

Trabajo Fin de Máster

Mejora de la calidad superficial en fabricación aditiva "FDM" mediante el uso de trayectorias no planas generadas a través de diseño algorítmico

Improvement of surface quality in additive manufacturing "FDM" using non-planar trajectories generated through algorithmic design

Autor

Antonio Martínez Angulo

Director

José Antonio Albajez García

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021

A mi mujer, Beatriz, por ayudarme a exprimir el tiempo.

A mis hijos, Isaac y Alejandro, por las horas de juego que les he robado.

Resumen

El modelado por deposición fundida (FDM), es un proceso de fabricación aditiva con un gran potencial de aplicación en un amplio rango de sectores. Mediante la disposición sucesiva de capas se obtienen prototipos y partes funcionales con una gran complejidad geométrica. Sin embargo, inherente a la técnica, la deposición del material capa a capa produce escalonamientos que llevan consigo una baja calidad superficial, acentuándose este hecho cuando hablamos de superficies con pequeña inclinación. Para solucionar este problema, la impresión no-plana surge como un sustituto adecuado a la impresión plana tradicional. En este trabajo, se realizará un acercamiento al método, incluyendo teoría y experimentación. A través de un novedoso procedimiento de diseño asistido por algoritmos obtendremos las trayectorias que seguirá la boquilla durante la impresión. En esta técnica no-plana, la geometría de la boquilla puede ocasionar colisiones y deformaciones sobre el material ya depositado, de tal forma, se estudiará un experimental tipo de boquilla de reciente introducción en el mercado. Por último, obtenidas mediante impresión varias geometrías, someteremos a éstas a un análisis de rugosidad superficial con el fin de comprobar la eficacia del método no-planar frente al tradicional, en cuanto a acabado superficial se refiere.

Abstract

Fused deposition modelling (FDM) is an additive manufacturing process with great application potential in many sectors. The successive addition of layers produces prototypes and functional parts with great geometrical complexity. However, inherent in the technique, the deposition of material layer-by-layer produces a stair-stepping effect that leads to low surface quality accentuated when dealing with surfaces with slight slopes. To solve this problem, non-flat printing emerges as a suitable substitute for traditional flat printing. In this work, an approach to the method will be made, including theory and experimentation. Through a novel algorithm-assisted design procedure, we will obtain the trajectories that the nozzle will follow during printing. In this non-flat technique, the nozzle geometry can cause collisions and deformations on the material already deposited; therefore, we will study an experimental type of nozzle recently introduced on the market. Finally, after printing various geometries, we will analyse their surface roughness in order to check the effectiveness of the non-planar method compared to the traditional one, as far as surface finish is concerned.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Definición del problema	2
1.2	Objetivo del trabajo	4
1.3	Fases de la exposición	5
2	Fundamentos	6
2.1	La fabricación aditiva (FA) como proceso de fabricación	6
2.2	Extrusión de material (FFF/ FDM)	9
2.2.1	Principios de la técnica	9
2.2.2	Ventajas e inconvenientes de la técnica	10
2.2.3	La impresora 3D	11
2.3	Código G	13
2.4	Del diseño a la obtención de la pieza real	14
2.5	Diseño Asistido por Algoritmos (AAD)	17
3	Trabajos relacionados	21
4	Implementación	26
4.1	Aspectos previos al proceso	26
4.2	Procedimiento general	27
4.3	Diseño e impresión de las piezas	28
4.4	Configuración experimental para impresión no-plana	29
5	Evaluación de la calidad superficial	35
5.1	Rugosidad superficial	35
5.2	Microscopio óptico de variación focal	36
5.3	Medición y resultados	38
6	Conclusión y trabajo futuro	40
	Referencias	

Anexos

A.I: Impresión de una cuña.

A.I-A: Algoritmo Grasshopper® de la cuña.

A.II: Impresión de un arco extruido.

A.II-A: Algoritmo Grasshopper® del arco extruido.

A.III: Impresión de una superficie compleja a partir de sus ecuaciones paramétricas.

A.III-A: Algoritmo Grasshopper® superficie compleja.

A.IV: Impresión de un paraboloides hiperbólico.

A.IV-A: Algoritmo Grasshopper® del paraboloides hiperbólico.

A.V: Plano: Extensión final carrera Z- Witbox 1.

A.VI: Medición de la rugosidad.

Lista de figuras

1.1	Efecto del escalonamiento en FDM	2
1.2	Orientación de la pieza y problemática asociada	3
2.1	Sistema extrusor	9
2.2	Esquema de la secuencia del proceso de fabricación aditiva FFF/FDM	10
2.3	Configuración de los sistemas de impresión	12
2.4	Formato GCode	13
2.5	El archivo STL	15
2.6	Software laminador Cura desarrollado por Ultimaker®	16
2.7	El dibujo a mano y su extensión al mundo digital	18
2.8	<i>Scripting</i>	19
2.9	<i>Visual Scripting</i>	20
2.10	De la función a la geometría	20
3.1	Errores de impresión debidos a la discretización del modelo	21
3.2	Definición del término <i>cusp height</i>	22
3.3	Fabricación aditiva CLFDM	23
3.4	Forma del filamento depositado en impresión plana y no plana	23
3.5	Efecto de la inclinación en la calidad superficial	24
3.6	Distancia entre la punta de la boquilla y la capa inferior	24
3.7	Modelo de capas no planas con altura variable	25
4.1	Fases de la pieza impresa	27
4.2	Procedimiento general para la impresión de la pieza	27
4.3	Modelo de colisión para la impresora 3D Ultimaker 2	30
4.4	Sensor de nivelación	30
4.5	Modelo de colisión en la Witbox 1	31
4.6	Boquilla original vs experimental	32
4.7	Final de carrera “Z” en la Witbox 1	33
4.8	Acople para contacto con el fin de carrera “Z”	34
5.1	Perfil de rugosidad	36
5.2	Representación esquemática de la tecnología de variación focal	37

Lista de tablas

2.1	Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva	7
5.1	Resumen de los resultados obtenidos en la medición de rugosidad	38

1 Introducción

La impresión 3D, es uno de esos términos que está en boca de todos en los últimos años. Parece inevitable no quedarse, por lo menos sorprendido, cuando los medios muestran cómo se construyen por este método casas y coches en tiempo récord, cómo un niño se coloca una prótesis impresa en 3D que sustituye a una mano que ha perdido por la explosión de una mina o cómo investigadores están imprimiendo órganos y tejidos que serán implantados en cuerpos humanos.

Esto es solo la punta del iceberg de una “Nueva Revolución Industrial” que llevará a la Humanidad un paso más hacia adelante, y aún desconocido, al igual que otras tecnologías lo han hecho en tiempos pasados. Aun así, no se puede denominar a la impresión 3D una nueva tecnología, ya que este término forma parte de un conjunto de técnicas de fabricación aditiva que se empezaron a poner en práctica en la década de los 80 del siglo pasado.

El debate emergente sobre si la fabricación aditiva es mejor que la sustractiva, o mejor que la obtención de partes mediante conformado, no tiene sentido, ya que cada técnica tiene sus ventajas y limitaciones que hacen que encuentre su propio campo de aplicación. Incluso un proceso híbrido entre las técnicas enunciadas es el óptimo en muchos casos.

El modelado por deposición fundida, FDM por sus siglas en inglés, es una técnica de fabricación aditiva, cuya implantación y desarrollo, tanto en el mundo industrial como en otros entornos, no ha hecho más que crecer desde que S.Scott Crump, en 1988, lo inventó, y tras automatizarlo obtuvo la patente. Si bien es cierto, que fue cuando expiró esta, cuando un movimiento *maker* denominado Rep Rap, hizo que la impresión 3D llegará al mundo en general.

Sin duda alguna, el fácil acceso a una forma de fabricación con tanto potencial como es el FDM, crea cientos de líneas de investigación, ya sea a través de particulares, universidades, centros de investigación y empresas privadas, que al integrarlas en proyectos concretos hacen avanzar el mundo en el que vivimos y nos hacen soñar con nuevos desafíos impensables pocos años atrás.

El trabajo que aquí se presenta tiene ese ánimo, el de aportar nuevos enfoques a una técnica de fabricación aditiva como es el FDM, con el fin de superar o mitigar las limitaciones inherentes al proceso, de tal forma que ese hecho suponga un desarrollo social, técnico y científico.

1.1. Definición del problema

El proceso de fabricación aditiva FDM permite obtener objetos físicos mediante la extrusión controlada de un material a través de una boquilla. Un filamento generalmente con base polimérica, aunque pueden utilizarse otros materiales, es fundido y depositado en una plataforma siguiendo unas trayectorias previamente programadas. A través de un proceso capa a capa se consiguen partes impresas con geometrías difíciles de obtener por otros procesos industriales.

Sin embargo, esta adición de capas crea escalonamientos que derivan en una pobre calidad superficial de la pieza impresa, máxime cuando se trata de superficies con pequeñas pendientes. Según Ahlers et al. [1] los efectos negativos que tiene el escalonamiento sobre la calidad superficial se incrementan en zonas donde la inclinación es menor, destacando este efecto cuando las superficies tienen un ángulo menor que 20° (Fig. 1. 1).

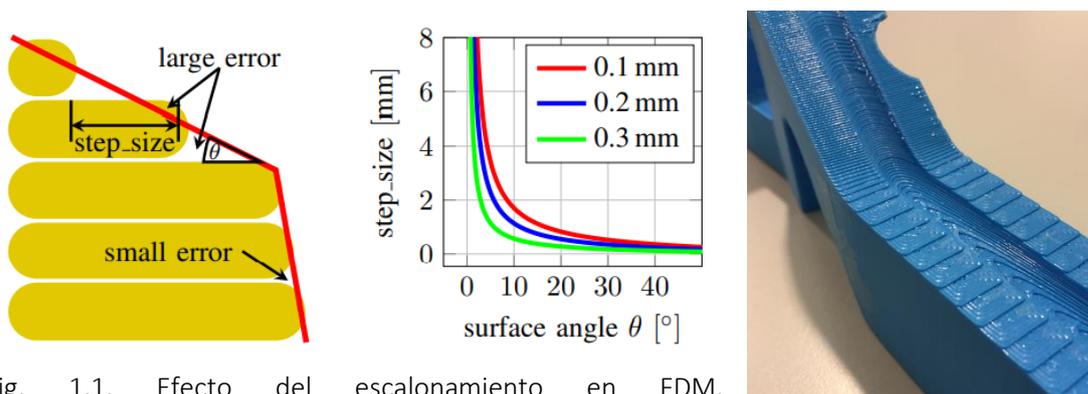


Fig. 1.1. Efecto del escalonamiento en FDM.

Izquierda: Efecto del escalonamiento en superficies impresas mediante FDM y tamaño del escalón (step-size) para diferentes tipos de altura de capa. (Fuente [1]). Derecha: Pieza real donde se aprecia el tamaño del escalón según el ángulo de inclinación de la superficie. El tamaño del escalón está relacionado con la calidad superficial.

Para mejorar esta calidad, se puede optimizar la orientación de la pieza para intentar que la pendiente sea mayor y así minimizar los escalonamientos, pero entonces puede que el relleno no quede con la orientación que se ha determinado en el diseño, lo que implicará una pérdida en las propiedades mecánicas de la pieza. Además, la reorientación de la pieza puede hacer que sea necesario la adición de soportes, y esto implicaría marcas en la superficie, disminuyendo una vez más la calidad superficial (Fig. 1. 2).

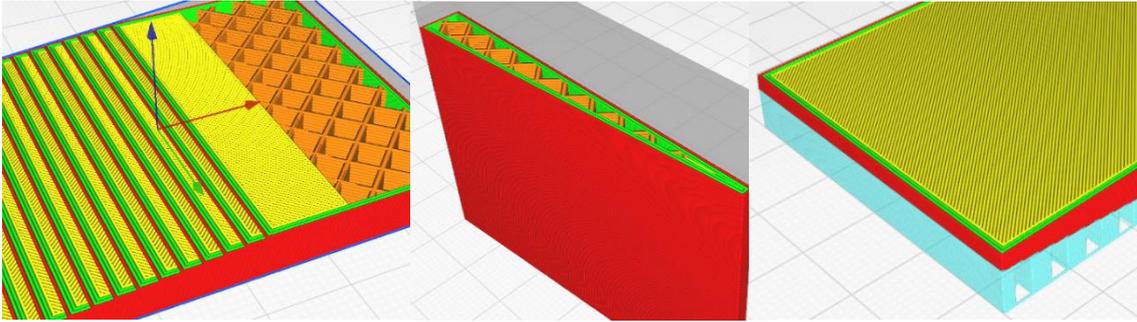


Fig. 1.2. Orientación de la pieza y problemática asociada. En los tres casos se trata de la misma pieza; una cuña que será impresa en este trabajo. Izquierda: Muestra la disposición típica que adoptaríamos al imprimir esta pieza. De esta forma se crean escalonamientos que ocasionan una baja calidad superficial. Centro: una nueva orientación de la pieza supondría una mejora en la calidad superficial. Sin embargo, el relleno interior (*infill*) ha cambiado y el tiempo de impresión se ha multiplicado por dos. Derecha: orientando la pieza de manera que la capa superficial sea perpendicular al eje Z conseguimos un buen acabado superficial. En contra, será necesaria la fabricación de soportes y, nuevamente, la orientación del relleno interior habrá cambiado.

Otra forma de hacer frente al escalonamiento y, por lo tanto, mejorar la calidad superficial de la pieza impresa es postprocesando esta. Este hecho requiere de procesos químicos (baños en soluciones químicas, vapores), trabajos manuales (uso de diferentes lijas) o bien un mecanizado de acabado basado en CAM cuando las superficies son complejas. De tal forma, al tiempo de impresión hay que sumarle un tiempo de postprocesado, incrementando considerablemente los costes del producto.

Por otra parte, las trayectorias de la boquilla, lo que se traduce en la deposición del filamento y, por lo tanto, en la orientación de las fibras, son calculadas automáticamente por un software laminador en base a unos algoritmos internos, generalmente desconocidos. Esta automatización hace que el usuario no pueda formar parte, por ejemplo, en el proceso de orientación de las fibras en capas sucesivas o en la definición de trayectorias particulares para un fin en concreto. Por no citar, que ante geometrías muy complejas y paredes finas el software no es capaz de calcular las trayectorias adecuadamente.

En procesos tan anisótropos como es el FDM, y con el uso de piezas donde las propiedades mecánicas del material y la aerodinámica, por citar alguna otra propiedad física, dependen de la disposición de dichas fibras, sería muy importante que el usuario pudiera controlar cómo estas fibras se orientan.

1.2. Objetivo del trabajo

Los procesos basados en la extrusión o deposición de material, como es el caso del FDM, nos brindan una oportunidad única para llevar un paso adelante el avance en ingeniería de diseño y fabricación, así como el desarrollo de nuevos materiales. Esto es así porque esta técnica nos permite “poner lo que queramos justo donde lo queramos” dándonos, de tal forma, la posibilidad de desarrollar complejas estructuras internas y superficies con un alto grado de sofisticación.

Para conseguir tal avance, es necesario un nuevo enfoque basado en la personalización de la fabricación. Es cierto que softwares, como el laminador Cura®, permiten aplicando algoritmos generales hacer fácil la impresión 3D, abriendo esta tecnología al público en general; Pero también es cierto, que llevar al ser humano a Marte o reducir unas décimas de segundo en los coches de F1, por poner dos ejemplos, requieren optimizar todo lo posible las piezas mecánicas según unos requerimientos de servicio realmente excepcionales, y eso solo se conseguirá tratando cada pieza como si fuera única.

Con lo dicho en mente, será un objetivo subyacente a todo este trabajo, aplicar, difundir y hacer valer este punto de vista, este nuevo enfoque que se empieza a explorar.

Por otra parte, un objetivo más tangible será mejorar la calidad superficial de las piezas impresas por FDM. Cuando introducíamos este proceso en el punto anterior remarcábamos la existencia de escalonamientos que disminuían dicha calidad superficial. Para solucionar este problema, la impresión no-plana surge como un sustituto adecuado a la impresión plana tradicional. Se pretende con este trabajo realizar un acercamiento tanto teórico como práctico a esta nueva metodología, que posibilita incluso obtener geometrías imposibles de fabricar con la impresión tradicional.

Por su parte, la impresión no-plana conlleva una mayor libertad de movimientos del cabezal de extrusión. Ya no se trata solo de movimientos en el eje X e Y, y que periódicamente se mueva el cabezal en Z, sino que ahora pueden existir movimientos en los tres ejes simultáneamente. Este hecho provoca que la boquilla pueda ocasionar colisiones y deformaciones sobre el material ya depositado. De tal forma, un objetivo obligado de este trabajo será estudiar y probar un experimental tipo de boquilla de reciente introducción en el mercado que permita esa libertad de movimientos, sin que este hecho ocasione colisiones.

En la búsqueda de esas formas libres, orgánicas, con una disposición de fibras personalizada, que promovíamos al inicio de este punto, es necesaria la introducción de nuevas metodologías para la creación de las trayectorias, en ocasiones complejas, que seguirá la boquilla durante la impresión. En este sentido, se propone un novedoso desarrollo de trayectorias a través del diseño asistido por algoritmos (Algorithms Aided Design, AAD).

Por último, se hace necesario mediante la experimentación contrastar si este nuevo paso que propone la fabricación FDM no-plana es real y si supone un avance, ¿permite la impresión FDM no-plana mejorar la calidad superficial de las piezas impresas? El objetivo final es responder a esta cuestión. Para ello, compararemos a través de un análisis de rugosidad superficial, piezas impresas de forma tradicional y las mismas piezas fabricadas con impresión no-plana.

Como aspecto importante, cabe reseñar que en todo momento hablaremos de impresiones no planares utilizando máquinas con configuración cartesiana y cama no orientable. Es decir, que utilizaremos en la práctica el tipo de impresoras FDM más extendido. Somos conscientes de que determinados “puntos flacos” de la impresión no-plana son fácilmente superables utilizando brazos robóticos o impresoras con más grados de libertad (cama y/o cabezal orientable), pero también entendemos que lo interesante del presente trabajo es conseguir una mejora sustancial utilizando los mismos medios, y no conseguir tal mejora a costa de máquinas que requieren de una gran inversión de capital y que, por lo tanto, no son asumibles por un público general.

1.3. Fases en la exposición

La baja calidad superficial y la posibilidad limitada por parte del usuario de personalizar las trayectorias de herramienta son algunos de los problemas asociados a la impresión FDM. En el capítulo 1 definiremos dichos problemas y plantearemos los objetivos de este trabajo que irán en línea con cómo superarlos.

En el capítulo 2 introduciremos una serie de fundamentos que son necesarios conocer para comprender este trabajo. Qué es la fabricación aditiva, en qué consiste la técnica FDM, cómo funciona una impresora 3D, cómo es el proceso que nos llevará desde el diseño a obtener la pieza física y qué es el Diseño Asistido por Algoritmos (AAD) son algunas de las preguntas a las que daremos respuesta en este capítulo.

Es imprescindible en todo trabajo conocer las diferentes investigaciones que se han llevado a cabo en el ámbito de éste. De tal forma, en el capítulo 3 presentaremos una serie de proyectos, cuyas ideas se tomarán como base en el desarrollo del trabajo.

El capítulo 4 constituye el cuerpo del trabajo, de tal forma que en éste se pondrá en práctica todo lo visto anteriormente. Para ello, se partirán de unos aspectos básicos para tener en cuenta y se expondrá el procedimiento general de trabajo. Tras esto, se llevará a cabo un estudio exhaustivo del diseño e impresión de cada una de las piezas propuestas.

Después de la impresión será necesario evaluar la calidad superficial de las piezas impresas con el fin de comparar las fabricadas mediante impresión FDM tradicional de aquellas impresas con impresión no-plana. El capítulo 5 tendrá esta finalidad.

Por último, se expondrán unas breves conclusiones y se citará la bibliografía empleada para la elaboración del presente trabajo.

2 Fundamentos

2.1. La fabricación aditiva (FA) como proceso de fabricación

Un aspecto importante que establecer a la hora de obtener una pieza previamente diseñada es la elección de su proceso de fabricación. Existen en la actualidad multitud de técnicas y procesos para la obtención de piezas y componentes, pero si somos prácticos, en general, podemos distinguir tres grandes grupos:

- **Fabricación mediante Conformado:** se obtiene la forma deseada aplicando presión y/o calor a un cuerpo de materia prima. El material puede ser fundido e introducido a presión en un molde (moldeo por inyección), fundido y vertido en un molde (fundición), deformado plásticamente a través o contra una matriz (extrusión, forja, estampación y conformación de chapa).
Esta técnica permite la obtención, a costes relativamente bajos, de grandes volúmenes de piezas, pero necesita de una herramienta (molde o matriz) para ello. El problema radica en la complejidad constructiva y el elevado coste de dicho molde o matriz, aspectos que implican respectivamente, un tiempo elevado para la obtención de las primeras piezas y una importante inversión inicial, de ahí que solo sea rentable para grandes volúmenes productivos.
- **Fabricación Sustractiva:** se parte de un bloque, “material en bruto” u otro semielaborado, y utiliza herramientas de corte para extraer material selectivamente, generando de este modo la forma deseada.
Por medio del fresado, el torneado, el tallado, el rectificado, entre otros muchos procesos sustractivos, podemos obtener piezas con una excelente precisión y calidad superficial. Se trata de una técnica óptima para fabricar pieza unitaria o lotes relativamente pequeños, aunque se le considera un proceso con mucho residuo, debido a la gran cantidad de material que en ocasiones hay que quitar para obtener la pieza final.
- **Fabricación Aditiva [FA]:** la pieza es generada mediante la adición de una capa tras otra de material. De esta forma, puede producirse casi cualquier geometría, con características de diseño en ocasiones imposibles de obtener a través de la fabricación sustractiva o el conformado. La rapidez con la que se pueden obtener

prototipos y pequeños lotes, junto con otras ventajas competitivas únicas están llevando a la industrialización de esta tecnología [2].

Evidentemente, como cualquier proceso productivo, tiene sus limitaciones, basadas éstas en su inherente anisotropía, lo que implica *a priori* propiedades mecánicas inferiores a las piezas obtenidas mediante los otros dos procesos enunciados.

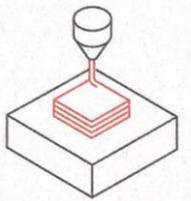
En la actualidad, encontramos procesos híbridos, donde piezas realizadas mediante fabricación aditiva son acabadas por procesos sustractivos con la finalidad de alcanzar los requisitos de calidad geométrica y superficial especificados [3,4].

Hecha una clasificación de las principales técnicas de fabricación, en este trabajo nos centraremos en la fabricación aditiva.

La fabricación aditiva es un término que históricamente ha recibido nombres como fabricación de sólido de forma libre o fabricación por adición de capas, así como prototipado rápido, ya que fue éste el primer uso de esta tecnología. También es llamada coloquialmente como impresión 3D, no sin un cierto debate sobre la igualdad de ambos términos, ya que se deja el término fabricación aditiva para un concepto más general y un uso industrial, dejando el término impresión 3D para un uso “doméstico” y menos profesional.

Lo cierto es que la fabricación aditiva está experimentando un gran crecimiento en la última década, tanto en actividad investigadora como en implantación industrial. Sin ir más lejos, en España, según datos de la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D (ADDIMAT), el sector de la fabricación aditiva emplea 700 personas y facturó 140 m€ en 2019, números que pueden ser extrapolables a nivel de comercio mundial donde el negocio y la investigación no paran de crecer [5].

Por otra parte, existe una variedad de procesos de fabricación aditiva en uso, cada uno con unas características, ventajas y limitaciones diferentes. La norma europea EN ISO/ASTM 52900:2017 ayuda a identificar los siete grandes grupos en los que esta tecnología se suele clasificar. En la siguiente tabla se indica una pictografía, una breve descripción del proceso y las diferentes “sub-tecnologías aditivas” con sus acrónimos en inglés, para cada uno de los citados grupos.

Proceso (en inglés)	Descripción	Tecnología (en inglés)
Material Extrusion 	Proceso de fabricación aditiva en el cual el material es extruido a través de una boquilla (nozzle) u orificio.	Fused Filament Fabrication (FFF), más conocida como Fused Deposition Modeling (FDM)

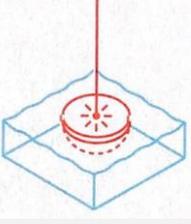
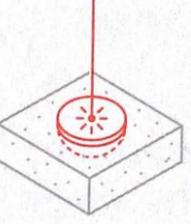
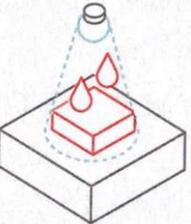
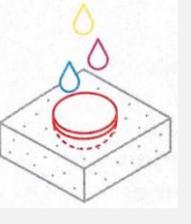
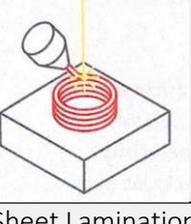
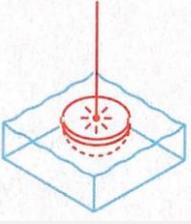
Proceso (en inglés)	Descripción	Tecnología (en inglés)
Vat Polymerization 	Proceso de fabricación aditiva en el cual un líquido fotopolimérico dispuesto en un tanque es selectivamente curado por una luz que activa la polimerización.	Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP)
Powder Bed Fusion 	Proceso de fabricación aditiva en el cual una fuente de energía térmica funde regiones de un lecho de polvos.	Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Selective Laser Melting (SLM) Electron Beam Melting (EBM)
Material Jetting 	Proceso de fabricación aditiva en el cual pequeñas gotas de material son selectivamente depositadas y curadas sobre una plataforma de construcción.	Material Jetting (MJ), Drop On Demand (DOD)
Binder Jetting 	Proceso de fabricación aditiva en el cual un agente adhesivo líquido une selectivamente regiones de un lecho de polvo.	Binder Jetting (BJ),
Direct Energy Deposition 	Proceso de fabricación aditiva en el cual energía térmica focalizada es usada para fundir materiales cuando están siendo depositados.	Laser Engineering Net Shaping (LENS), Laser-Based Metal Deposition (LBMD)
Sheet Lamination 	Proceso de fabricación aditiva en el cual hojas de material son unidas para formar una parte (pieza)	Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), Laminated Object Manufacturing (LOM)

Tabla 2.1.- Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva. Fuente [6]

Conocidas las diferentes tecnologías en las que se clasifica la fabricación aditiva, desarrollaremos el presente trabajo basándonos en la tecnología de extrusión de material (FFF/FDM) (de aquí en adelante nos referiremos a ella mediante estas siglas), si bien, todo lo desarrollado se podría implementar para el proceso de deposición de energía directa (DED), chorro de material (material jetting) o cualquier otra variante basada en la deposición o expulsión de material a través de una boquilla.

2.2. Extrusión de material (FFF/ FDM)

2.2.1 Principios de la técnica

Tal y como hemos citado con anterioridad, cada proceso o tecnología en el que podemos clasificar la fabricación aditiva tiene unas características propias y por ello unas ventajas y limitaciones que le harán idóneo o no para la obtención de diferentes piezas y componentes.

Esto implica que no existe una tecnología mejor o peor, una de otra, sino una preferente según el campo de aplicación, resistencia mecánica, requisitos técnicos y estéticos, material a utilizar, entre otros parámetros exigidos.

Para advertir qué ventajas y limitaciones tiene el proceso FDM, y por lo tanto conocer dónde y para qué puede ser aplicado éste, conviene comprender cómo funciona. Básicamente se trata de depositar material secuencialmente capa por capa hasta obtener la pieza final.

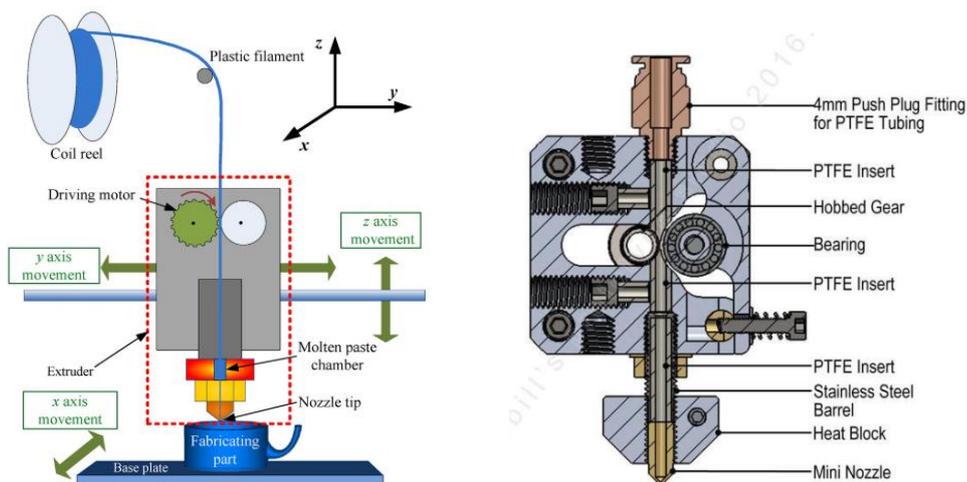


Fig. 2.1. Sistema extrusor. Izquierda: Esquema del sistema extrusor formado por extrusor y fusor, y su disposición en el conjunto del proceso (Fuente [7]). Derecha: Sección del sistema extrusor.

Para ello, como podemos apreciar en la Fig. 2. 1, un extrusor (*feeder o drive*) formado por un motor, una rueda dentada conducida por este último y un rodamiento o engranaje (esta última opción se da en el sistema de doble engranaje) que sirve para apretar el

filamento contra la rueda, permite arrastrar un filamento plástico hasta el fusor o *hotend*. Una vez allí, dicho fusor compuesto de un disipador de calor, un bloque calefactor y una boquilla (*nozzle*), transforma el filamento sólido en una pasta fundida que será extruida a través de la boquilla.

De tal forma, el material extruido se dispone en una base (cama) siguiendo un recorrido previamente programado. Una vez completada una capa, el extrusor se elevará una distancia denominada “altura de capa” y proseguirá depositando la siguiente capa. Este proceso se repetirá hasta completar la pieza o el componente 3D (Fig. 2. 2).

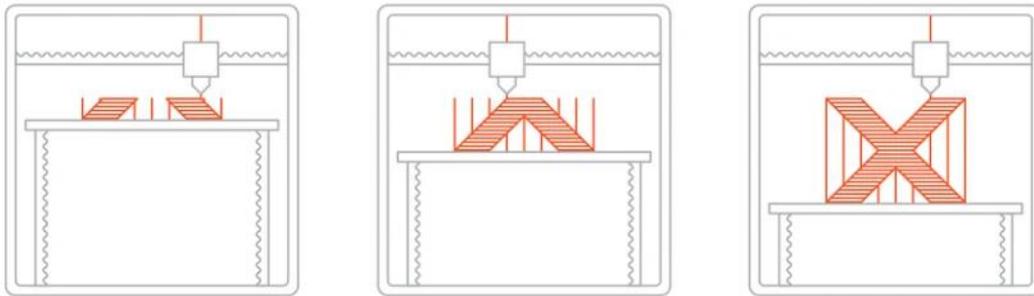


Fig. 2.2. Esquema de la secuencia del proceso de fabricación aditiva FFF/FDM (Fuente [6]).

2.2.2 Ventajas e inconvenientes de la técnica

La forma de proceder indicada en el punto anterior, en cuanto a la trayectoria seguida por la herramienta, en este caso la boquilla, y la construcción del objeto por capas sucesivas, brinda la posibilidad de fabricar geometrías complejas, con estructuras internas (celosías o *lattice*) [8], casi imposibles de obtener por otro método, y con la seguridad de que la herramienta no va a colisionar con ninguna parte de la máquina, utillaje o con la pieza durante la fabricación de la misma, algo que sí puede suceder en fabricación sustractiva.

Además, la técnica proporciona la obtención de piezas a bajo coste, de una forma rápida, y mediante un uso eficiente de material, sin apenas residuo (solo el utilizado en la fabricación de soportes, si los hubiera).

Todas estas ventajas, entre muchas otras, permiten introducir el proceso FDM en muchos campos y aplicaciones, como la fabricación de moldes y elementos auxiliares de la industria del automóvil [9]; prótesis, implantes y dispositivos médicos [10], industria aeroespacial [11], etc.

A pesar de lo anteriormente expuesto, aparecen algunos inconvenientes inherentes a la técnica. Uno de ellos, de gran interés, se basa en la anisotropía del material. La naturaleza del “capa a capa”, el recorrido seguido por la boquilla y la orientación de la pieza hacen que ésta tenga diferentes propiedades mecánicas en diferentes direcciones. En otras

palabras, la pieza tendrá una dirección preferente en cuanto a resistencia mecánica se refiere [12, 13]. Por otra parte, el FDM se enfrenta a limitaciones en cuanto a calidad superficial y precisión geométrica, sin duda dos factores que le impiden ser más funcional y aceptado en el mundo industrial. En sucesivos apartados se incidirá en estos factores, analizando el porqué de su limitación.

2.2.3 La impresora 3D

Existe una amplia gama de impresoras 3D para FDM en el mercado, con diferencias notables en cuanto a prestaciones y calidad de componentes según al sector al que vaya dirigido. Marcas comerciales como Stratasys, 3D Systems, Markforged, BCN3D, Ultimaker, Makerbot, Prusa Research se sitúan como referencias en la tecnología estudiada, si bien es cierto que cada una de ellas tiene un tipo de usuario bien definido.

Pese a estas diferencias, se trata de impresoras, todas ellas, con una configuración cartesiana, basada en el movimiento sobre un sistema de ejes cartesiano X, Y, Z, e inspiradas en otras aplicaciones CNC como centros de mecanizado, cortadoras láser y máquinas de electroerosión.

Aunque este sistema cartesiano es el más común, la misma “inspiración industrial” comentada está propiciando la entrada de otras configuraciones como la Delta, basada en el “pick and place” robótico, impresoras multi eje donde el cabezal y/o la base disponen de diferentes grados de libertad [14] o las impresoras con brazo robótico, dotando, esta última, de una mayor flexibilidad a la técnica [15].

Básicamente, la impresora puede dividirse en dos sistemas, uno referente al movimiento del cabezal de extrusión y otro a la extrusión del filamento. Este planteamiento es aplicable a todas las máquinas FDM, pero pueden existir varias configuraciones y utilización de diferentes componentes, según el modelo de máquina y especificaciones de la misma. De tal forma, para analizar estos dos sistemas, vamos a basarnos en la configuración de la impresora utilizada en el presente trabajo, la Witbox 1 de la marca BQ, una máquina cuyo funcionamiento es fácilmente aplicable a otras máquinas del mismo rango (Fig. 2. 3).

Como ya hemos introducido, existe un sistema que posiciona el cabezal extrusor dentro del volumen de impresión que es capaz de ejecutar la impresora. Para ser más técnicos, posiciona la boquilla en un punto tridimensional de coordenadas [x,y,z]. La posición en el plano XY se realiza a través de dos motores, generalmente “paso a paso”, donde el giro del eje del motor es convertido en movimiento lineal a través de correas dentadas. Aquí, el cabezal va montado sobre unas guías y dirigido por las correas anteriormente citadas. Por otra parte, el movimiento en el eje Z se logra mediante otro motor, igual a los dos anteriores, pero esta vez la conversión en movimiento lineal se logra a través de un husillo, y lo que se mueve “arriba y abajo” es la plataforma (cama) sobre la que se imprime, y no el cabezal.

Es importante puntualizar, una vez más, que esto ocurre en la máquina utilizada en este trabajo, si bien podemos encontrar que el movimiento en el eje X y Z lo hace el cabezal, mientras que el movimiento en Y lo hace la plataforma; o bien podemos encontrar otras disposiciones como la utilización de husillos en los tres ejes, uso de otro tipo de motores y control de la posición mediante reglas ópticas, etc.

Por otra parte, está el sistema de extrusión, introducido anteriormente y visualizado en la figura 2.1 (derecha). Otro motor, similar a los utilizados en el sistema de posicionamiento, lleva incorporado en su eje de salida una rueda que junto con un rodamiento u otra rueda dentada empujan al filamento, generalmente de diámetro 1.75 mm o 2.85 mm, hasta el bloque calefactor. Este sistema de alimentación puede ser directo, como en la Witbox 1, o de tipo Bowden. La diferencia principal estriba en que en el directo el sistema de alimentación, y esto implica el motor, se dispone sobre los carros, lo que conlleva una carga sobre las guías. Para evitar esto, el sistema de alimentación tipo Bowden se sitúa fuera de los carros, incluso fuera del habitáculo de la impresora, y empuja el filamento desde allí. El problema de este hecho es que la flexibilidad del filamento puede ocasionar problemas de extrusión, sobretodo con filamentos muy flexibles, si bien es cierto que esto se puede solucionar en parte utilizando filamentos de mayor diámetro, generalmente de 2.85 mm.

Una vez llega el filamento al bloque calefactor empieza a reblandecerse hasta convertirse en una pasta. La temperatura del bloque, aspecto clave en el proceso, es monitorizada por un termistor mediante un control PID. Con la viscosidad adecuada, la pasta sale a través del orificio interior de la boquilla (*nozzle*). Como analizaremos en apartados posteriores la geometría de la boquilla es clave, si bien podemos generalizar una geometría exterior en forma de cono y un orificio interior que se sitúa entre los 0.25 mm a 1mm de diámetro, siendo el de 0.4 mm el de uso estándar.

Por último, el filamento es depositado en una superficie plana llamada base o cama, donde solidifica casi instantáneamente. Aunque la Witbox 1 posee una base fría, la gran mayoría de las impresoras del mercado poseen una cama caliente o calefactada a través de resistencias, lo que incrementa la adhesión y reduce el “*warping*”.



Fig. 2.3. Izquierda: Impresora 3D Witbox 1 de la marca BQ utilizada en el trabajo. Derecha: vista interior con el sistema de posicionamiento y extrusión, además de la base.

2.3. Código G

Los motores encargados del movimiento en los ejes X, Y, Z; el motor encargado de la extrusión, así como otros sistemas o componentes auxiliares a la impresión como termistores, ventiladores, sensores de nivelación, cama caliente, entre otros, son controlados a través de una placa controladora.

Cada modelo de impresora contará con un tipo de placa, aunque básicamente podemos decir que su función es la misma en todas ellas, controlar los componentes anteriormente citados para ejecutar el proceso de impresión. En nuestro caso, protegida con una RAMPS 1.4 (*shield*), la Arduino Mega 2560, es la placa que controla los elementos en la Witbox 1.

Por otro lado, en el chip de memoria de la placa estará instalado un firmware, un tipo de software, como puede ser Marlin, Repetier, Reprap firmware, entre otros. Este firmware será el encargado de leer e interpretar el código G, línea a línea, convirtiendo cada comando en órdenes para cada componente: giro en el eje de los motores, control de temperatura, etc.

Llegados a este punto, conviene detenernos a explicar qué es el código G. Éste lo podemos definir como un lenguaje utilizado por un gran número de máquinas automatizadas como fresadoras, tornos, máquinas de corte por agua o láser, electroerosión por hilo o penetración, impresoras 3D, entre otras.

Se trata de un lenguaje alfanumérico, donde las órdenes son organizadas por bloques que se leen secuencialmente, y en donde además de coordenadas intervienen funciones auxiliares (indicadas con la letra M) o funciones preparatorias (indicadas con la letra G). Estas últimas, debido a su importancia y a que encabezan la mayoría de los bloques, son las que dan el nombre al lenguaje, código-G.

```
*P2Full.gcode: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
;FLAVOR:Marlin
;Generated with Cura_SteamEngine 4.6.1
M104 S215
M105
M109 S215
M82 ;absolute extrusion mode
; -- START GCODE --
G21                ;set units to millimetres
G90                ;set to absolute positioning
M106 S0            ;set fan speed to zero (turned off)
G28 X0 Y0          ;move to the X/Y origin (Home)
G28 Z0             ;move to the Z origin (Home)
G1 Z15.0 F1200     ;move Z to position 15.0 mm
G92 E0             ;zero the extruded length
G1 E20 F200        ;extrude 20mm of feed stock
G92 E0             ;zero the extruded length again
G1 F7200           ;set feedrate to 120 mm/s
; -- end of START GCODE --
G92 E0
G92 E0
G1 F1500 E-6.5
;LAYER_COUNT:27
;LAYER:0
M107
G0 F3600 X123.7 Y129.768 Z0.2
```

Fig. 2.4. Formato GCode. El archivo de texto “.gcode” contiene las órdenes en código G (alfanumérico) que serán interpretadas por el firmware de la impresora.

Por otra parte, todos los bloques, con sus órdenes escritas en código G, se incluyen en un archivo de texto, con extensión *.gcode interpretable por el firmware de la impresora. En el caso de la impresora utilizada en este trabajo, la Witbox 1, será el firmware Marlin, el que interprete el código (Fig. 2. 4).

Hay que tener en cuenta que no todos los códigos G son aplicables en todas las máquinas, ya que el funcionamiento de los mismos depende del hardware, en este caso de la impresora. Por ejemplo, M140 S80 calienta la cama a 80°C, pero la impresora empleada en este trabajo carece de la misma, por lo cual este código no ejecutará ningún proceso de calentamiento.

Así mismo, determinadas partes de código son interpretadas de formas diferentes según el tipo de máquina. Por ejemplo, S215 es interpretado en una fresadora como el giro del cabezal a 215 rpm, mientras que en una impresora 3D, M104 S215 es interpretado como calentar el cabezal a 215 °C.

En la página <https://marlinfw.org/meta/gcode/> podemos encontrar una lista de códigos G y funciones auxiliares, así como una explicación de su cometido.

2.4. Del diseño a la obtención de la pieza real

Entendemos, según lo visto anteriormente, que un firmware instalado en la placa controladora de la impresora 3D, interpreta un código y ejecuta una serie de ordenes: cómo se mueve el cabezal, cuánto material extruir, qué temperatura tiene el bloque calefactor, etc.

Ahora bien, ¿cómo creamos ese código? ¿cuál es el proceso para obtenerlo? ¿cómo a partir de él llegamos a la pieza física, real? En este apartado resolveremos estas cuestiones.

Generación del modelo 3D

El proceso comienza con la creación de un modelo 3D utilizando para ello un programa CAD (Computer Aided Design). En el mercado podemos encontrar múltiples software CAD como SolidWorks, CATIA, Solid Edge, NX, Autodesk Inventor, Rhinoceros 3D, entre otros.

Independientemente del programa utilizado, el modelo creado debe ser sólido y estanco. Cuando se trabaja con sólidos este aspecto no constituye ningún problema, pero cuando se trabaja con superficies, y más cuando el modelo consiste en la unión de varias, se puede dar el problema de dobles superficies, colisión entre ellas, o que la unión entre

dichas superficies no se haya realizado de forma correcta, lo que en el argot de diseño se define como superficies mal cosidas o no estancas.

Una vez logrado nuestro objetivo, el siguiente paso será exportarlo como un archivo con extensión *.STL (Standard Tessellation Language). Este tipo de archivo, ampliamente usado en fabricación aditiva, contiene solo una malla de triángulos de la superficie del objeto, lo que implica que información del color, material, textura, así como otros atributos del objeto, no estarán contenidos en el archivo (Fig. 2. 5).

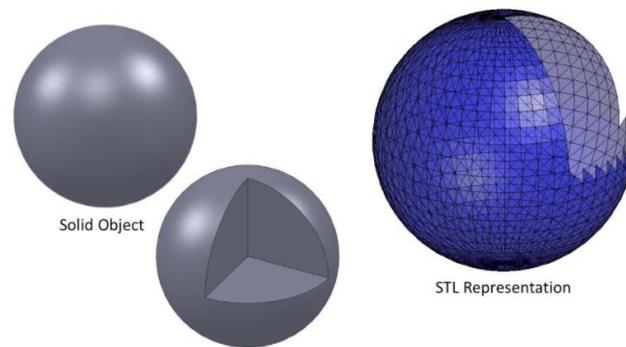


Fig. 2.5. El archivo *.STL (Standard Tessellation Language) solo contiene una malla de triángulos, lo que matemáticamente se puede traducir como un conjunto de caras triangulares definidas cada una por sus tres vértices y el vector normal a dicha cara.

Aquí, ya podemos establecer un primer problema de este tipo de formato. Un triángulo es una superficie plana, por lo que a la hora de mallar una superficie curva estos triángulos se tienen que ir disponiendo sobre la superficie, discretizando ésta, por lo que, aun poniendo triángulos más pequeños, lo que implica aumentar el número de éstos, existirá siempre una pérdida de precisión y calidad superficial. En otras palabras, cuando se trate de superficies curvas, la superficie mallada no corresponde con la superficie original diseñada.

Laminación (Slicing)

La conversión del modelo STL a código G, lo que se traduce en la obtención del archivo *.gcode interpretable por la impresora, se realiza mediante un software conocido como laminador (*slicer*). Cura, Slic3r y Simplify3D, los dos primeros libres y el último de pago, constituyen unos de los laminadores más comúnmente utilizados en impresión 3D, mientras que marcas de máquinas de fabricación aditiva “más industriales” han desarrollado sus propios softwares para implementar esta función en sus equipos.

Sea con un software u otro, se lamina o filetea el modelo 3D en capas perpendiculares al eje Z, de espesor igual a la altura de capa seleccionada. Junto con este parámetro es necesario configurar muchos otros, algunos comunes a todos laminadores y otros propios de cada uno. Entre estos se encuentran el espesor de pared, la altura de capa de la base y techo, la temperatura de extrusión, la velocidad de traslación depositando y en vacío, el relleno y la geometría de éste, los soportes, la adhesión a la base, etc. Además,

se puede orientar el modelo, escalarlo, realizar una imagen espejo del mismo, crear múltiples objetos e indicar dónde se desea su impresión respecto a la plataforma de impresión (Fig. 2. 6).

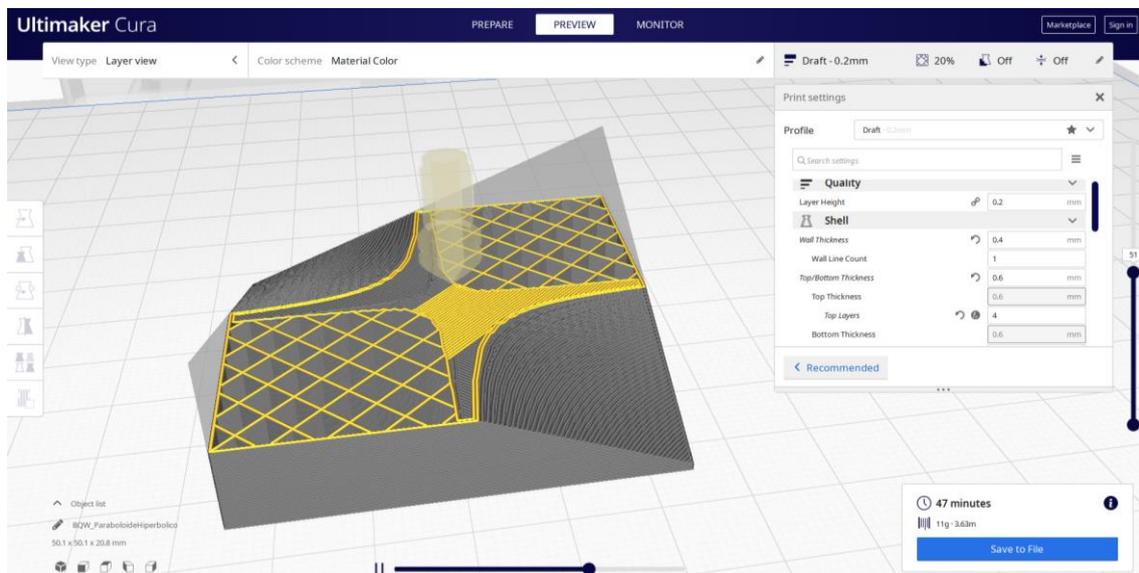


Fig. 2.6. Software laminador Cura desarrollado por Ultimaker®. El usuario debe ajustar los parámetros de impresión según la pieza a desarrollar.

Tras elegir los parámetros de impresión, algoritmos internos del software crean las trayectorias del *nozzle* para cada una de las capas en las que ha quedado dividido el objeto. Estas trayectorias, junto con otras funciones auxiliares y parámetros de impresión son traducidas a código G, constituyendo el archivo *.gcode.

Hay que tener en cuenta que la elaboración del código G mediante un software laminador se basa en algoritmos basados en diferentes técnicas de optimización, lo que implica que las trayectorias generadas no sean controladas por el usuario.

Para la mayoría de los usuarios de impresión 3D, esta automatización en la creación de trayectorias posibilita que en pocos pasos y de una forma más o menos fácil se obtenga la pieza física sin verse ellos envueltos en la programación o generación del archivo *.gcode. En contra, si se desea que el componente fabricado posea unas determinadas propiedades mecánicas y que las fibras tengan una determinada dirección, esta generación automática es un hecho totalmente negativo.

Por otra parte, en diseños con paredes muy finas, geometrías complejas y/o superficies con poco espesor, los laminadores no son capaces de resolver la generación de trayectorias y generan un error.

Impresión

Una vez generado el código G, recordemos que lo que realmente obtenemos es un archivo con la extensión *.gcode, hay que transferir ese código a la máquina. Normalmente, la lectura de ese fichero por parte de la impresora se realiza a través de una tarjeta SD, USB, conexión WIFI u otro tipo de conexión. Conseguido esto, comienza el proceso de impresión.

En primer lugar, la impresora busca su cero máquina, habitualmente denominado *Home*. Para ello, el cabezal de impresión y la plataforma (este procedimiento puede variar según la impresora utilizada) se mueven en sus ejes respectivos hasta que hacen contacto con el final de carrera. Una vez allí, empieza el calentamiento del hotend, y de la cama si la hubiera, hasta la temperatura fijada y alcanzado este valor el cabezal se desplaza en vacío hasta posicionarse en el punto de inicio.

A partir de aquí, comienza la traslación del cabezal siguiendo la trayectoria programada a la velocidad indicada, unas veces depositando material y otras veces en vacío, hasta obtener capa por capa la pieza física final. Durante el proceso, en el display de la impresora se pueden visualizar algunos datos de impresión, como el porcentaje de la pieza realizada, tiempo de ejecución y temperatura del hotend.

Acabado el proceso, el usuario puede retirar la pieza, en ocasiones ayudándose de una espátula para despegarla de la base de impresión.

2.5. Diseño Asistido por Algoritmos (AAD) [16]

Como paso previo a la fabricación, casi como un acto instintivo, surge el dibujo, el croquis. Este hecho nos ayuda a organizar las ideas, el espacio y a predecir inconvenientes en el diseño y posterior fabricación.

El dibujo “a mano”, el realizado durante décadas, se basa en el uso de una serie de instrumentos como son el papel, la tinta, la regla y el compás. En este modelo, cada pensamiento creativo es traducido a geometría a través de gestos que establecen una conexión entre la idea y el signo, entendiéndose este último como una sucesión de puntos y líneas.

Este dibujo tradicional es un proceso aditivo, en el que la complejidad se logra añadiendo y superponiendo signos independientes en un papel, y donde el significado es confiado a los diseñadores en base a unas normas.

Por otra parte, la invención y aparición de software de diseño no paramétrico, supuso una mera traslación de la lógica aditiva al ámbito digital, donde el lápiz y el papel es sustituido por el ratón y la pantalla (Fig. 2. 7).

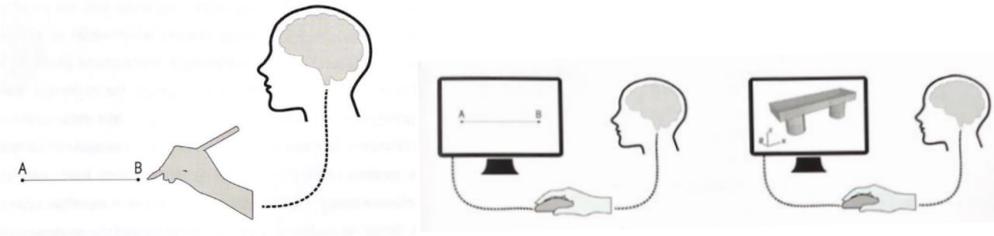


Fig. 2.7. El dibujo a mano y su extensión al mundo digital. El acto de dibujar es un gesto natural donde utilizando instrumentos tradicionales se establece una conexión entre ideas y signos. Usando software CAD el ratón simula la presencia de la mano en un entorno digital, siendo todavía una extensión del cerebro.

Para adentrarnos en lo que sí supuso una verdadera revolución en la filosofía del diseño, hay que retroceder a 1939, fecha en la que un arquitecto italiano, Luigi Moretti, inventó el término “Arquitectura Paramétrica”. Sus investigaciones, que más tarde llevarían a la creación del primer programa CAD interactivo por Ivan Sutherland en 1963, se pueden resumir en sus propias palabras:

“Los parámetros y sus interrelaciones se convierten [...] en el código del nuevo lenguaje arquitectónico, la “estructura” en el original sentido de la palabra [...]. Los parámetros de ajuste y sus relaciones deben ser apoyados por las técnicas y herramientas que ofrecen las más actuales ciencias, en particular por la lógica, las matemáticas [...] y los ordenadores. Los ordenadores dan la posibilidad de expresar los parámetros y sus relaciones a través de un conjunto de rutinas de autocorrección” [17].

En las últimas décadas, los diseñadores, con la intención de explorar nuevas vías de controlar el software “desde dentro”, han creado sofisticados programas, llevando la complejidad de diseño más allá de lo que capacidad humana es capaz de lograr. Este tipo de modelos están basados en lenguajes de programación, los cuales expresan instrucciones en una forma que puede ser ejecutada por el ordenador a través de un procedimiento paso a paso: el algoritmo.

Un algoritmo es un procedimiento usado para conseguir la solución a una pregunta, o una tarea, a través de una lista finita de instrucciones básicas y bien definidas. Los algoritmos permiten dividir el problema en un conjunto de pasos simples que pueden ser fácilmente introducidos en un ordenador, y aunque están fuertemente asociados a éste, podrían ser definidos en otro ámbito.

Cuando los algoritmos son ejecutados por un ordenador, un editor específico es usado para escribir las instrucciones. Los editores pueden ser aplicaciones independientes o estar embebidos en un software. Por ejemplo, editores independientes incluyen Python, C++, etc, mientras que editores embebidos son editores de código proporcionados por programas tales como Rhinoceros y Autocad, que permiten a los usuarios escribir instrucciones para realizar tareas automáticas en dichos programas.

Llegados a este punto, y ligado al diseño y a nuestro trabajo, cabría preguntarse ¿puede un algoritmo crear geometrías? La respuesta es afirmativa, y se basa en la existencia de editores embebidos o integrados dentro de los softwares de modelado.

En estos, los objetos ya no son manipulados con un ratón, sino que son definidos por procedimientos expresados en un lenguaje de programación específico: AutoLisp® en Autocad®, RhinoScript® en Rhinoceros®, o Python® en otras plataformas.

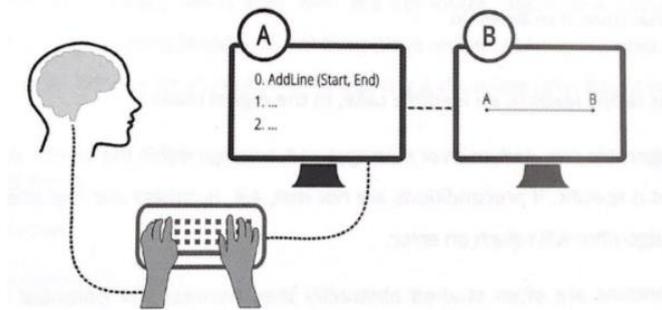


Fig. 2.8. *Scripting*. El *Scripting* consiste en dos entornos: un editor (A) donde escribes el código y un entorno de modelado (B) donde se representará la geometría 2D o 3D obtenida como resultado del algoritmo.

Esta metodología, conocida como *scripting*, es completamente nueva para los diseñadores y transforma la conexión entre la idea y el resultado final obtenido. Este último, ya no es solo un signo o una representación digital, como indicábamos en párrafos anteriores, sino que puede ser considerado un modelo digital interactivo, por el hecho que responde y recalcula en el sistema completo las variaciones que podamos realizar en las entradas (Fig. 2. 8).

Por poner un ejemplo, imaginemos una línea recta que está definida por sus dos puntos extremos. Si modificamos las coordenadas de uno de ellos, el algoritmo mantiene la relación de dichos puntos que definen la línea, recalculándola y representándola en su nueva disposición. Esto implica que el diseño algorítmico permite a los usuarios diseñar el proceso en lugar de un simple objeto.

Bruce Mau en su *Incomplete Manifiesto for Growth* expone que “el proceso es más importante que el resultado. Cuando el resultado impulse el proceso sólo iremos a donde ya hemos estado. Si el proceso conduce a un resultado, puede que no sepamos a dónde vamos, pero sabremos que queremos estar allí”. Este pensamiento se corresponde con una filosofía de diseño emergente conocida como “buscar la forma” (*form-finding*), en auge con la optimización topológica, frente a un pensamiento tradicional de “hacer la forma” (*form-making*).

En estos últimos años, se están desarrollando herramientas visuales para hacer el *scripting* más accesible a usuarios con escasas nociones de programación. De tal forma, reglas asociativas y dependencias pueden ser expresadas usando un método gráfico basado en diagramas de nodos.

El *Visual Scripting* hace posible un proceso donde una línea puede ser construida conectando dos objeto-punto, un cuadrado conectando cuatro objeto-líneas, etc.

El proceso genera dos salidas: por un lado, se genera el diagrama de nodos, también llamado diagrama paramétrico o algoritmo visual y, por otro lado, dicho diagrama crea una geometría paramétrica, ya sea 2D o 3D (Fig. 2. 9).

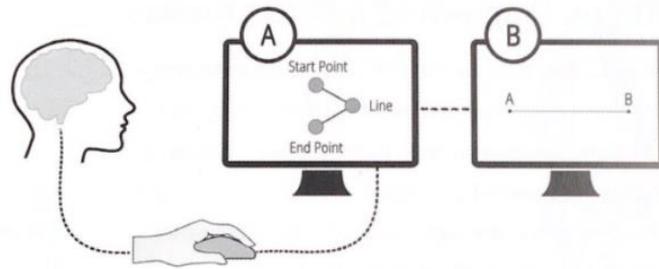


Fig. 2.9. *Visual Scripting*. El *Visual Scripting* consiste en dos entornos: un editor visual (A) donde dispones y conexiones los nodos, y un entorno de modelado (B) donde se representará la geometría 2D o 3D obtenida como resultado del algoritmo visual.

El diagrama está constituido por nodos y conexiones. Los nodos cuadrados son las funciones principales: dibujar un círculo, dividir un círculo, crear una línea. Los nodos circulares son los parámetros: el radio de cada círculo y el número de divisiones. Este algoritmo visual creará una geometría generada de la misma forma que si utilizásemos *scripting*, pero con una mayor intuición lógica, lo que permite interactuar más rápidamente con los parámetros.

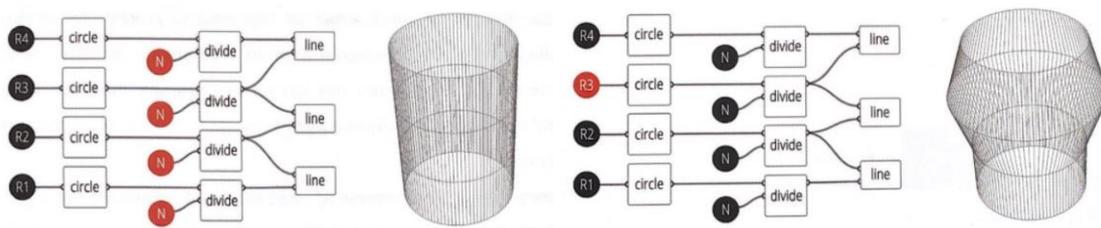


Fig. 2.10. De la función a la geometría. A partir de funciones visuales (nodos), el algoritmo visual permite crear geometría parametrizada.

Por ejemplo, si el parámetro N de la figura 2.10. es modificado incrementando su valor, más líneas serán generadas. Si modificamos el parámetro de radio (R3), tal y como se indica en la figura, éste será automáticamente actualizado modificándose la geometría.

En resumen, el diagrama paramétrico tiene el potencial de crear modelos asociativos que exploran múltiples configuraciones a través del control de los parámetros de entrada.

En este trabajo utilizaremos Grasshopper®, una de las más populares y avanzadas herramientas de modelado algorítmico. Grasshopper, un plug-in para Rhinoceros®, es un editor basado en nodos (*Visual Scripting*), desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates.

3 Trabajos relacionados

Al estudiar el proceso de impresión FDM indicábamos cómo un objeto era laminado en una serie de “rodajas” que luego llevarían a una fabricación por capas, de abajo a arriba, hasta completar el modelo. Este proceso de discretización no está exento de inconvenientes relacionados estos con el escalonamiento, la rugosidad superficial y la distorsión de la forma (Fig. 3. 1).

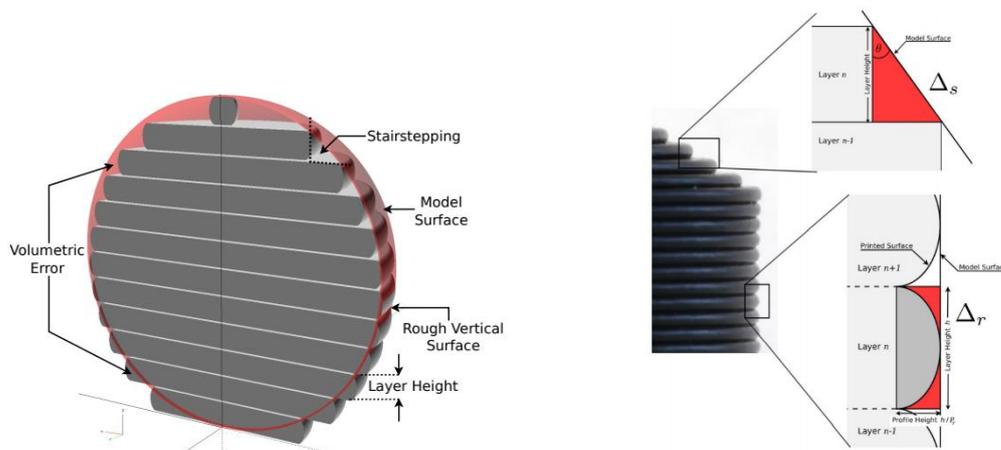


Fig. 3.1. Errores de impresión debidos a la discretización del modelo. Izquierda: Las capas de material impreso se aproximan a la superficie del modelo. Derecha: Rugosidad en la superficie lateral y efecto del escalonamiento en la superficie superior.

Por un lado, las partes impresas por FDM muestran una rugosidad mayor que otros procesos aditivos citados, como pueden ser SLA o SLS. Como puede verse en la figura anterior, existe una rugosidad lateral, producida ésta por la forma esférica achatada que se produce al depositarse el material, además de una rugosidad superior como consecuencia, principalmente, del escalonado. Hay que tener en cuenta que la impresión 3D es un proceso donde influyen muchas variables (altura de capa, temperatura de extrusión, velocidad, “hardware” de la máquina, dinámica de fluidos viscosos, etc.) y, por lo tanto, esto se va a traducir en una rugosidad y acabado superficial variable, donde es complicado obtener un modelo matemático riguroso que coincida con el observado en la práctica.

Por otro lado, existe un efecto de distorsión de la forma producido por el mismo escalonado. Dependiendo de cómo se haya realizado la discretización, los escalones en cada capa quedarán dentro o fuera de la superficie del modelo teórico, ocasionando un error volumétrico que puede que no sea grave si miramos la pieza de forma completa,

pero que sí va a ser importante en cada capa, donde el error será inversamente proporcional al ángulo de la superficie.

Es este mismo ángulo superficial, ya introducido en el punto “1.1. Definición del problema” el verdaderamente importante, y el que va a ocasionar que el efecto del escalonado (*stairstepping*) sea el más crucial en el acabado y precisión dimensional de nuestras piezas impresas.

Es fácil comprender que, si nuestra pieza es un simple cubo, la superficie del modelo estará compuesta por una serie de paredes o superficies laterales a 90° y por una superficie inferior y otra superior totalmente horizontales a 0° . En este tipo de piezas no existe efecto de escalonamiento y, por lo tanto, este no influye en el acabado y precisión dimensional. En contra, cualquier superficie ni vertical ni horizontal implicará un mayor o menor grado de escalonamiento, mayor cuanto menos inclinación tenga la superficie.

La importancia del efecto del escalonado es tal que llevo a Dolenc y Mäkelä [18] a introducir el término altura de cúspide (*cusp height*) para medirlo y controlarlo (Fig. 3. 2).

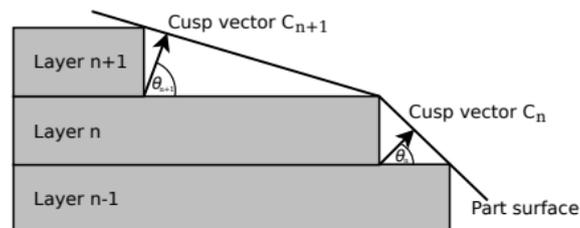


Fig. 3.2. Definición del término *cusp height*. El “*cusp vector*” describe la desviación máxima entre la superficie teórica del modelo y la superficie impresa del mismo. Nótese que un ángulo $\theta=0^\circ$ implicará que como mínimo entre dos capas contiguas no existe escalonado y, por lo tanto, en esa zona la rugosidad será la provocada por la forma lateral del filamento depositado. En contra, un ángulo θ que se aproxime a 90° , sin ser igual a él, indicará un escalonamiento muy elevado.

Todos los inconvenientes y errores analizados como efecto de la discretización de la pieza a imprimir se pueden mitigar, que no hacer desaparecer, disminuyendo la altura de capa. Evidentemente, este hecho implica un sustancial aumento de tiempo, razón por la cual no es posible aplicarlo en determinadas aplicaciones industriales donde el coste es un factor limitante.

En este sentido Wasserfall et al. [19] proponen un modelo de capas adaptativo, en el que la altura de éstas varía según la inclinación de la superficie del modelo, traducida ésta en el valor del *cusp vector*. De esta forma se logra una alta calidad superficial mientras que el tiempo de impresión se mantiene en un rango razonable.

Chackraborty et al. [20] van un paso más allá, y presentan una nueva técnica llamada *Curved Layer Fused Deposition Modeling (CLFDM)*, conocida coloquialmente como impresión no-plana. Esta técnica se basa en depositar el material en capas curvas, en contraste con la impresión FDM clásica donde las capas son depositadas e impresas de forma plana (Fig. 3. 3). El método que proponen es particularmente ventajoso, sobre el FDM, en la fabricación de piezas curvas con poco espesor (carcasas, chasis), donde el

efecto del escalonamiento se reduce, a la vez que se incrementa la resistencia del material.

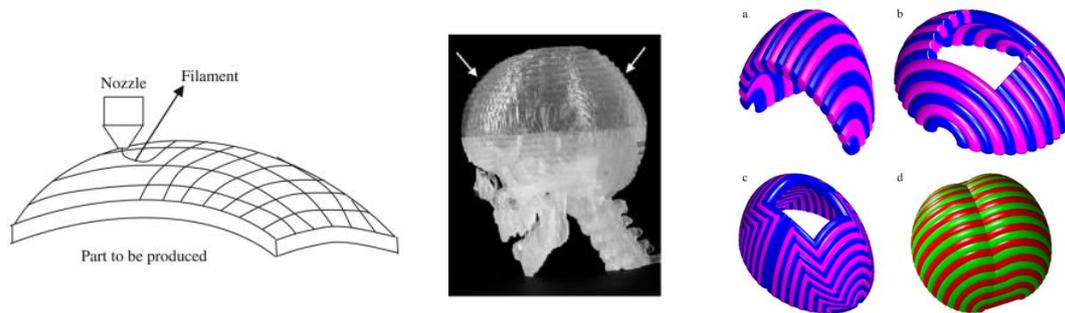


Fig. 3.3. Fabricación aditiva CLFDM. Izquierda: Deposición de filamento mediante impresión no plana para prototipar una pieza curva de pequeño espesor. Centro-Derecha: En este caso la pieza es una parte del cráneo humano donde se estudian diferentes disposiciones del filamento para la obtención de diferentes propiedades mecánicas.

Como vemos, esta nueva técnica, que conjuntamente con el FDM aplicaremos en este trabajo, supone una apertura a un nuevo mundo en la fabricación aditiva. En ésta ya se habla de orientación de las fibras, de generación de las trayectorias de impresión y de la formación de estructuras con determinadas propiedades físicas.

Por otra parte, con esta técnica las impresoras adquieren nuevas posibilidades de movimiento. El FDM se basa en un modelo 2.5D, donde el eje X e Y se pueden mover coordinados y el eje Z se desplaza para “pasar” a la siguiente capa. En el CLFDM el eje Z adquiere la posibilidad de moverse sincronizado con los ejes X e Y, adquiriendo en ciertas ocasiones el verdadero rango de movimiento en las tres dimensiones, 3D.

A partir de aquí, diferentes autores proponen mejoras y optimizaciones de la técnica, siempre tomando como base la filosofía impuesta por Chackraborty.

En esta línea, Jin et al. [21] remarcan el cambio que se produce en la geometría del filamento depositado al pasar de una impresión FDM a una CLFDM. En la primera, la geometría se puede aproximar a dos semicírculos y una base rectangular, mientras que en la impresión no planar las fuerzas cambian y la geometría de la sección del filamento tiene forma ovalada (Fig. 3. 4).

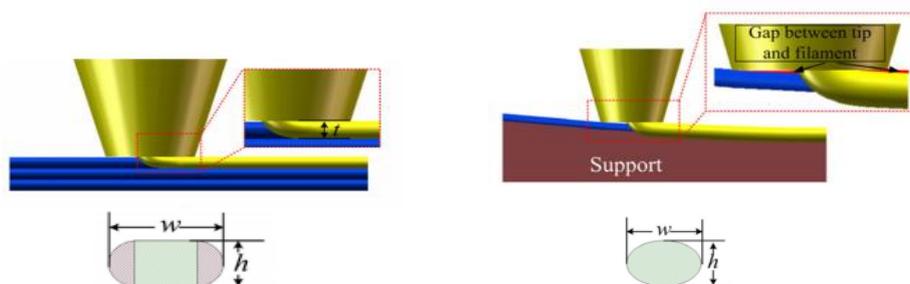


Fig. 3.4. Forma del filamento depositado en impresión plana y no plana. Izquierda: En impresión plana la sección del filamento depositado se aproxima a una geometría formada por dos semicírculos y un rectángulo. Derecha: En impresión no plana, no existe un contacto completo

entre el filamento depositado y la punta de la boquilla, por lo que el filamento depositado adquiere una forma ovalada.

Otro aspecto importante a tener en cuenta son las colisiones que en el CLFDM pueden darse al dotar al cabezal extrusor de una mayor libertad de movimientos. No es extraño que el *nozzle*, ventiladores u otros elementos incorporados en el cabezal choquen con la pieza que se está fabricando. Con ánimo de evitar este hecho, autores como Micali [22] o Ahlers [1] proponen algoritmos avanzados que chequean posibles colisiones indicando si es posible o no la impresión de la pieza.

Ahlers, además, establece algunas pautas que relacionan la inclinación de la superficie y la calidad de la misma, algo a tener en cuenta para este trabajo. Así, como podemos observar en la Fig. 3.5, la resolución de las capas no planares será mayor que la obtenida con capas planas, siempre hablando de la misma geometría, si el ancho de extrusión (*extrusion width*) es más pequeño que el escalonado (*step size*). Lo que implica que dados un ancho de extrusión y una altura de capa

(*layer height*), y calculado el ángulo θ_h como se indica en la ecuación (1), será recomendable

$$\theta_{th} = \arctan \left(\frac{\text{layer_height}}{\text{extrusion_width}} \right) \quad (1)$$

una impresión no planar siempre que el ángulo de inclinación, θ , sea menor al calculado.

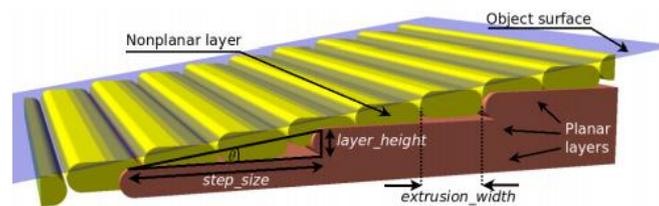


Fig. 3.5. Efecto de la inclinación en la calidad superficial.

En consonancia con la búsqueda de esa calidad superficial, el mismo Jin, nombrado anteriormente, indica la importancia de adaptar la altura de capa a la inclinación de la superficie, teniendo en cuenta, además, el sentido de la trayectoria calculada (Fig. 3.6).

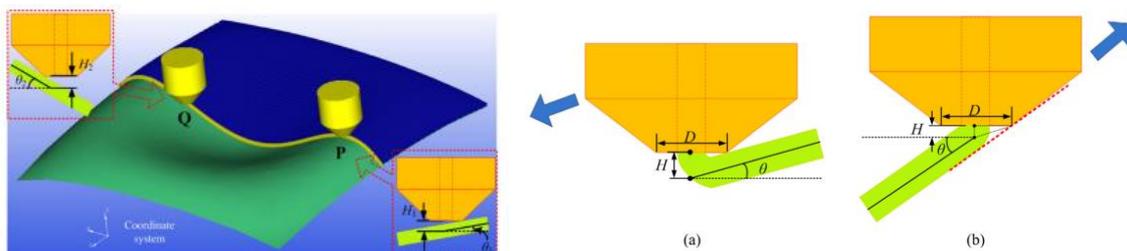


Fig. 3.6. Distancia entre la punta de la boquilla y la capa inferior. Izquierda: La distancia entre la punta de la boquilla y la capa anterior debería adaptarse en cada punto de la trayectoria teniendo en cuenta la inclinación de la superficie. Derecha: El sentido en la trayectoria de la herramienta es importante. La distancia cuando la boquilla se mueve de arriba a abajo debe ser mayor que si lo hiciera en sentido contrario.

Por último, Pelzer y Hopmann [23] plantean un modelo donde la altura de las capas es variable dentro del mismo objeto, pero a diferencia del planteamiento de Wasserfall donde las capas eran planas, en este las capas son curvas. Usando funciones

matemáticas, calculan la cantidad de material a extruir, de tal forma que el espesor de capa puede ser variable dentro de la misma capa. Esto proporciona cohesión entre las capas, desapareciendo los huecos de aire entre estas, lo que hace mejorar la rugosidad superficial y aumentar las propiedades mecánicas (Fig. 3. 7).

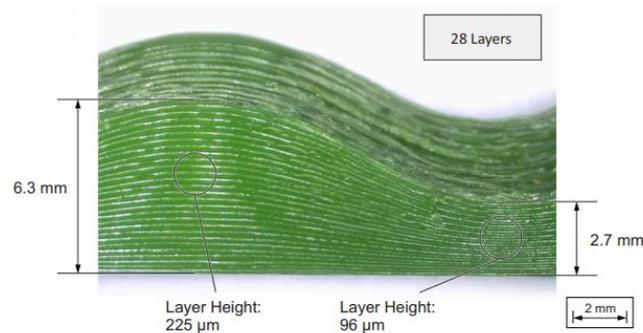


Fig. 3.7. Modelo de capas no planas con altura variable.

Para terminar con este capítulo, se hace necesario indicar que muchos de los autores advierten una mejoría importante, sobretodo en términos de calidad superficial, si implementaran sus trabajos con máquinas de 5 ejes o brazos robóticos, de tal forma que pudieran cambiar la orientación relativa entre el extrusor y la superficie de la pieza. Claro está que, bajo este prisma, algunas ventajas de la fabricación aditiva como la economía y la simplicidad de control se perderían, lo cual parece *a priori* contrario a la intención originaria de la fabricación aditiva, aunque las mejoras de las técnicas industrial parecen ir en esa línea.

4 Implementación

4.1. Aspectos previos al proceso

En un proceso de fabricación FDM “clásico” la geometría a imprimir es tratada como un todo. Esto implica que partimos de un código (*.gcode) que contiene la geometría completa y, por lo tanto, no hay distinción entre las diferentes partes que conforman la pieza. Por ejemplo, durante la impresión de una capa se puede dar el hecho de imprimirse a la vez parte de base, relleno, superficie y soporte.

Dado que la finalidad del presente trabajo es mejorar la calidad superficial de las piezas impresas, el planteamiento del párrafo anterior no es aplicable. Aquí, tanto en el proceso de diseño como en el de impresión, la geometría no es tratada como única e íntegra, y diferenciaremos en ésta dos partes o fases (Fig. 4. 1).

La primera de ellas, la más importante en nuestro cometido, la denominaremos piel o fase superior. Ésta constará de una o más capas, cada una con una orientación distinta en cuanto a las fibras se refiere. Esta distinción abre la puerta a futuras investigaciones donde la piel se asemeja a un material composite en el que la orientación y estructura de las fibras, así como su composición, puede variar en cada una de las capas, dando a dicha piel propiedades mecánicas concretas.

La piel será elaborada a partir de trayectorias no planas generadas mediante el *plug-in* Grasshopper®, ya introducido en un capítulo anterior. Será la calidad superficial de la superficie de la piel así fabricada la que mediremos y compararemos con la calidad superficial obtenida en piezas elaboradas mediante una impresión FDM tradicional.

En este punto hay que indicar que llamamos superficie de la piel a la capa más exterior de ésta, generalmente la capa superior, por la disposición de ésta cuando termina el proceso de impresión.

Por otro lado, denominaremos base o fase inferior a la segunda parte en la que hemos dividido la pieza física a obtener. Sobre esta base se asentará la piel y su finalidad es soportar a ésta. La base será fabricada mediante capas planas, basándonos en un sistema FDM clásico, cuyas trayectorias serán generadas mediante el software de laminado CURA®.

El material utilizado será de la misma composición química que el material de la piel, PLA negro de la marca Smart Materials 3D (www.smartmaterials3d.com), si bien es cierto que podremos usar otro color para una mejor visualización de la interfase base-piel. Nuevamente, aquí se abre otra futura vía de investigación al utilizar material hidrosoluble como base. De esta forma, podríamos obtener pieles avanzadas con geometrías y estructuras complejas.

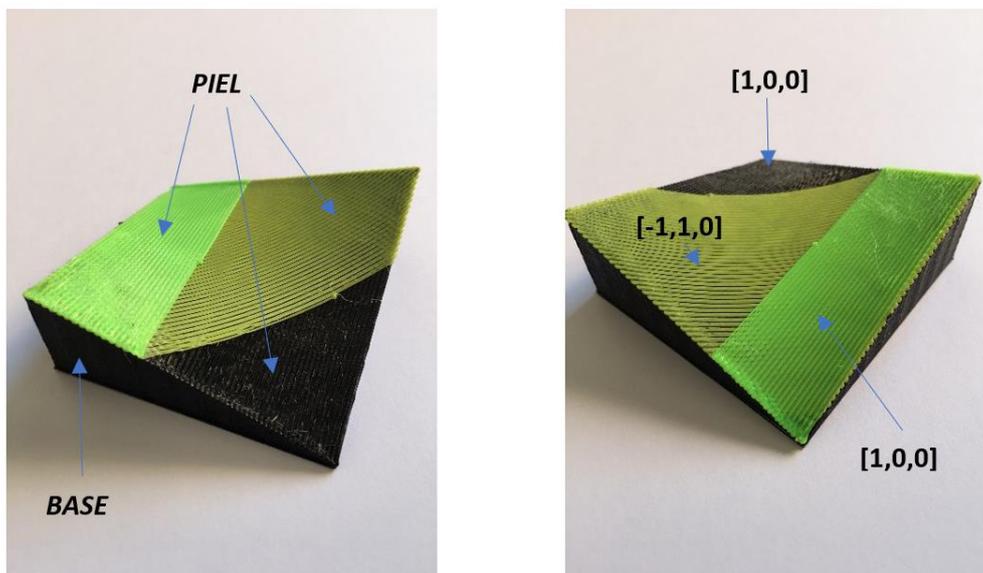


Fig. 4.1. Fases de la pieza impresa. Izquierda: La piel, fabricada con una metodología FDM no planar, estará compuesta por una o más capas con distintas orientaciones cada una. La base, que servirá de soporte a la piel, se obtendrá siguiendo una metodología convencional capa a capa. Derecha: Las diferentes orientaciones de las fibras serán definidas a través del vector perpendicular a éstas.

4.2. Procedimiento general

Se pretende en este punto establecer un procedimiento general a seguir para la obtención de las piezas impresas (Fig. 4. 2). Recordemos que diferenciamos dos partes, base y piel, tanto en el diseño como en la fabricación de las piezas.

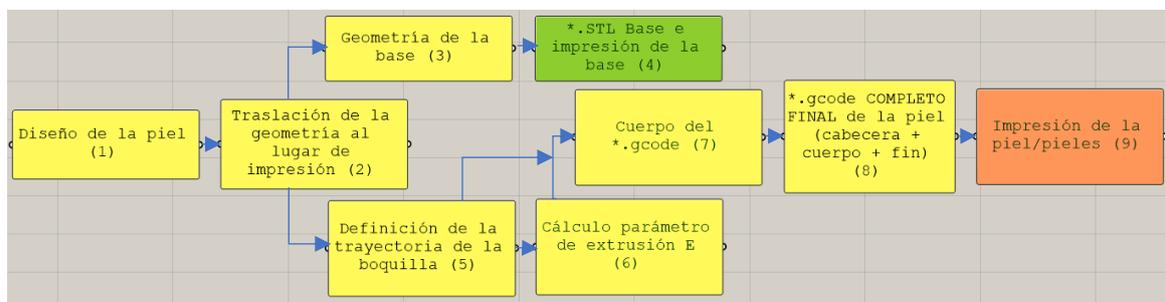


Fig. 4.2. Procedimiento general para la impresión de la pieza. Es necesario distinguir entre una impresión FDM clásica para la fabricación de la base y una impresión no-planar (CLFDM) para la obtención de la piel o pieles.

De tal forma, se tomará siempre como punto de partida el diseño de la piel. Ésta será una superficie de geometría más o menos compleja ①. Diseñada la piel es necesario trasladarla a la zona/coordenada de la impresora donde se imprimirá ②. A partir de la piel, definiremos la geometría de la base ③ y, cambiándonos al entorno CAD de Rhinoceros® obtendremos el archivo *.STL para la impresión de la misma ④.

Por otra parte, la división de la piel mediante una serie de planos marcará el inicio de la definición de la trayectoria que seguirá la boquilla en el proceso de impresión ⑤. Tras calcular el parámetro de extrusión E ⑥, que indica cuánto material sale por la boquilla, obtendremos el cuerpo del *.gcode ⑦.

El *.gcode completo de la piel (el código que interpretará la impresora para la impresión de ésta) se obtendrá de fusionar la cabecera del programa, con el cuerpo del programa y el final de éste ⑧.

Por último, ejecutaremos en la impresora este programa para fabricar la piel ⑨. Pielés sucesivas y con diferentes orientaciones pueden obtenerse siguiendo diferentes metodologías que serán explicadas posteriormente.

4.3. Diseño e impresión de las piezas

Atendiendo a todo lo anteriormente estudiado se propone el diseño e impresión de cuatro piezas con geometría bien diferenciada entre ellas. En este apartado se hará alusión a cada una de las piezas, si bien un análisis pormenorizado del proceso de diseño e impresión de éstas, dado su extensión, se realizará por medio de anexos debidamente citados.

La primera pieza que proponemos en este trabajo es una cuña. Ésta podría parecer simple y trivial, pero existen dos razones fundamentales de su elección. La primera de ellas radica en la didáctica del proceso, ya que es una pieza adecuada para explicar y analizar, de una forma fácil, práctica y rigurosa, el procedimiento utilizado; un procedimiento cuya estructura general se seguirá en todas las piezas propuestas. La segunda razón, más técnica, es que la geometría de la cuña, en particular su pendiente, nos permite estudiar la mejora de la calidad superficial buscada en el presente trabajo.

Anexo I: Impresión de una cuña.

En la segunda pieza, con el fin de aumentar ligeramente la complejidad en la impresión, vamos a introducir una superficie con una pequeña curvatura. Esta superficie es un arco extruido definido por tres puntos (inicio, centro y fin del arco) y una longitud de extrusión. Con el fin de imprimir la pieza con el *nozzle* que viene de serie en la Witbox 1 (el mismo que el utilizado en la cuña), similar a los *nozzles* usados habitualmente en la impresión 3D por el usuario general, la diferencia de altura entre los puntos inicio-final y el punto

central del arco no va a ser elevada, y será de 3 mm. Esto nos permitirá que no existan colisiones entre la boquilla y la pieza impresa.

Anexo II: Impresión de un arco extruido.

En la tercera pieza que se propone, se diseñará e imprimirá una superficie compleja a partir de sus ecuaciones paramétricas. La superficie que ha sido definida como “PIVA” en el *Proyecto Educativo Descartes* [27] posee una variable que hace modificar su geometría. La elección de dicha variable (parámetro) se ha realizado con el fin de aplanar la geometría y que la impresión de ésta sea posible, a la vez que permitiera destacar las ventajas de la impresión no plana en este tipo de figuras.

Anexo III: Impresión de una superficie compleja a partir de sus ecuaciones paramétricas.

Por último, la cuarta pieza, que cuenta con una geometría de paraboloides hiperbólicos, representa un incremento sustancial en la complejidad geométrica de la superficie y por lo tanto en la dificultad de impresión de ésta. Además, tal y como se analiza detalladamente en el siguiente punto “4.4. Configuración experimental para impresión no-plana”, para que dicha impresión sea posible y libre de colisiones se introduce un nuevo modelo de *nozzle* más específico para esta impresión no plana.

Anexo IV: Impresión de un paraboloides hiperbólicos.

4.4. Configuración experimental para impresión no-plana

Colisiones y elección del *nozzle*

La fabricación del paraboloides hiperbólicos no supondría una dificultad extra para la impresión FDM “clásica”, pero si lo que queremos es fabricarlo con impresión FDM no planar, con el objetivo de mejorar la calidad superficial, es necesario tener en cuenta el diseño de la unidad extrusora, más concretamente del *nozzle*, con el fin de que no se produzcan colisiones durante el proceso de impresión.

Efectivamente, en cualquier impresora que encontremos en el mercado, la geometría y disposición del conjunto extrusor, así como del *nozzle* incluido en éste, está pensada para trabajar en un modo tradicional de fabricación aditiva basado en imprimir sucesivas capas planas perpendiculares al eje Z. De esta forma nunca puede existir una colisión del *nozzle* con ninguna parte de la pieza que en ese momento se esté imprimiendo. Ahora bien, en

una filosofía de trabajo no planar que conlleva una mayor libertad de movimientos del extrusor, dado que ahora se pueden mover los tres ejes de trabajo a la vez, sí que pueden existir colisiones durante el proceso si no se tienen en cuenta algunos aspectos.

Uno de ellos, denominado por Ahlers et al. [1] modelo de colisión, tiene que ver con el “volumen libre alrededor del *nozzle*”. En su trabajo diferencian, de una forma muy acertada, una zona general y una zona local de colisión (Fig. 4. 3). Este modelo permite definir qué geometrías son posibles de fabricar mediante impresión FDM no planar.

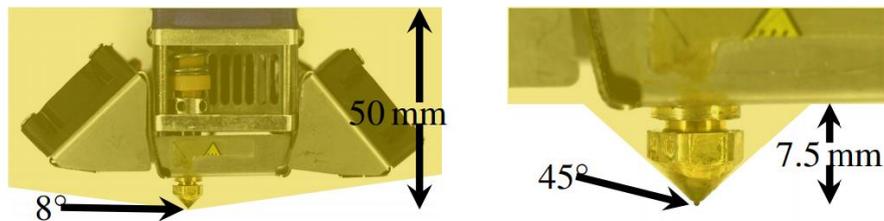


Fig. 4.3. Modelo de colisión para la impresora 3D Ultimaker 2. Éste nos permitirá conocer que geometrías podremos imprimir no planarmente. Por poner un ejemplo, con esta impresora no podríamos imprimir una cuña con un ángulo mayor a 8° y con las dimensiones que se han planteado en este trabajo. Sí que se admitiría este ángulo e incluso mayores en la impresión de microgeometrías, objeto que queda fuera del alcance de este proyecto.

En la actualidad, existen impresoras que incluyen sensores capacitivos para nivelar la base o cama de impresión (Fig. 4. 4). La base de este sensor se encuentra unas pocas décimas por encima de la punta de la boquilla por donde sale el filamento permitiendo que no haya colisiones durante un proceso de impresión tradicional. Ahora bien, la impresión no-planar no estaría libre de colisiones debido a la propia disposición de este sensor, excepto una vez más, la impresión de geometrías concretas donde el estudio de la orientación y el tamaño de la pieza a fabricar habría sido estudiado detalladamente.

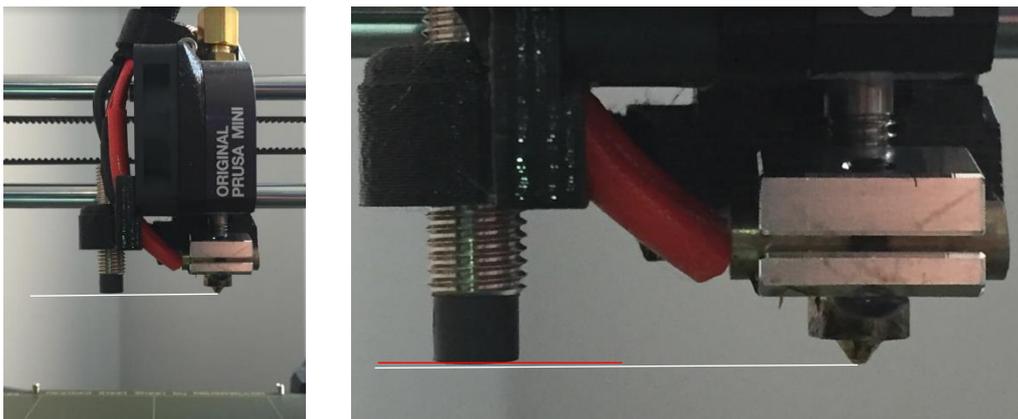


Fig. 4.4. Sensor de nivelación. La impresora Prusa Mini+ de PrusaResearch cuenta con un sensor capacitivo que asiste en la nivelación de la base de impresión. La disposición de este tipo de sensores dificulta y/o imposibilita la impresión no-plana de determinadas superficies al provocar colisiones con éstas durante el proceso de impresión.

El cabezal de impresión de la Witbox 1, la impresora utilizada en el presente trabajo, lo podríamos asemejar al cabezal de la Ultimaker 2, aunque, claro está, podemos apreciar algunas diferencias en cuanto a las dimensiones del modelo de colisión.

En la Fig. 4. 5, se indican las cotas importantes del modelo de colisión de la Witbox 1. En este indicamos como datos importantes para tener en cuenta; un ángulo de 6° entre la base de la boquilla y el extremo del soporte del extrusor, soporte que hace a la vez de alojamiento de los rodamientos en las guías del eje X. Por otra parte, entre la base de la boquilla y el soporte indicado anteriormente existe una diferencia de alturas de 6mm. Además, la boquilla tiene un ángulo exterior de 45° , idéntico al *nozzle* de la Ultimaker 2.

La diferencia de alturas entre la base de la boquilla y el soporte de aluminio del hotend es en realidad, como vemos en la Fig. 4. 6, de 7.5 mm, pero en la Witbox 1 el soporte del extrusor queda por debajo, de tal forma que a efectos prácticos para la impresión no planar contamos con 6 mm.

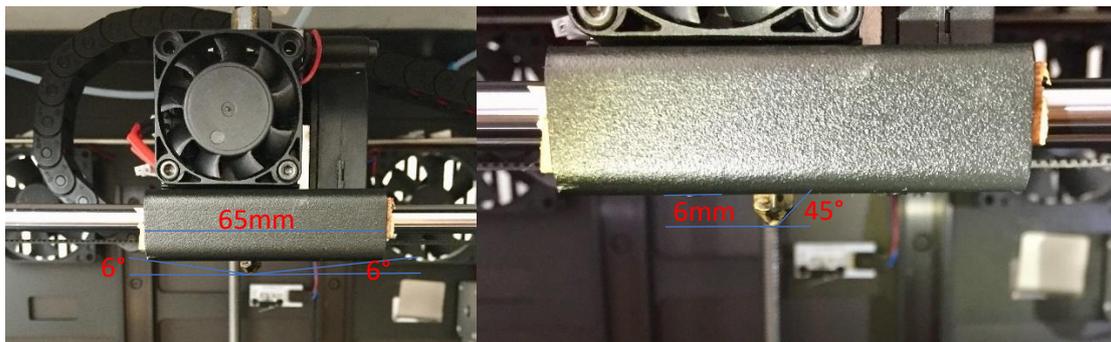


Fig. 4.5. Modelo de colisión en la Witbox 1.

La conclusión de todos estos datos dimensionales a la hora de imprimir las superficies de nuestras pieles de un modo no planar es que éstas no pueden tener una diferencia de alturas en Z mayor que 6 mm ni una pendiente mayor de 45° microgeométricamente y 6° macrogeométricamente. En el momento de la impresión, con un modelo más detallado que incluyera las dimensiones inferiores del soporte extrusor, se podría llevar al límite de la colisión la impresión de las pieles, pero este hecho no entra dentro del objetivo del proyecto.

Estudiado el modelo de colisión de la Witbox 1, no es posible la impresión de la cuarta pieza, cuya piel tiene una geometría de paraboloides hiperbólico, debido a las dimensiones del extrusor y del *nozzle* que acabamos de analizar.

Para superar este problema, y sí hacer posible esta impresión, se va a recurrir al uso de un nuevo modelo de *nozzle*, ideado y comercializado por *nonplanar.xyz* dentro de Kupol Inc. [26]

Para ello, vamos a sustituir el *nozzle* que viene de serie en la Witbox 1 por el *nozzle* de *nonplanar.xyz*. Este tendrá un diámetro de boquilla de 0.6 mm, e irá montado en el mismo hotend.

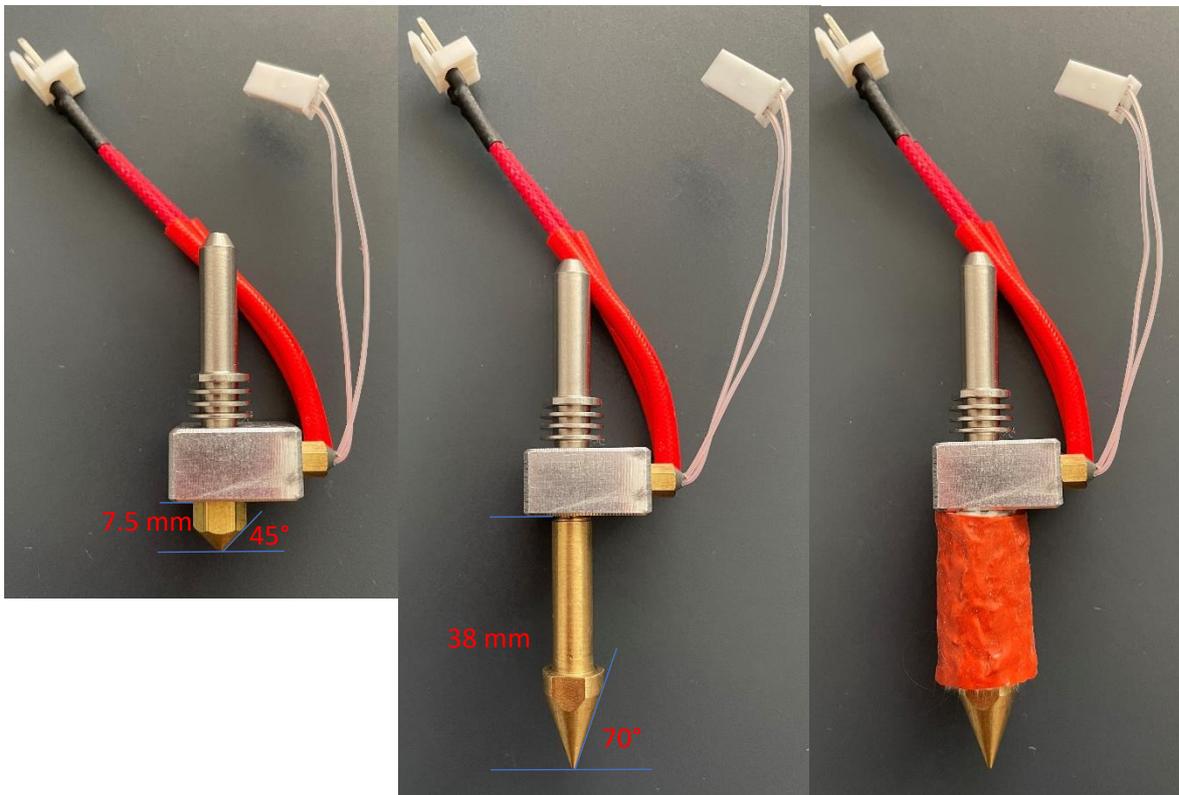


Fig. 4.6. Boquilla original vs experimental. Izquierda: *Nozzle* original en la Witbox 1. Centro: *Nozzle* de *nonplanar.xyz* diseñado para impresión FDM no planar. Derecha: Debido al incremento de longitud del *nozzle* es conveniente dotar a éste de un aislante térmico. Este aislante también lo comercializa la misma empresa.

Como se puede observar en la Fig. 4. 6, existe un cambio sustancial en la geometría de la boquilla. La longitud del *nozzle*, medido desde la punta de éste hasta la base de aluminio del bloque calefactor, aumenta desde los 7.5 mm a los 38 mm. Por otra parte, el ángulo de la boquilla, medido nuevamente desde la punta de ésta, se incrementa desde los 45° a los 70°. Este cambio en la geometría de la boquilla nos brinda la oportunidad de imprimir nuestras piezas con la metodología FDM no planar que habíamos contemplado.

Nueva configuración del final de carrera Z

Es importante observar al realizar el cambio de *nozzle* que sus dimensiones, en cuanto a longitud, han cambiado y, por lo tanto, si lleváramos a cabo un procedimiento de nivelación de la cama de la impresora o si lanzáramos cualquier impresión, el *nozzle* colisionaría con la cama dañando nuestra impresora. Para solucionar este hecho es necesario idear una nueva configuración en el final de carrera del eje Z.

En la Witbox 1, los finales de carrera de los tres ejes son mecánicos y están fijados en la estructura de la impresora. De tal forma, son dos patillas metálicas, que forman parte del soporte donde va alojado el conjunto extrusor, las que activan los finales de carrera del eje X e Y al contactar con estos. Por otra parte, una patilla, similar a las anteriores, dispuesta en el soporte de la cama de impresión, es la que realiza el contacto con el final de carrera del eje Z (Fig. 4. 7). Este último contacto es de vital importancia en la realización del presente trabajo.

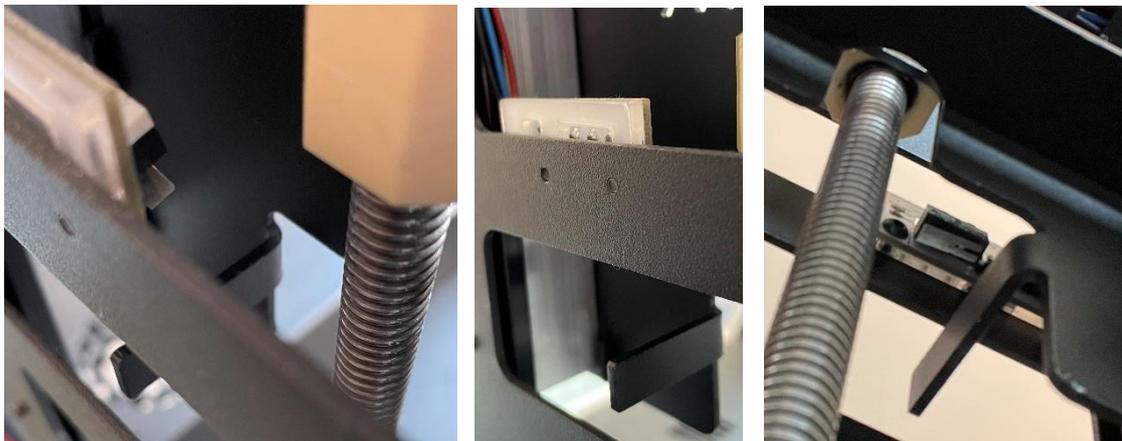


Fig. 4.7. Final de carrera “Z” en la Witbox 1. Izquierda: Una patilla metálica es la encargada de contactar con el final de carrera mecánico en el eje Z. Centro: La “patilla” metálica está integrada mediante un proceso de doblado de chapa en el soporte de la cama de impresión. Derecha: Vista inferior de la configuración, en la Witbox 1, del final de carrera en Z. El contacto mecánico está fijado mediante dos tornillos a la estructura de la impresora.

La reconfiguración de este contacto en Z se basa en una idea muy simple. Si, como vemos en la figura 4. 6, el *nozzle* original de la Witbox 1 sobresale 7.5 mm y el *nozzle* que queremos adaptar sobresale 38 mm, lo que implica que existe una diferencia entre ellos de 30.5 mm, será necesario que el contacto se produzca 30.5 mm antes que en la anterior configuración con el *nozzle* original.

Para anticipar este contacto podemos adoptar dos soluciones. La primera de ellas consistiría en mover el final de carrera mecánico a una posición más inferior (una coordenada Z menor). Para ello tendríamos que desatornillar la fijación del final de carrera y diseñar un componente que utilice esos dos agujeros roscados para su fijación a la estructura de la máquina. Por otra parte, este mismo componente contará con dos nuevos agujeros roscados situados 30.5 mm por debajo, de tal forma que en estos se fijará nuevamente el final de carrera. Esta estrategia, dotaría de rigidez al sistema de contacto, sin embargo, cada vez que queramos hacer un cambio de boquillas existirá un tiempo elevado en la colocación del sistema diseñado. Por no citar que el acceso a la zona de fijado es complicado.

La segunda solución, que será la que adoptaremos, consiste en diseñar e imprimir una pieza que ajuste debidamente en la patilla metálica que contacta con el final de carrera, incrementando la altura de la patilla. Con esta nueva configuración es la pieza diseñada, y no la patilla metálica, la que realiza el contacto, pero esta vez dicho contacto se

producirá 30.5 mm antes (Fig. 4. 8). Este planteamiento es flexible en cuanto al cambio, ya que permite una rápida colocación desde el frente de la máquina, y permite un contacto seguro al ir la pieza fijada a la patilla con un tornillo prisionero. De tal forma, no es necesario agujerear ni modificar ningún componente de la impresora.

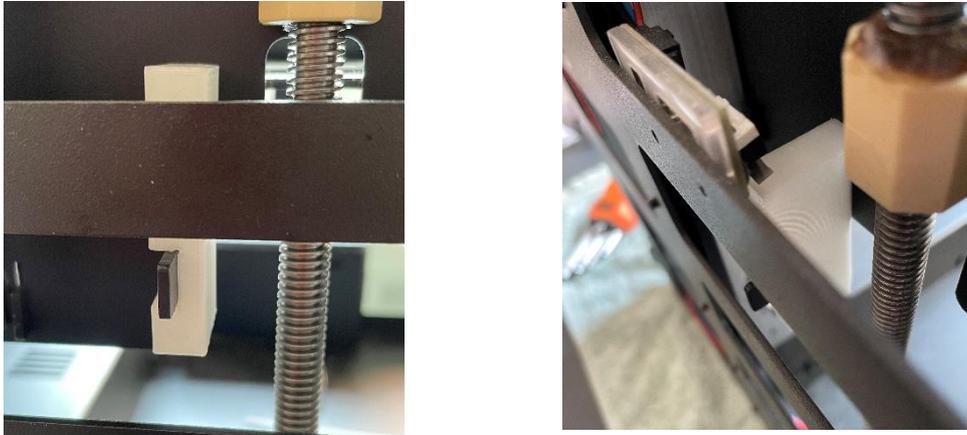


Fig. 4.8. Acople para contacto con el fin de carrera "Z". Izquierda: La pieza, impresa en 3D, se fija a la patilla metálica de la impresora mediante un tornillo prisionero. Este hecho propicia una colocación fácil y rápida desde el frente de la máquina, a la vez de que permite un contacto mecánico fiable. Derecha: El contacto con el final de carrera de Z se producirá 30.5 mm antes que si no pusiéramos esta pieza, de tal forma, no se produce la colisión del *nozzle* de nonplanar.xyz con la mesa.

Una vez colocada la pieza en la patilla será necesario nivelar nuevamente la base de impresión. Por último, hay que indicar que, en ningún momento del cambio de boquilla es posible identificar a esta y llevar una corrección de la longitud (decalaje) al código G, aspecto que sí se puede realizar en otras máquinas herramientas CNC.

El plano de la pieza que permite la corrección del contacto con el final de carrera en Z está disponible en el Anexo V, Plano: Extensión final carrera Z- Witbox 1.

5 Evaluación de la calidad superficial

Tras el diseño e impresión de los cuatro modelos estudiados en el punto anterior, será necesario evaluar la calidad superficial de los mismos con el fin de determinar mediante comparación qué tipología de fabricación aditiva “FDM”, plana o no-plana, arroja mejores resultados en cuanto a dicha característica.

5.1. Rugosidad superficial

La mayoría de las piezas fabricadas son sometidas a algún tipo de control superficial. Esto es así, porque es dicha superficie la que interactúa con el medio que le rodea, con todo lo que este hecho implica: deslizamiento o ajuste con otra pieza y/o material, moldeo, interacción con la luz, apariencia estética, etc.

De tal forma, y dada la importancia de la superficie, será necesario establecer en nuestros diseños de pieza especificaciones de “calidad superficial” según el uso o aplicación al que vaya destinada dicha parte. Sin embargo, la obtención de dicha calidad no está exenta de dificultades debido a la multitud de variables que intervienen.

La rugosidad, sin ir más lejos, es una serie de ranuras, marcas o estrías localizadas en la superficie, causadas por el proceso de fabricación utilizado. Es decir, cada proceso productivo implica un rango de rugosidad diferente.

Por otra parte, la ondulación es otro tipo de defecto generado por los desajustes en las máquinas, así como vibraciones en las mismas, e incluso es causado por tensiones internas en el material. Además, se pueden dar errores de forma como falta de planitud, curvatura, conicidad, etc.

Teniendo esto en mente, en este trabajo nos ocuparemos de la medición de la rugosidad en nuestras piezas, entendiendo ésta como el conjunto de irregularidades que posee la superficie real de un objeto en una sección determinada, donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados (Fig. 5. 1).

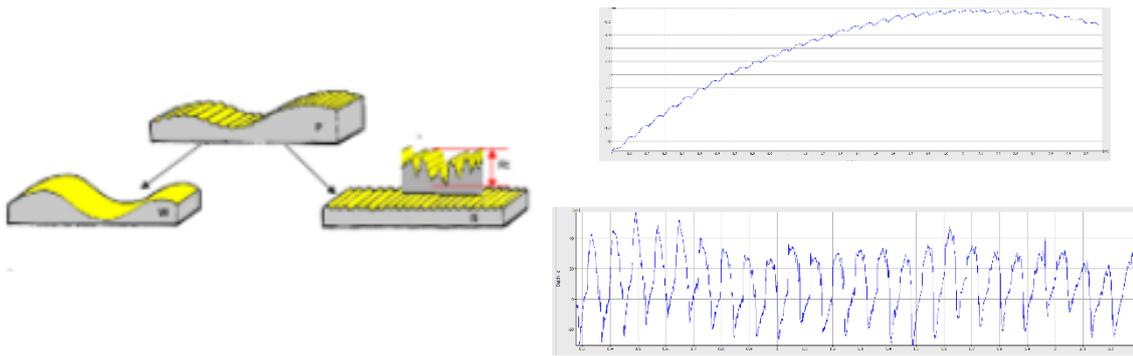


Fig. 5.1. Perfil de rugosidad. Según la definición de rugosidad, el perfil primario obtenido habrá que filtrarlo de los errores de forma y de las ondulaciones aparecidas en el proceso productivo.

La medición de este perfil de rugosidad puede arrojar diferentes parámetros, siendo los más empleados la desviación aritmética media del perfil (R_a), la rugosidad media cuadrática (R_q) y la altura de las irregularidades en diez puntos (R_z). Evidentemente esa medición se realizará en una longitud de evaluación, dividida ésta en una longitud básica (longitud de onda de corte, λ_c). Las longitudes que aplicar, y por lo tanto medir, están recogidas en la norma ISO 4288.

Por otra parte, la medición de la rugosidad de un perfil se puede ampliar a la medición de la rugosidad en un área. En este caso, los parámetros R_a , R_q y R_z se convierten en S_a , S_q y S_z , respectivamente.

5.2. Microscopio óptico de variación focal

Como ya hemos introducido anteriormente, cualquier superficie, por pulida que ésta sea, presentará irregularidades que en la mayoría de los casos no seremos capaces, ni visualmente ni de forma exacta, de determinar su valor.

Habitualmente, se utiliza un rugosímetro para este tipo de mediciones. Se trata de un instrumento con un palpador que se desplaza linealmente sobre la superficie de la pieza a medir, siendo capaz de amplificar, filtrar y procesar, el perfil superficial que recorre, arrojando el valor numérico del parámetro de rugosidad deseado. En la medición de nuestras piezas con este tipo de aparato surgen principalmente dos problemas. El primero de ellos deriva de que la medición se realiza por contacto del palpador con la pieza, lo que puede afectar a la medición cuando se trata de piezas plásticas como es nuestro caso. En segundo lugar, es importante recalcar que el desplazamiento del cabezal de palpado es lineal sobre la superficie, lo cual imposibilita la medición de la mayoría de nuestras piezas al tratarse estas de superficies curvas, excepto la cuña.

Para hacer frente a estos problemas, haremos uso de un microscopio óptico de variación focal para la evaluación superficial de las muestras. Estudios realizados indican que las tecnologías de medición basadas en variación focal (FV) proveen un buen compromiso

entre la calidad de los resultados medidos, la versatilidad, la facilidad de medición y los tiempos utilizados [28, 29].

La variación focal (FV) utiliza una óptica con una profundidad de campo limitada y la combina con un proceso de escaneo vertical, obteniéndose de esta forma una secuencia de “imágenes verticales” (Fig. 5. 2). Así, para cada píxel de la imagen, correspondiente a una ubicación x, y del plano, se obtiene una medición del contraste local, al combinarse algorítmicamente información sobre el brillo que rodea al píxel y los píxeles oscuros.

El proceso se repite para el mismo píxel en todas las imágenes del registro vertical. Cuando se completan los cálculos, una serie de valores de contraste (conocido como curva de contraste) está disponible para cada ubicación x, y , abarcando todo el conjunto de imágenes verticales. Una vez esto, se utilizan algoritmos para determinar el valor del contraste máximo de cada curva y su localización en el eje z (vertical).

Por último, la información correspondiente al punto de contraste máximo de cada curva se utiliza para crear un mapa topográfico 3D, mientras que la información de color RGB asociada al punto de contraste máximo en cada ubicación se utiliza para generar un mapa de color de la misma superficie [30].

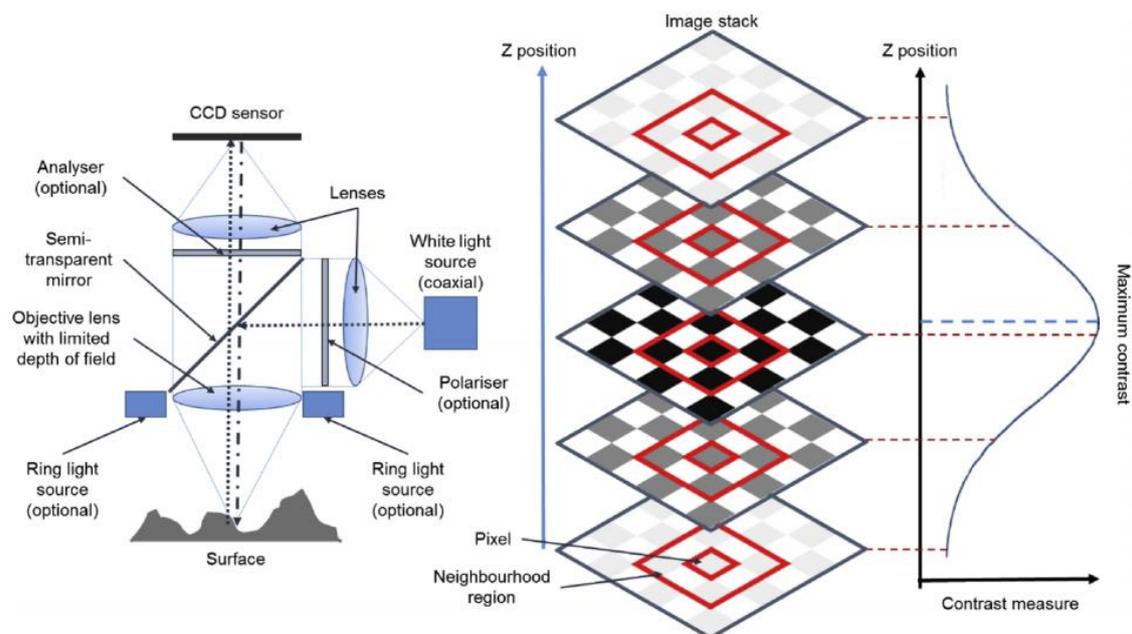


Fig. 5.2. Representación esquemática de la tecnología de variación focal. Izquierda: Elementos que conforman el sistema óptico. Centro: Captura de imágenes durante el escaneo vertical guardadas como una “pila o array vertical”. El cuadro rojo interior representa un píxel donde el contraste es analizado. El cuadrado rojo exterior representa los píxeles vecinos que son usados para calcular el contraste. Derecha: La curva de contraste asociada a cada píxel, obtenida por interpolación entre los valores de contraste del registro vertical.

5.3. Medición y resultados

Tal y como hemos introducido en el punto anterior, la medición de la rugosidad en la superficie de las muestras se va a realizar con un microscopio de variación focal (FV), concretamente con el microscopio Alicona Infinite Focus SL [31] del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Este dispone además de una lente de aumento (10x), lo que implica una distancia de trabajo de 17.5 mm y un área de medición de 4 mm² (2 mm tanto para eje X como para el eje Y), aunque un software específico permite ensamblar varias áreas de trabajo aumentando de esta forma el área de medición.

Para las primeras dos piezas a medir, la cuña y el arco extruido, hemos utilizado los parámetros de medición de rugosidad Ra, Rq, Rz, dado que la dirección principal de las estrías, la de la orientación del filamento, es idéntica entre las muestras de impresión plana y no-plana, por lo tanto, la evaluación de la superficie puede ser comparable.

Sin embargo, dada la complejidad geométrica de las superficies "PIVA" y paraboloide hiperbólico, no es evidente la existencia de una dirección preferente para evaluar la rugosidad. En este caso, es más razonable abordar el análisis de la calidad superficial de estas muestras mediante parámetros de rugosidad superficial (Sa, Sq, Sz) frente a los anteriores parámetros lineales.

Todos los resultados del proceso de medición, junto con los parámetros necesarios para reproducir el mismo, así como imágenes obtenidas del microscopio, están recogidos en el Anexo VI: Medición de la rugosidad. No obstante, parece adecuado exponer en la siguiente tabla un resumen de ellos para a continuación realizar un análisis de resultados.

CUÑA			
	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
FDM planar	42.2	49.5	188.5
FDM no-planar	9.0	11.8	59.4

CURVA EXTRUIDA			
	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
FDM planar	45.0	54.7	194.4
FDM no-planar	17.4	21.1	72.4

SUPERFICIE COMPLEJA "PIVA"			
	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]
FDM planar	51.8	66.0	1760.3
FDM no-planar (piel 45°)	32.5	42.1	668.4
FDM no-planar (piel 0°)	30.7	38.9	592.7

PARABOLOIDE HIPERBÓLICO			
	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]
FDM planar	48.6	58.6	506.1
FDM no-planar	13.7	17.6	255.9

Tabla 5.1.- Resumen de los resultados obtenidos en la medición de rugosidad.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que existe una mejora notable, en cuanto a calidad superficial se refiere, al realizar la impresión de las capas superficiales mediante el método no planar expuesto en este trabajo. Queda de este modo cuantificado la mejoría que habíamos advertido de forma visual.

No obstante, las cifras obtenidas no se pueden considerar exactas, sino más bien aproximadas ya que han sido detectados pequeños defectos en la medición como consecuencia generalmente de desperfectos en la superficie (pequeños hilos al hacer la contracción para moverse la boquilla, huecos como consecuencia de filamentos contiguos no cosidos unos con otros, pequeños pegotes de filamento, partículas de polvo) y de “zonas de sombra” que el microscopio no ha sido capaz de medir, quedando huecos en el escaneado de la superficie.

6 Conclusión y trabajo futuro

Es un hecho ampliamente investigado que la impresión FDM, tal y como la conocemos, crea escalonamientos que derivan en una pobre calidad superficial, máxime cuando se trata de superficies con pequeñas pendientes. Este trabajo describe una novedosa metodología que aplicada a la fabricación aditiva “FDM” nos permite mejorar la calidad superficial de las piezas impresas.

El fundamento es claro, ya que el FDM nos permite “poner lo que queramos justo donde lo queramos” dándonos, de tal forma, la posibilidad de desarrollar complejas estructuras internas y superficies con un alto grado de sofisticación. En base a esta filosofía, el presente trabajo propone un nuevo enfoque basado en una fabricación personalizada, donde el usuario forma parte en la definición de las trayectorias de herramienta y, por ende, en el proceso de orientación de las fibras, lejos de las calculadas mediante los algoritmos internos, generalmente desconocidos, que nos aportan los softwares laminadores comerciales.

Para la impresión de las piezas se ha utilizado una metodología híbrida, diferenciando en éstas una base o fase inferior, y una piel o fase superior. En la fabricación de la base se ha seguido un proceso de impresión FDM tradicional, capa a capa, a partir de un archivo *.STL y el procesado de éste con un software laminador comercial. Por otra parte, la impresión de la piel se ha llevado a cabo por un proceso FDM no-planar, donde la boquilla de impresión recorre complejas trayectorias 3D, totalmente definidas por el usuario.

En el diseño de las trayectorias no-planas, anteriormente descritas, se ha utilizado Grasshopper®, una de las más populares y avanzadas herramientas de modelado algorítmico. De esta forma, han sido estudiados y puestos en práctica, nuevos términos como el *Visual Scripting* y el Diseño Asistido por Algoritmos (AAD). Varios aspectos físicos e importantes fórmulas matemáticas que los modelan, relativos a la impresión no plana, y que han sido extraídos de artículos científicos dedicados al ámbito de la fabricación aditiva han sido embebidos en los algoritmos.

En una parte más experimental del trabajo, y aplicando la metodología anteriormente expuesta, cuatro piezas con superficies con un grado creciente de complejidad han sido impresas. En la última de ellas, debido a la geometría de la superficie y del *nozzle*, este último provocaba colisiones y arrastres de material en la pieza impresa. Para evitar esto,

se ha introducido en la fabricación de esta pieza el uso de un nuevo *nozzle*, con una forma característica para este tipo de impresiones no planas.

Por último, mediante un microscopio óptico de variación focal se ha medido y comparado la rugosidad superficial de las piezas impresas por ambos métodos, planar y no-planar. Los resultados de la medición demuestran de una forma inequívoca las ventajas de la impresión no planar en la mejora de la calidad superficial de las piezas obtenidas.

Por otra parte, este trabajo abre paso a futuras vías de investigación. Al definir dos fases en la pieza impresa, la composición de la base podría ser de material hidrosoluble. De tal forma, podríamos obtener por separado la superficie con una geometría compleja impresa no planarmente, sirviendo esta de piel o capa exterior.

Siguiendo este modo de trabajo, se pueden obtener pieles compuestas de varias capas, cada una de ellas con un material y orientación de las fibras bien diferenciada, asemejándose el material obtenido a un composite.

Trabajo futuro puede ir encaminado a implementar el método utilizado en otro tipo de impresoras, con *hardware* y *software* más actualizado que el utilizado en la Witbox 1. De esta forma, mejorará la calidad superficial de las piezas impresas y se obtendrá una rugosidad más uniforme en toda la pieza.

En cuanto al desarrollo de trayectorias de herramienta a través de *Visual Scripting* queda mucho trabajo de investigación y mejora que hacer. Optimización de trayectorias, aplicación de comportamientos físico-mecánicos del material al extruirse, microgeometría en la disposición de dos fibras anexas ya depositadas, etc.

Como ya hemos citado, en este trabajo se ha pretendido utilizar una impresora 3D “convencional” de uso habitual, siendo conocedores que esto tenía limitaciones en la obtención de superficies mediante un método no plano. Evidentemente, este trabajo se puede desarrollar utilizando brazos robóticos o impresoras con mesa y/o cabezal orientable, de tal forma que la punta de la boquilla sea tangente en todo momento a la superficie de la pieza durante el proceso de deposición de material. He aquí un importante trabajo futuro.

Referencias

- [1] AHLERS, D.; WASSERFALL, F.; HENDRICH, N.; ZHANG, JIANWEI.: 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation. *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.
- [2] CHUA, C. K.; LEONG, K. F.: 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping Fourth Edition. *World Scientific Publishing Company* (2014), ISBN: 978-981-4571-41-8
- [3] MERKLEIN, M.; JUNKER, D.; SCHAUB, A.; NEUBAUER, F.: Hybrid additive manufacturing technologies – An analysis regarding potentials and applications. *Physics Procedia* 83 (2016) 549-559
- [4] DMG MORI.: LaserTec 65 Additive Manufacturing- Additive manufacturing for exceptional finished part quality. *DMG MORI Journal*, No.1 (2014)
- [5] WOHLERS, T.: *Wohlers Report 2019: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry* (2019), ISBN: 978-0-9913332-5-7
- [6] REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B.: The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications. *3D Hubs B.V.* (2017), ISBN: 978-90-827485-0-5
- [7] JIN, Y.; LI, H.; HEA, Y.; FUA, J.: Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling. *Additive Manufacturing* 8 (2015) 142-148
- [8] SYCHOV, M. M.; LEBEDEV, L. A.; DYACHENKO, S. V.; NEFEDOVA, L. A.: Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology. *Carta Astronautica* 150 (2018) 81-84
- [9] Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures (2017). Disponible <https://ultimaker.com/es/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed>
- [10] MOHD PU'ADA, N. A. S.; ABDUL HAQ, R. H.; MOHD NOH, H.; ABDULLAH, H.Z.; IDRIS, M. I.; LEE, T.C.: Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications. *Materials Today: Proceeding*. Volume 29, Part 1 (2020) 228-232

- [11] GOH, G. D.; AGARWALA, S.; GOH, G. L.; DIKSHIT, V.; SING, S. L.; YEONG, W. Y.: Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology* 63 (2017) 140-151
- [12] YAO, T.; YE, J.; DENG, Z.; ZHANG, K.; MA, Y.; OUYANG, H.: Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering*. Volume 188 (2020) 107894
- [13] DEV, S.; SRIVASTAVA, R.: Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceeding*. Volume 26, Part 2 (2020) 1995-1999
- [14] FANG, G.; ZHANG, T.; ZHONG, S.; CHEN, X.; ZHONG, Z.; WANG, C. C. L.: Reinforced FDM: Multi-Axis Filament Alignment with Controlled Anisotropic Strength. *ACM TRANS. GRAPH.* 39, 6, Article 204 (2020), 15 pages.
<https://doi.org/10.1145/3414685.3417834>
- [15] KRAKEN: ¿por qué esta máquina puede revolucionar la industria? (2020). Disponible <https://www.3dnatives.com/es/kraken-por-que-puede-revolucionar-la-industria-040320202/>
- [16] TEDESCHI, A.: AAD_Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using Grasshopper®. *Le Penseur Publisher* (2018), ISBN: 978-88-95315-30-0. (*Todas las figuras de este capítulo, así como algunas ideas y textos, han sido extraídas de este libro*).
- [17] BUCCI, F.; MULLAZZANI, M.: Luigi Moretti opere e scritti. *Milano: Electa* (2006) 204-208
- [18] DOLENC, A.; MÄKELÄ, I.: Slicing procedures for layered manufacturing techniques. *Computer-Aided Design*. Volume 26, no.2 (1994)
- [19] WASSERFALL, F.; HENDRICH, N.; ZHANG, J.: Adaptive Slicing for the FDM Process Revisited. *2017 IEEE 13th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.
- [20] CHAKRABORTY, D.; ANEESH REDDY, B.; ROY CHOUDHURY, A.: Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling. *Computer-Aided Design*. 40 (2008) 235-243
- [21] JIN, Y.; DU, J.; HE, Y.; FU, G.: Modeling and process planning for curved layer fused deposition. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 91 (2017) 273-285
- [22] MICALI, M. K.; DORNFELD, D.: Fully three-dimensional toolpath generation for point-based additive manufacturing systems. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceeding of the 27th Annual International*.
- [23] PELZER, L.; HOPMANN, C.: Additive manufacturing of non-planar layers with variable layer height. *Additive Manufacturing* 37 (2021) 101697

- [24] GARCÍA CUEVAS, D.; PUGLIESE, G.: ADVANCED 3D PRINTING With Grasshopper®. Clay and FDM. *Independently published* (2020) 65-71, ISBN: 9798635379011
- [25] ¿Cómo calcular el parámetro E? Disponible:
<https://3dprinting.stackexchange.com/questions/10171/how-is-e-value-calculated-in-slic3r>
- [26] NONPLANAR.XYZ; Sitio Web para la compra de boquillas adaptadas a la impresión no planar. Disponible <https://www.nonplanar.xyz/>
- [27] Proyecto Educativo Descartes. Sitio Web donde se define la superficie denominada “PIVA” a través de sus ecuaciones paramétricas. Disponible https://proyectodescartes.org/uudd/materiales_didacticos/superficies-curiosas-2_JS/onduladas.html
- [28] TOWNSEND, A.; SENIN, N.; BLUNT, L.; LEACH, R. K.; TAYLOR, J. S.: Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precis. Eng.* 46 (2016) 34–47
- [29] DANZL, R.; HELMLI, F.; SCHERER, S.: Focus variation—a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. *Stroj. Vestnik/J. Mech. Eng.* 57 (2011) 245–256
- [30] NEWTON, L.; SENIN, N.; GOMEZ, C.; DANZL, R.; HELMLI, F.; BLUNT, L.; LEACH, R.: Areal topography measurement of metal additive surfaces using focus variation microscopy. *Additive Manufacturing* 25 (2019) 365-389
- [31] Alicona Infinite Focus SL. Sitio Web del producto donde se puede acceder a las características técnicas del microscopio. Disponible:
<https://www.alicon.com/en/products/infinitefocussl/>