joyería, textil, mobiliario, o el arte en su manera más general, que aprovechan principalmente las ventajas que ofrece el AM en cuanto a la libertad en el diseño y de la baja infraestructura que se requiere para pasar de ser diseñador a

ser al mismo tiempo fabricante y comercializador del diseño. El sector de la joyería es ejemplo que comenzó en la aplicación de AM como medio para el prototipado rápido. De hecho, hoy en día existen máquinas desarrolladas especialmente para este sector, que permiten obtener piezas máster (por ejemplo en cera) que luego son fundidas para obtener la pieza final en el material deseado.



**Figura 2.29.** Piezas (a) de mobiliario [97], (b) joyería [3]

- Educación. Cada vez más, se utilizan modelos conceptuales como apoyo en la enseñanza. Estos desplazan a otros métodos como fotografías o videos [98].



**Figura 2.30.** Modelos de enseñanza (conceptuales) en diferentes sectores de la educación [77]

- Consumidores. Referido a personas con su propia máquina que realizan infinidad de elementos, hasta productos personalizados (ya sean deportivos, de protección, de uso cotidiano, complementos, etc) tales como cascos, botas de esquí, adornos, premios etc.
- Equipos o piezas alta gama en diseño. Piezas complejas de máquinas, electrónica, ingeniería eléctrica, etc.



**Figura 2.31.** Bici diseñada para la fabricación mediante AM [99]

- Aeroespacial. Los bajos volúmenes de fabricación, la necesidad de un compromiso óptimo entre la resistencia mecánica y peso, la personalización y la necesidad de utilizar geometrías complejas provocan que AM sea imbatible frente a otros procesos en la fabricación de ciertos componentes. Algunos ejemplos son estructuras aligeradas, con canales internos, piezas de repuesto en el espacio, todos los productos de bajo volumen (pequeños lotes), el equipo piloto personalizado, etc.



**Figura 2.32.** Modelo de tubos interiores y *Rake* integral fabricado por sinterizado láser selectivo SLS [8]

- Automoción. Al ser un sector de grandes series, en principio esta instaurado para la creación de prototipos. En formula 1 son más utilizados, asemejándose las causas al sector aeronáutico. Algunos ejemplos son estructuras aligeradas, piezas sometidas a frecuentes cambios de diseño, productos de prueba funcionales, adaptado de interiores (para ciertos conductores), coches de edición limitada, etc.



**Figura 2.33.** (a) Eje de transmisión y (b) intercambiador de calor de un “Formula student” [100]

La mayoría de estas tecnologías, o al menos las más utilizadas a día de hoy, están destinadas a la industria y a aplicaciones para casa y bienes de consumo. Sin embargo, actualmente el sector de automoción, médico, dental y aeroespacial están en investigación y desarrollo, y aparentan provocar un crecimiento económico inmediato para estas tecnologías. Por ejemplo, en la industria aeronáutica aumenta la demanda de ciertas piezas muy complejas en bajo volumen (producción por lotes).

Actualmente, la industria aeroespacial y maquinaria en general, tiene una gran demanda de aplicaciones que utilizan tecnologías de AM. Muchos de los grandes fabricantes de equipos originales (OEM, *Original Equipment Manufacturers*) están en el mercado de AM ya equipados con máquinas de AM, pero todavía hay mucho trabajo por hacer en términos de validación y pruebas de dichas aplicaciones.

En la medicina, ha sido un gran conductor en términos de crecimiento económico para AM. La población está creciendo por lo que hay una necesidad de más implantes y productos personalizados. En la industria médica y dental, por tanto, se restringe más al hecho de producción adaptada al cliente (piezas sueltas).

Estas tecnologías también son utilizadas como *Fab-lab* o laboratorio y máquinas destinadas a asuntos de formación, educación, calificación y mejora. También sirve como apoyo a la formación de los diseñadores para optimizar el diseño y conseguir beneficios en reducción de costos, energía, materiales, etc.

Todo esto se traduce en que, aunque sea denominado *Rapid Manufacturing* en términos generales, realmente la Fabricación Aditiva es rápida y factible para pequeños lotes o piezas personalizadas, o para la creación de piezas muy complejas. Es más rápida en términos de diseño, preparación, puesta a punto de la máquina, y programación, sin embargo, es más lento que otros métodos en la propia fabricación. Esto quiere decir que actualmente es factible para realización de prototipos, piezas en pequeños lotes, o productos que no pueden obtenerse mediante otras tecnologías.



Sin embargo, el desarrollo de estas tecnologías están provocando una disminución en el tiempo de fabricación (*Lead time*) del producto, que sumado a la disminución en los costes de equipos y consumibles, desembocarán en una expansión en el destino de estas aplicaciones.

La Fabricación Aditiva tiene un gran potencial en muchos sectores industriales, sustituyendo o complementando los métodos tradicionales de fabricación. A pesar de la oportunidad que representa AM y mientras el mercado de consumo está creciendo rápidamente, hay una resistencia en la industria para la captación de AM. En este sentido, es importante tomar medidas que pueden crear la conciencia de estas tecnologías en Europa. Con el fin de crear la demanda de esta tecnología, se necesita identificar dónde están las deficiencias y limitaciones que impiden la absorción de AM por la industria.

### 2.13. Conclusiones

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

- Personalización en masa. La capacidad de combinar las bondades del trabajo artesano con el volumen de demanda de un gran mercado. Ahora el diseñador es el artesano en la era digital.
- Diseño y fabricación de cualquier cosa. Desaparecen muchas limitaciones geométricas que debían respetar los diseñadores para que sus creaciones fueran fabricables, y esto les permite dar rienda suelta a la imaginación. Esto resuelve problemas hasta ahora inabordables.
- Productos ensamblados. Reducir el número de piezas en los ensamblajes mediante la integración inteligente de funciones. Esto reduce los costes de montaje.
- Procesos con desperdicio nulo. Se consume prácticamente el material necesario para la pieza (a excepción de los soportes), con la energía imprescindible y reduciendo por tanto el impacto medioambiental.
- La fábrica digital. Basada en activos lógicos (software) y no físicos (utillajes, moldes, herramientas, etc), y por lo tanto mucho más configurable, adaptable y flexible.
- Complejidad geométrica. Es posible utilizar estructuras huecas y espesores de pared variables allí donde sea posible y útil, así como densidades o porosidad del producto variables.
- Auto-fabricación. Cualquiera pueda ser dueño de una empresa, fabricar sus propios productos, o involucrarse en el diseño de productos en red con entornos de fabricación distribuidos geográficamente.

Estas tecnologías por tanto, suponen una nueva Revolución Tecnológica, a falta de información, comunicación, estandarización y desarrollo de las mismas.

Además es un campo muy amplio, ya que dependiendo del tipo de material, del modo de aportación, del proceso, etc, se pueden desarrollar todo tipo de funciones, desde una pieza de un avión, una casa, hasta un implante médico.

Todas estas ventajas, sumadas al amplio uso al que están destinadas, deben inducir a la sociedad a un mayor estudio y avance en estas tecnologías, para conseguir mejores acabados y tiempos en ciertas tecnologías, lo cual mejoraría los rangos de tolerancias y la productividad. Así mismo, es necesaria una temprana estandarización y normalización (para todos los procesos y posibles materiales). Esto último podrá abrir nuevos nichos de mercado debido a una posible satisfacción mayor del cliente.

Este conocimiento podrá llevar incluso a introducir modificaciones en el diseño, de forma que se corrijan las desviaciones durante el proceso de fabricación y la pieza final corresponda a lo deseado.

## 2.14. Bibliografía

- 1- M. P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems*, 3ª Ed. McGraw-Hill, 2010.
- 2- S. Kalpakjian, S. R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5ª Ed. Prentice Hall, 2008.
- 3- M.S.J Hashmi, *Comprehensive Materials Processing*, Ed. 13, Elsevier, 2014.
- 4- *Fabricación Aditiva*, 1ª Edición, Fundación Cotec, Madrid (España), 2011.
- 5- J. L. Vallés, *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014*, Bruselas (Bélgica), 2014.
- 6- M. Porras Rodríguez, *Análisis Técnico-Económico de Técnicas de Fabricación Aditiva para Aplicación en Diferentes Sectores Industriales*, Proyecto Fin de Master, Universidad de Madrid (España), 2012.
- 7- S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, *Additive manufacturing: A framework for implementation*, *Int. J. Production Economics*, 149 (2014) 194-201.
- 8- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Edición, Springer, Nueva York (USA), 2015.
- 9- L. Bechthold, V. Fischer, A. Hainzmaier, D. Hugenroth, L. Ivanova, K. Kroth, B. Römer, E. Sikorska, V. Sitzmann, *3D Printing. A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential*, Center for Digital Technology and Management (CDTM), München (Alemania), 2015.
- 10- J. Winder, R. Bibb, *Medical Rapid Prototyping Technologies: State of the Art and Current Limitations for Application in Oral and Maxillofacial Surgery*, *American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 63 (2005) 1006-1015.
- 11- X. Yan, P. Gu, *A review of rapid prototyping technologies and systems*, *Survey*, 6 (1995) 307-318.
- 12- D.T. Pham, R.S. Gault, *A comparison of rapid prototyping technologies*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 (1998) 1257-1287.
- 13- M. V. Zelkowitz, *A case study in rapid prototyping*, *Software- Practice and Experience*, 10 (1980) 1037-1042.
- 14- J.-P. Kruth, M.C. Leu, *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*, *Annals of the CIRP* 47 (1998) 525-540.
- 15- G. N. Levy, R. Schindel, J.P. Kruth, *RAPID MANUFACTURING AND RAPID TOOLING WITH LAYER MANUFACTURING (LM) TECHNOLOGIES, STATE OF THE ART AND FUTURE*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52 (2003) 589-609.

- 16- E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1459-1468.
- 17- K. V. Wong, A. Hernandez, *A Review of Additive Manufacturing*, ISRN Mechanical Engineering, 38 (2012) 208-218.
- 18- D. W. Hutmacher, K. C. Tan, J. T. Schantz, T. C. Lim, C. X. Lam, *State of the art and future directions of scaffold-based bone engineering from a biomaterials perspective*, Journal Tissue Engineering Regen Medical, 1 (2007) 245-260.
- 19- M.A Hartfel, D.G. Nechrebecki, M.W. Scanlan, MW, *EXPERIENCES WITH DESK-TOP RAPID MANUFACTURING*, 51ST Annual Technical Conference of the Soc of Plastic Engineers, New Orleans (USA), 1993.
- 20- P.M Dickens, *RESEARCH DEVELOPMENTS IN RAPID PROTOTYPING*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B- Journal OF Engineering Manufacture, 209 (1995) 261-266.
- 21- <http://www.stratasys.com>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 22- D. Dimitrov, K. Schreve, N. Beer, *ADVANCES IN THREE DIMENSIONAL PRINTING - STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES*, Journal for New Generation Sciences, 4 (2005) 21-49.
- 23- S. Dolinsek, *Additive Manufacturing Processes: State of The Art and Vision for RM*, 11th International Research/Expert Conference: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet (Tunisia) 2007.
- 24- P. Ramírez López-Para, J. López Soto, *Tecnologías Aditivas, Un Concepto Más Amplio Que El Prototipado Rápido*, XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Huesca (España) 2011.
- 25- WC Lee, CC Wei, SC Chung, *Development of a Hybrid Rapid Prototyping System using Low-cost Fused Deposition Modeling and Fve-axis Machining*, Journal of Materials Processing Technology, 214 (2014) 2366-2374.
- 26- J.P.J. Jong, E. Bruijn, *Innovation Lessons From 3-D Printing*, MIT Sloan Management Review, 54 (2013).
- 27- T. Wohlers, *Rapidd Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, INC., 2001.
- 28- M. Srivastava, U. Singh, R. Yashaswi, *Trends in the Domain of Rapid Prototyping: A Review*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 3 (2014) 747-762.
- 29- M. Aliakbari, *Additive Manufacturing: State-of-the-Art, Capabilities, and Sample Applications with Cost Analysis*, Master of Science Thesis, Production Engineering and Management, Department of Industrial Production, KTH, 2012.

- 30- B.N. Turner, S.A. Gold, *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: Materials, dimensional accuracy, and surface roughness*, Rapid Prototyping Journal, 21(2015) 250 – 261.
- 31- <http://apps.webofknowledge.com>, última consulta: 1 de julio 2015.
- 32- D.S. Thomas, S.W. Gilbert, *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*, NIST Special Publication 1176, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>, 2014.
- 33- H. Singh, F. Rayegani, G. Onwubolu, *Cost Optimization of FDM Additive Manufactured Parts*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec (Canada), 2014.
- 34- V. Raja, S. Zhang, J. Garside, C. Ryall, D. Wimpenny, *Rapid and cost-effective manufacturing of high-integrity aerospace components*, International Journal Advanced Manufacturing Technologies, 27 (2006) 759–773.
- 35- L. Zachmann, *3D printing – Potential analysis and implementation of an Additive Manufacturing system to reduce production equipment costs*, Master degree Project, Stockholm (Suecia) 2014.
- 36- F. Thiesse, D. Morar, S. Ford, M. Wirth, H. Lasi, T. Minshall, HG. Kemper, F. Piller, M. Moisa, P. Buxmann, L. Mortara, *Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS*, Business and Information Systems Engineering 57 (2015) 139–148.
- 37- J. Risent, J. Masiá, *Reconstrucción Tridimensional de Superficies en el Cuerpo Humano*, Valencia (España), 2013.
- 38- P. Hernández, *Guía práctica de Rapid Manufacturing*, Gran Canaria (España), 2012.
- 39- M. Paulic, T. Irgolic, *Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing*, *Procedia Engineering*, 69 (2014).
- 40- J.A. Acosta, C.A. Duque, C.U. Galeano, J.M. Mantilla, *3D-Digitizing of a centrifugal compressor´s impeller: an alternative procedure*, *Ingeniare* 15 (2007).
- 41- J. Zaragoza-Siqueiros, H.I. Medellín-Castillo, *Design for Rapid Prototyping, Manufacturing and Tooling: Guidelines*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 42- Y. Tang, Y.F. Zhao, *Design Method for Lattice-Skin Structure Fabricated by Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 43- C. Zhou, *A Direct Tool Path Planning Algorithm for Line Scanning Based Stereolithography*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.

- 44– H. Rodrigue, B. Bhandari, W. Wang, SH Ahn, *3D soft lithography: A fabrication process for thermocurable polymers*, Journal of Materials Processing Technology, 217 (2015) 302–309.
- 45– A. M. Forster, *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8059>, 2015.
- 46– S. Hwang, R. C. Rumpf, E. I. REYES, KS. MOON, N.S. KIM, *Thermo–mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process*, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 44 (2015) 771–777.
- 47– <http://www.google.es/trends>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 48– <http://www.zcorp.com>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 49– J.R Castrejon–Pita, W.R Baxter, J. Morgan, et ál, *Future, Opportunities and Chalenges of Inkjet Technologies*, ATOMIZATION AND SPRAYS, 23 (2013) 541–565.
- 50– J. Miettinen, V. Pekkanen, K. Kaija, P. Mansikkama, J. Mantysalo, M. Mantysalo, J. Niittynen, J. Pekkanen, T. Saviauk, R. Ronkka, *Inkjet printed System–in–Package design and manufacturing*, Microelectronics Journal 39 (2008) 1740–1750.
- 51– A. M. Elliott, O. S. Ivanova, C. B. Williams, T. A. Campbell, *Inkjet Printing of Quantum Dots in Photopolymer for Use in Additive Manufacturing of Nanocomposites*, Advanced Engineering Materials, 15 (2013) 903–907.
- 52– S. Fathi, P. Dickens, R. Hague, *Jetting stability of molten caprolactam in an additive inkjet manufacturing process*, International Journal Advanced Manufacturing Technologies, 59 (2012) 201–212.
- 53– M. Salmi, KS. Paloheimo, J. Tuomi, et ál., *Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)*, JOURNAL OF CRANIO–MAXILLOFACIAL SURGERY, 41 (2013) 603–609.
- 54– C.N. Ionita, M. Mokin, N. Varble, et ál., *Challenges and limitations of patient–specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing*, Conference on Medical Imaging – Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging, San Diego, 2014.
- 55– R. Udroui, A. Nedelcu, B. Deaky, *Rapid Manufacturing by Polyjet Technology og Customized Turbines for Renewable Energy Generation*, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND MANAGEMENT JOURNAL, 10 (2011) 1387–1394.
- 56– Iwan, Zein; Hutmacher, Dietmar W.; Kim Cheng, Tan; Swee Hin, Teoh, *Fused Deposition Modeling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, Biomaterials, 23 (2002) 1169–1185.
- 57– Hutmacher, Dietmar W.; Thornsten, Schantz.; Iwan, Zein; Kee Woei, Ng; Swee Hin, Teoh; Kim Cheng, Tan, *Mechanical Properties and Cell Cultural Response of*

- Polycaprolactone Scaffolds Designed and Fabricated via Fused Deposition Modeling*, Journal Biomedical Mater. Res., 55 (2001) 203–216.
- 58– Too, M. H.; Leong, K. F.; Chua, C. K.; Du, Z. H.; Yang, S. F.; Cheah, C. M.; Ho, S. L. *Investigation of 3D Non-random Porous Structures by Fused Deposition Modelling*. Int. Journal Advanced Manufacturing Technologies, 19 (2002) 217–223.
- 59– Cao, Tong; Kee-Hai, Ho; Swee-Hin, Teoh Scaffold, *Design and in Vitro Study of Osteochondral Coculture in a Three-Dimensional Porous Polycaprolactone Scaffold Fabricated by Fused Deposition Modeling*. Tissue Eng. 9 (2003) 103–112.
- 60– M. Paulic, T. Irgolic, J. Balic, F. Cus, A. Cupar, T. Brajlji, I. Drstvensek. *Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing*, Procedia Engineering, 69 (2014) 795 – 803.
- 61– D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms*, International Materials Reviews, 57 (2012) 133–164.
- 62– J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs, *Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing*, Annals of the CIRP Vol. 56 (2007) 730–759.
- 63– G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, K.E. Evans, *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting*, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013) 589–597.
- 64– A. J. Pinkerton, *Advances in the modeling of laser direct metal deposition*, Journal of Laser Applications, 27 (2015) S15001–1 – S15001–7.
- 65– Steven Price, James Lydon, Ken Cooper, Kevin Chou, *Temperature Measurements in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 66– B. Cheng, S. Price, X. Gong, J. Lydon, K. Cooper, K. Chou, *Speed Function Effects in Electron Beam Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 67– X. Gong, J. Lydon, K. Cooper, K. Chou, *MICROSTRUCTURAL ANALYSIS AND NANOINDENTATION CHARACTERIZATION OF Ti-6AL-4V PARTS FROM ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 68– S. Reginster, A. Mertens, H. Paydas, et ál., *Processing of Ti Alloys by Additive Manufacturing: A Comparison of the Microstructures Obtained by Laser Cladding, Selective Laser Melting and Electron Beam Melting*, 6th International Light Metals Technology Conference (LMT 2013), Old Windsor (Inglaterra), 2013.

- 69– M. Rombouts, G. Maes, M. Mertens, *Laser metal deposition of Inconel 625: Microstructure and mechanical properties*, Journal of laser applications, 24 (2012).
- 70– A.V. Gusarov, M. Pavlov, I. Smurov, *Residual Stresses at Laser Surface Remelting and Additive Manufacturing*, Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, 12 (2011) 248–254.
- 71– S. Saqib, R. J. Urbanic, K. Aggarwal, *Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths*, Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 17 (2014) 824 – 829.
- 72– <http://3dprint.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 73– Buswell et al., *Freeform Construction: mega-scale rapid manufacturing for construction*, Automat. Construct., 16 (2007) 224–231.
- 74– B. Khoshnevis, D. Hwang, *Contour Crafting, a mega scale fabrication technology*, Manufacturing Systems Engineering Series, 6 (2006), 221–251.
- 75– F. Ceccanti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian, *3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil*, Proceedings of the 61th International Astronautical Congress (IAC 2010), Prague (Czech Republic), 2010.
- 76– A. Atala, *Anthony Atala's Work on Bioprinting*, <http://www.wakehealth.edu/WFIRM>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 77– J. Giannatsis, V. Dedoussis, *Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review*, International Journal Advanced Manufactured Technologies, 40 (2009) 116–127.
- 78– T. Billiet, M. Vandenhaute, J. Schelfhout, S. Van Vlierberghe, P. Dubruel, *A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering*, Journal Biomaterials, 33 (2012) 6020–6041.
- 79– [www.elmundo.com](http://www.elmundo.com), última consulta 29 de junio de 2015.
- 80– P.M. Gronet, G.A. Waskewicz, C. Richardson, *Preformed Acrylic Cranial Implants Using Fused Deposition Modeling: a Clinical Report*, Journal Prosthet. Dent. 90 (2003) 429–433.
- 81– <http://www.abc.es>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 82– MIT Media Labs Conceptual Work on Food Printers, <http://web.media.mit.edu>
- 83– J. I. Lipton, M. Cutler<sup>1</sup>, F. Nigl, D. Cohen, H. Lipson, *Additive manufacturing for the food industry*, Trends in Food Science & Technology, 43 (2015) 114–123.
- 84– J. Lipton, D. Arnold, F. Nigl, N. Lopez, D. Cohen, N. Noren, *Multi-material food printing with complex internal structures suitable for conventional post-processing*, 21st Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (2010).
- 85– T. Wegrzyn, M. Golding, R. Archer, *Food layered manufacture: a new process of constructing solid foods*, Trends in Food Science & Technology (2012) 66–72.



- 86– Wohlers Report, <http://www.wohlersassociates.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 87– A. Drizo, J. Pegna, *Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date*, Rapid Prototyping Journal, 12 (2006) 64-71.
- 88– V. B. Meyer, *Prototyping the Environmental Impacts of 3D Printing: Claims and Realities of Additive Manufacturing*, Environmental Policy Senior Thesis, 2015.
- 89– M. Monzón, Z. Ortega, A. Martínez, F. Ortega, *Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76 (2015) 1111-1121.
- 90– K. Jurrens, *Standards for the rapid prototyping industry*, Rapid Prototyping Journal, 5 (1999) 169-178.
- 91– M.J. Pratt, A.D. Bhatt, D. Dutta, R.W. Lyons, L. Patil, R.D. Siriam, *Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing*, Journal Comput Aided Des 34 (2002) 1111-112.
- 92– Norma ISO 17296-4:2014, Fabricación Aditiva- Principios generales: Visión general de procesamiento de datos.
- 93– <http://www.prodintec.es>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 94– O.L.A. HARRYSSON, D.J. MARCELLIN-LITTLE, T. J. HORN, *Applications of Metal Additive Manufacturing in Veterinary Orthopedic Surgery*, Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 67 (2015) 647-654.
- 95– A. Rosochowski, A. Matuszak, *Rapid tooling: the state of the art*, Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000) 191-198.
- 96– <http://worldindustrialreporter.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 97– <http://www.haute-innovation.com/en/events/interzum-3d-printing-congress>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 98– Y. Huang, M.C. Leu, *Frontiers of Additive Manufacturing Research and Education*, An NSF Additive Manufacturing Workshop Report, Florida (USA), 2014.
- 99– <http://i.materialise.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 100– <http://www.eos.info>, última consulta 29 de junio de 2015.



Escuela Superior  
de Ingeniería

# Capítulo III: Metodología Experimental

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## 3. Capítulo III: Metodología Experimental

### 3.1. Introducción

A medida que las impresoras 3D siguen penetrando en la industria, muchas normas para control de calidad deben de ser desarrolladas. Se ha observado muchos foros en línea y debates sobre la forma de controlar la calidad de los sistemas de AM, pero no existe la suficiente investigación, o al menos no está disponible para hacer frente a estas preocupaciones. Este trabajo tiene como objetivo continuar con el desarrollo del control de calidad y la precisión de un sistema de Modelado por Deposición Fundida (FDM), considerando los parámetros de impresión que pueden influir en mayor medida en el resultado de un producto.

En este apartado se propone y se pretende establecer una metodología experimental para conseguir el objetivo del presente trabajo.

En Fabricación Aditiva hay numerosos aspectos o condiciones que pueden afectar a la calidad de las piezas fabricadas [1–3]. En este sentido, además de la tecnología, máquina y material, se considera que hay otras condiciones que afectan a los resultados.

Se escoge la tecnología FDM por ser la más utilizada y expandida actualmente, y a su vez poco estudiada [1–3]. Cabe destacar que en contadas investigaciones ha sido estudiada la repercusión de algún parámetro individualizado y la repercusión del mismo en un único aspecto [4].

En dicha tecnología se quiere conocer la influencia de las propias dimensiones de las piezas construidas y de los parámetros de fabricación utilizados.

Para ello se propone realizar dos tipos de análisis y por tanto dos tipos de ensayos, cada uno con sus probetas correspondientes:

- Ensayos tipo I. Consisten en construir probetas de geometrías similares con dimensiones variables, todas ellas con igualdad de condiciones y parámetros de fabricación.
- Ensayos tipo II. Consisten en construir probetas de geometría y dimensiones análogas, modificando algunos de los parámetros de fabricación.

La Fabricación Aditiva mediante estos dos tipos de ensayos y su consiguiente evaluación, determinará la influencia tanto de las dimensiones, como de los parámetros utilizados como variables en los resultados de las piezas.

Para ello se analizan tanto cantidad e importancia de la aparición de defectos característicos en estas tecnologías, como tolerancias dimensionales y calidades superficiales.

Para llevar a cabo dicha metodología se van a seguir los pasos indicados en el siguiente diagrama de flujo, Figura 3.1.

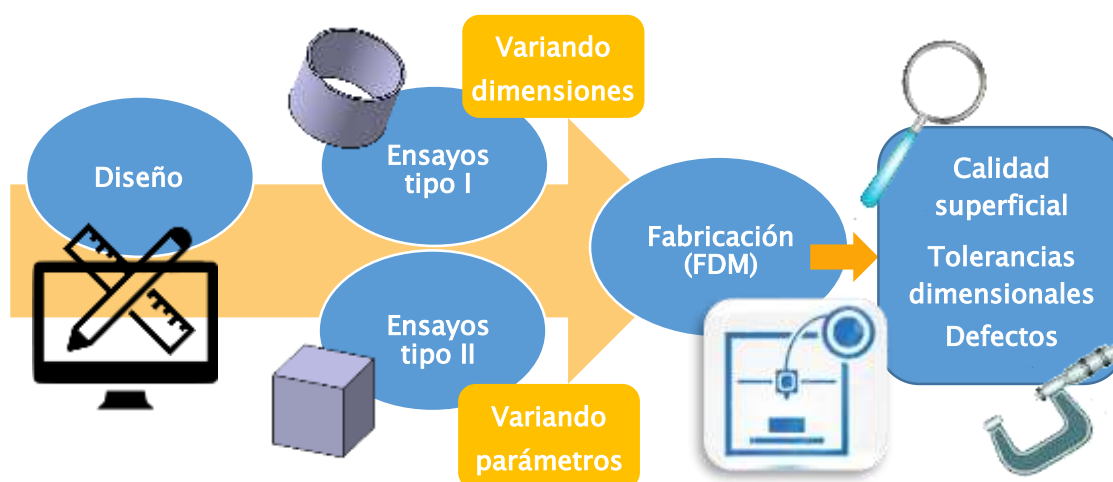


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

### 3.2. Caracterización de probetas

En este apartado se definen las características de las probetas elaboradas, respecto tanto en material que las conforma como en dimensiones.

Como se ha dicho, se van a realizar dos tipos de ensayos. Para cada uno de ellos ha sido definida una probeta diferente. Las probetas tipo I para los ensayos tipo I, y las probetas tipo II para los ensayos tipo II.

Se utiliza el mismo material para ambas probetas, pero con diferente color.

#### 3.2.1. Material y dimensiones

En primer lugar se tendrá en cuenta el material de partida. Entre las posibilidades existentes en el proceso de fabricación utilizado, se escoge el PLA (Poliácido Láctico) para ambos ensayos, cuyas principales características se encuentran en la siguiente Tabla 3.1. Sin embargo, se utilizará PLA azul para los ensayos tipo 1, y PLA natural (transparente) para los ensayos tipo 2.

Tabla 3.1. Propiedades del PLA [5]

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	16.0 – 114 MPa
Elongación hasta rotura	0.500 – 430 %
Módulo de elasticidad	0.230 – 13.8 GPa
Temperatura de Fusión	170°C
Temperatura de trabajo*	185°C

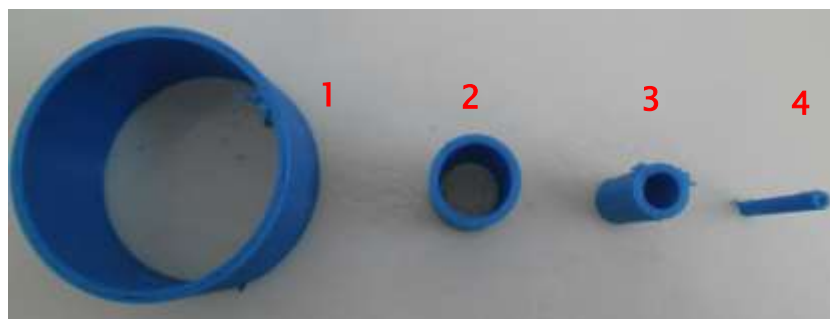
El PLA, es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes al politereflalato de etileno (PET). Se utiliza entre otras cosas para hacer envases y además es biodegradable. Se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono, y se disuelve por completo en soluciones de sosa cáustica (NaOH, hidróxido de sodio) [6].

Es un plástico duro que tiene un bajo impacto en el medio ambiente, además de que no desprende ningún tipo de gas nocivo con su manipulación. Este termoplástico se deriva a partir de recursos renovables y biodegradables con base de almidón [7–9].

Posee una temperatura de trabajo (fabricación) recomendable alrededor de los 185° C, aunque muchos autores recomiendan utilizarlo a una temperatura algo superior para la obtención de mejores resultados [6–10].

#### 1.1.1.1. Probetas tipo I

Para los ensayos tipo I, cuyas especificaciones serán mencionadas posteriormente (parámetros de fabricación constantes) se escogen 4 tubos de diferente tamaño como probetas. En la siguiente Figura 3.2 se incluye la imagen de la familia de piezas escogida como probetas tipo I.



**Figura 3.2.** Probetas tipo I. Dimensiones variables, parámetros de fabricación constantes

Las dimensiones escogidas para cada uno de los tubos quedan recogidas en la siguiente Tabla 3.2. Se pretende establecer una diferencia considerable entre los mismos para comprobar cómo puede afectar a las tolerancias geométricas y calidad superficial.

**Tabla 3.2.** Características dimensionales de las probetas tipo I.

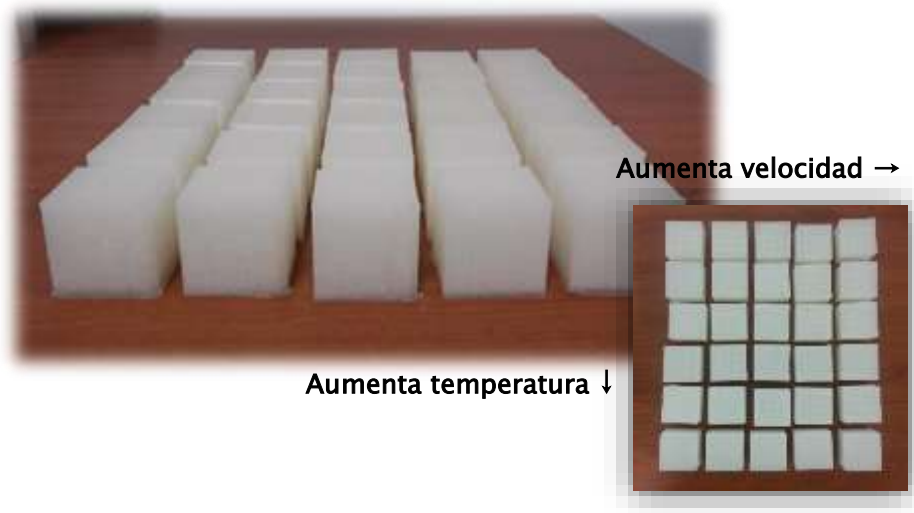
Probeta	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Altura (mm)
T_1	60	56	40
T_2	20	16	40
T_3	12	8	40
T_4	8	4	40

### 1.1.1.2. Probetas tipo II

En los ensayos tipo II se opta por mantener la geometría constante, y para ello se escoge como probeta a fabricar un cubo.

Un cubo queda completamente definido por la longitud de una de sus aristas, puesto que todas ellas deberán de ser iguales. Por tanto la especificación dimensional vendrá definida por una única unidad (30 mm).

En la siguiente Figura 3.3 se incluye la familia de piezas escogida como probetas tipo II.



**Figura 3.3.** Probetas tipo 2. Mismo geometría, parámetros de fabricación variables

### 3.2.2. Nomenclatura

En este apartado se define la codificación utilizada para las probetas impresas de ambos tipos. Esto facilita el manejo de datos para los siguientes apartados y capítulos. Así mismo, queda definido desde un primer momento las zonas que van a ser analizadas de algún modo, ya sea referente a su macro o microgeometría.

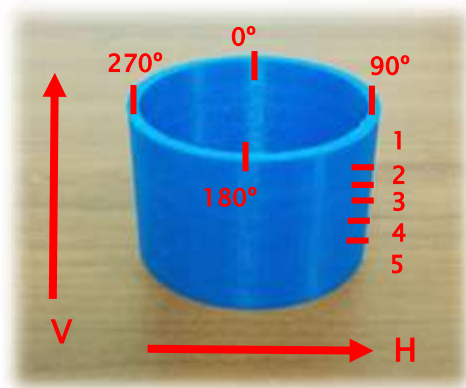
#### 3.2.2.1. Probetas tipo I

Los distintos tubos han sido codificados con números, tal y como se encuentra en la anterior Tabla 3.1.

Se definen las distintas zonas de la probeta para poder nombrar, ordenar y posicionar más fácilmente los datos y defectos tomados posteriormente. De este modo, las zonas de cada tubo quedarían nombradas del siguiente modo:

$$X_j\_D\_N$$

- $X_j$ , corresponde a la superficie donde se ha realizado la medición o toma de datos, siendo  $D_i$  la superficie interior del tubo, y  $D_e$  la superficie exterior del tubo.
- $D$ , corresponde con la dirección en la que se han realizado las medidas o toma de datos, siendo  $H$  las tomadas horizontalmente y  $V$  las tomadas verticalmente, tal y como aparece en la siguiente Figura 3.4.
- $N$ , depende del valor de codificación anterior ( $H$  o  $V$ ) y corresponde a la zona donde se ha realizado el análisis y puede tomar un valor entre 1 y 5 ( $n^\circ$  enteros) en medidas horizontales, y un valor de 0, 90, 180 o 270° en las medidas verticales.



**Figura 3.4.** Dirección y zona de las medidas realizadas en las probetas tipo I para su codificación

Para tener definido entonces cualquier dato tomado en un análisis se procederá a escribir la codificación del tubo ( $T_M$ ), seguido de la zona en cuestión ( $X_j_D_N$ ), siempre y cuando sean necesarios todos los datos de dicha nomenclatura. En caso contrario se obviarán los que se considere oportunos en cada ocasión.

### 3.2.2.2. Probetas tipo 2

Los distintos cubos serán codificados atendiendo a los parámetros de fabricación utilizados como variables (temperatura y velocidad). De este modo se obtiene una codificación siguiendo el criterio:

#### C\_L\_T\_V

- $C_L$ , corresponde con la pieza ( $C$ ) y su longitud de arista (30 mm), y quedará constante en todas las probetas a "C\_30".
- $T$ , corresponde a la temperatura de extrusión en grados centígrados programada en la fabricación.
- $V$ , coincide con la velocidad de fabricación expresada en mm/s.

Se definen las distintas zonas de la probeta para poder nombrar, ordenar y posicionar más fácilmente los datos y defectos tomados posteriormente. De este modo, las zonas de cada cubo quedarían nombradas del siguiente modo:

#### Z\_X\_Y

- Z, corresponde a la superficie en la que se ha realizado la medición o toma de datos, y puede ser L (laterales del cubo) o S (tapa superior del cubo).
- X, depende del primer dígito y corresponde a la cara en la que se ha realizado la medición o toma de datos, y varía entre 1 y 4 para L (los laterales del cubo) y es siempre 1 en S (tapadera o base superior del cubo).
- Y, corresponde a la zona de una misma cara en la que se ha realizado la medición, y puede variar como se muestra en la siguiente Figura 3.5.

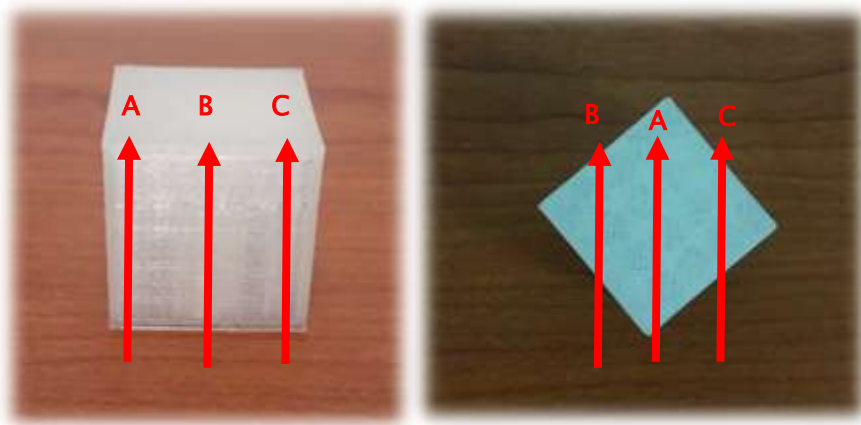


Figura 3.5. Zonas de una misma superficie del cubo donde se realizan tomas de datos

Para tener definido entonces cualquier dato tomado en un análisis se procederá a escribir la codificación del cubo (C\_L\_T\_V), seguido de la zona en cuestión (Z\_X\_Y), siempre y cuando sean necesarios todos los datos de dicha nomenclatura. En caso contrario se obviarán los que se considere oportunos en cada ocasión.

### 3.3. Equipo utilizado

La impresora utilizada es la Cubex® Duo, cuyas características principales aparecen en la siguiente Tabla 3.3.

Esta impresora (Figura 3.6) posee una técnica de impresión por extrusión de chorro de plástico también denominada Fabricación con filamento fundido (FFF), anteriormente explicada y más conocida como *Fused Deposition Material* o FDM [1–3, 12–13].



**Tabla 3.3.** Características del equipo utilizado [11]

Característica	Valor
Dimensión máxima de construcción	275 x 265 x 240 mm
Resolución máxima	0,1 mm
Tolerancias de impresión	+/- 1% de la dimensión del objeto o 0,2 mm en ejes X/Y +/- la mitad de la resolución escogida en eje Z
Velocidad máxima de fabricación	15 mm <sup>3</sup> /s
Temperatura máxima de extrusión	280° C

Posee sus ejes “x” e “y” en el cabezal (donde se encuentran los inyectores) y el eje “z” en el plato o plataforma de impresión. El nivel del plato baja gradualmente una vez que cada capa ha sido depositada para así poder extender otra capa encima de la última e ir construyendo la pieza [13]. Así es la distribución general en la mayoría de las máquinas que trabajan con dicha tecnología.

Esta impresora ofrece la posibilidad de alojar hasta tres cabezales de impresión para trabajar simultáneamente con diferentes materiales y colores múltiples [10], sin embargo no se tiene más que un único chorro o extrusor para representar las distintas probetas.

No obstante, dicha máquina de 3D Systems, no permite el uso de materiales de otro fabricante, lo cual reduce mucho las posibilidades de trabajo.



**Figura 3.6.** Impresora Cubex

### 3.4. Protocolo de ensayos

En este apartado se definen los ensayos realizados, cómo han sido fabricadas las probetas, la posición de las mismas en la plataforma, así como los parámetros usados en cada uno de ellos.

Se distinguen dos tipos de ensayos, ambos realizados para sus correspondientes probetas. De este modo, se distinguen los ensayos tipo I y los ensayos tipo II.

Previamente a la fabricación, se ha llevado a cabo una correcta nivelación de la plataforma de impresión, además de un pulido de la misma para favorecer la adherencia del material evitando el uso de adhesivos.

#### 3.4.1. Ensayos tipo I

Los ensayos tipo I son los que abarcan la fabricación de las probetas tipo I.

Para la elaboración de dichas probetas se han considerado todos los parámetros de fabricación constantes. De este modo, solo se varía las dimensiones de las probetas utilizadas.

Los parámetros utilizados quedan recogidos en la siguiente Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Parámetros de fabricación utilizados en los ensayos tipo I

Parámetro	Valor
Temperatura	200°C
Velocidad de avance	30 mm/s
Densidad interna	16,7 %
Estructura interna	Panal de abejas (octagonal)
Espesor de capa	0,25 mm
Diámetro de la boquilla	0,5 mm
Raft	No
Ventilación	50%
Flujo de material (máx.-min.)	0,1 - 10 mm <sup>3</sup> /s
Velocidad de extrusión	15 mm/s

Se han impreso las 4 probetas de dicho tipo en el centro de la plataforma de construcción sin utilizar pegamento u otro adhesivo entre dicha plataforma y la primera capa.

La temperatura ambiente se considera aproximadamente constante a unos 25°C.

#### 3.4.2. Ensayos tipo II

Los ensayos tipo II son los que abarcan la fabricación de las probetas tipo II.

Para la elaboración de dichas probetas se han establecido como variables temperatura y velocidad, considerando el resto de parámetros de fabricación, así como la geometría y dimensiones de las probetas, invariables.

Los parámetros considerados, y a su vez mantenidos, constantes se incluyen en la siguiente Tabla 3.5.

Como variables utilizadas serán la velocidad de fabricación, que corresponde con la velocidad de avance de la boquilla, y la temperatura de extrusión o de trabajo. Estas serán modificadas y combinadas de manera que se utilizan 6 temperaturas diferentes en un rango entre 185–260°C y 5 velocidades en un rango entre 20 y 30 mm/s.

El intervalo de temperaturas escogido es debido a que a fuera de este rango el material no se comporta bien. A temperaturas inferiores el material prácticamente solidifica al ser extruido, lo cual provoca en muchas ocasiones la adherencia del mismo al cabezal. A temperaturas superiores a dicho intervalo, el material se degrada.

**Tabla 3.5.** Constantes utilizadas en los ensayos tipo II

Parámetro	Valor
Densidad interna	16,7 %
Estructura interna	Panal de abejas (octagonal)
Espesor de capa	0,25 mm
Diámetro de la boquilla	0,5 mm
Raft	No
Ventilación	50%
Flujo de material (máx.-min.)	0,1 – 10 mm <sup>3</sup> /s
Velocidad de extrusión	15 mm/s

La velocidad de fabricación no debe ser confundida con la de extrusión. La de fabricación o avance, es la que delimita el tiempo que va a tardar la pieza en ser construida (Lead Time), mientras que la de extrusión dicta la cantidad de material, junto con el flujo, que va a ser depositado en un mismo punto.

De esta manera, y atendiendo a la nomenclatura mencionada, se obtienen 30 posibles probetas con la combinación de las variables mencionadas, Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Probetas fabricadas.

		Temperaturas °C					
		185	200	215	230	245	260
Velocidad mm/s	20	C_30_185_20	C_30_200_20	C_30_215_20	C_30_230_20	C_30_245_20	C_30_260_20
	22,5	C_30_185_22,5	C_30_200_22,5	C_30_215_22,5	C_30_230_22,5	C_30_245_22,5	C_30_260_22,5
	25	C_30_185_25	C_30_200_25	C_30_215_25	C_30_230_25	C_30_245_25	C_30_260_25
	27,5	C_30_185_27,5	C_30_200_27,5	C_30_215_27,5	C_30_230_27,5	C_30_245_27,5	C_30_260_27,5
	30	C_30_185_30	C_30_200_30	C_30_215_30	C_30_230_30	C_30_245_30	C_30_260_30

Dichas probetas se han impreso directamente sobre la superficie de la plataforma, sin usar pegamento o cintas adhesivas, y serán fabricadas sobre ella tal como aparece en la siguiente Figura 3.7.

La temperatura ambiente se considera aproximadamente constante a unos 25°C.

En la siguiente Tabla 3.7, aparece la relación de tiempos teóricos (calculados por software), y reales que la impresora ha tardado en la elaboración de cada probeta.



Figura 3.7. Disposición de las probetas para proceder a su fabricación

Se incluyen únicamente las variaciones de velocidad, ya que son las que dictaminan el tiempo total de construcción.

Tabla 3.7. Tiempos de fabricación de las probetas tipo II

Probeta	Tiempo teórico (minutos)	Tiempo real (minutos)
C_30_T_20	52	60
C_30_T_22,5	49	53
C_30_T_25	45	48
C_30_T_27,5	42	44
C_30_T_30	39	41

Esta diferencia en la estimación de tiempos es importante tenerla en cuenta, puesto que incurre en la productividad real de la máquina. Para piezas de mayores dimensiones se ha comprobado que la diferencia de tiempos estimados es mucho mayor. Además, la máquina estima tiempos diferentes aun modificando únicamente la temperatura, lo cual ya aporta una idea del error de cálculo que realiza.

### 3.5. Protocolo de evaluación

Como se ha mencionado, se quiere determinar la influencia de ciertos parámetros en la integridad y calidad superficial en la tecnología utilizada.

En este apartado se designan los equipos utilizados para estos análisis y las distintas evaluaciones que se van a realizar para cada tipo de ensayos, siendo alguna de ellas común en ambos. Se incurre en mayor o menor medida en ciertos estudios observando desde un primer momento lo que aparentemente puede verse más afectado por las dimensiones o por los parámetros respectivamente.

#### 3.5.1. Equipos utilizados

Se utilizan distintos equipos para la evaluación de las probetas. Algunos de los mismos son utilizados en un solo tipo de probetas y otros en ambos.

Para hacer una evaluación dimensional se utiliza un micrómetro de exteriores Mitutoyo para comprobar algunas medidas (Tabla 3.8), y un microscopio estereoscópico Nikon tipo SMZ800 (Tabla 3.9) también para comprobar medidas y observar con mayor detalle ciertos defectos (Figura 3.8). Es decir, con estos equipos se medirá la macrogeometría de las piezas fabricadas (probetas de ambos tipos).



**Figura 3.8.** Equipo de evaluación macrogeométrica utilizado: a la izquierda micrómetro; a la derecha microscopio estereoscópico [15]

**Tabla 3.8.** Características del micrómetro de exteriores utilizado [15]

Concepto	Valor
Campo de medida	25 - 50 mm
Tolerancia	0,001 mm

**Tabla 3.9.** Características del microscopio utilizado [16]

Concepto	Valor
Relación del Zoom	6:1
Rango del Zoom	1 – 6x
Aumento total	5 – 360x
Distancia de trabajo	78 mm

Dentro de la evaluación macrogeométrica, se utiliza también un medidor de formas Mahr, formtester MMQ 44 CNC (Figura 3.9). En dicho equipo se evalúa la redondez, cilindridad, rectitud y paralelismo de las probetas tipo 1, cuyas características principales se encuentran en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10.** Características principales del medidor de formas utilizado [17]

Concepto	Valor
Error de redondez	0,07+0,001 $\mu\text{m}$
Error de descentramiento axial	0,05+0,001 $\mu\text{m}$
Diámetro de la mesa	285 mm
Trayecto de medición	350 mm
Error Rectitud / 100 mm	0,25 $\mu\text{m}$
Error de paralelismo/ dirección de rastreo	0,5 %
Velocidad de medición	>30 mm/s
Precisión de posicionamiento	7 $\mu\text{m}$



**Figura 3.9.** Equipo de evaluación macrogeométrica utilizado: medidor de formas

Para evaluar la rugosidad se utiliza un rugosímetro Mahr cuya unidad de avance es PGK 120 y el palpador MFW 250 (Tabla 3.11). Este equipo, mostrado en la Figura 3.10, mide entonces la microgeometría de las probetas fabricadas.

**Tabla 3.11.** Características principales del rugosímetro utilizado [17]

Unidad	Concepto	Valor
Palpador	Radio	2 $\mu\text{m}$
	Ángulo de punta	90°
Unidad de avance	Rango de medición	$\pm 25 \mu\text{m}$ , $\pm 250 \mu\text{m}$
	Resolución vertical	$\pm 25 \mu\text{m}$ / 0,7 nm, $\pm 250 \mu\text{m}$ / 7,0 nm, $\pm 2500 \mu\text{m}$ / 50 nm
	Resolución horizontal	La distancia entre puntos según DIN EN ISO 3274



**Figura 3.10.** Equipo de evaluación micrométrica utilizado: rugosímetro

### 3.5.2. Evaluación de las probetas

Se procede a la evaluación de las probetas haciendo distinción en los dos tipos de ensayos, ya que cada uno de ellos se ha fabricado con una intención.

### 3.2.2.3. Probetas tipo I

Los tubos fabricados en igualdad de condiciones y manteniendo los parámetros constantes han sido fabricados para evaluar la importancia de las dimensiones de la pieza a fabricar.

Se pretende evaluar la repercusión de dichas dimensiones en cuanto a las tolerancias geométricas y calidad superficial, sin que puedan influir los parámetros o incluso la propia geometría de la pieza (geometrías similares con distintas dimensiones).

#### Evaluación macrogeométrica

Para realizar una evaluación macrogeométrica de los tubos impresos se van a realizar distintos análisis.

En primer lugar se van a extraer de cada tubo, mediante el equipo medidor de formas, la redondez que presentan 5 secciones de los mismos (interna y externamente) separadas entre sí 2 milímetros de altura (Nomenclatura de las mediciones:  $D_j\text{-}H\text{-}N$ ).

El equipo escogido mide la redondez de cada sección calculando el círculo de referencia media cuadrática (LSC). Este método consiste en calcular un círculo para el cual la suma de los cuadrados de las distancias entre el mismo y el perfil palpado de la pieza tenga un valor mínimo, o dicho de otra manera, que el área encerrada por el perfil a un lado del círculo sea igual al área encerrada en el otro

Una vez obtenidas las redondeces mencionadas, se colocan contiguamente de manera concéntrica. Esto permite analizar la cilindridad aproximada de cada uno de los tubos.

Por otra parte, se procede a examinar en el mismo equipo la rectitud de 4 generatrices tomadas en cada cilindro tanto interna como externamente a excepción del tubo de menor tamaño ( $T_4$ ) debido a la dificultad de introducir el palpador en el interior. Estas generatrices se toman a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$  (Nomenclatura de las mediciones:  $D_j\text{-}V\text{-}N$ ). Esta rectitud muestra las desviaciones de las generatrices analizadas respecto a una línea recta.

Una vez adquiridas las 4 rectitudes de cada probeta tanto interna como externamente, se procede al análisis del paralelismo de las mismas dos a dos. Esto significa que se estudia el paralelismo entre cada una de las generatrices a  $0^\circ$  con sus respectivas a  $180^\circ$ , y cada una de las tomadas a  $90^\circ$  con sus respectivas a  $270^\circ$ , tanto interna como externamente.

Por otro lado, se van a realizar mediciones con un micrómetro, para estudiar las desviaciones dimensionales obtenidas en el modelo impreso respecto al diseño.



Los valores obtenidos en esta evaluación ayudan a comparar la influencia de las dimensiones de fabricación en las tolerancias geométricas y de forma, para poder estimar las que se pueden obtener en una pieza diseñada para construir mediante FDM.

#### Evaluación microgeométrica

Para realizar una evaluación microgeométrica de los tubos impresos se va a realizar un único análisis.

Se obtienen dos medidas de rugosidad en dos generatrices de cada tubo. Estas medidas se realizan únicamente en el exterior debido a la imposibilidad de introducir el palpador en el interior de las mismas.

En este sub-apartado se analizan las medidas de calidad superficial obtenida en términos de Ra, Rz y R Sm.

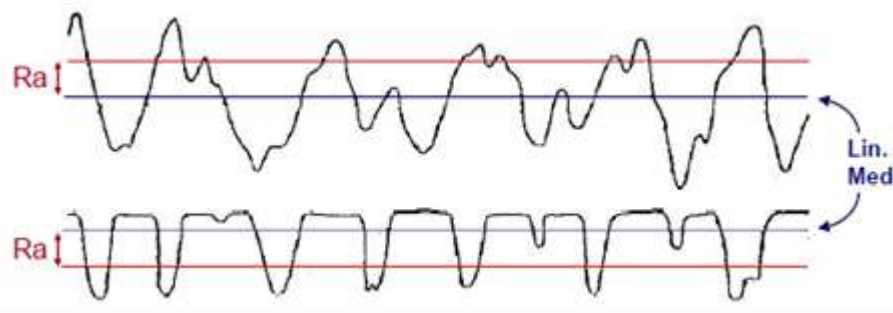
Se denomina rugosidad Ra a la media aritmética de las desviaciones de la curva del perfil con respecto a la línea media de la longitud básica, siendo esta la longitud de la línea de referencia donde se medirá la rugosidad superficial, donde actúa el rugosímetro. La longitud de evaluación consistirá en una o más longitudes básicas. Si el número de longitudes básicas de muestreo difiere de 5, número por defecto (Norma ISO 4288:1996), debe indicarse. Los valores numéricos de la longitud básica son 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 y 25 mm.

El parámetro Rz corresponde con el promedio de las alturas de pico a valle obtenidas en la misma longitud de evaluación.

El parámetro R Sm (Anchura media de los elementos del perfil), es el espaciado entre picos de más de una longitud de muestro en la línea media. Este se encuentra junto con Ra entre los más interesantes, puesto que su valor corresponde con el espesor de capa utilizado en la fabricación.

Para evaluar y medir dichas probetas se ha escogido el método del perfil (UNE-EN ISO 3274) con un rugosímetro con palpador de contacto mencionado en el apartado "Protocolo de evaluación- Equipos utilizados".

Ha sido escogido el perfil R, y dentro del mismo el parámetro Ra por ser el más utilizado en la industria. Sin embargo, puede haber dos perfiles muy diferentes con la misma Ra, Figura 3.11. Por este motivo se incluirán los resultados obtenidos en términos de Rz. Aunque Ra no ofrece una total información del perfil que se obtiene, y en algunos casos puede llevar a equívoco, este análisis se centrará mayoritariamente en el mismo, para hacer más amena la comparación entre procesos.



**Figura 3.11.** Ejemplo de 2 perfiles con misma Ra pero completamente distintos, y con un comportamiento al rozamiento muy diferente

Todos estos valores obtenidos ayudan a comparar la repercusión del tamaño de las piezas fabricadas en la calidad superficial de las mismas.

#### 3.2.2.4. Probetas tipo 2

Los cubos construidos en igualdad de condiciones y modificando únicamente la temperatura y velocidad de fabricación, han sido elaborados para evaluar la importancia de dichos parámetros en el resultado de la pieza a fabricar.

Se pretende evaluar la repercusión de estos parámetros en cuanto a las tolerancias geométricas y calidad superficial, sin que puedan influir las dimensiones, la geometría o incluso otros parámetros o condiciones de fabricación de la pieza.

#### Evaluación macrogeométrica

Para realizar una evaluación macrogeométrica de los tubos impresos se van a realizar distintos análisis. Por un lado se analizan las dimensiones obtenidas, y por otro la calidad de la superficie y los defectos macrogeométricos que pueden ser observados a simple vista o con el microscopio estereoscópico.

Para estudiar las dimensiones obtenidas se utiliza un micrómetro, con el que se comprueba la distancia perpendicular entre dos caras paralelas, que debe coincidir con 30 mm. Esta medición por tanto se hace entre caras opuestas dos a dos, y se harán 3 medidas por cada 2 caras (Figura 3.12), una posicionada en el centro y las otras dos cercanas a dos esquinas opuestas.

Por otro lado, se van a observar y analizar los defectos macrogeométricos (hendiduras, protuberancias, etc), así como la apariencia superficial con el microscopio estereoscópico.

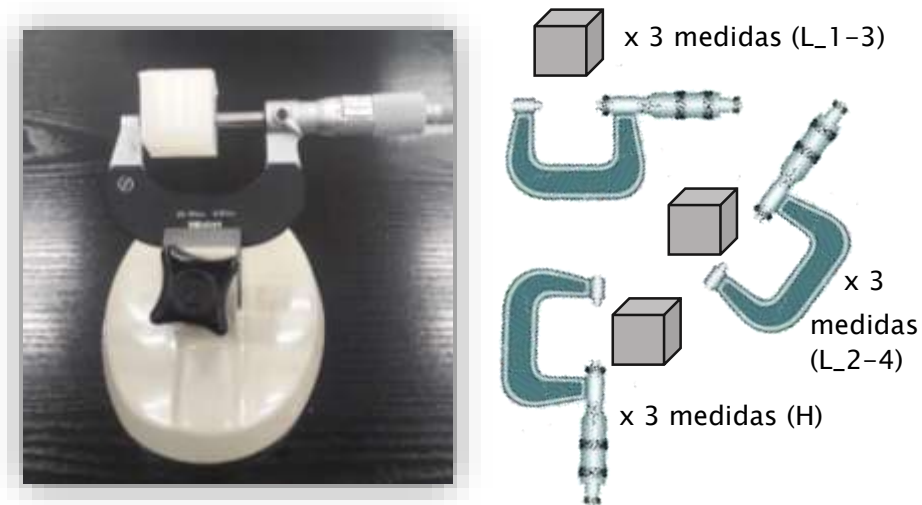


Figura 3.12. Medidas realizadas con el micrómetro

#### Evaluación microgeométrica

Para realizar una evaluación microgeométrica se van a realizar medidas de rugosidad en cada una de las caras de cada tubo impreso, exceptuando la base de los mismos al poderse ver afectada por la superficie de la plataforma de fabricación. Esta siempre será de una rugosidad menos por estar en contacto con la plataforma (normalmente lisa) y debido a la acción de la gravedad.

De este modo se toman 3 medidas de rugosidad en cada lateral del cubo (L\_1, L\_2, L\_3 y L\_4) y sólo 1 en la tapadera o base superior (S\_1) al comprobarse que si se obtienen más medidas en dicha cara difieren de manera despreciable.

En este caso se incide sobre todo en el valor Ra al ser el más utilizado y el que ofrece más información. Los otros parámetros coincidentes con el apartado anterior (Evaluación microgeométrica en las probetas tipo I) serán evaluados puntualmente.

### 3.6. Bibliografía

- 1- M.S.J Hashmi, *Comprehensive Materials Processing*, Ed. 13, Elsevier, 2014.
- 2- J. L. Vallés, *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014*, Bruselas (Bélgica), 2014.
- 3- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Edición, Springer, Nueva York (USA), 2015.
- 4- A. Boschetto, V. Giordano, F. Veniali, *3D roughness profile model in fused deposition modelling*, *Rapid Prototyping Journal*, 19 (2013) 240–252.
- 5- <http://www.matweb.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 6- E. Amanov, N. Thein-Dang, J. Burgner-Kahrs, *Additive Manufacturing of Patient-Specific Tubular Continuum Manipulators, Conference on Medical Imaging – Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, Orlando (2015).
- 7- M. Loaiza, R.A. Rezende, J. V. da Silva, et ál., *Chitosan microlayer on the photografting modified surface of PLA, PCL and PLA/PCL bioextruder scaffolds*, 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Physical Prototyping (VRatP), Portugal (2013).
- 8- M. Kreiger, J. M. Pearce, *Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products*, *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, 1 (2014) 1511–1519.
- 9- A. Relaño, J. Hidalgo, *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*, Trabajo Fin de Master, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- 10- M. N. Hafsa, M. Ibrahim, M. S. Wahab, et ál., *Evaluation of FDM Pattern with ABS and PLA Material*, 4th International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering, (ICME 2013), Putrajaya, Malaysia.
- 11- <http://cubify.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 12- S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, *Additive manufacturing: A framework for implementation*, *Int. J. Production Economics*, 149 (2014) 194–201.
- 13- 8- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D-P, RP and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Ed. Springer, Nueva York (USA), 2015.
- 14- S. Hwang, R. C. Rumpf, E. I. REYES, KS. MOON, N.S. KIM, *Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process*, *Journal of Electronic Materials*, 44 (2015) 771–777.
- 15- <http://www.mitutoyo.com>, última consulta 29 de junio de 2015.

- 16- <http://www.nikoninstruments.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 17- <https://www.mahr.com>, última consulta 29 de junio de 2015.



# Capítulo IV: Resultados

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## Capítulo IV: Resultados

### 4.1. Introducción

En este capítulo se pretende llevar a cabo la metodología experimental propuesta en el capítulo anterior.

Se realizan los ensayos tipo I y II del modo descrito, con las máquinas y requisitos mencionados, estudiando la influencia de los parámetros de fabricación así como de las dimensiones, en las tolerancias geométricas, tanto dimensionalmente como en formas y calidad superficial.

En primer lugar, se realizará un análisis de la importancia del tamaño o dimensiones del sólido a fabricar en los resultados. De esta manera, se construyen 4 tubos de espesor de pared y altura similares, de manera que solo se varía el diámetro de los mismos. Sobre estas probetas se estudia la aparición de defectos característicos de la tecnología utilizada, las variaciones dimensionales que existen, las desviaciones de forma, y los perfiles de rugosidad obtenidos.

Una vez analizado, se mantiene una geometría y unas dimensiones constantes, de manera que se modifican ciertos parámetros de fabricación (velocidad y temperatura). Se analiza la repercusión de dichos parámetros en los resultados de las piezas obtenidas (ensayos tipo II). Se estudian nuevamente los defectos característicos que aparecen, las desviaciones dimensionales obtenidas y la calidad superficial en términos de Ra creada.

En cada ensayo se hará hincapié en los paradigmas que intervienen en mayor medida en los resultados obtenidos, según las variables utilizadas.

De esta manera se debe llegar a los parámetros óptimos de fabricación para obtener los mejores resultados. Se comprobará si dichos parámetros coinciden con los indicados por el fabricante de la máquina y el material escogidos. Se rechazarán los resultados no aceptables.

Se pretende optimizar la productividad, aumentando en medida de lo posible la velocidad de fabricación, combinando este parámetro con la temperatura de extrusión del material, manteniendo o mejorando incluso los resultados.

### 4.2. Ensayos tipo I

En dicho apartado se quiere evaluar la importancia de la dimensión de la pieza construida en la calidad de la misma. Para el desarrollo de dicho apartado se elaboran las probetas descritas en el capítulo anterior como probetas tipo I (4 cilindros).

Una vez construidos, se procede a la evaluación macro y microgeométrica de los mismos.

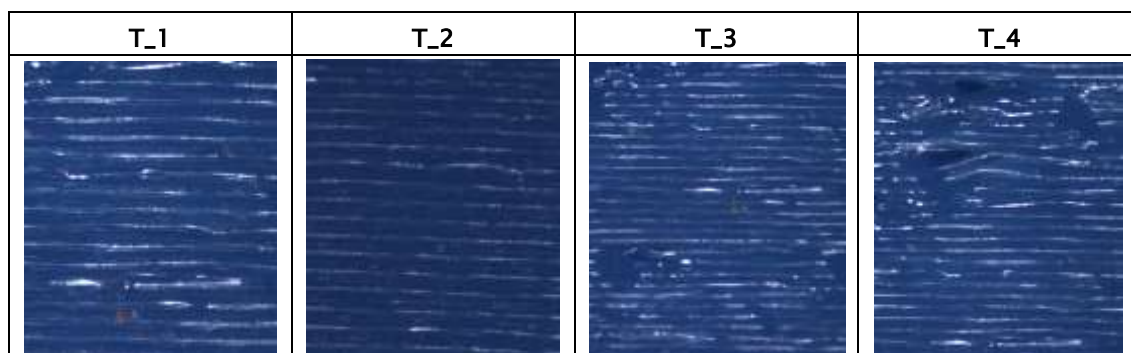
La evaluación macrogeométrica consiste por un lado en comprobar las dimensiones teóricas o de diseño con las reales obtenidas. Por otro lado, se realiza un análisis de formas para comprobar las desviaciones de geometría.

La evaluación microgeométrica consiste en analizar la calidad superficial de las probetas fabricadas para este ensayo únicamente en la superficie exterior de las mismas.

#### 4.2.1. Evaluación macrogeométrica

En primer lugar, se quiere comprobar la diferencia entre la calidad superficial aparente ocasionada por las diferentes dimensiones. En la siguiente Tabla 4.1 se puede obtener una primera inspección visual de los resultados que se van a obtener posteriormente en la evaluación microgeométrica e intuir la repercusión que puede tener el tamaño de la pieza en la misma.

**Tabla 4.1.** Influencia aparente de las dimensiones fabricadas en el acabado de las piezas



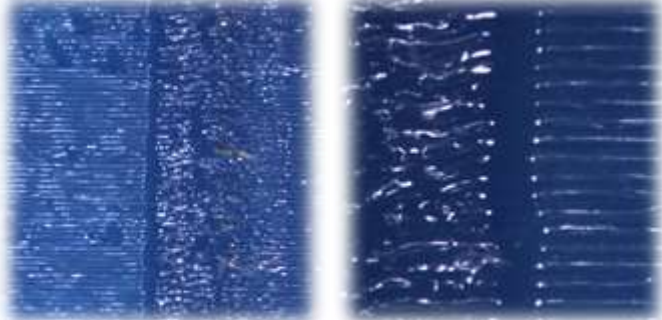
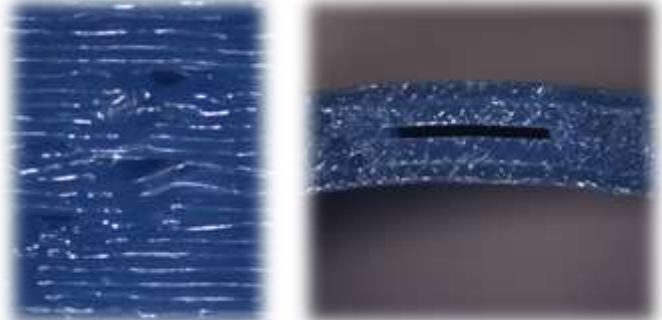
Con una primera inspección visual se intuye que, aunque aparecen más defectos en la superficie de piezas pequeñas que pueden afectar notablemente a las desviaciones tanto macro como microgeométricas, la superficie en general se mantiene más o menos constante. Esto quiere decir que, ignorando estos defectos, la calidad superficial aparentemente es similar (Ra aparente similar en las probetas tipo I).

Por otro lado, se van a examinar los defectos que aparecen en las piezas fabricadas, y a su vez relacionarlos con los característicos de esta tecnología (FDM). Una vez analizados los defectos destacados serán posteriormente relacionados con los resultados.

En la siguiente Tabla 4.2 aparecen dichos defectos visualmente más eminentes. Dichos defectos son: la costura, protuberancias, hendiduras, grietas, hileras residuales y defectos de forma muy destacados.



**Tabla 4.2.** Defectos más característicos encontrados en las probetas tipo I

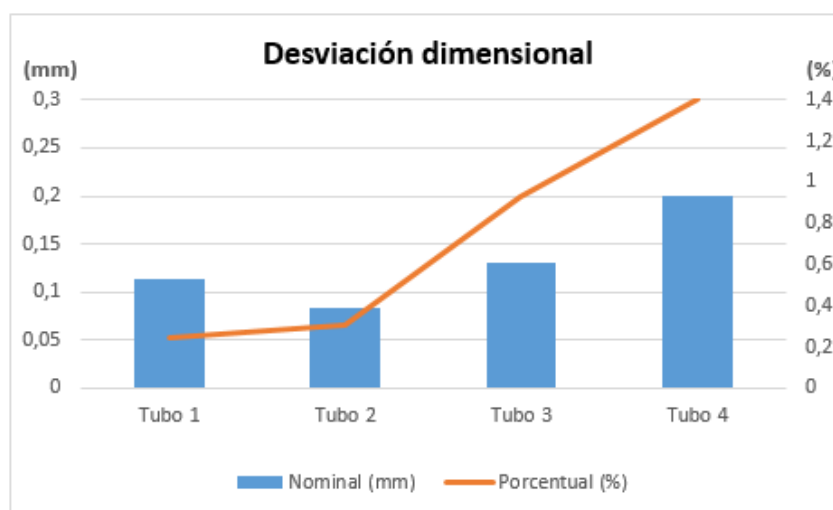
Defecto	Imagen	
Costura		
Protuberancias		
Hendiduras y grietas		
Ondulaciones		

Una vez analizada la apariencia de las probetas, se recogen las magnitudes que definen por completo el modelo de la probeta tipo I y se comprueban las desviaciones con las teóricas. Estas medidas se encuentran recogidas en la siguiente Tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Desviaciones dimensionales obtenidas con el micrómetro en las probetas tipo I

Probeta	-	Medida teórica	Medida Real	Desviación
C_1	$\varnothing_i$	60 mm	59,99 mm	0,01 mm
	$\varnothing_e$	56 mm	55,83 mm	0,17 mm
	H	40 mm	39,84 mm	0,16 mm
C_2	$\varnothing_i$	20 mm	20,03 mm	0,03 mm
	$\varnothing_e$	16 mm	15,86 mm	0,14 mm
	H	40 mm	39,92 mm	0,08 mm
C_3	$\varnothing_i$	12 mm	11,93 mm	0,07 mm
	$\varnothing_e$	8 mm	7,86 mm	0,14 mm
	H	40 mm	39,82 mm	0,18 mm
C_4	$\varnothing_i$	8 mm	7,82 mm	0,18 mm
	$\varnothing_e$	4 mm	-	-
	H	40 mm	39,78 mm	0,22 mm

En todos los casos, la media de las desviaciones obtenidas para cada tubo difiere entre 0,08 y 0,13 mm, a excepción del tubo más pequeño en el que aumenta considerablemente, además de no respetar el diámetro interior. Sin embargo, como es lógico, en términos porcentuales, estas desviaciones aumentan exponencialmente a medida que se disminuye las dimensiones (Figura 4.1). Es lógico pensar entonces, que para piezas de mayor tamaño se mantienen las desviaciones en torno a la décima de mm, y que proporcionalmente se consiguen tolerancias más estrechas.

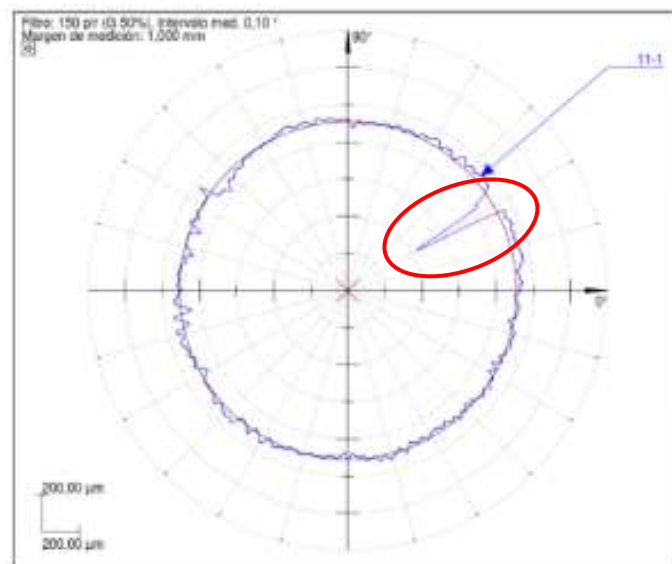


**Figura 4.1.** Desviaciones dimensionales nominales frente a porcentuales obtenidas con el micrómetro en las probetas tipo I

Las desviaciones dimensionales en las caras laterales a su vez, pueden estar ligadas a los errores existentes en los motores paso a paso del control numérico. Por este motivo, se mantienen constantes sea cual sea el tamaño de la pieza a fabricar.

Por otro lado se van a extraer de cada cilindro, mediante el equipo medidor de formas, la redondez que presentan 10 secciones de los mismos, 5 en la superficie interior y 5 en la superficie exterior. Dicha toma de datos se realizan separadas entre sí 10 milímetros.

En la siguiente Figura 4.2 puede observarse como queda reflejada uno de los defectos característicos de esta tecnología, la costura. Esta costura, sumada a protuberancias y hendiduras repartidas por la superficie, son las principales causas de las desviaciones de redondez.

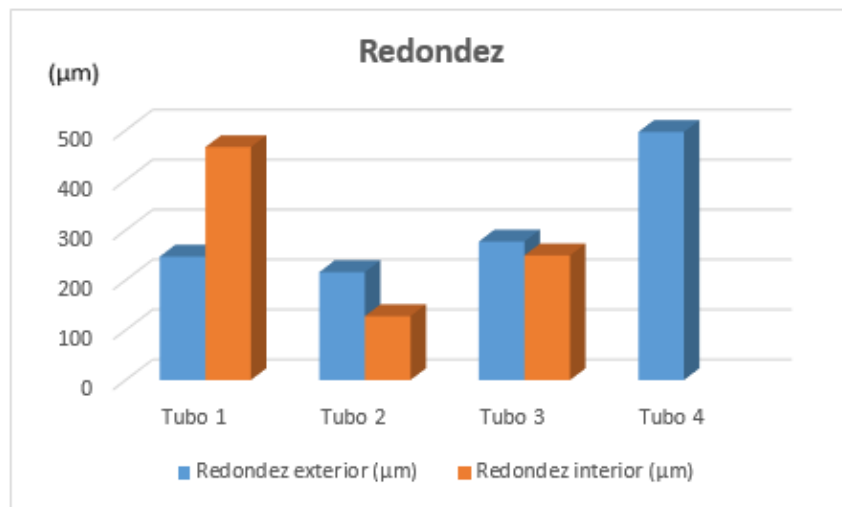


**Figura 4.2.** Redondez en T\_1\_Di\_5. Marcado defecto característico: costura

Los valores de desviación máxima de redondez están comprendidos aproximadamente entre 0,1 y 0,5. Aparentemente aumentan a medida que se disminuye las dimensiones, a excepción del tubo 1, que se ve fuertemente afectado por la costura tan marcada que presenta. En la Figura 4.3 se pueden observar las medidas de redondez media obtenidas en cada uno de los tubos tanto interna como externamente.

Esto quiere decir, que las piezas de menor tamaño tendrán mayores defectos en su redondez y estos a su vez, son considerados aún mayores por la proporción respecto a sus dimensiones.

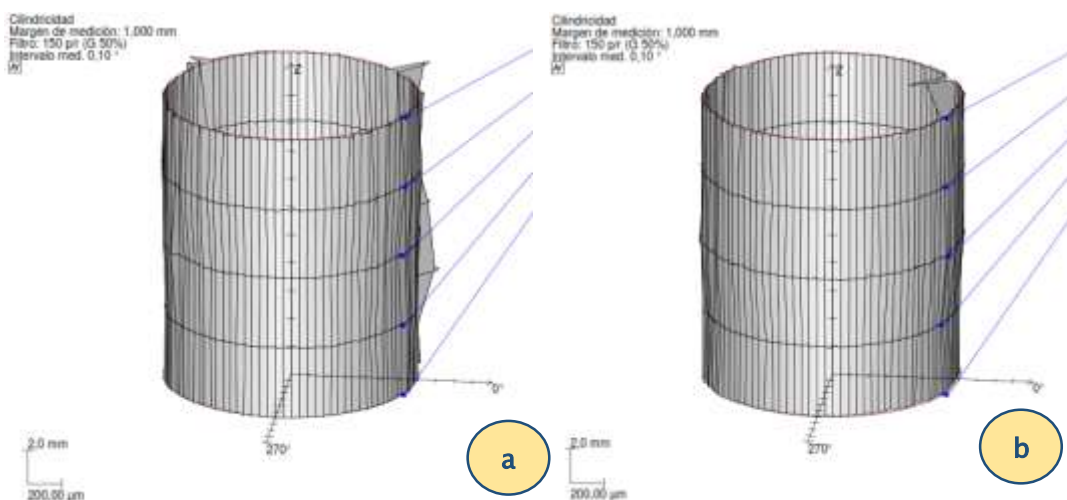
Una vez obtenidas dichas redondeces, se colocan contiguamente de manera concéntrica. Esto permite analizar la cilindridad aproximada de cada uno de los tubos.



**Figura 4.3.** Valores de redondez ( $\mu\text{m}$ ) obtenidos en los 4 tubos tanto exterior ( $D_e$ ) como interiormente ( $D_i$ )

Se puede observar en la Figura 4.4 el mapa de desviaciones para uno de los cilindros impresos. La desviación obtenida abarca la distancia comprendida entre pico más alto y valle más bajo encontrando en las 5 redondeces obtenidas. En los tubos de mayor tamaño (cilindros 1 y 2), esta cilindridad ronda entre 0,25 y 0,6 mm, dependiendo del tamaño de la costura que se crea. Sin embargo este valor se dispara al reducir los modelos de impresión, pudiendo alcanzar incluso valores cercanos al milímetro (cilindro 4, cilindridad: 0,962 mm).

Se observan claramente las pequeñas desviaciones presentes, que van disminuyendo si se aumenta el tamaño de la pieza. La costura característica de las máquinas de impresión por extrusión (FDM), queda notablemente definida en ambos análisis realizados. Esta costura es una acumulación de material al comienzo y final de cada sección o capa impresa, por lo que provoca una zona de mayor anchura que en el resto de dicha sección.



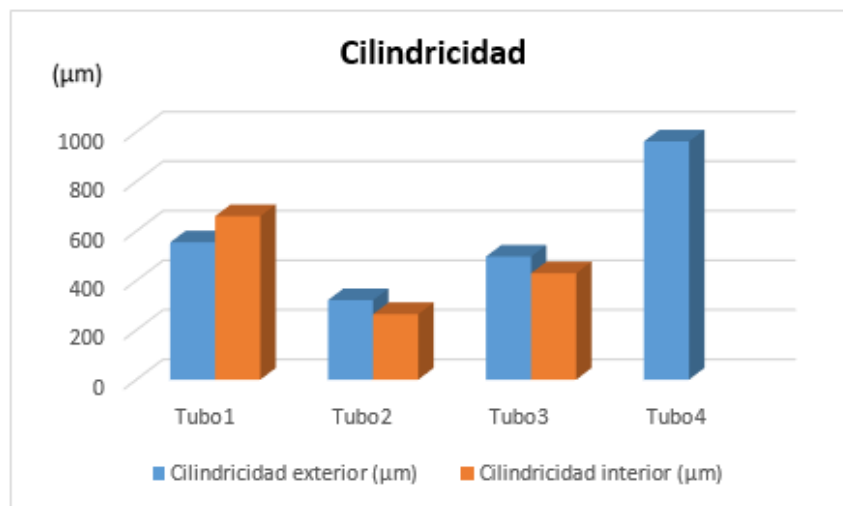
**Figura 4.4.** Cilindridad: (a) T\_1\_D<sub>i</sub>; (b) T\_1\_D<sub>e</sub>

En la siguiente Figura 4.5 quedan representadas la cilindridad de los 4 tubos tanto interna como externamente.

En la figura se observa que las desviaciones de cilindridad aumentan a medida que se disminuye el tamaño, a excepción del tubo 1, en el que la costura característica ha sido demasiado significativa y ha disparado estos valores, tal y como se esperaba después de los resultados de redondez.

Sin embargo, una posible hipótesis puede ser que al ir construyendo un sólido de mayor tamaño, la diferencia de temperatura entre las capas que se están imprimiendo y las anteriores provoca posibles contracciones o dilataciones del material. Esto provocaría a su vez mayores desviaciones de forma. Esta suposición aumenta el interés de realizar el estudio de otros parámetros en la fabricación mediante esta tecnología.

Para poder descartar esta opción se propone realizar el estudio en una máquina cerrada, que no permita la disipación del calor y estas contracciones.



**Figura 4.5.** Desviación de cilindridad obtenida en los 4 tubos tanto exterior como interiormente

Una vez realizado este análisis, se procede a examinar la rectitud de 4 generatrices tomadas en cada cilindro, tanto interna como externamente ( $D_{j\_V\_N}$ ). Estas generatrices se toman a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ . Se procura no realizar ninguna de las medidas de rectitud sobre ningún defecto de demasiada índole, incluida la costura. De este modo, se analiza la superficie y se realiza una marca para el comienzo de dichas mediciones que corresponde con  $0^\circ$ .

En la siguiente Figura 4.6 queda representada uno de estos análisis, de manera que se puede observar que la impresora no reproduce de manera correcta las generatrices o cualquier línea recta que forme un sólido.

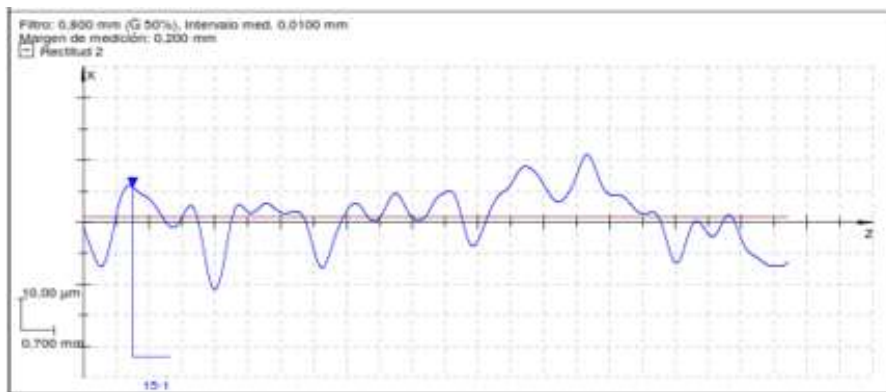


Figura 4.6. Rectitud de una de las generatrices de un tubo (T\_1\_De\_V\_180°)

Las desviaciones máximas de rectitud se encuentran comprendidas entre 0,04 y 0,12 mm para las 4 probetas, sin aumentar aparentemente el valor de desviación a medida que se reduce el objeto reproducido por impresión 3D a excepción de la última probeta. Las desviaciones medias de rectitud quedan representadas en la siguiente Figura 4.7.

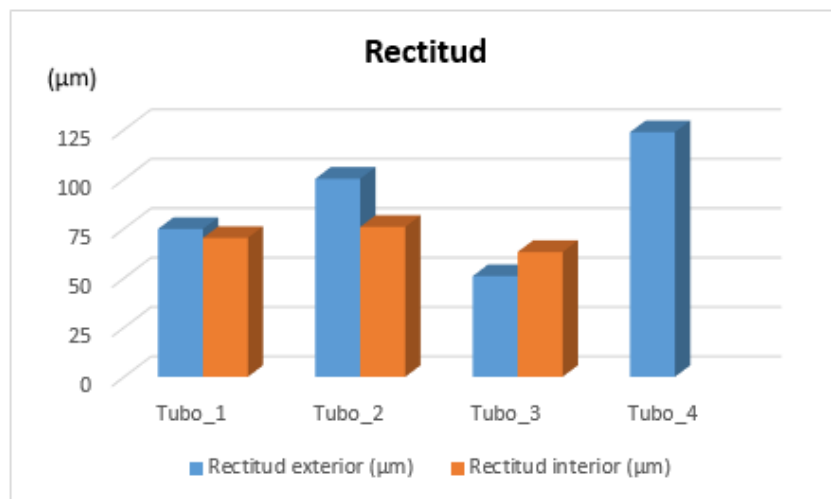
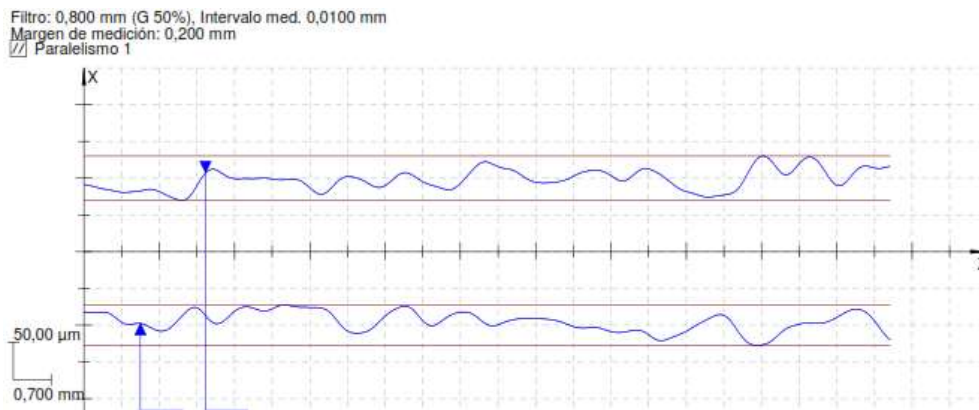


Figura 4.7. Desviaciones de rectitud obtenidas en los 4 tubos tanto exterior como interiormente

Una vez obtenidas las medidas de rectitud, se analiza el paralelismo entre las mismas dos a dos. Se realiza para cada dos generatrices situadas frente a frente, es decir, se analiza el paralelismo entre las generatrices de 0° con las de 180°, y las de 90° con las de 270°.

Se podría haber analizado el paralelismo entre las interiores y exteriores sin hacer distinción entre las mismas, pero se ha mantenido el criterio utilizado en los anteriores apartados.

Una medida de paralelismo se encuentra a modo de ejemplo reflejada en la Figura 4.8.

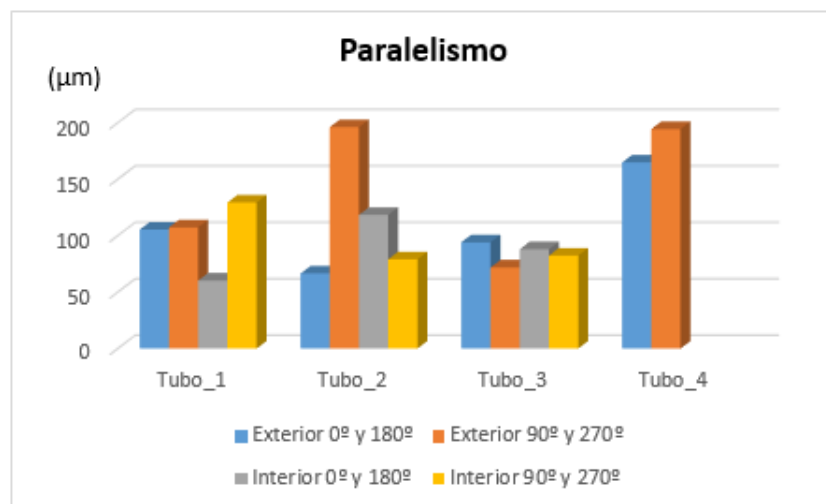


**Figura 4.8.** Paralelismo entre 2 generatrices opuestas de un tubo (T\_1\_De\_90° y T\_1\_De\_270°)

En estos análisis de los gráficos y datos anteriores, se puede observar claramente, que las líneas a lo largo del eje Z, no solo no van a ser paralelas entre sí, sino que no van a ser rectas.

Las desviaciones máximas de paralelismo quedan comprendidas entre 0,06 y 0.2 mm. Dichas desviaciones quedan representadas en la siguiente Figura 4.9.

En este caso ocurre como para la rectitud, que aparentemente no está más recalcada en objetos de menor tamaño, aunque sí serán desviaciones porcentualmente mayores.



**Figura 4.9.** Desviaciones de paralelismo (µm) obtenidas en los 4 tubos tanto exterior (2 primeras medidas) como interiormente (las 2 restantes)

#### 4.2.2. Evaluación microgeométrica

La evaluación microgeométrica consiste en analizar la calidad superficial de las probetas fabricadas para este ensayo únicamente en la superficie exterior de las mismas. Esta evaluación se realiza en términos de Ra, Rz y R Sm.

Se realizan 4 medidas (en 4 generatrices) para el primer tubo y se comprueba que no difieren de manera sustancial en los resultados. Por este motivo se decide realizar una única medida en los tubos sucesivos. En la siguiente Tabla 4.4 aparecen los valores obtenidos para cada probeta para cada uno de estos términos.

**Tabla 4.4.** Calidad superficial obtenida en los tubos

	Ra	Rz	R Sm
T_1	11,29 $\mu\text{m}$	100,4 $\mu\text{m}$	260,16 $\mu\text{m}$
T_2	13,86 $\mu\text{m}$	147,84 $\mu\text{m}$	352,09 $\mu\text{m}$
T_3	12,05 $\mu\text{m}$	100,48 $\mu\text{m}$	250,16 $\mu\text{m}$
T_4	13,66 $\mu\text{m}$	129,44 $\mu\text{m}$	287,9 $\mu\text{m}$

Se comprueba además, que estos parámetros no solo permanecen constantes para una misma probeta, sino que son estables entre ellas. Ra varía como máximo en 3  $\mu\text{m}$ , lo cual es un valor despreciable tratándose de estas tecnologías. Esta se encuentra entre los valores 11 y 14  $\mu\text{m}$  para todos los casos, obteniéndose una clase de rugosidad N10.

Los otros parámetros varían en mayor medida debido a defectos puntuales como pueden ser protuberancias o hendiduras y que provocan picos de rugosidad. Aun así, los valores no se disipan demasiado.

La rugosidad difiere en las desviaciones de forma de manera que permanece más o menos constante sin intervenir la escala a la cual se fabrique, es decir, los valores serán muy parecidos sea cual sea el tamaño de la pieza que se imprima. La única diferencia notable dependerá de los defectos característicos que aparecen en cada pieza.

En la siguiente Figura 4.10 se puede observar el perfil de rugosidad así como otros valores de calidad superficial obtenidos en un tubo.

Como se ha mencionado antes el parámetro R Sm es importante en las tecnologías de Fabricación Aditiva, puesto que va a coincidir con la altura o espesor de capa, en este caso 0,25 mm.

Estos valores muestran las desviaciones que presenta la pieza impresa, resultando un margen de error bastante estrecho. Las piezas se consideran aceptables en cuanto a dimensiones y rugosidades para reproducción de modelos conceptuales, para la impresión de prototipos que permitan realizar pruebas funcionales se precisa unas impresoras de mejores prestaciones.



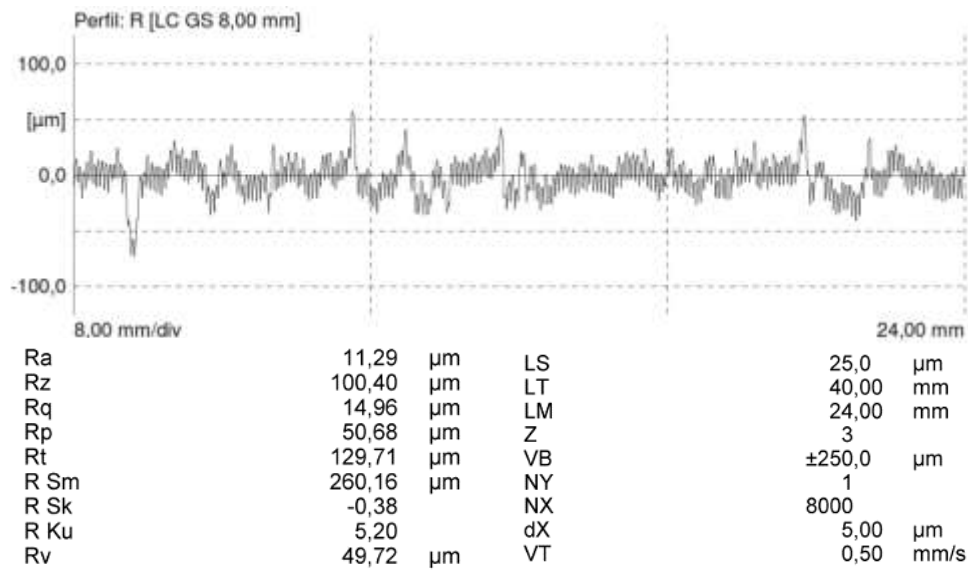


Figura 4.10. Rugosidad superficial medida en T\_1\_De\_180°

### 4.3. Ensayos tipo II

En dicho apartado se quiere evaluar la relevancia de los parámetros de fabricación utilizados en la calidad de la misma. Para el desarrollo de dicho apartado se elaboran las probetas descritas en el capítulo anterior como probetas tipo II (30 cubos).

Una vez construidos, se procede a la evaluación macro y microgeométrica de los mismos.

La evaluación macrogeométrica consiste por un lado en comprobar las dimensiones teóricas o de diseño con las reales obtenidas. Por otro lado, se caracterizan los errores o defectos típicos propios de esta tecnología, así como se analiza visualmente la calidad aparente.





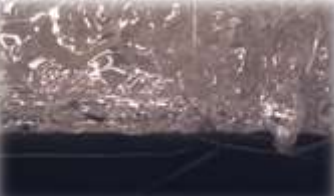





La evaluación microgeométrica consiste en analizar la calidad superficial de las probetas fabricadas para este ensayo.

#### 4.3.1. Evaluación macrogeométrica

En primer lugar se van a examinar los defectos que aparecen en las piezas fabricadas, y a su vez relacionarlos con los característicos de esta tecnología (FDM). Una vez analizados los defectos destacados serán posteriormente relacionados con los resultados.

En la siguiente Tabla 4.2 aparecen dichos defectos visualmente más eminentes. Dichos defectos son: las protuberancias, hendiduras, grietas, hileras residuales, defectos de forma, así como una marca de salida de la herramienta.

**Tabla 4.5.** Defectos más característicos encontrados en las probetas tipo II

Defecto	Imagen	
Protuberancias		
Hendiduras y grietas		
Hileras residuales		
Ondulaciones		
Salida de la herramienta (cabezal)		

Estas imágenes han sido tomadas con el microscopio estereoscópico, pero dicha influencia es apreciada a simple vista.

Además de los defectos, cabe destacar las diferencias que marcan los parámetros utilizados para la fabricación de cada probeta. De este modo, se distingue la repercusión del aumento de la temperatura y la velocidad en el acabado de las piezas, tal y como se observa en las siguientes Tabla 4.6 y Tabla 4.7.

En las imágenes se observa claramente como a medida que aumenta la temperatura, hay una menor distinción de los hilos depositados, quedando la superficie más fusionada o compacta.

La velocidad sin embargo, no afecta de igual modo al resultado final obtenido. Mientras que para temperaturas bajas, la velocidad empeora aparentemente el acabado superficial obtenido, o al menos provoca la aparición de mayor cantidad de defectos, a temperaturas más elevadas (aproximadamente de 220°C en adelante), se mejora la calidad con un aumento de la velocidad. Esto puede tener la explicación de que al elevar la temperatura el filamento se encuentra más fluido y el inyector debe desplazarse más rápidamente para no depositar más cantidad de la necesaria en cada punto. Otra conjetura puede ser que al mantener el cabezal a temperaturas elevadas más tiempo cercano al hilo depositado, favorece la fluidez y por tanto, la libre expansión del material.


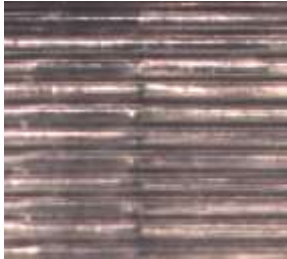


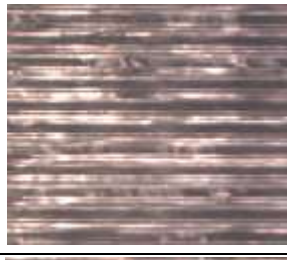




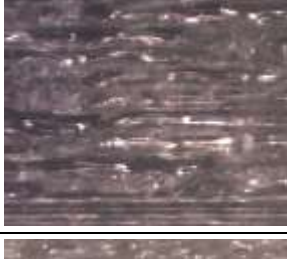
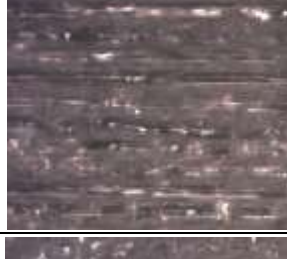
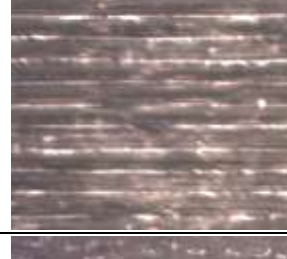
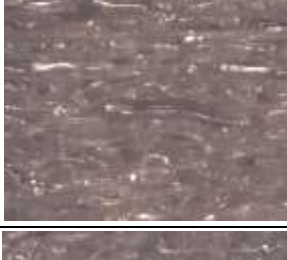





Aparentemente, podría seguir aumentándose la velocidad de avance y poder conseguir mejores resultados a velocidades más altas, lo cual mejoraría la productividad.

En la siguiente Tabla 4.7, se muestra esta misma influencia de los parámetros en la base superior de las piezas. Al ser un material semitransparente, en algunos casos puede observarse incluso los hilos de la capa anterior.


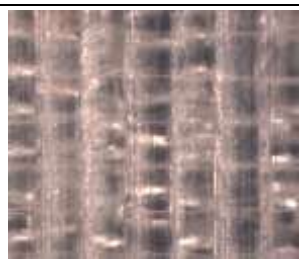


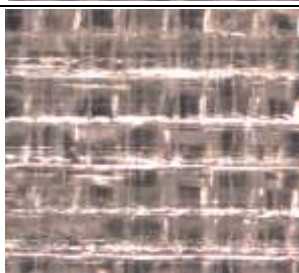
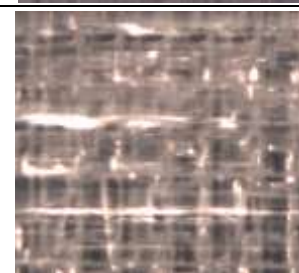
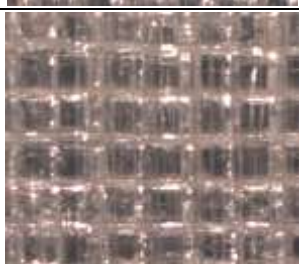

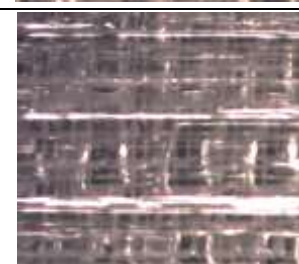
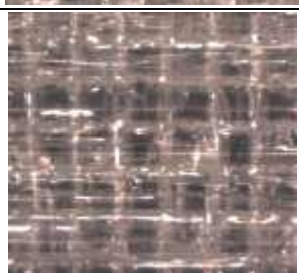
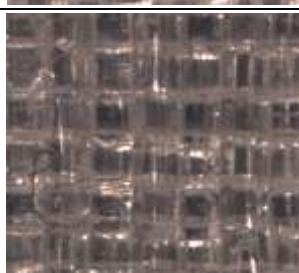
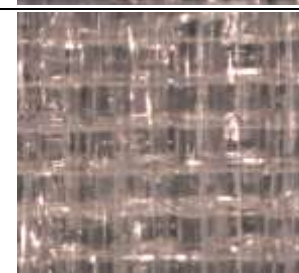


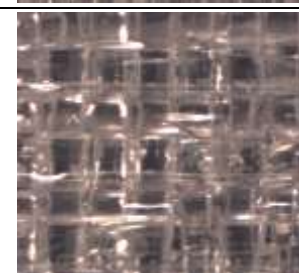
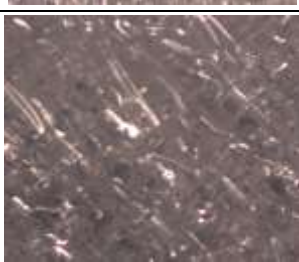


Como se puede observar, dicha superficie se encuentra afectada en menor medida que las laterales por la temperatura y velocidad. En este caso, aparentemente a medida que aumenta la temperatura empeora también la calidad superficial, y la velocidad a temperaturas bajas también influye del mismo modo. Sin embargo, a partir de temperaturas medias (230°C) comienza a observarse de nuevo el cambio. A temperaturas más altas, una velocidad superior parece que mejora la superficie de tapa superior. Esto es apariencia que hay que contrastar con los resultados que se obtengan a nivel microgeométrico.

Sin embargo, es importante tener en cuenta esta distinción de unas caras a otras, puesto que la superficie superior va a otorgar mejores resultados y aparentemente una menor rugosidad superficial, por lo que es importante a la hora de fabricar una pieza si se diseña una zona en la que deba de conseguirse unos acabados más finos. Esto significa que, depende de lo que prevalezca (lead time del producto o mayor calidad en ciertas zonas) se debe fabricar el elemento con una orientación u otra en la plataforma, aunque se precise el uso de soportes.

**Tabla 4.6.** Influencia de los parámetros de fabricación en el acabado de las piezas (caras)

	20 mm/s	25 mm/s	30 mm/s
185°C			
200°C			
215°C			
230°C			
245°C			
260°C			

**Tabla 4.7.** Influencia de los parámetros de fabricación en el acabado de las piezas (base superior)

	20 mm/s	25 mm/s	30 mm/s
185°C			
200°C			
215°C			
230°C			
245°C			
260°C			

Por otro lado, en algunos casos se observa una variabilidad independiente a los parámetros y geometrías utilizadas (Figura 4.11). Para este caso, en una de las probetas tipo II, sin existir variabilidad de parámetros, ni en las condiciones ambientales. Se imprimieron en la misma posición, y una seguida de la otra.

Estos resultados llevan a la conjetura de que el propio material no es homogéneo, y que se comporta de manera desigual en ciertos puntos. Esto puede provocar una menor adherencia a la plataforma o una extrusión desigual debido a una fluidez menor o mayor. Estas posibilidades provocan resultados desiguales en algunos casos como el observado en dicha Figura 4.11. En este caso la pieza impresa era el mismo modelo virtual, con los mismos parámetros de fabricación, las mismas condiciones ambientales y la misma posición en la plataforma de impresión. Como puede observarse los resultados son completamente diferentes. En los casos a) y b) el objeto queda adherido al cabezal más que a la plataforma. No es el impreso a temperaturas más bajas, por lo que se descarta la posibilidad de que no llegue a ser depositado sino que solidifique antes de hacerse. Por otro lado, no puede ser debido al Gap ya que afectaría en los 3 casos por igual, al no haberse modificado. Se llega a la conjetura como se ha dicho, que el propio material puede llegar a no ser homogéneo.



**Figura 4.11.** Variabilidad del proceso debida a factores no vinculados con los parámetros de fabricación

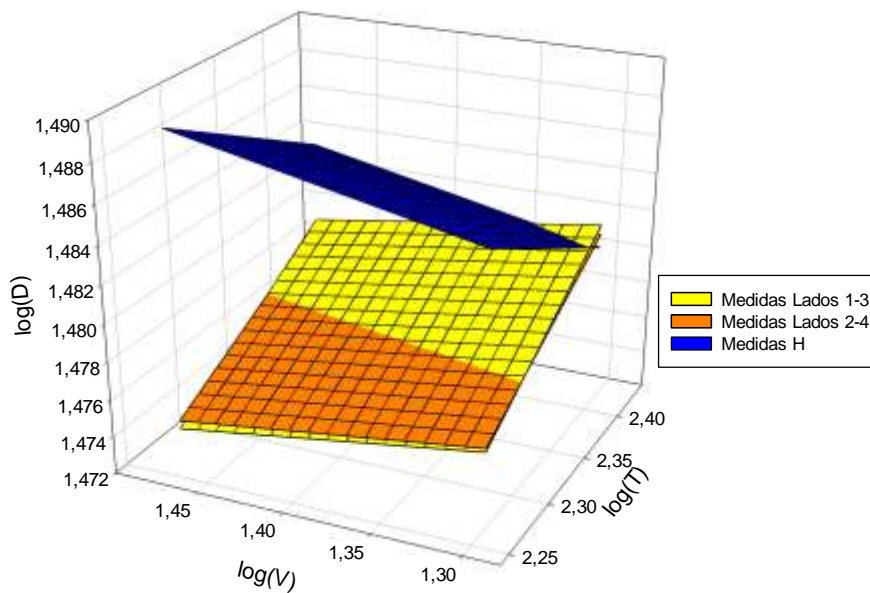
Una vez caracterizados los errores palpables a primera vista, se procede obtener las longitudes entre superficies paralelas de cada cubo para comprobar las tolerancias dimensionales alcanzadas y como varían con la modificación de dichos parámetros. Como se ha mencionado en el capítulo de metodología, se realizan 3 medidas por cada 2 caras, incluyéndose en la siguiente Tabla 4.8 las medias aritméticas de las mismas.

En primer lugar se observa como existen ciertas medidas que se alejan del valor real de manera importante. Todas estas medidas que se encuentran más dispersas corresponden con la altura del cubo (H), y se intuye que pueden ser ocasionadas por una falta de planitud de la mesa o plataforma donde se construye.

**Tabla 4.8.** Media de las medidas obtenidas con el micrómetro.

Probeta	Medida teórica (mm)	Medida L_1-3 (mm)	Medida L_2-4 (mm)	Medida H (mm)
C_30_185_20	30	29,98	29,95	30,42
C_30_185_22,5	30	29,94	29,93	30,97
C_30_185_25	30	29,91	29,88	30,37
C_30_185_27,5	30	29,93	29,91	29,95
C_30_185_30	30	29,86	29,86	30,46
C_30_200_20	30	30,03	30,06	30,46
C_30_200_22,5	30	30,00	29,93	30,76
C_30_200_25	30	29,83	29,87	31,48
C_30_200_27,5	30	29,89	29,89	30,83
C_30_200_30	30	29,93	29,90	30,38
C_30_215_20	30	30,02	29,95	30,48
C_30_215_22,5	30	29,88	30,04	31,18
C_30_215_25	30	29,91	29,89	31,16
C_30_215_27,5	30	29,95	29,87	30,79
C_30_215_30	30	29,72	29,93	30,99
C_30_230_20	30	30,05	30,17	29,99
C_30_230_22,5	30	30,13	30,07	30,27
C_30_230_25	30	30,04	30,10	30,76
C_30_230_27,5	30	29,95	29,98	30,73
C_30_230_30	30	29,74	29,94	30,67
C_30_245_20	30	30,18	30,34	30,59
C_30_245_22,5	30	30,26	30,22	30,19
C_30_245_25	30	30,26	30,28	30,30
C_30_245_27,5	30	30,18	30,18	30,38
C_30_245_30	30	30,20	30,08	30,73
C_30_260_20	30	30,45	30,23	29,74
C_30_260_22,5	30	30,32	30,29	30,30
C_30_260_25	30	30,32	30,20	30,11
C_30_260_27,5	30	30,28	30,19	30,33
C_30_260_30	30	30,20	30,12	30,31

En la siguiente Figura 4.12 se observan los planos de regresión de las medidas obtenidas para las anchuras y alturas. Estos representan la tendencia que tienen a tomar los valores dimensionales (D) dependiendo de la temperatura (T) y velocidad (V) escogida.



**Figura 4.12.** Planos de regresión. Tendencia de la variación dimensional según la temperatura y velocidad utilizada

Como puede observarse, las medidas en cuanto a altura (H) son considerablemente mayores (tienen desviaciones positivas y de mayor valor).

Por otro lado, en las siguientes ecuaciones (1–3) se puede comprobar que la anchura (ecuaciones 1 y 2) se comporta de manera similar. Para estos dos primeros casos, un incremento de la temperatura (X) favorece un aumento en la dimensión. A su vez, un aumento en la velocidad de avance, provoca una disminución de estos valores (Y). Sin embargo, la velocidad repercute en menor medida que la temperatura (menos de la mitad). Los exponentes son similares para los 2 casos, de ahí que los planos de regresión prácticamente se solapen.

Para la altura (H) la dependencia de ambos parámetros está más igualada, sin embargo sigue teniendo mayor repercusión la temperatura. En este caso el elevar la temperatura favorece una reducción de esta altura, y el incrementar la velocidad un aumento de la misma.

$$M(T, V) = x^{0,0391} * y^{-0,0149} * 10^{1,4047} \quad (1)$$

$$M(T, V) = x^{0,0344} * y^{-0,0120} * 10^{1,4139} \quad (2)$$

$$M(T, V) = x^{-0,0366} * y^{0,0179} * 10^{1,5456} \quad (3)$$

De estos resultados puede interpretarse que al elevar la temperatura se incrementa la fluidez del material, lo cual provoca que en cada capa este se expanda en mayor medida. Esto provoca un aumento de las dimensiones correspondientes a la anchura y a su vez la reducción del espesor de cada capa y por tanto de la altura final de la pieza.



Por el contrario, una reducción de la velocidad provoca que el cabezal tarde más tiempo en desplazarse, lo cual provoca que el calor tarde más tiempo en disiparse, y por tanto el material tarda más tiempo en solidificar. Por este motivo, el material a velocidades más lentas, podrá extenderse con mayor facilidad que si se deposita rápidamente, y esto nuevamente provoca mayor dimensión en la anchura y una reducción de altura.

No obstante, se va a analizar la repercusión de estos parámetros de manera independiente, estudiando las ecuaciones marginales. Por un lado se van a considerar las medidas a temperatura constante y velocidad variable, y posteriormente a velocidad constante y temperatura variable.

De esta manera para una temperatura constante y velocidad variable de fabricación, se obtendrán unos Diagramas de Dispersión incluidos en las siguientes Figura 4.13 a la Figura 4.18.

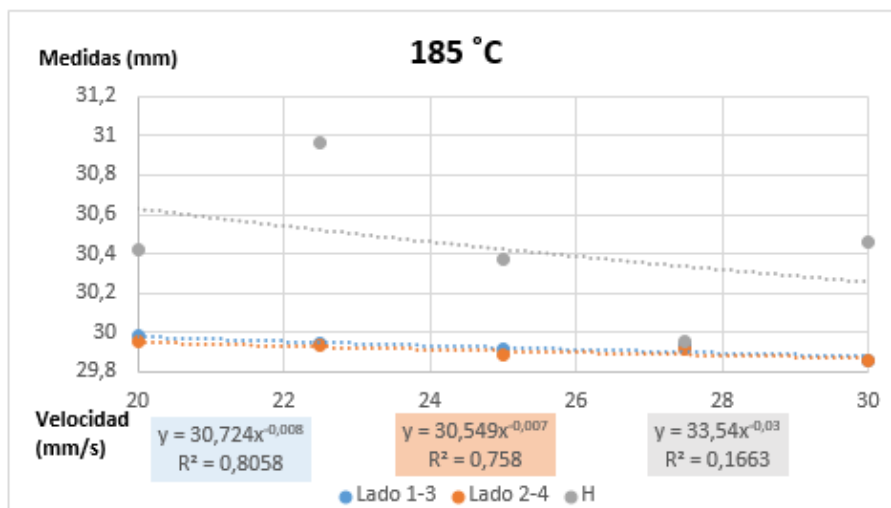


Figura 4.13. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 185° C y con V variable

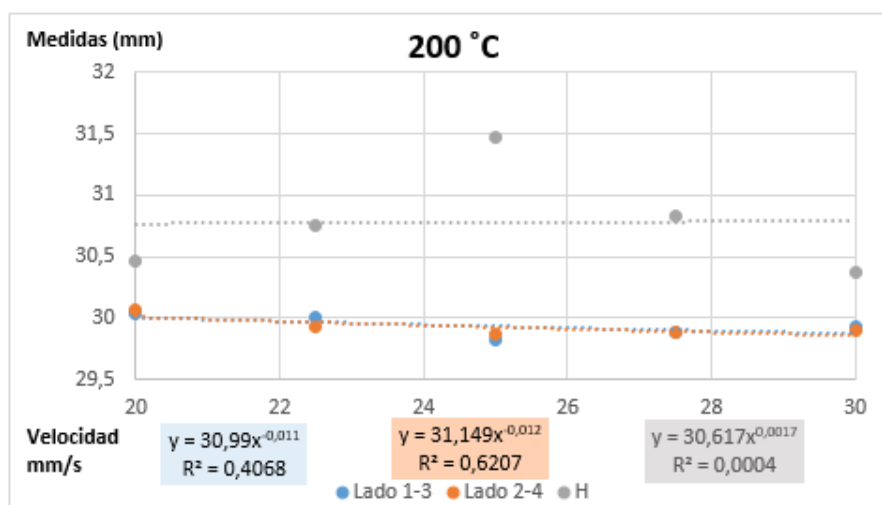


Figura 4.14. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 200° C y con V variable

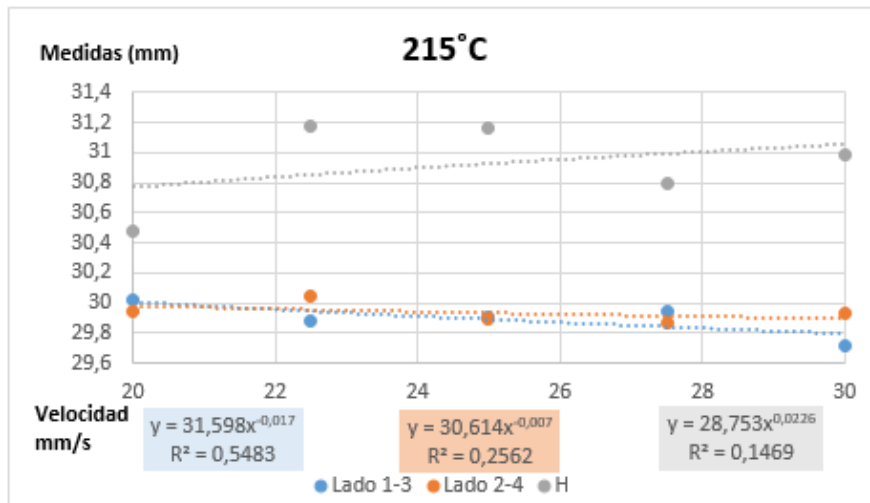


Figura 4.15. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 215° C y con V variable

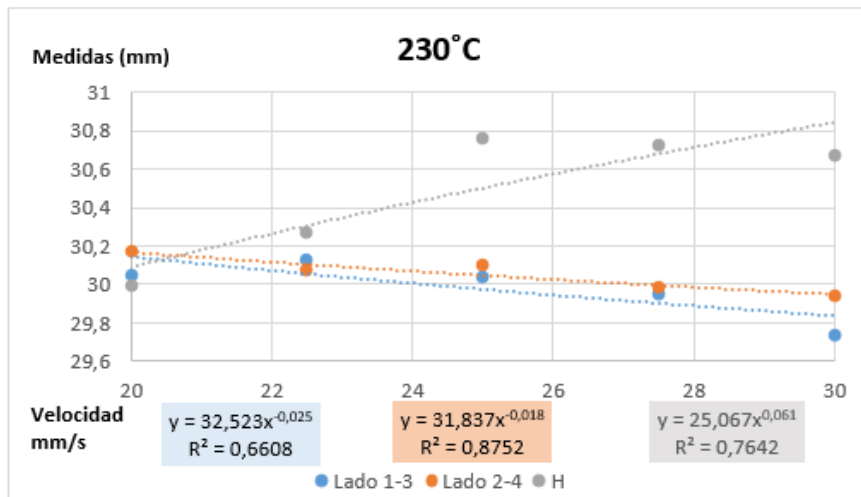


Figura 4.16. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 230° C y con V variable

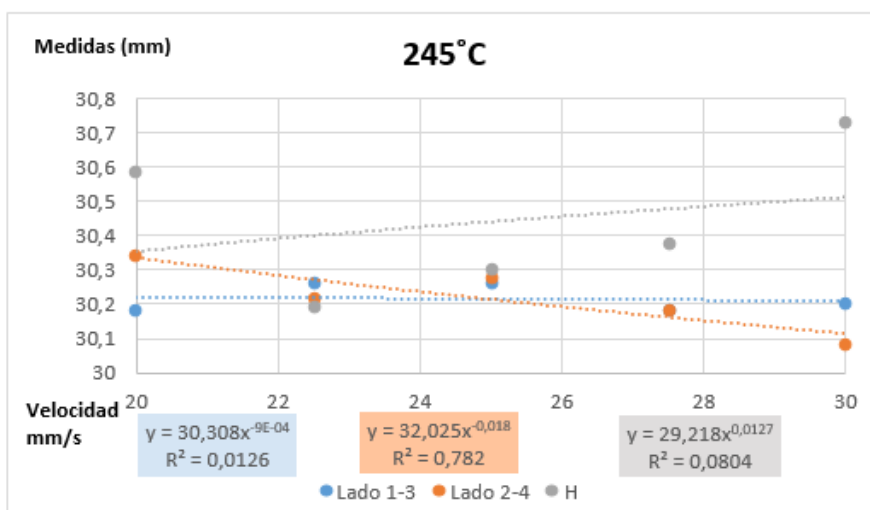


Figura 4.17. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 245° C y con V variable

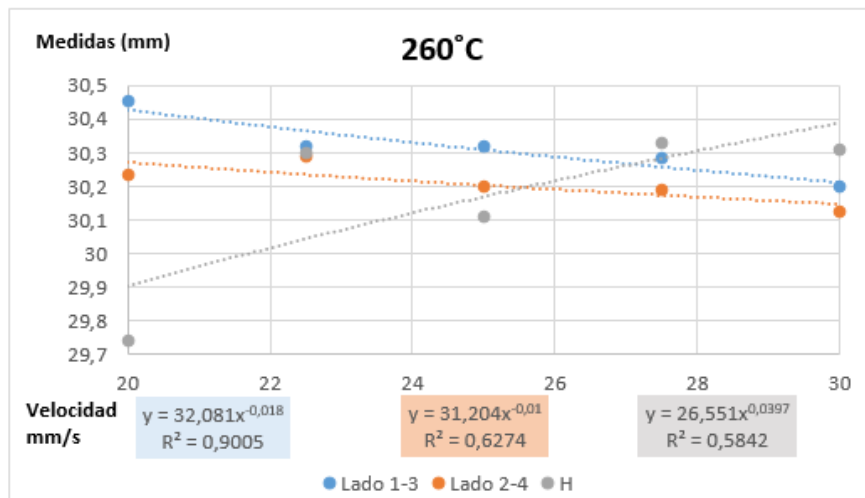


Figura 4.18. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 260° C y con V variable

De esta manera, queda claramente definido que para una temperatura constante disminuye la anchura de los cubos en ambos sentidos a medida que se aumenta la velocidad de fabricación. Esto coincide con lo anteriormente mencionado. El cabezal permanece más tiempo cercano al material recién extruido y por tanto la fluidez del mismo prevalece durante un tiempo más prolongado, lo cual provoca la facilidad de expandirse y aumentar en anchura previamente a su solidificación.

Este efecto no está definido en cuanto a la altura (H) del mismo, sino que las desviaciones en este sentido aparecen de un modo irregular. Existe una mayor dispersión en los resultados obtenidos en la dimensión altura, que pueden ser atribuidos a numerosos factores independientes de los parámetros de fabricación, como pueden ser las condiciones ambientales (temperatura y humedad), los errores de la máquina (motores paso a paso), pequeñas vibraciones, o incluso la propia falta de homogeneidad del material.

Para evitar la disipación del calor que provoca esta disminución considerable de la dimensión en dos sentidos del sólido fabricado, se propone el uso de máquinas cerradas. Estos defectos podrían ser evitados cerrando la máquina para mantener y controlar el calor y mantener la fluidez del polímero.

Por otro lado, a velocidad constante, se observa claramente que la dimensión en cuanto a la anchura de los cubos en ambos sentidos aumenta al elevar la temperatura (Figura 4.19 a la Figura 4.23). Esto como ya se ha explicado, puede tener la misma explicación. Al estar el material caliente, se mantiene con mayor fluidez, esparciéndose en mayor medida previamente a su solidificación.

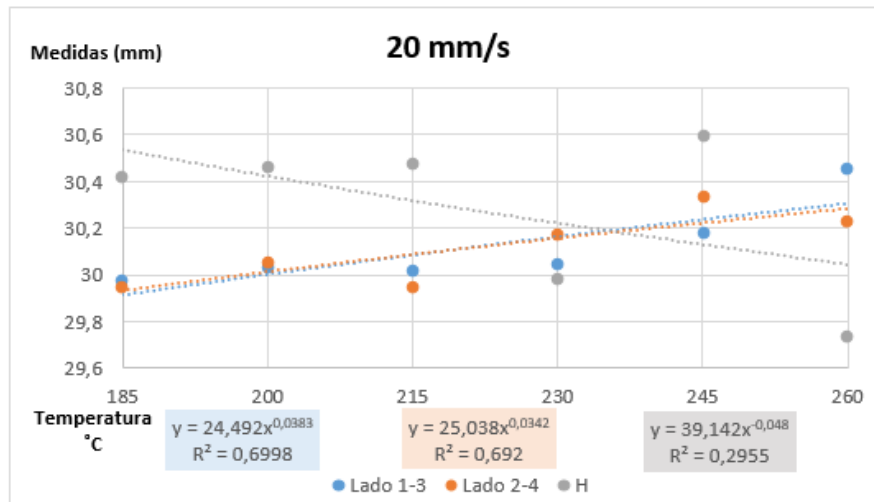


Figura 4.19. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 20 mm/s y T variable

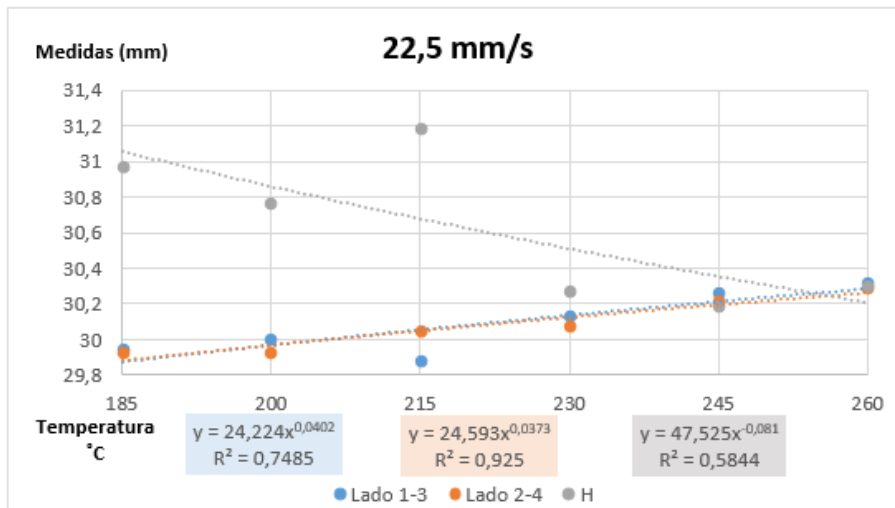


Figura 4.20. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 22,5 mm/s y con T variable

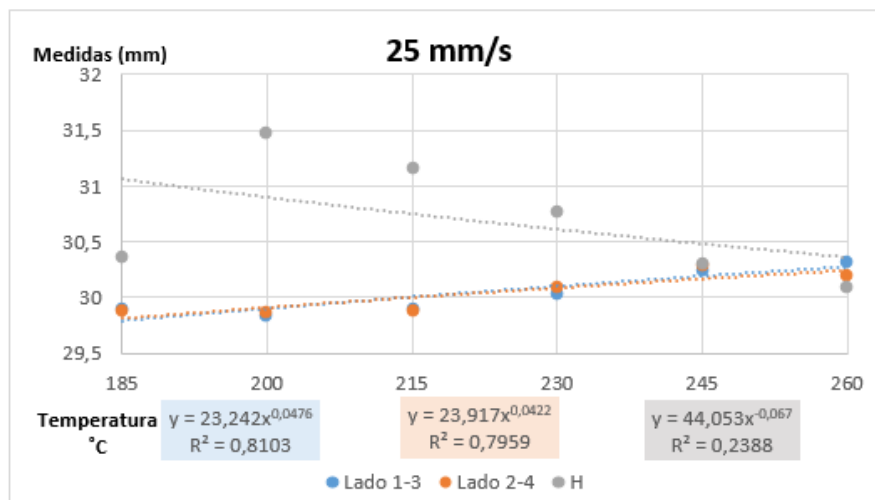


Figura 4.21. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 25 mm/s y con T variable

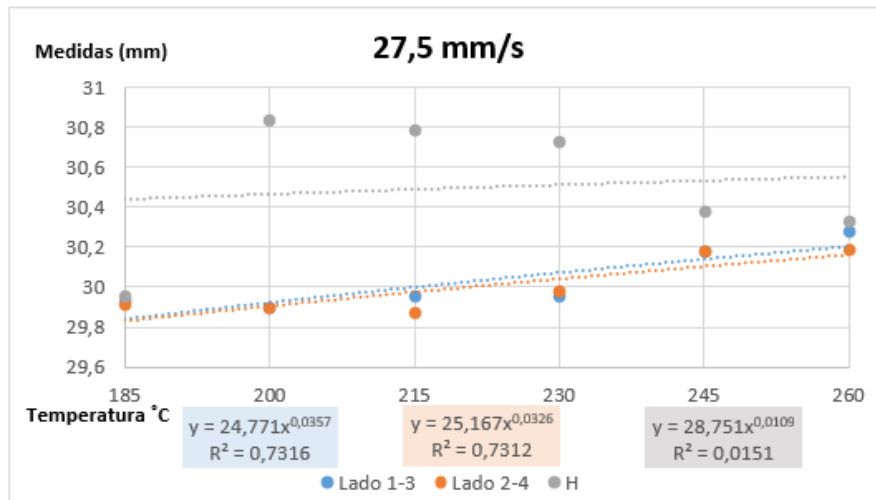


Figura 4.22. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 27,5 mm/s y con T variable

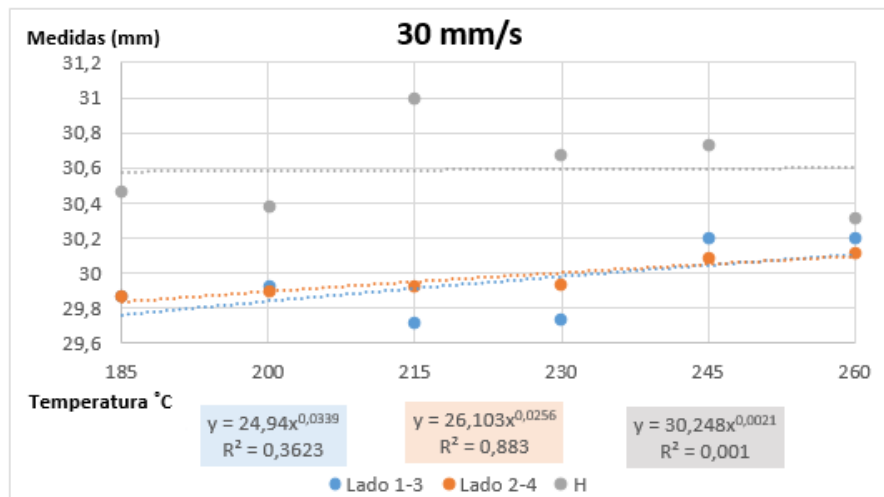


Figura 4.23. Diagrama de dispersión de las dimensiones obtenidas a 30 mm/s y con T variable

Al igual que antes, la altura de los cubos (H) no tiene un comportamiento potencial al verse influida por la temperatura. La dispersión de las medidas de altura es mucho mayor, por lo que se llega a la conjetura de que influyen en mayor medida otros factores.

Estas variaciones de altura tan irregulares y dispersas se supone que son debidas, como se ha mencionado, a varios motivos:

- Posibles errores en los motores paso a paso del control numérico (error máquina)
- Fluencia del material (en función de la temperatura y velocidad)
- Planitud de la mesa (Gap variable)
- Temperatura y humedad ambiental (condiciones ambientales)
- No homogeneidad del material (error material)

Una pequeña desviación en la planitud de la mesa varía en cada punto el Gap programado. Esto a su vez, provoca que el material pueda fluir con mayor o menor libertad y en un sentido u otro. Como línea futura se propone comprobar dicha planitud y corregir los puntos en donde no se mantenga. A pesar de ello, H se ve influenciada por otros factores, ya que hay modelos que se han impreso en la misma posición, y otorgan diferentes tamaños. Esto lleva a la conclusión de que H a su vez se ve influenciada por los otros factores ya mencionados.

Se propone evaluar el diámetro de los hilos depositados y solidificados para observar la variación de los mismos en función de estos parámetros, y relacionarlos con las posibles variaciones dimensionales obtenidas. Para ello, es preciso realizar un corte transversal a la dirección de los hilos, evitando la posible deformación plástica derivada del mecanizado. Esto podría realizarse con tecnologías no convencionales como puede ser el corte por chorro de agua.

#### 4.3.2. Evaluación microgeométrica

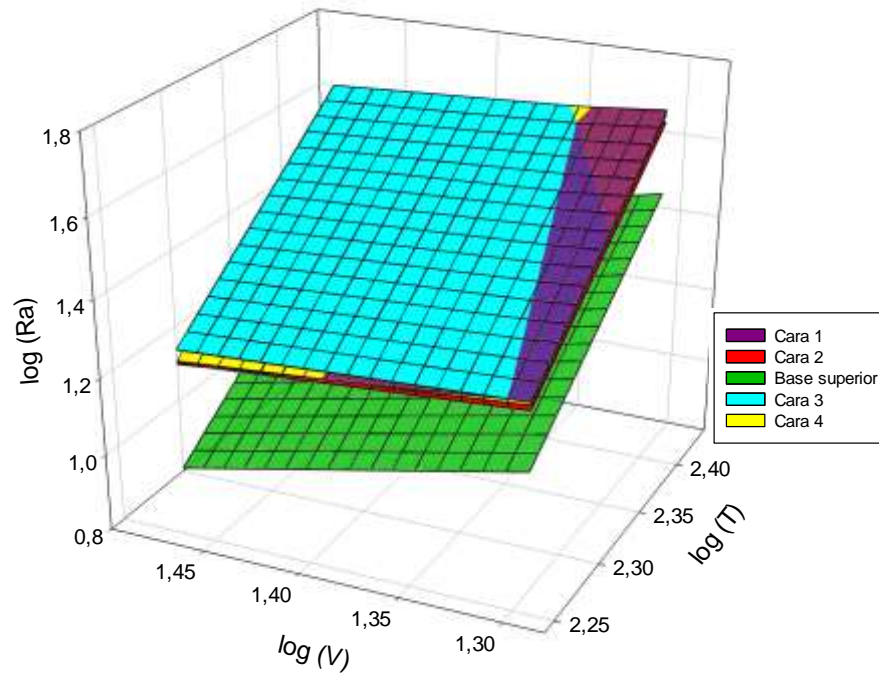
La evaluación microgeométrica consiste en analizar la calidad superficial de las probetas fabricadas para este ensayo únicamente en la superficie exterior de las mismas. Esta evaluación se realiza en términos de Ra, Rz y R Sm, sin embargo se va a evaluar principalmente el término Ra, por ser el más utilizado en la industria.

Se comienza por realizar 3 análisis de rugosidad por cada cara lateral del cubo, y otras 3 en la tapa o base superior del mismo. Se comprueba que la base superior permanece constante por lo que se realiza una única medida para los cubos sucesivos.

Al realizar las 3 medidas por lateral, se comprueba que estas no difieren tampoco en gran medida (Desviación de los valores inferior al 10%). Por este motivo se decide usar la media aritmética de las 3 medidas de cada cara para analizar los resultados. Esto tiene sentido ya que en la misma trayectoria no debe de existir notables diferencias. Podría intuirse que en todas las caras se obtienen los mismos resultados, pero se decide analizar los resultados e introducirlos en la siguiente Figura 4.24.

En dicha gráfica quedan representadas las medidas de rugosidad en términos de Ra ( $\mu\text{m}$ ) obtenidas en función de las distintas velocidades (mm/s) y temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) utilizadas  $Ra=f(V, T)$ .

La figura abarca los 5 planos de regresión correspondientes a las 4 caras laterales y la base superior del cubo.



**Figura 4.24.** Planos de regresión. Tendencia de la variación de Ra según la temperatura y velocidad utilizada

Se puede observar que, como se predecía, las funciones que representan la Ra de las caras laterales se solapan, lo que significa que tienen prácticamente la misma dependencia con los parámetros de fabricación (Cara 1  $\approx$  Cara i). En las siguientes ecuaciones (4–8) se observan las distintas funciones correspondientes con las caras laterales (de la 4–7 respectivamente). La ecuación número 8 corresponde con la base o tapa superior.

$$Ra(T, V) = x^{2,8469} * y^{-0,4747} * 10^{-4,5559} \quad (4)$$

$$Ra(T, V) = x^{2,7950} * y^{-0,3353} * 10^{-4,6422} \quad (5)$$

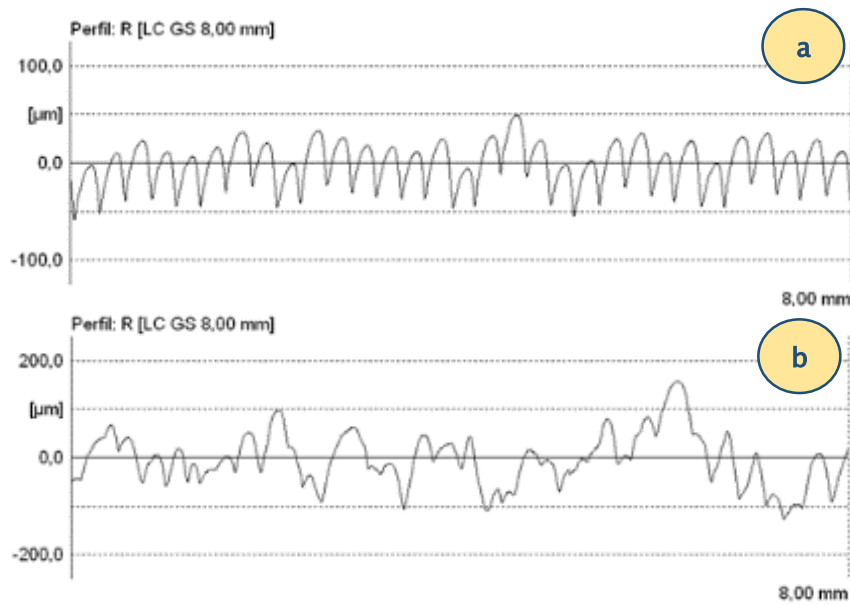
$$Ra(T, V) = x^{2,7974} * y^{-0,4281} * 10^{-4,7410} \quad (6)$$

$$Ra(T, V) = x^{2,8902} * y^{-0,3752} * 10^{-4,7934} \quad (7)$$

$$Ra(T, V) = x^{2,5871} * y^{-1,0559} * 10^{-3,3853} \quad (8)$$

Para todos los casos,  $R^2 > 0,8$ , a excepción de la base superior en la que se obtiene un  $R^2 = 0,72$ . No obstante los planos de regresión se ajustan lo suficiente a los resultados.

Se observa que para las superficies laterales el parámetro de mayor influencia es la temperatura utilizada (x). A mayor temperatura, mayor Ra. Esto parece ser debido a que temperaturas menores, los picos y valles del perfil de rugosidad se encuentran más compensados al ser más uniformes (Figura 4.25). Esto principalmente puede ser debido a que la fluidez del material aumenta a medida que se eleva la temperatura, lo cual provoca que el material se extienda sobre la capa anterior libremente.



**Figura 4.25.** Ejemplo de dos perfiles de rugosidad a 20 mm/s para (a) 185°C y (b) 260°C

Por el contrario, la influencia del parámetro velocidad ( $v$ ) es de menor repercusión, en torno a 7 veces menor (valores de los exponentes). En este caso, un aumento de la velocidad provoca una disminución en  $R_a$  pero no tan distinguida.

Todo esto quiere decir que, según los resultados obtenidos y para los parámetros utilizados, se podría aumentar la productividad escogiendo velocidades más altas sin que esto repercutiera negativamente en la calidad superficial.

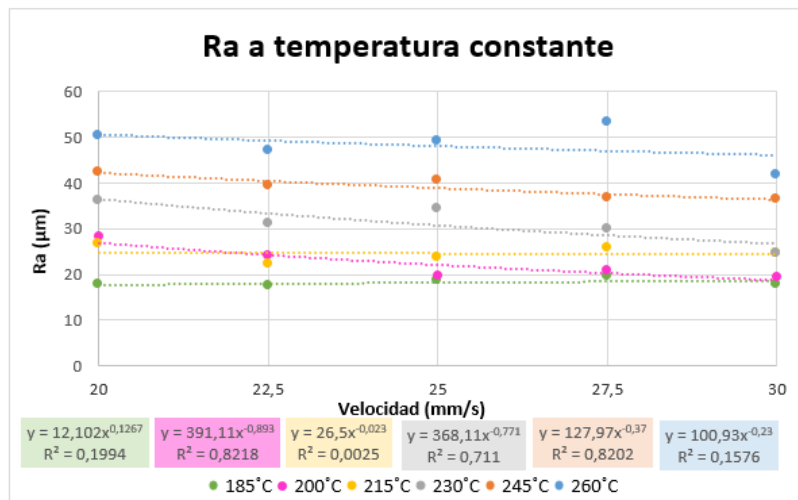
Por este motivo, como línea futura, se propone estudiar velocidades más elevadas aunque no estén en el rango de lo recomendado por el fabricante.

Por otro lado, en el caso de la base o tapa superior, el comportamiento es ligeramente diferente. La temperatura afecta en mayor medida que la velocidad, pero su influencia no diverge de manera tan importante como para los lados de la probeta. En este caso también aumenta  $R_a$  a medida que se eleva la temperatura, y disminuye a medida que se aumenta la velocidad.  $R_a$  puede ser menor debido a que la distancia entre hilos (o espesor del mismo, 0,5 mm) es mayor a la distancia entre capas (0,25 mm), lo cual provoca una separación mayor entre picos y por tanto una  $R_a$  menor. Otra conjetura podría ser, que en la base superior, no existe tiempo suficiente para que solidifiquen los hilos en la deposición entre uno y su contiguo, fusionando cada uno ligeramente con los colindantes. Esto es provocado por la menor disipación de calor y por efecto de la propia gravedad.

Como se ha demostrado que el comportamiento entre las medidas de las caras laterales es similar (difiere en menos de un 5 %), se procede a hacer un análisis marginal de cada parámetro individualizado. Para ello se utiliza la media aritmética de todas las medidas de  $R_a$  tomadas en todas las superficies laterales de cada probeta.



En las siguientes gráficas (Figura 4.26 y Figura 4.27) aparece la influencia de cada uno de estos parámetros aislados.



**Figura 4.26 .** Ra en función de la velocidad para ciertas temperaturas constantes

Como puede observarse y como era de esperar, la velocidad no es un parámetro que influya fuertemente en la calidad superficial. Hay casos en los que R<sup>2</sup> es extremadamente pequeña. Esto es debido a que existen algunas medidas en dichos casos que se dispersan de la tendencia general. Esto sumado a la poca influencia de la velocidad en Ra provoca que disminuya excesivamente R<sup>2</sup>.

Las ecuaciones (9–14) incluyen las funciones Ra=f (V) para cada una de las temperaturas utilizadas de menor a mayor.

$$Ra (V) = 12,102 * x^{0,1267} \tag{9}$$

$$Ra (V) = 391,11 * x^{-0,893} \tag{10}$$

$$Ra (V) = 26,5 * x^{-0,023} \tag{11}$$

$$Ra (V) = 368,11 * x^{-0,771} \tag{12}$$

$$Ra (V) = 127,97 * x^{-0,37} \tag{13}$$

$$Ra (V) = 100,93 * x^{-0,23} \tag{14}$$

Como puede observarse, para una temperatura constante, la función de Ra= f (V) se ajusta en más de un 90% en todos los casos a una ecuación potencial, por lo que el exponente es lo que delimita la influencia de este parámetro. Como se ha dicho tiene una repercusión muy baja (exponente<1).

A excepción de la temperatura menor, un aumento de velocidad mejora la calidad superficial. Esto coincide con lo estudiado con ambos parámetros de manera simultánea.

En el caso de esta temperatura tan baja (poco superior a la de fusión y por tanto la mínima de trabajo), el material prácticamente solidifica al instante, por lo que no influye que el cabezal tarde más tiempo en alejarse del material depositado.

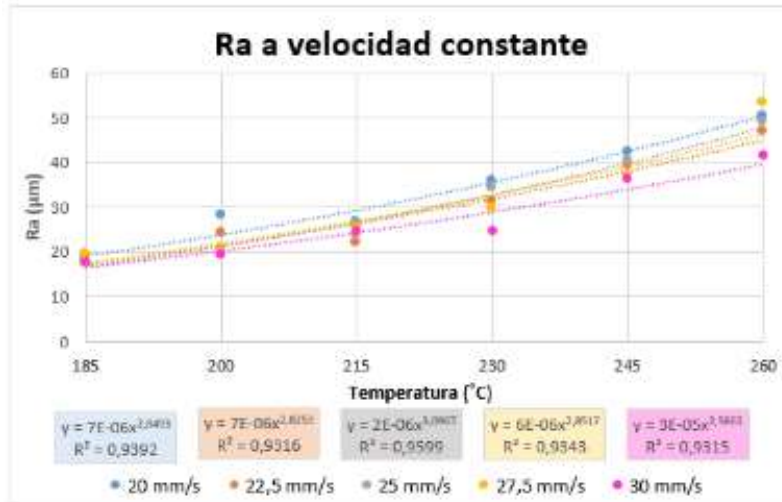


Figura 4.27. Ra en función de la temperatura para ciertas velocidades constantes

Las ecuaciones (14–18) incluyen las funciones  $Ra=f(T)$  para cada una de las velocidades utilizadas de menor a mayor.

$$Ra(T) = 7 * 10^{-6} * x^{2,8493} \quad (14)$$

$$Ra(T) = 7 * 10^{-6} * x^{2,8253} \quad (15)$$

$$Ra(T) = 2 * 10^{-6} * x^{3,0967} \quad (16)$$

$$Ra(T) = 6 * 10^{-6} * x^{2,8517} \quad (17)$$

$$Ra(T) = 3 * 10^{-5} * x^{2,5662} \quad (18)$$

Como era de esperar, para una misma velocidad, elevar la temperatura provoca un aumento de Ra. Estos resultados coinciden con lo anteriormente planteado en las regresiones y tienen la misma explicación.

La superficie superior se ha decidido estudiar por separado, ya que se observaba que Ra variaba con dependencia a ambos parámetros.

En las siguientes Figura 4.28 y Figura 4.29, aparece el comportamiento de Ra en esta base superior de los cubos.

Se observa nuevamente que la temperatura tiene una mayor influencia sobre Ra que la velocidad, aunque no tan decisiva como anteriormente. En este caso, no se puede obviar este parámetro, porque repercute en menor medida pero no de manera despreciable.

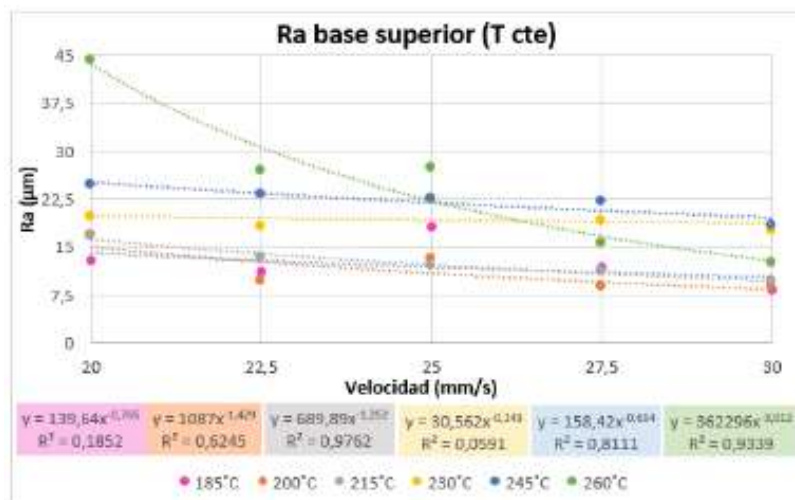


Figura 4.28. Ra en función de la velocidad para ciertas temperaturas constantes

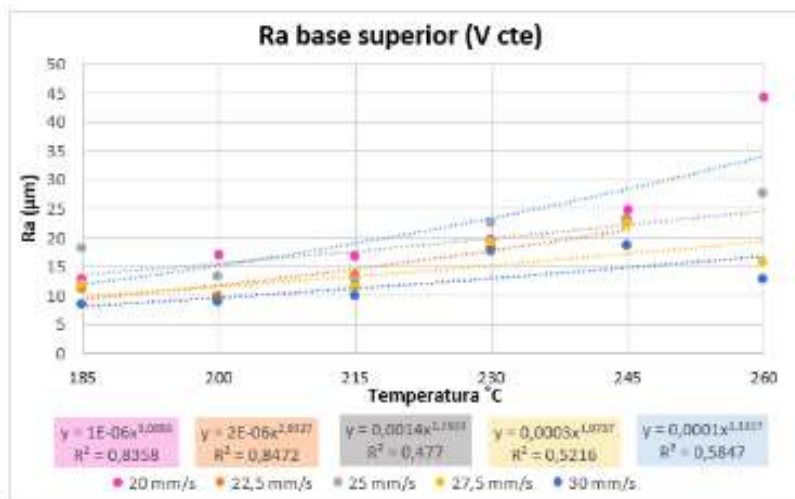


Figura 4.29. Ra en función de la temperatura para ciertas velocidades constantes

Un aumento de velocidad provoca nuevamente una disminución de rugosidad, es decir, una mejora en la calidad superficial. Esto se ve más fuertemente influenciado a medida que se eleva la temperatura. La explicación nuevamente es la misma, a diferencia de que aquí la deposición de los hilos no es continua sino paralela, por lo que la evacuación del calor se hace más compleja.

De este mismo modo, el aumento de temperatura provoca también un aumento de Ra aún más decisivamente.

Una vez realizados los análisis de los resultados obtenidos para una misma pieza (ensayos tipo II), se procede a hacer un análisis de resultados para obtener los parámetros óptimos de fabricación. En las siguientes Tabla 4.9 y Tabla 4.10 se incluye el resumen de dicha combinación de parámetros que ofrece buenas tolerancias dimensionales.

En verde aparecen los valores más aceptables, en naranja los medios y en rojo los más desfavorables. En este caso, el verde corresponde a las desviaciones inferiores al espesor de una capa (0,25), los valores tomados en rojo no son aceptables puesto que la desviación es mayor que el espesor de 2 capas (0,5 mm), y los valores en naranja corresponden a los valores intermedios. Aun así, las tolerancias dimensionales vendrán delimitadas por el uso al que se destina la pieza, y para cada caso habría que hacer posibles modificaciones de valores aceptables. Además, si se disminuye el espesor de capa, estos valores se verían mejorados.

**Tabla 4.9.** Desviaciones dimensionales medias en los ejes XY obtenidas para todas las probetas

	20 mm/s	22,5 mm/s	25 mm/s	27,5 mm/s	30 mm/s
185 °C	-0,035 mm	-0,065 mm	-0,105 mm	-0,080 mm	-0,140 mm
200 °C	0,045 mm	-0,035 mm	-0,150 mm	-0,110 mm	-0,085 mm
215 °C	-0,015 mm	-0,040 mm	-0,100 mm	-0,090 mm	-0,175 mm
230 °C	0,110 mm	0,100 mm	0,070 mm	-0,035 mm	-0,160 mm
245 °C	0,260 mm	0,240 mm	0,270 mm	0,180 mm	0,140 mm
260 °C	0,340 mm	0,305 mm	0,260 mm	0,235 mm	0,160 mm

**Tabla 4.10.** Desviaciones dimensionales medias en el eje Z obtenidas para todas las probetas

	20 mm/s	22,5 mm/s	25 mm/s	27,5 mm/s	30 mm/s
185 °C	0,420 mm	0,970 mm	0,370 mm	-0,050 mm	0,460 mm
200 °C	0,460 mm	0,760 mm	1,480 mm	0,830 mm	0,380 mm
215 °C	0,480 mm	1,180 mm	1,160 mm	0,790 mm	0,990 mm
230 °C	-0,010 mm	0,270 mm	0,760 mm	0,730 mm	0,670 mm
245 °C	0,590 mm	0,190 mm	0,300 mm	0,380 mm	0,730 mm
260 °C	-0,260 mm	0,300 mm	0,110 mm	0,330 mm	0,310 mm

Como se puede comprobar, en términos de altura los resultados son en la mayoría de los casos indeseables, y en muchas ocasiones inaceptables. Por este motivo se hace hincapié en la propuesta de estudio más específico del control dimensional en el eje Z, contemplando la posibilidad de analizar la sección de los hilos depositados, el control de temperatura y humedad ambiente, y otros posibles factores.

En la siguiente Tabla 4.11 se incluye un resumen de la combinación de parámetros para la que se obtienen buenas calidades superficiales. Al igual que en el caso anterior, en verde aparecen los valores más aceptables, en naranja los medios y en rojo los más desfavorables. Para este caso, se consideran en rojo las combinaciones que otorgan valores de  $R_a > 0,035$  mm, aunque la rugosidad vendrá delimitada por el uso al que se destina la pieza y para cada caso habría que hacer posibles modificaciones de valores aceptables.

**Tabla 4.11.** Ra media obtenida para todas las caras de cada probeta

	20 mm/s	22,5 mm/s	25 mm/s	27,5 mm/s	30 mm/s
185 °C	16,711 μm	16,172 μm	18,473 μm	17,939 μm	15,850 μm
200 °C	25,966 μm	21,272 μm	18,379 μm	18,564 μm	17,298 μm
215 °C	24,739 μm	20,382 μm	21,513 μm	22,982 μm	21,645 μm
230 °C	32,732 μm	28,608 μm	31,953 μm	27,715 μm	23,282 μm
245 °C	38,937 μm	36,075 μm	36,971 μm	33,801 μm	32,837 μm
260 °C	49,135 μm	42,946 μm	44,920 μm	45,859 μm	41,714 μm

Haciendo una combinación entre las anteriores tablas, se llega a la conclusión de que dentro de los rangos de parámetros utilizados, los mejores resultados se obtienen para velocidades bajas. La velocidad va ligada en cierto modo a la temperatura, y a su vez de lo que se quiere primar o dar prioridad, si a Ra o a las tolerancias dimensionales. A pesar de esto, y así como no se puede aumentar el rango de temperaturas a estudiar, sí que se puede y se propone estudiar la influencia de dichos parámetros a velocidades aún mayores. Ya que esto mejora la calidad superficial para todo este rango de temperaturas, además de aumentar la productividad.

Se recomienda el uso a temperaturas de 185°C, lo cual puede ser ampliado para un rango mayor. Sin embargo, en cierto modo no conviene realizar este incremento de temperatura a no ser que sea por un motivo en concreto, ya que se incrementaría el consumo. Esta recomendación está en cierto modo basada en que estas máquinas están pensadas para realizar prototipos personales de bajo coste, lo cual no requiere unas tolerancias dimensionales muy estrictas.

Basándose en los resultados obtenidos, se obtiene unas tolerancias más estrechas a temperaturas algo mayores (incluso hasta las 230°C). Esto quiere decir, que si se traslada el estudio realizado a la fabricación de piezas funcionales en otros equipos, habría que jugar con la combinación de dichos parámetros nuevamente. Por este motivo se propone como línea futura comprobar las tendencias obtenidas en otros equipos.

#### 4.4. Conclusiones

Se ha analizado la influencia de las dimensiones del objeto a fabricar manteniendo los parámetros de fabricación constantes en diversos aspectos:

- La aparición de defectos característicos. Los defectos palpables a primera vista aumentan a medida que se disminuye el tamaño, no sólo proporcionalmente en tamaño, sino también en cantidad.

- Las desviaciones dimensionales (macrogeometría dimensional). Estas se mantienen constantes adquiriendo un valor nominal aproximado entre 0,08–0,18 mm para los parámetros utilizados. Esto quiere decir que las desviaciones son porcentualmente mucho mayores a medida que disminuimos el tamaño. Por este motivo, pequeños detalles aun estando dentro de la resolución de la máquina, no serán representados con tanta fiabilidad.
- Las desviaciones de forma (macrogeometría– redondez y cilindridad). Las desviaciones de redondez, y por tanto la cilindridad, se ven afectadas con mayor intensidad a medida que disminuimos el tamaño. Existe la excepción de la probeta de mayor tamaño. Esta contiene mayores desviaciones ya que existen contracciones del material cuando hay una diferencia de temperatura considerable entre unas capas y otras. Esto, a partir de un tamaño, influye negativamente en dichas desviaciones. La solución a este defecto sería mantener la temperatura en el entorno, es decir, cerrar la máquina y establecer un control de la temperatura en todo momento. De esta manera se llega a la conjetura de que disminuirán notablemente dichas desviaciones.
- Las desviaciones de forma (macrogeometría– rectitud y paralelismo). No existe una dependencia aparente del tamaño del objeto a imprimir con la rectitud de sus aristas (generatrices en este caso) ni en el paralelismo de las mismas. Las desviaciones de rectitud rondan en torno a 0,04 y 0,11 mm para todos los casos, dependiendo en mayor medida de la cantidad de defectos puntuales que se captan en la zona evaluada. No obstante, para dimensiones considerablemente pequeñas estos valores se disparan.
- La calidad superficial (microgeometría). Los perfiles de rugosidad se consideran análogos o muy semejantes independientemente de las dimensiones de la pieza a fabricar. Ra se mantiene constante para todas las probetas tipo I. Así mismo se comprueba la correspondencia del parámetro R Sm con la altura o espesor de capa utilizado.

Por otro lado, se ha analizado la influencia en diversos aspectos de 2 parámetros de fabricación, velocidad de avance y temperatura de extrusión, manteniendo la geometría y dimensiones constantes:

- La aparición de defectos característicos visuales. Se ven influenciados en cierto modo por la temperatura y velocidad de fabricación. De este modo, a temperaturas más elevadas existe una mayor compactación o fusión de unas capas con otras, apareciendo de este modo menos grietas, hendiduras o protuberancias. Sin embargo, la superficie es más áspera.

- Por otro lado se demuestra que manteniendo todas los parámetros constantes, la geometría y dimensiones, así como la posición en la superficie, pueden existir cambios en los resultados. Se llega a la posible conjetura de que el material no es homogéneo.
- Las desviaciones dimensionales (macrogeometría dimensional ejes X e Y). Para el caso de las desviaciones dimensionales existe un comportamiento desemejante entre la anchura y la altura de las piezas. En el caso de la anchura, un aumento de la velocidad aumenta la desviación dimensional, siempre en valores negativos. El aumento de la temperatura provoca el aumento de estas dimensiones, otorgando en este caso valores negativos las temperaturas más bajas y desviaciones positivas las más altas. Esto es debido a la fluidez del material a temperaturas más altas, que provoca una libre expansión del material fundido antes de solidificar. Este efecto se ve favorecido cuando la velocidad es más baja, ya que el cabezal se encuentra caliente y cercano durante un tiempo más prolongado.
- Las desviaciones dimensionales (macrogeometría dimensional ejes Z). En el caso de la altura, hay muchas condiciones que intervienen en los resultados, sin reducirse a la modificación de los parámetros y los errores del control numérico. De este modo, hay que realizar controles más exhaustivos de la planitud de la mesa, de los posibles cambios o interferencias ambientales, etc.
- La calidad superficial (microgeometría). Los perfiles de rugosidad se ven fuertemente influenciados por las variaciones de estos parámetros. Para todos los casos,  $R_a$  tiene una mayor dependencia de la temperatura de extrusión que de la velocidad de avance. Elevar la temperatura desemboca en un aumento de  $R_a$ , ya que a mayor fluidez del material, éste se extiende con más libertad por la superficie depositada. Sin embargo, un incremento de la velocidad ayuda a reducir dicha rugosidad, ya que favorece la disipación del calor.
- Los mejores resultados tanto en rugosidad como en dimensiones se obtienen siempre para temperaturas inferiores a 230°C, aunque hay un rango más amplio de velocidades que incluso podría ser aumentado.

Como líneas futuras se propone:

- Utilizar otros equipos de esta tecnología para el estudio de la influencia de los parámetros de fabricación estudiados.
- Ampliar el rango de velocidades utilizado, ya que hay una tendencia de mejorar ciertos aspectos, además de mejorar la productividad.
- Cerrar la máquina para evitar la disipación del calor en el ambiente y evitar las posibles contracciones que aparecen durante la fabricación.

- Estudiar el comportamiento interno de los hilos depositados a las distintas temperaturas, es decir, comprobar la sección del hilo, si este se ha fusionado a temperaturas más altas por completo, etc.





# Capítulo V: Conclusiones

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## 5. Capítulo V: Conclusiones

### 5.1. Conclusiones generales

En este trabajo se ha recopilado información sobre la amplia variedad de tecnologías de Fabricación Aditiva que existen hoy en día. Todas ellas difieren en numerosos aspectos como pueden ser los materiales para los cuales están destinadas, el estado en el que se encuentran, la energía aplicada para la fabricación, etc. Por este motivo, es muy complejo tener un conocimiento completo de todas ellas y poder compararlas en todos sus aspectos. Además, el uso al que están destinadas es un aspecto esencial para comprobar rangos de tolerancias, resoluciones, etc.

Además, dentro de un mismo proceso, hoy en día varían los resultados de manera importante dependiendo de la máquina, los parámetros y el material utilizados.

Estas técnicas se encuentran en pleno auge, aumentando cada año el número de estudios e investigaciones respecto a las mismas. Sin embargo, aún siguen siendo técnicas con mucho desconocimiento, ya que suponen un cambio radical de mentalidad desde los inicios de un diseño, así como una inversión de capital alta. Las tecnologías AM suponen un nuevo paso en la evolución tecnológica hacia una industria sostenible y generadora de servicios asociados de alto valor añadido. Por este motivo, deben ser incluidas en los estudios, tal y como se hace con otros métodos de fabricación, debido a la necesidad del conocimiento de las mismas desde la primera etapa del ciclo de vida de los productos (diseño).

Se escoge como técnica de estudio el Modelado por Deposición Fundida o FDM (*Fused Deposition Modelling*), ya que es la técnica más expandida y utilizada, y sin embargo no es la más estudiada. Esto es principalmente debido a su bajo coste y que su uso primordial se reduce al personal, para fabricación de piezas en casa. No obstante, una posible mejora de los resultados podría ampliar sus funciones.

De esta manera se ha desarrollado una metodología para el estudio de la influencia de ciertas variables en el proceso FDM.

Por un lado se decide analizar cómo afecta la variación del tamaño de un objeto a imprimir en los resultados obtenidos (ensayos tipo I).

Para ello se ha propuesto la elaboración de probetas con una misma geometría y dimensiones variables, manteniendo todos los parámetros de fabricación constantes. Una vez fabricada se propone el estudio de las mismas en cuanto a su macrogeometría, tolerancias de forma y dimensionales, y microgeometría, calidad superficial.

Por otro lado, se decide estudiar la influencia de ciertos parámetros de fabricación en los resultados de las piezas impresas (ensayos tipo II).

Para ello se ha planteado la realización de probetas con una misma geometría y dimensiones, modificando dos parámetros importantes en la fabricación: la velocidad de avance y la temperatura de extrusión. Se pretende analizar la repercusión de dichos parámetros, tanto individual como conjuntamente, en las tolerancias dimensionales y la calidad superficial que generan.

Se ha llevado a cabo la metodología propuesta y se ha llegado a varias conclusiones en ambos ensayos.

Se obtienen ciertas conclusiones para los ensayos tipo I. En primer lugar y basándose en los resultados adquiridos, se considera invariable la rugosidad para cualquier dimensión fabricada. Sin embargo, es más apreciable la cantidad de defectos aparentes cuando se disminuye el tamaño del objeto.

Por otro lado, se plantea la hipótesis de que las desviaciones dimensionales no dependen tampoco del tamaño ya que tienen el mismo valor nominal. No obstante, porcentualmente, estas son mayores y más apreciables cuando las dimensiones son demasiado pequeñas. Se llega a la hipótesis de que estas desviaciones dimensionales están relacionadas principalmente con los posibles errores que estén presentes en los motores paso a paso de los ejes (Control Numérico).

Para las desviaciones dimensionales se obtienen diferentes resultados. Por un lado, las desviaciones de rectitud y paralelismo permanecen constantes a excepción de las piezas demasiado pequeñas.

En cuanto a redondez y cilindridad se obtienen resultados muy diferentes. Existe menos desviación a medida que se aumenta el tamaño, sin embargo, para tamaños ya considerablemente mayores, comienzan nuevamente a aumentar. Se llega a la suposición de que existe contracción del material depositado por los cambios de temperatura que existen entre capas. Esta disipación del calor podría evitarse manteniendo el entorno caliente (cerrar la máquina) para así poder contrastar esta hipótesis.

Para los ensayos tipo II, se obtienen otra serie de conclusiones o deducciones. Se obtiene una fuerte dependencia de los resultados con la modificación de estos valores.

En primer lugar, cabe destacar la diferencia obtenida en superficies paralelas a la plataforma de trabajo y las perpendiculares a la misma, ya sea en tema de calidad superficial como en tolerancias dimensionales.

La calidad superficial se ve íntimamente ligada a la temperatura, de manera que al elevarla se empeora la rugosidad obtenida. A su vez, un aumento de la velocidad favorece la obtención de una superficie con mejores acabados. La combinación de ambos parámetros permite trabajar con rangos mucho más amplios de los que propone el cliente. Así mismo, la tendencia lleva a la hipótesis de que se podrían mejorar aún más las calidades con el aumento de dicha velocidad.

En cuanto a tolerancias dimensionales, se propone la hipótesis de que elevar la temperatura provoca una mayor expansión del material al estar más fluido, que desemboca en un ensanchamiento de la pieza. Por otro lado, un aumento de la velocidad provoca una reducción en la anchura de la misma. El comportamiento en el eje Z del sólido sin embargo, es ligeramente distinto. En este interviene mucho más la planitud de la mesa y los factores ambientales.

En base a los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que el parámetro de la temperatura afecta en mayor medida que la velocidad de avance para todas las zonas y objetos de estudio.

Por otro lado, se llega a la conclusión de que los errores o desviaciones principales son debidas a:

- La posible existencia de posibles desviaciones de planitud en la plataforma de impresión, lo cual provoque modificaciones del gap en ciertas zonas.
- La poca fijación y estabilidad de la mesa de planitud. Posibilita pequeños movimientos que favorecen la variación dimensional incluso en una misma pieza.
- Los defectos en los motores paso a paso del control numérico, sobre todo en los ejes X e Y (cabezales).
- La no homogeneidad del material.
- La posible variación en las condiciones ambientales, que pueden provocar contracciones en el modelo a fabricar.
- El bajo control de la temperatura real que se tiene. Posibles defectos en el sistema pueden provocar oscilaciones de temperatura no solo en el ambiente, sino en el material extruido.

## **5.2. Propuestas de líneas de trabajo futuras**

Se desea poder trasladar dicha metodología experimental a otras tecnologías. Sin embargo, como línea de futuro más temprana se propone:

- Realizar un estudio similar para otro tipo de material usado en estas máquinas, como puede ser el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

- Trasladar esta metodología a otra máquina de características similares y comparar la tendencia de los resultados.
- Analizar la influencia de otros parámetros, como puede ser el diámetro de hilo, la altura de capa, la velocidad de extrusión, etc.
- Proponer una metodología para la realización de ciertos ensayos mecánicos y así poder comprobar la repercusión de los parámetros usados.
- Ampliar el rango de velocidades. Puesto que aparentemente se puede seguir aumentando el rango de estas sin repercutir trascendentalmente en los resultados, incluso puede mejorar algunos aspectos de los mismos. Además, esto mejoraría la productividad del proceso.
- Realizar un estudio de los parámetros en superficies curvas (alguna de las probetas tipo I) y oblicuas.
- Proceder al cierre de la máquina para comprobar si se reducen las desviaciones que han sido vinculadas a las contracciones del elemento por la diferencia de temperatura. También podría usarse una plataforma con calefacción para contribuir a la no disipación del calor.
- Comprobar la planitud de la plataforma e intentar realizar una fijación más exacta para evitar vibraciones.
- Comprobar el comportamiento interno de los hilos, sobre todo a diferentes temperaturas. Se propone mecanizar las probetas y comprobar la sección de los hilos para ver como varía en función de los diferentes parámetros.
- Realizar un estudio más exhaustivo de los cambios de temperatura que se van realizando durante el proceso, monitorizando on-line todas las fluctuaciones de temperatura que se ejecuten.



Escuela Superior  
de Ingeniería

# Capítulo VI: Referencias Bibliográficas

Estudio de la Influencia de los Parámetros de Fabricación  
en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

Autor: Ana Pilar Valerga Puerta

Tutores: Mariano Marcos Bárcena y Moisés Batista Ponce

## 6. Capítulo VI: Referencias Bibliográficas

### 6.1. Bibliografía utilizada

- 1– M. P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems*, 3ª Ed. McGraw–Hill, 2010.
- 2– S. Kalpakjian, S. R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5ª Ed. Prentice Hall, 2008.
- 3– M.S.J Hashmi, *Comprehensive Materials Processing*, Ed. 13, Elsevier, 2014.
- 4– *Fabricación Aditiva*, 1ª Edición, Fundación Cotec, Madrid (España), 2011.
- 5– J. L. Vallés, *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014*, Bruselas (Bélgica), 2014.
- 6– M. Porras Rodríguez, *Análisis Técnico–Económico de Técnicas de Fabricación Aditiva para Aplicación en Diferentes Sectores Industriales*, Proyecto Fin de Master, Universidad de Madrid (España), 2012.
- 7– S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, *Additive manufacturing: A framework for implementation*, *Int. J. Production Economics*, 149 (2014) 194–201.
- 8– I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Edición, Springer, Nueva York (USA), 2015.
- 9– L. Bechthold, V. Fischer, A. Hainzmaier, D. Hugenroth, L. Ivanova, K. Kroth, B. Römer, E. Sikorska, V. Sitzmann, *3D Printing. A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential*, Center for Digital Technology and Management (CDTM), München (Alemania), 2015.
- 10– J. Winder, R. Bibb, *Medical Rapid Prototyping Technologies: State of the Art and Current Limitations for Application in Oral and Maxillofacial Surgery*, *American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 63 (2005) 1006–1015.
- 11– X. Yan, P. Gu, *A review of rapid prototyping technologies and systems*, *Survey*, 6 (1995) 307–318.
- 12– D.T. Pham, R.S. Gault, *A comparison of rapid prototyping technologies*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 (1998) 1257–1287.
- 13– M. V. Zerkowicz, *A case study in rapid prototyping*, *Software– Practice and Experience*, 10 (1980) 1037–1042.
- 14– J.–P. Kruth, M.C. Leu, *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*, *Annals of the CIRP* 47 (1998) 525–540.

- 15- G. N. Levy, R. Schindel, J.P. Kruth, *RAPID MANUFACTURING AND RAPID TOOLING WITH LAYER MANUFACTURING (LM) TECHNOLOGIES, STATE OF THE ART AND FUTURE*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 52 (2003) 589–609.
- 16- E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1459–1468.
- 17- K. V. Wong, A. Hernandez, *A Review of Additive Manufacturing*, ISRN Mechanical Engineering, 38 (2012) 208–218.
- 18- D. W. Hutmacher, K. C. Tan, J. T. Schantz, T. C. Lim, C. X. Lam, *State of the art and future directions of scaffold-based bone engineering from a biomaterials perspective*, Journal Tissue Engineering Regen Medical, 1 (2007) 245–260.
- 19- M.A Hartfel, D.G. Nechrebecki, M.W. Scanlan, MW, *EXPERIENCES WITH DESK-TOP RAPID MANUFACTURING*, 51ST Annual Technical Conference of the Soc of Plastic Engineers, New Orleans (USA), 1993.
- 20- P.M Dickens, *RESEARCH DEVELOPMENTS IN RAPID PROTOTYPING*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B– Journal OF Engineering Manufacture, 209 (1995) 261–266.
- 21- <http://www.stratasys.com>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 22- D. Dimitrov, K. Schreve, N. Beer, *ADVANCES IN THREE DIMENSIONAL PRINTING – STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES*, Journal for New Generation Sciences, 4 (2005) 21–49.
- 23- S. Dolinsek, *Additive Manufacturing Processes: State of The Art and Vision for RM*, 11th International Research/Expert Conference: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet (Tunisia) 2007.
- 24- P. Ramírez López-Para, J. López Soto, *Tecnologías Aditivas, Un Concepto Más Amplio Que El Prototipado Rápido*, XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Huesca (España) 2011.
- 25- WC Lee, CC Wei, SC Chung, *Development of a Hybrid Rapid Prototyping System using Low-cost Fused Deposition Modeling and Fve-axis Machining*, Journal of Materials Processing Technology, 214 (2014) 2366–2374.
- 26- J.P.J. Jong, E. Bruijn, *Innovation Lessons From 3-D Printing*, MIT Sloan Management Review, 54 (2013).
- 27- T. Wohlers, *Rapidd Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, INC., 2001.
- 28- M. Srivastava, U. Singh, R. Yashaswi, *Trends in the Domain of Rapid Prototyping: A Review*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 3 (2014) 747–762.



- 29– M. Aliakbari, *Additive Manufacturing: State-of-the-Art, Capabilities, and Sample Applications with Cost Analysis*, Master of Science Thesis, Production Engineering and Management, Department of Industrial Production, KTH, 2012.
- 30– B.N. Turner, S.A. Gold, *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: Materials, dimensional accuracy, and surface roughness*, *Rapid Prototyping Journal*, 21(2015) 250 – 261.
- 31– <http://apps.webofknowledge.com>, última consulta: 1 de julio 2015.
- 32– D.S. Thomas, S.W. Gilbert, *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*, NIST Special Publication 1176, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>, 2014.
- 33– H. Singh, F. Rayegani, G. Onwubolu, *Cost Optimization of FDM Additive Manufactured Parts*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec (Canada), 2014.
- 34– V. Raja, S. Zhang, J. Garside, C. Ryall, D. Wimpenny, *Rapid and cost-effective manufacturing of high-integrity aerospace components*, *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, 27 (2006) 759–773.
- 35– L. Zachmann, *3D printing – Potential analysis and implementation of an Additive Manufacturing system to reduce production equipment costs*, Master degree Project, Stockholm (Suecia) 2014.
- 36– F. Thiesse, D. Morar, S. Ford, M. Wirth, H. Lasi, T. Minshall, HG. Kemper, F. Piller, M. Moisa, P. Buxmann, L. Mortara, *Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS*, *Business and Information Systems Engineering* 57 (2015) 139–148.
- 37– J. Risent, J. Masiá, *Reconstrucción Tridimensional de Superficies en el Cuerpo Humano*, Valencia (España), 2013.
- 38– P. Hernández, *Guía práctica de Rapid Manufacturing*, Gran Canaria (España), 2012.
- 39– M. Paulic, T. Irgolic, *Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing*, *Procedia Engineering*, 69 (2014).
- 40– J.A. Acosta, C.A. Duque, C.U. Galeano, J.M. Mantilla, *3D-Digitizing of a centrifugal compressor´s impeller: an alternative procedure*, *Ingeniare* 15 (2007).
- 41– J. Zaragoza-Siqueiros, H.I. Medellín-Castillo, *Design for Rapid Prototyping, Manufacturing and Tooling: Guidelines*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 42– Y. Tang, Y.F. Zhao, *Design Method for Lattice-Skin Structure Fabricated by Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.

- 43- C. Zhou, *A Direct Tool Path Planning Algorithm for Line Scanning Based Stereolithography*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 44- H. Rodrigue, B. Bhandari, W. Wang, SH Ahn, *3D soft lithography: A fabrication process for thermocurable polymers*, Journal of Materials Processing Technology, 217 (2015) 302–309.
- 45- A. M. Forster, *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8059>, 2015.
- 46- S. Hwang, R. C. Rumpf, E. I. REYES, KS. MOON, N.S. KIM, *Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process*, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 44 (2015) 771–777.
- 47- <http://www.google.es/trends>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 48- <http://www.zcorp.com>, última consulta: 28 de junio 2015.
- 49- J.R Castrejon-Pita, W.R Baxter, J. Morgan, et ál, *Future, Opportunities and Challenges of Inkjet Technologies*, ATOMIZATION AND SPRAYS, 23 (2013) 541–565.
- 50- J. Miettinen, V. Pekkanen, K. Kaija, P. Mansikkama, J. Mantysalo, M. Mantysalo, J. Niittynen, J. Pekkanen, T. Saviauk, R. Ronkka, *Inkjet printed System-in-Package design and manufacturing*, Microelectronics Journal 39 (2008) 1740–1750.
- 51- A. M. Elliott, O. S. Ivanova, C. B. Williams, T. A. Campbell, *Inkjet Printing of Quantum Dots in Photopolymer for Use in Additive Manufacturing of Nanocomposites*, Advanced Engineering Materials, 15 (2013) 903–907.
- 52- S. Fathi, P. Dickens, R. Hague, *Jetting stability of molten caprolactam in an additive inkjet manufacturing process*, International Journal Advanced Manufacturing Technologies, 59 (2012) 201–212.
- 53- M. Salmi, KS. Paloheimo, J. Tuomi, et ál., *Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)*, JOURNAL OF CRANIO-MAXILLOFACIAL SURGERY, 41 (2013) 603–609.
- 54- C.N. Ionita, M. Mokin, N. Varble, et ál., *Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing*, Conference on Medical Imaging – Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging, San Diego, 2014.
- 55- R. Udriou, A. Nedelcu, B. Deaky, *Rapid Manufacturing by Polyjet Technology og Customized Turbines for Renewable Energy Generation*, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND MANAGEMENT JOURNAL, 10 (2011) 1387–1394.
- 56- Iwan, Zein; Hutmacher, Dietmar W.; Kim Cheng, Tan; Swee Hin, Teoh, *Fused Deposition Modeling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, Biomaterials, 23 (2002) 1169–1185.

- 57- Hutmacher, Dietmar W.; Thornsten, Schantz.; Iwan, Zein; Kee Woei, Ng; Swee Hin, Teoh; Kim Cheng, Tan, *Mechanical Properties and Cell Cultural Response of Polycaprolactone Scaffolds Designed and Fabricated via Fused Deposition Modeling*, Journal Biomedical Mater. Res., 55 (2001) 203-216.
- 58- Too, M. H.; Leong, K. F.; Chua, C. K.; Du, Z. H.; Yang, S. F.; Cheah, C. M.; Ho, S. L. *Investigation of 3D Non-random Porous Structures by Fused Deposition Modelling*. Int. Journal Advanced Manufacturing Technologies, 19 (2002) 217-223.
- 59- Cao, Tong; Kee-Hai, Ho; Swee-Hin, Teoh Scaffold, *Design and in Vitro Study of Osteochondral Coculture in a Three-Dimensional Porous Polycaprolactone Scaffold Fabricated by Fused Deposition Modeling*. Tissue Eng. 9 (2003) 103-112.
- 60- M. Paulic, T. Irgolic, J. Balic, F. Cus, A. Cupar, T. Brajlji, I. Drstvensek. *Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing*, Procedia Engineering, 69 (2014) 795 - 803.
- 61- D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms*, International Materials Reviews, 57 (2012) 133-164.
- 62- J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs, *Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing*, Annals of the CIRP Vol. 56 (2007) 730-759.
- 63- G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, K.E. Evans, *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting*, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013) 589-597.
- 64- A. J. Pinkerton, *Advances in the modeling of laser direct metal deposition*, Journal of Laser Applications, 27 (2015) S15001-1 - S15001-7.
- 65- Steven Price, James Lydon, Ken Cooper, Kevin Chou, *Temperature Measurements in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 66- B. Cheng, S. Price, X. Gong, J. Lydon, K. Cooper, K. Chou, *Speed Function Effects in Electron Beam Additive Manufacturing*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 67- X. Gong, J. Lydon, K. Cooper, K. Chou, *MICROSTRUCTURAL ANALYSIS AND NANOINDENTATION CHARACTERIZATION OF Ti-6Al-4V PARTS FROM ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING*, Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Quebec, (Canada), 2014.
- 68- S. Reginster, A. Mertens, H. Paydas, et ál., *Processing of Ti Alloys by Additive Manufacturing: A Comparison of the Microstructures Obtained by Laser Cladding*,

- Selective Laser Melting and Electron Beam Melting*, 6th International Light Metals Technology Conference (LMT 2013), Old Windsor (Inglaterra), 2013.
- 69– M. Rombouts, G. Maes, M. Mertens, *Laser metal deposition of Inconel 625: Microstructure and mechanical properties*, Journal of laser applications, 24 (2012).
- 70– A.V. Gusarov, M. Pavlov, I. Smurov, *Residual Stresses at Laser Surface Remelting and Additive Manufacturing*, Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, 12 (2011) 248–254.
- 71– S. Saqib, R. J. Urbanic, K. Aggarwal, *Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths*, Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 17 (2014) 824 – 829.
- 72– <http://3dprint.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 73– Buswell et al., *Freeform Construction: mega-scale rapid manufacturing for construction*, Automat. Construct., 16 (2007) 224–231.
- 74– B. Khoshnevis, D. Hwang, *Contour Crafting, a mega scale fabrication technology*, Manufacturing Systems Engineering Series, 6 (2006), 221–251.
- 75– F. Ceccanti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian, *3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil*, Proceedings of the 61th International Astronautical Congress (IAC 2010), Prague (Czech Republic), 2010.
- 76– A. Atala, *Anthony Atala's Work on Bioprinting*, <http://www.wakehealth.edu/WFIRM>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 77– J. Giannatsis, V. Dedoussis, *Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review*, International Journal Advanced Manufactured Technologies, 40 (2009) 116–127.
- 78– T. Billiet, M. Vandenhoute, J. Schelfhout, S. Van Vlierberghe, P. Dubruel, *A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering*, Journal Biomaterials, 33 (2012) 6020–6041.
- 79– [www.elmundo.com](http://www.elmundo.com), última consulta 29 de junio de 2015.
- 80– P.M. Gronet, G.A. Waskewicz, C. Richardson, *Prefomed Acrylic Cranial Implants Using Fused Deposition Modeling: a Clinical Report*, Journal Prosthet. Dent. 90 (2003) 429–433.
- 81– <http://www.abc.es>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 82– MIT Media Labs Conceptual Work on Food Printers, <http://web.media.mit.edu>
- 83– J. I. Lipton, M. Cutler<sup>1</sup>, F. Nigl, D. Cohen, H. Lipson, *Additive manufacturing for the food industry*, Trends in Food Science & Technology, 43 (2015) 114–123.
- 84– J. Lipton, D. Arnold, F. Nigl, N. Lopez, D. Cohen, N. Noren, *Multi-material food printing with complex internal structures suitable for conventional post-processing*, 21st Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (2010).

- 85– T. Wegrzyn, M. Golding, R. Archer, *Food layered manufacture: a new process of constructing solid foods*, Trends in Food Science & Technology (2012) 66–72.
- 86– Wohlers Report, <http://www.wohlersassociates.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 87– A. Drizo, J. Pegna, *Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date*, Rapid Prototyping Journal, 12 (2006) 64–71.
- 88– V. B. Meyer, *Prototyping the Environmental Impacts of 3D Printing: Claims and Realities of Additive Manufacturing*, Environmental Policy Senior Thesis, 2015.
- 89– M. Monzón, Z. Ortega, A. Martínez, F. Ortega, *Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76 (2015) 1111–1121.
- 90– K. Jurrens, *Standards for the rapid prototyping industry*, Rapid Prototyping Journal, 5 (1999) 169–178.
- 91– M.J. Pratt, A.D. Bhatt, D. Dutta, R.W. Lyons, L. Patil, R.D. Siriam, *Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing*, Journal Comput Aided Des 34 (2002) 1111–112.
- 92– Norma ISO 17296–4:2014, Fabricación Aditiva– Principios generales: Visión general de procesamiento de datos.
- 93– <http://www.prodintec.es>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 94– O.L.A. HARRYSSON, D.J. MARCELLIN–LITTLE, T. J. HORN, *Applications of Metal Additive Manufacturing in Veterinary Orthopedic Surgery*, Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 67 (2015) 647–654.
- 95– A. Rosochowski, A. Matuszak, *Rapid tooling: the state of the art*, Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000) 191–198.
- 96– <http://worldindustrialreporter.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 97– <http://www.haute-innovation.com/en/events/interzum-3d-printing-congress>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 98– Y. Huang, M.C. Leu, *Frontiers of Additive Manufacturing Research and Education*, An NSF Additive Manufacturing Workshop Report, Florida (USA), 2014.
- 99– <http://i.materialise.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 100– <http://www.eos.info>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 101– M.S.J Hashmi, *Comprehensive Materials Processing*, Ed. 13, Elsevier, 2014.
- 102– J. L. Vallés, *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014*, Bruselas (Bélgica), 2014.
- 103– I. –Gibson–, D. –Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Edición, Springer, Nueva York (USA), 2015.

- 104– A. Boschetto, V. Giordano, F. Veniali, 3D roughness profile model in fused deposition modelling, *Rapid Prototyping Journal*, 19 (2013) 240–252.
- 105– <http://www.matweb.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 106– E. Amanov, N. Thein–Dang, J. Burgner–Kahrs, Additive Manufacturing of Patient–Specific Tubular Continuum Manipulators, *Conference on Medical Imaging – Image–Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, Orlando (2015).
- 107– M. Loaiza, R.A. Rezende, J. V. da Silva, et ál., Chitosan microlayer on the photografting modified surface of PLA, PCL and PLA/PCL bioextruder scaffolds, 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Physical Prototyping (VRatP), Portugal (2013).
- 108– M. Kreiger, J. M. Pearce, Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three–Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products, *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, 1 (2014) 1511–1519.
- 109– A. Relaño, J. Hidalgo, Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida, Trabajo Fin de Master, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- 110– M. N. Hafsa, M. Ibrahim, M. S. Wahab, et ál., Evaluation of FDM Pattern with ABS and PLA Material, 4th International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering, (ICME 2013), Putrajaya, Malaysia.
- 111– <http://cubify.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 112– S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, Additive manufacturing: A framework for implementation, *Int. J. Production Economics*, 149 (2014) 194–201.
- 113– 8– I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D–P, RP and Direct Digital Manufacturing*, 2ª Ed. Springer, Nueva York (USA), 2015.
- 114– S. Hwang, R. C. Rumpf, E. I. REYES, KS. MOON, N.S. KIM, Thermo–mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process, *Journal of Electronic Materials*, 44 (2015) 771–777.
- 115– <http://www.mitutoyo.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 116– <http://www.nikoninstruments.com>, última consulta 29 de junio de 2015.
- 117– <https://www.mahr.com>, última consulta 29 de junio de 2015.