



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Desarrollo de un mango adaptado para personas
mayores mediante impresión 3D

Autor:

Herráez Arribas, Guillermo.

Tutor:

Mansilla Gallo, Alberto

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería,
Ingeniería Cartográfica, Geodesia y
Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería
de los Procesos de Fabricación

Valladolid, Junio de 2019.

Resumen

Mediante el presente Trabajo de Fin de Grado se pretende fabricar un mango de cuchillo adaptado para personas mayores con problemas articulares. Para ello se utilizará la técnica de impresión 3D, FFF, de la cual se hará un estudio previo para conocer sus bases y parámetros importantes a controlar.

Palabras clave

Impresión 3D

FDM

Ayuda Técnica

Cuartería

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos.....	5
2. Estado del arte.....	6
2.1. Historia.....	6
2.2. Impresión 3d y técnicas de fabricación aditiva.....	7
3. Técnicas de fabricación aditiva.....	10
3.1. SLA.....	10
3.2. SLS.....	11
4. Técnica FDM/FFF.....	12
4.1. Técnica FDM.....	12
4.2. Parámetros importantes.....	15
4.2.1. Altura de capa.....	15
4.2.2. Temperatura de extrusión.....	16
4.2.3. Velocidad de impresión.....	18
4.2.4. Orientación de la impresión.....	19
4.2.5. Densidad y patrón de relleno.....	22
4.3. Problemas a solucionar.....	24
4.3.1. Warping.....	24
4.3.2. Precisión dimensional.....	25
4.3.3. Adhesión en impresión multimaterial.....	38
4.4. Calibración.....	42
5. Tipos impresoras y software.....	43
5.1. Impresora utilizada.....	43
5.2. Software utilizado (Cura).....	45
6. Materiales.....	47
6.1. PLA.....	47
6.2. ABS.....	48

6.3. PLA.....	49
6.4. PETG.....	51
7. Aplicación.....	52
7.1. Estudio de Benchmarking.....	52
7.2. Definición de producto.....	54
7.3. Fabricación.....	58
7.4. Conclusiones y líneas futuras.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	62

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

EL objetivo de este trabajo de fin de grado es la fabricación, mediante la técnica FDM de impresión 3D, de un mango auxiliar de cuchillo para facilitar la función a personas con dificultades o discapacidades.

Dentro de este objetivo se incluyen otros necesariamente previos como son:

- Presentación de la impresión 3D y sus variantes.
- Explicación de la técnica de FDM, junto con sus parámetros más importantes e influyentes a la hora de conseguir una calidad óptima en las piezas impresas.
- Principales problemas de esta técnica y formas de corregirlos.
- Presentación de los materiales más utilizados en impresión 3D y formas de elegir el más adecuado para cada función concreta.

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. Historia. [1][2]

Lo primero que debemos saber, o al menos tener una idea para poder empezar, es qué es la impresión 3D, ya que es un término muy amplio, que engloba muchos conceptos, tecnologías y pese a estar muy extendido en nuestra sociedad actual, puede que algunas nociones sean difusas o incorrectas.

La impresión 3D es, por tanto, un grupo de tecnologías de fabricación que, partiendo de un archivo digital, permite manejar unos materiales y darles la forma deseada para construir un objeto en tres dimensiones. Más adelante veremos cuáles son estas tecnologías, archivos digitales y materiales necesarios.

Este gran concepto se remonta al siglo XX, cuando en 1976 Charles Hull inventa la estereolitografía (SLA) proceso mediante el cual, capa por capa, un láser de rayos ultravioleta provoca que cadenas de moléculas se unan formando polímeros.

Surge como un nuevo método de fabricación aditiva debido a la demanda de un procedimiento de prototipado rápido y económico.

Años más tarde, en 1980 aparece la primera patente relacionada con esta tecnología, que fue presentada por el Dr. Hideo Kodama que describía un sistema de “prototipado rápido de fotopolímeros”, pero nunca va más allá.

En 1987 Carl Deckard da con una nueva forma de impresión 3D, la técnica de sinterizado selectivo por láser, SLS, mediante la cual, se convierte el polvo suelto en un sólido mediante el uso de un láser para unirlo y solidificarlo.

Pero no es hasta 1989 cuando Scott Crump, inventa y patenta el método llamado “Fused Deposition Modeling” FDM, o Modelado por Deposición Fundida. Podríamos decir que fue un descubrimiento por casualidad, ya que la idea llegó cuando intentaba crear un juguete para su hija usando una pistola de pegamento, y pensó una manera de automatizar el proceso mediante la creación de una serie de capas delgadas, apiladas una encima de otra. Esta técnica se ha convertido en la técnica aditiva más utilizada por sus grandes ventajas.

A partir de aquí, las evoluciones han sido gigantescas, patentes, nuevos tipos de impresoras, su uso en medicina para crear órganos funcionales, impresoras con capacidad de autoreplicarse... hasta el punto en el que nos encontramos actualmente, donde la impresión 3D es tan popular y utilizada, que cualquier usuario puede acceder a ella.

2.2. Impresión 3D y técnicas de fabricación aditiva.

En este capítulo vamos a adentrarnos en la impresión 3D, para conseguir comprender qué es realmente, sus aplicaciones, ventajas e inconvenientes, así como sus diferentes tipos.

En primer lugar, empezaremos con una definición general.

La impresión 3D es un proceso mediante el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital. Actualmente, también se conoce como manufactura aditiva, ya que a diferencia de los medios substractivos tradicionales, la impresión 3D no remueve el material, sino que lo adiciona.

El proceso comienza de forma digital, diseñando la pieza que queremos fabricar. Esto se suele hacer a través de diversos softwares de diseño por ordenador. También existen otros modos, como por ejemplo, a través de imágenes tomadas por cámaras a la pieza en cuestión, lo cual nos permitirá a través de una digitalización obtener el modelo CAD de la pieza.

Una vez que tenemos este archivo, el siguiente paso es convertirlo a un formato que nos permita trabajar con él para su posterior impresión. Esto es, necesitamos crear un archivo con formato STL, que es el único que reconocen los softwares de laminación 3D o “slicers”. Es a partir de aquí cuando podemos empezar a hablar de impresión 3D. Con estos programas podemos modificar y personalizar un gran número de parámetros y configuraciones para la impresión de la pieza. El programa que hemos utilizado, es el Ultimaker Cura 3.6.0. el cual veremos más en detalle más adelante, así como los parámetros más influyentes y representativos para conseguir un buen resultado en nuestra pieza.

Una vez que hemos ajustado todos los detalles, lo que hace este tipo de software es crear un archivo de lectura, un código, que es lo que más tarde se proporciona a la impresora para que sea capaz de llevar a cabo la impresión de nuestra pieza. Este es un archivo con extensión .gcode, que se encarga de dar órdenes de movimientos a los cabezales de la impresora y a los motores que se encargan de proporcionar el material. También lo veremos más detallado.

Una vez que se proporciona el fichero gcode a la impresora, esta realiza la impresión de nuestra pieza y ahí termina el proceso. Aunque en numerosas ocasiones, se llevan a cabo procesos para mejorar la calidad superficial de la pieza obtenida o pinturas, etc.

Las aplicaciones de la impresión 3D son muy numerosas, desde sencillos diseños decorativos o lúdicos, hasta complicadas construcciones y delicadas aplicadas en medicina.

Pero sin duda, la mayor aplicación es por la que se empezó a usar en sus orígenes, el prototipado rápido. Es muy útil cuando se trata de hacer bocetos o prototipos con una

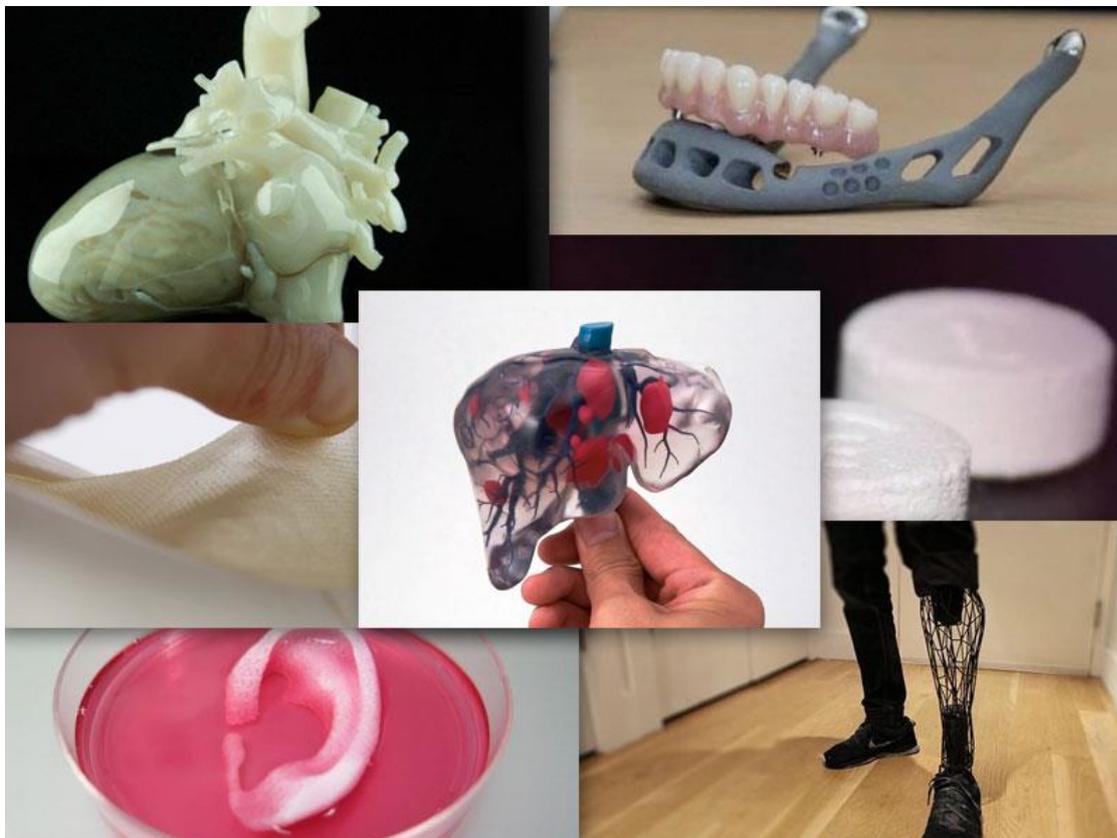
gran precisión y rapidez, y a un coste muy inferior al que supondría hacerlo de forma tradicional.

Las ventajas que ofrece el proceso de impresión 3D frente a otras formas de fabricación son muy numerosas, pero las más destacadas son las siguientes.

En primer lugar, supone una revolución en el mundo de la manufactura, una nueva forma de fabricar objetos que hasta ahora no se concebía. Esto incluye un nuevo sector de industria, nuevas formas de trabajo y formas de adaptación a trabajos futuros.

Pero sin duda, su punto fuerte es la posibilidad de fabricar prototipados rápidos, objetos únicos y personalizados, y a un precio reducido, lo cual hasta ahora era inconcebible ya que los procesos de manufactura tradicionales, empiezan a ser rentables a partir de grandes lotes y cantidades de piezas fabricadas, y los prototipos iniciales son muy costosos. De este modo con la creación de piezas en plástico, se pueden obtener mucho más rápido y mucho más barato.

Y no solo en el mundo de la fabricación de piezas en serie, también tiene grandes aplicaciones en otros sectores como por ejemplo en la medicina. En este último sector las aplicaciones son gigantes, desde fabricación de huesos, dientes, prótesis... artificiales y totalmente funcionales, hasta creaciones tan complejas como orejas biónicas, impresión de células madre e incluso vasos sanguíneos.



Aplicaciones de impresión 3D en medicina [3]

Pese a todas estas ventajas, también cuenta con puntos débiles, como veremos a continuación. Como hemos comentado, con una impresora 3D se puede fabricar casi cualquier cosa que se imagine, desde pequeñas figuras decorativas hasta elementos funcionales de un automóvil, pero todavía la tecnología no está tan desarrollada como para sustituir a los procesos de fabricación modernos.

El tamaño de la pieza a imprimir está limitado por el tamaño de la impresora, no podemos imprimir piezas todo lo grandes que quisiéramos. Otro punto débil, es la dependencia de la utilización de plásticos, y todo lo que ello conlleva, la contaminación, los vapores nocivos de algunos de ellos al ser impresos y la limitada resistencia estructural para ciertas aplicaciones. Si bien es cierto, que en los últimos años se están empezando a desarrollar impresoras con cabezales adaptados y ultrarresistentes que son capaces de imprimir más allá de materiales plásticos, como aluminios u otro tipo de metales, pero de momento, sigue en vías de desarrollo y es complicado para el usuario medio y muy costoso.

Otro de los grandes problemas que se plantea, viene del lado ético, ya que si cualquier persona con acceso a impresión 3D puede crear y fabricar lo que desee, se podría entrar en conflicto con derechos de autor, propiedad intelectual, etc.

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA.

Como hemos ya visto en el capítulo anterior, existen diversos tipos de fabricación aditiva. En este capítulo desarrollaremos en detalle las más importantes.

3.1. SLA (estereolitografía) [4][5]

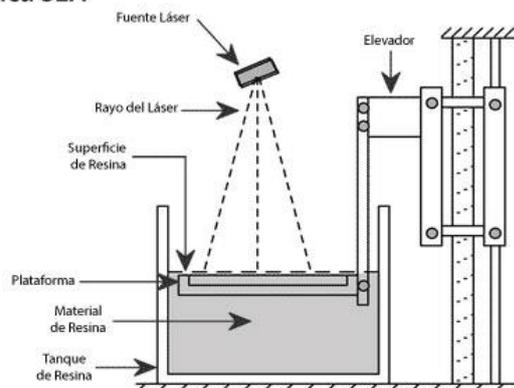
La estereolitografía también conocida como fabricación óptica o de foto solidificación, es una de las variantes de la impresión 3D, de hecho se considera el origen de esta técnica y es muy utilizada para la fabricación de modelos, prototipos o piezas definitivas.

Se trata de un proceso de fabricación por adición que utiliza el principio de fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensible a los rayos UV. Esto se solidifica mediante el paso de un láser capa por capa, dotando con esto de mayor calidad a los modelos hechos con esta tecnología. Los objetos son obtenidos mediante la adición de finas capas impresas unas encima de otras. La resina líquida utilizada y se solidifica debido a la exposición del láser ultravioleta.

Así se va formando la pieza deseada, y una vez terminada se sumerge en un baño químico que se encarga de retirar el exceso de resina y, posteriormente, se cura en un horno de luz ultravioleta.

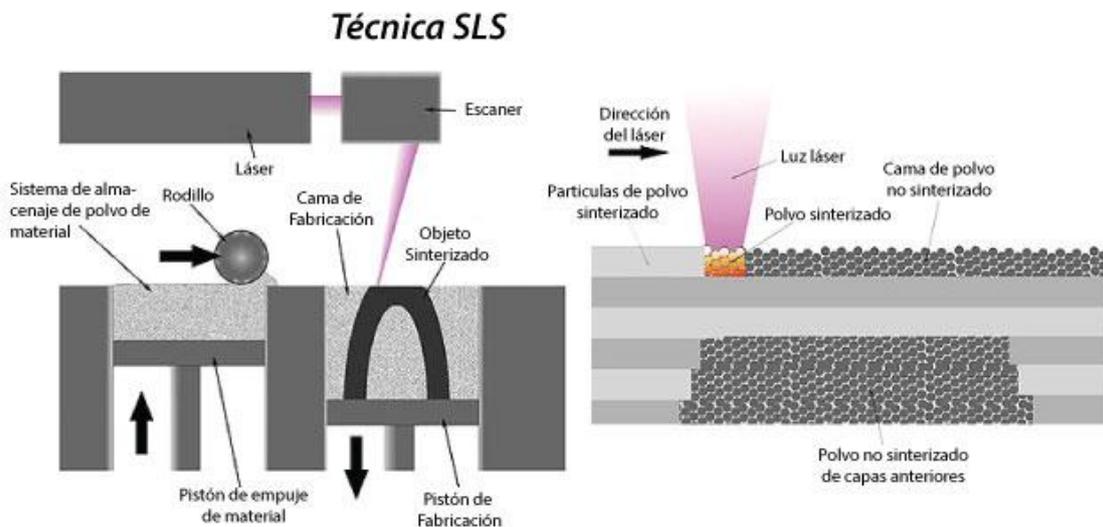
Una de las principales ventajas de este tipo de impresión es que las piezas obtenidas no son porosas (como en el caso de impresión SLS) por lo que no necesitan de un tratamiento posterior para hacerlas impermeables al agua o aire. Y su mayor inconveniente proviene de la característica de las resinas fotosensibles de curar con luz ultravioleta, ya que las propiedades de dureza y resistencia obtenidas del curado cambian a lo largo del tiempo, volviéndose las piezas cada vez más frágiles.

Técnica SLA



3.2. SLS [6]

Esta técnica consiste en la sinterización mediante láser óptico. En ella se tiene en una cubeta una capa de polvo que posteriormente el láser de CO2 fusiona y solidifica dando la forma deseada para la pieza final. Una vez que el láser ha dado la forma deseada al polvo, la cubeta desciende una distancia equivalente a la altura de la capa y una nueva capa de material base es añadida para darle forma de la misma manera. Una vez acabado este proceso y con la forma deseada, es necesario refrigerar la pieza antes de ser extraída.



Mediante esta técnica, aparte de plásticos como en la mayoría de impresión 3D, también permite trabajar con otros materiales como metal, cerámica o cristal.

La principal ventaja del sinterizado por láser respecto a otras tecnologías de impresión como FDM o SLA es que no necesita utilizar estructuras de soporte, ya que a medida que la pieza se va construyendo, está rodeada en todo momento por polvo sin sinterizar, por lo que no se forman “vacíos” o voladizos bajo las piezas impresas al actuar este como soporte.

4. TÉCNICA FDM / FFF.

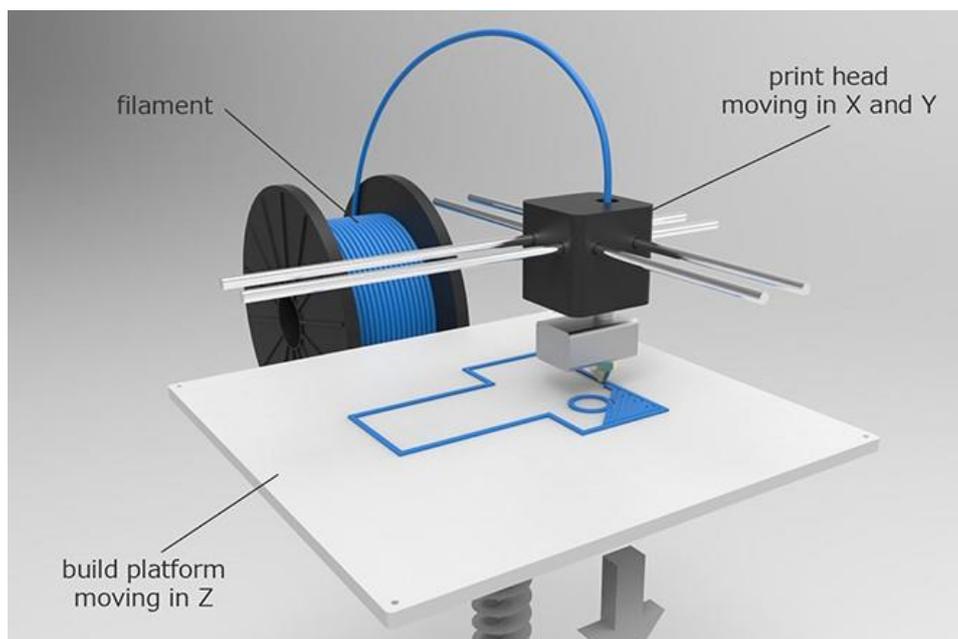
4.1. Técnica FDM [7]

La tecnología FDM o modelado por deposición fundida, es una variante más dentro de la impresión 3D. Esta consiste, en la adición de capas de material fundido para ir conformando la pieza.

Se basa principalmente en tres factores:

El plato o la base desde donde se empieza a conformar la pieza de abajo hacia arriba mediante la deposición de capas de material; la bobina de filamento que será el material de impresión, y el extrusor que se encarga de fundir el material y depositarlo en las coordenadas solicitadas.

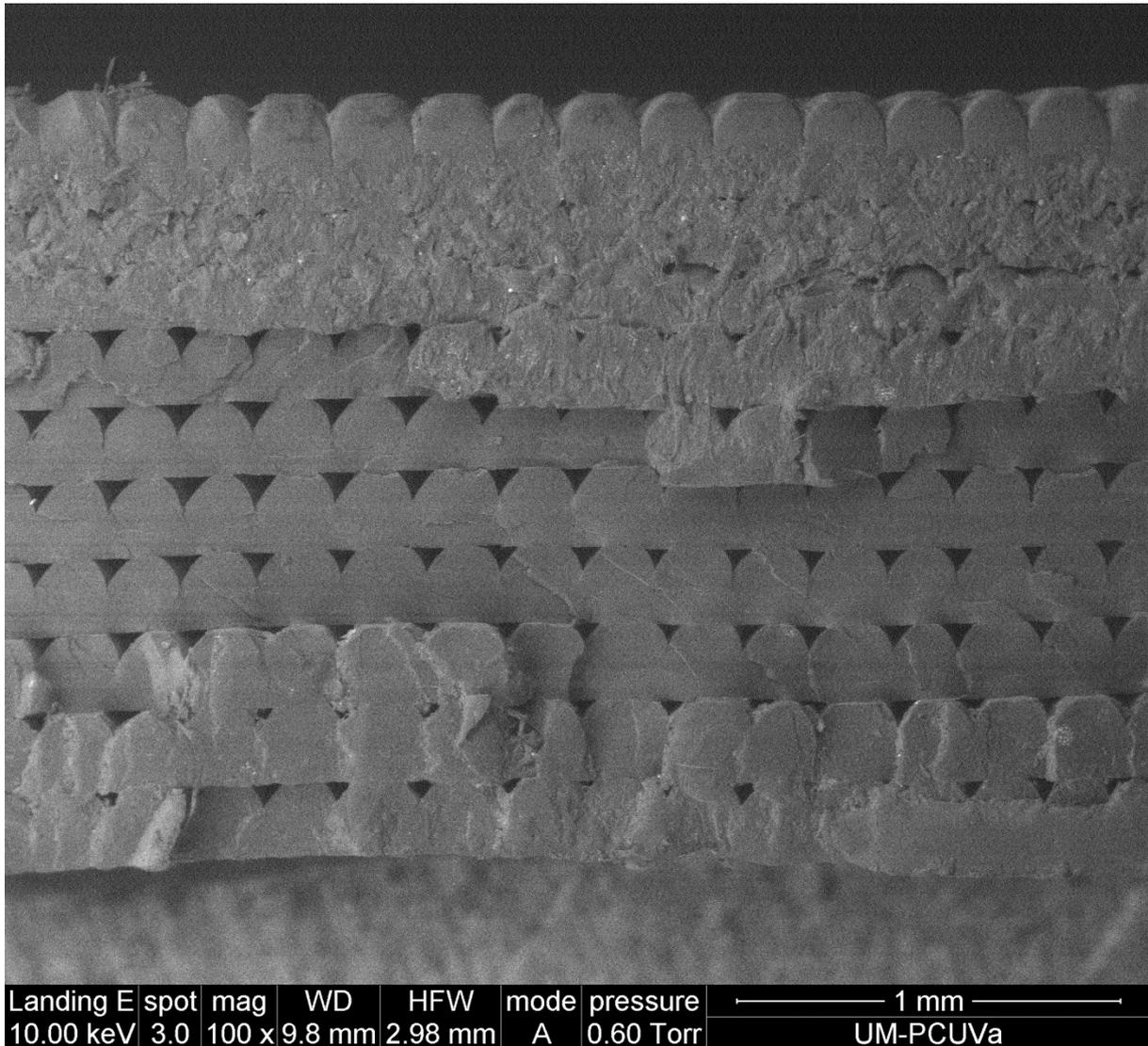
En la siguiente podemos ver estos elementos, y de forma intuitiva el funcionamiento de esta técnica de fabricación.



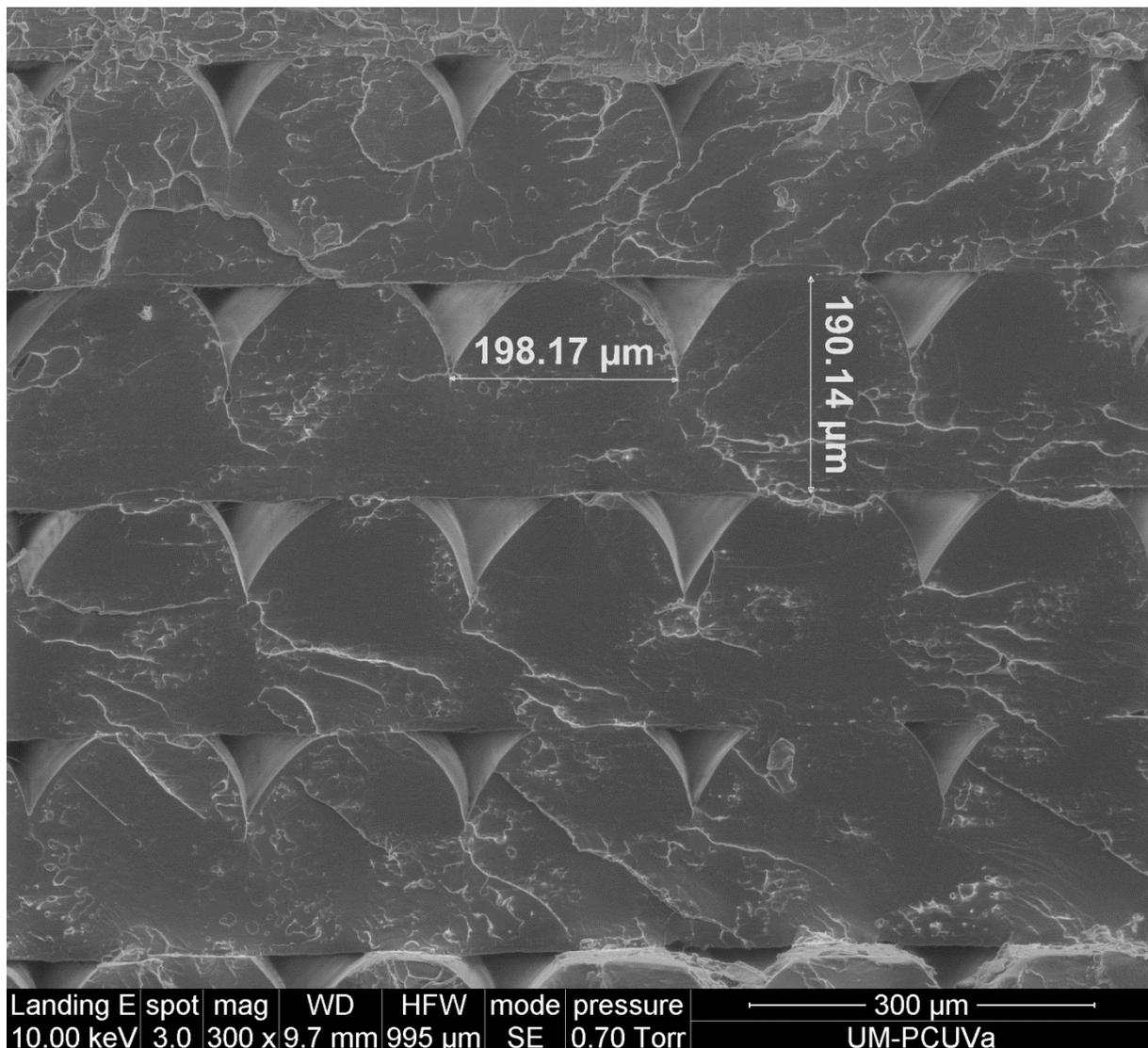
Una peculiaridad más del FDM, es la que presenta a la hora de fabricar piezas “huecas”, o con partes en voladizo. Esto es porque al ser necesario que el material sea depositado sobre una superficie, bien sea el plato para la primera capa, o el resto de material para las sucesivas, al encontrarse con formas de voladizo en una pieza, no podría imprimir “en el aire”. Es por esto que en muchas ocasiones es necesario el material de soporte, cuya única función es crear una estructura inferior donde depositar las capas de nuestra

pieza. Este material de soporte, no forma parte de la pieza final, y se retira una vez ha acabado la impresión.

Como ya hemos dicho, esta técnica se basa en ir creando la pieza a base de capas unas sobre otras. Para entender cómo funcionan estas capas y las líneas de material de extrusión se realizó el experimento de crear una probeta con un relleno del 100% de material, y a continuación seccionarla y analizarla mediante una micrografía electrónica, que vemos en la siguiente imagen.



Lo que nos muestra, es las diferentes capas en el eje Z, unas sobre otras, y la sección de las fibras de material impreso que como veremos más adelante aparecen deformadas en el plano XY. En la parte central de la imagen, donde la rotura es más limpia, se aprecia muy claramente la disposición de las líneas de impresión, su unión en las zonas inferiores por la presión que ejerce el extrusor durante su deposición, y las zonas de vacío de material en las esquinas superiores.



También es posible realizar mediciones mediante esta micrografía, y analizar el tamaño de las fibras de material para compararlo con lo que previamente se había programado en el software de laminación y así entender de donde pueden provenir algunos fallos en precisión dimensional etc.

En este caso, el tamaño que estaba prefijado era 0.2mm tanto en alto como en ancho, pero como vemos en la imagen con una precisión de $10^{-6}m$, el error cometido en la dirección vertical es de 0.01mm es decir, 10 micras; y en la dirección horizontal, la diferencia con respecto al valor nominal es de sólo 2 micras, 0.002mm.

Otro dato muy interesante que se puede apreciar, es la forma en la que se une el material de la misma capa, y de las diferentes capas entre sí. Parece fácil observar, que dentro de una misma capa, las líneas que están colindantes, parecen fundidas unas contra otras y formando parte del mismo sólido. Sin embargo, se aprecia una mayor diferencia a las uniones entre diferentes capas, donde se observa como parecen estar separadas por planos horizontales. Esto, como veremos más adelante, nos explica las propiedades mecánicas y resistencias a esfuerzos de la técnica FDM.

4.2. Parámetros importantes.

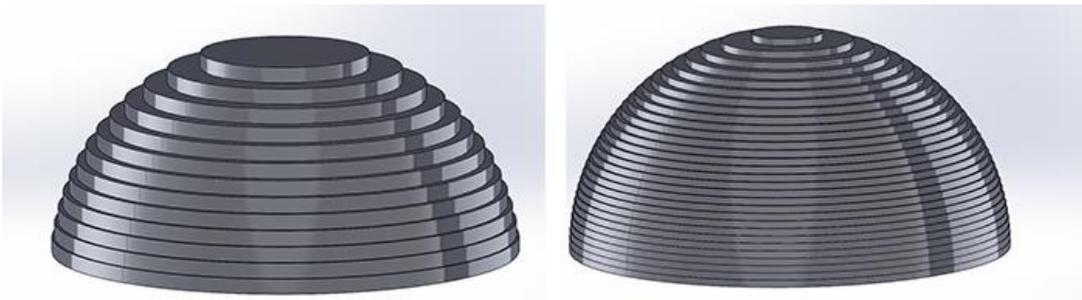
Como ya hemos visto, hay un gran número de variables que controlan todo el proceso, a continuación veremos los parámetros más influyentes a la hora de conseguir un buen resultado y controlar el proceso de nuestra impresión.

4.2.1. Altura de capa.

La altura de capa es uno de los parámetros más importantes en una impresión ya que de él dependen muchas situaciones posteriores como veremos a continuación. La altura de capa se define como la dimensión Z la capa que depositará el nozzle para ir creando la pieza.

El rango en el que se suele utilizar este parámetro está entre 0.05mm-0.5mm. Así dependiendo de la altura de capa y la altura de la pieza, habrá un determinado número de pasadas o capas para formar la pieza, lo cual influye directamente en el tiempo necesario de fabricación. Esto es, una pieza de 20mm con una altura de capa de 0.1mm tardará el doble en fabricarse que con una altura de capa de 0.2mm, ya que el tiempo de hacer cada capa es el mismo y tendrá que hacer el doble de capas.

Otra gran consecuencia de la altura de capa es el acabado final de la pieza, ya que si utilizamos alturas de capa más pequeñas, conseguiremos una mejor resolución en nuestra pieza.



Altura de capa [8]

4.2.2. Temperatura de extrusión.

Este parámetro se corresponde con la temperatura del extrusor en el punto de salida del material. Es un factor de gran importancia, ya que dependerá del tipo de material que estemos utilizando, y de su temperatura de fusión y de cristalización los cuales deberemos conocer previamente para trabajar con la temperatura adecuada para cada material. Por tanto, para cada material habrá un rango de unos 10-15°C en los que podremos imprimirlo, y en base a esto, la pieza final también se verá afectada ya que el efecto de la temperatura de extrusión tendrá consecuencias en la precisión dimensional de nuestra pieza, y en su dureza. Estos rangos de temperatura vendrán dados por el fabricante de cada material, pero es conveniente hacer una pequeña prueba para comprobar cuál es la que mejor se adapta a nuestras condiciones.

Como veremos en el siguiente apartado, la temperatura de extrusión está ligada con la velocidad de impresión, la cual es otro de los parámetros importantes del proceso.

Por último, como sub-apartado de la temperatura de extrusión, se puede encontrar la temperatura de extrusión de la primera capa, la cual, se suele aumentar en unos 5°C para mejorar la adhesión a la placa y así evitar errores comunes de despegue de las piezas.

Subir la temperatura	Bajar la temperatura
Adherencia entre capas (menor probabilidad de que se separen)	
Poca probabilidad de atasco en extrusor (plástico más fluido)	
Posibilidad de alta velocidad de impresión (plástico más fluido)	
Poco peligro de carbonización del plástico (por exceso de temperatura)	
Calidad de voladizos y puentes (peor cuanto más fluido sea el plástico)	
Piezas sin "stringing" (ver imagen adjunta, también debido a fluidez del plástico)	

Temperatura de impresión [9]

En la tabla adjunta podemos ver los principales efectos de imprimir a temperaturas más altas o bajas de la nominal. Dependiendo de la funcionalidad que vaya a tener nuestra pieza podemos elegir subir o bajar ligeramente la temperatura óptima de impresión para conseguir alguno de estos efectos.

También es importante saber la zona de la impresión y tener en cuenta la velocidad para ello, ya que, por ejemplo, no es lo mismo imprimir una zona exterior y visible donde queremos tener un buen acabado y habrá que hacerlo a una velocidad baja, que el relleno interno de la pieza, donde podremos utilizar una velocidad más alta.

En la siguiente tabla también podemos ver unos consejos para optimizar las velocidades según la zona y conseguir una impresión óptima.

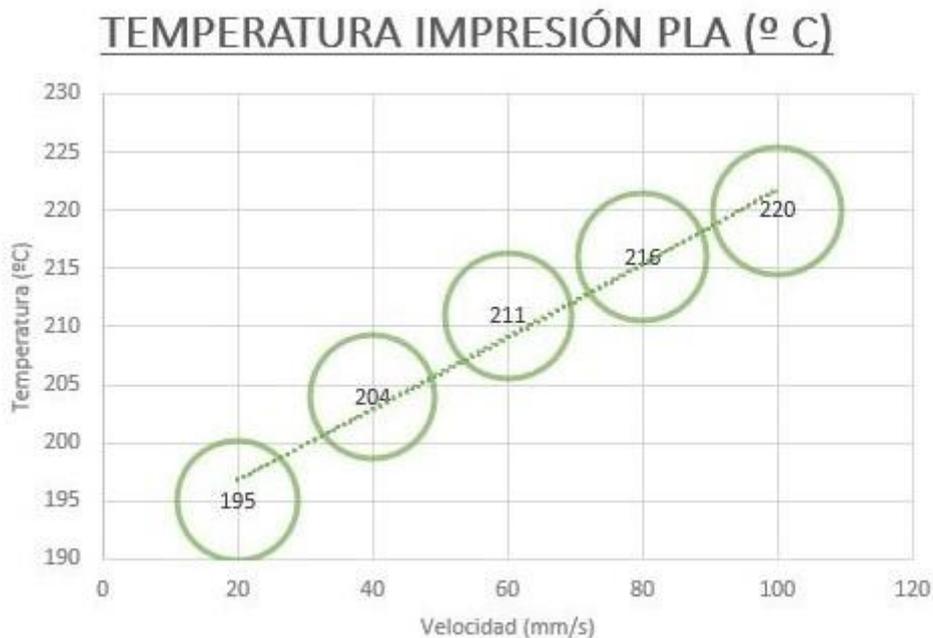
Zona	¿Velocidad?
Perímetros externos	Siempre muy lenta (15-20 mm/s)
Perímetros pequeños (agujeros...)	Siempre muy lenta (15-20 mm/s)
Perímetros internos	Podemos subir la velocidad, sin exagerar(<60mm/s)
Relleno interno	Aquí no hay problema en subir la velocidad al máximo que admita nuestra impresora sin atascarse el extrusor ni tener problemas mecánicos (60-120 mm/s)
Capa sólida superior (externa)	Siempre muy lenta (20-25 mm/s)
Capas sólidas no externas	Podemos subir la velocidad, sin exagerar (<50-60 mm/s)
Puentes	La velocidad debe ser media. Una muy lenta causará que el puente se caiga por su propio peso, y una más rápida puede ocasionar que no salga plástico de lado a lado completamente. (aprox. 50 mm/s)

4.2.3. Velocidad de impresión.

Como su nombre indica, esta variable controla la velocidad con la que el nozzle o extrusor se desplaza mientras va depositando material sobre la placa o sobre el resto de la pieza en el caso de capas superiores.

A su vez, existen variables análogas a esta pero con pequeñas variantes como pueden ser la velocidad del cabezal en vacío, es decir, a la que se mueve el extrusor para ir de un punto a otro mientras no está añadiendo material; la velocidad de impresión de la primera capa; velocidad de impresión de capas exteriores, la cual se suele hacer más lenta para mejorar el acabado de la pieza, etc.

Como hemos dicho anteriormente, está íntimamente ligada con el parámetro temperatura de impresión, ya que al extruir a temperaturas más altas, el material saldrá ligeramente más fundido y podremos aumentar así la velocidad. Normalmente, cada material viene definido con unos rangos de temperatura y velocidad de impresión por parte del fabricante para los cuales la impresión es óptima. A continuación podemos ver un ejemplo de la relación temperatura-velocidad para un material determinado.



Temperatura extrusión PLA [10]

4.2.4. Orientación de la impresión.

Antes de comenzar la impresión, es clave definir una buena orientación de la pieza en los tres ejes, ya que de ella van a depender el tiempo que tardará en formarse, la necesidad y/o cantidad de material de aporte, y la resistencia mecánica de la pieza, veamos con más detalle.

Una vez tenemos definida una pieza para imprimir y empezar a imprimir, debemos definir la forma en la que se va a colocar en la impresora y por donde se va a empezar a imprimir. Pongamos un ejemplo sencillo, queremos imprimir una pieza en forma de U, algo parecido a un puente, tenemos varias opciones:



Opción 1 (forma puente)



Opción 2 (forma U)

En la primera opción (forma puente) será necesario utilizar material de soporte bajo el voladizo para conseguir la impresión de las capas superiores, pero por el contrario, en la segunda opción, al tener la forma alargada sobre la base de la impresora y no tener zonas de impresión en voladizo, no se necesitará material de soporte, ahorrando así,

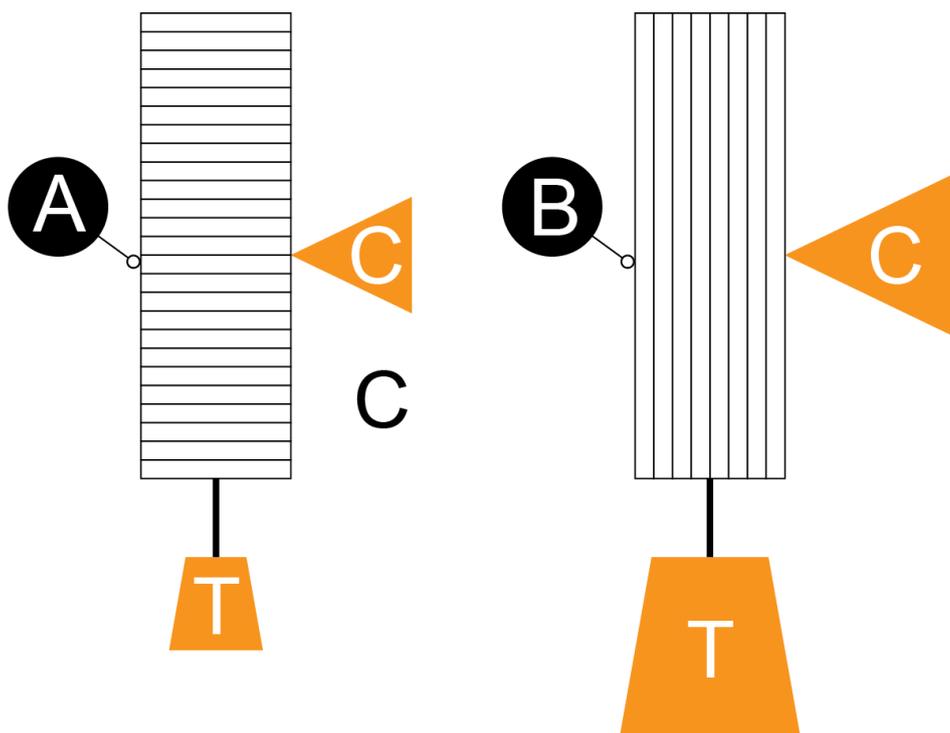
tiempo y material con la única modificación de una rotación de la pieza antes de ser impresa.

Este es un simple ejemplo didáctico, pero en la mayoría de las impresiones aunque no de forma tan clara, siempre se puede optimizar el proceso con una buena elección de la orientación.

Otro concepto muy importante en cuanto a la orientación, se basa en la dirección de impresión de las líneas de impresión que conforman la pieza, tanto en las capas de relleno como las exteriores de pared.

La gran ventaja que proporciona (o en caso contrario inconveniente) una buena elección, radica en la resistencia mecánica de la pieza y su capacidad a resistir esfuerzos y tensiones.

Para ello es muy importante saber en qué dirección va a trabajar dicha pieza. Veamos un ejemplo:



Orientación esfuerzos [11]

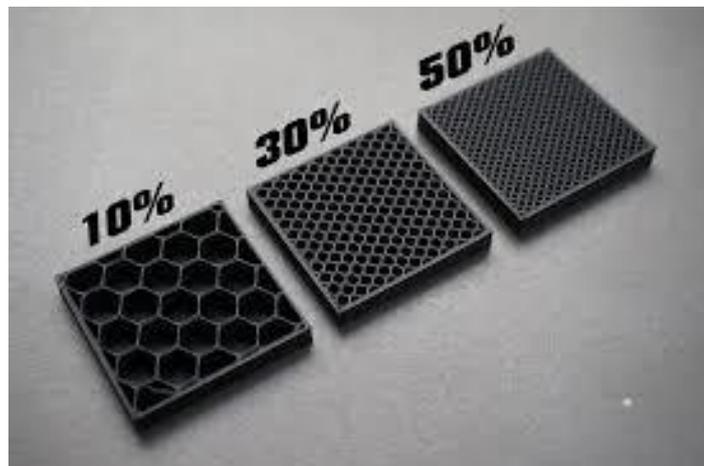
En la imagen podemos ver, como en función de, en qué dirección va a trabajar la pieza (vertical), y la dirección en la que las fibras han sido impresas (horizontal), será capaz de resistir unos esfuerzos mayores o menores, representados con las pesas pequeñas o

grandes. Como también se aprecia, la disposición idónea para elegir la orientación de la impresión es alineando las líneas de impresión con la dirección de los esfuerzos, ya que las uniones entre capas de la impresión son más débiles, y de esta forma la misma pieza, impresa en la dirección correcta, será capaz de resistir hasta el doble de cargas.

4.2.5. Densidad y patrón de relleno.

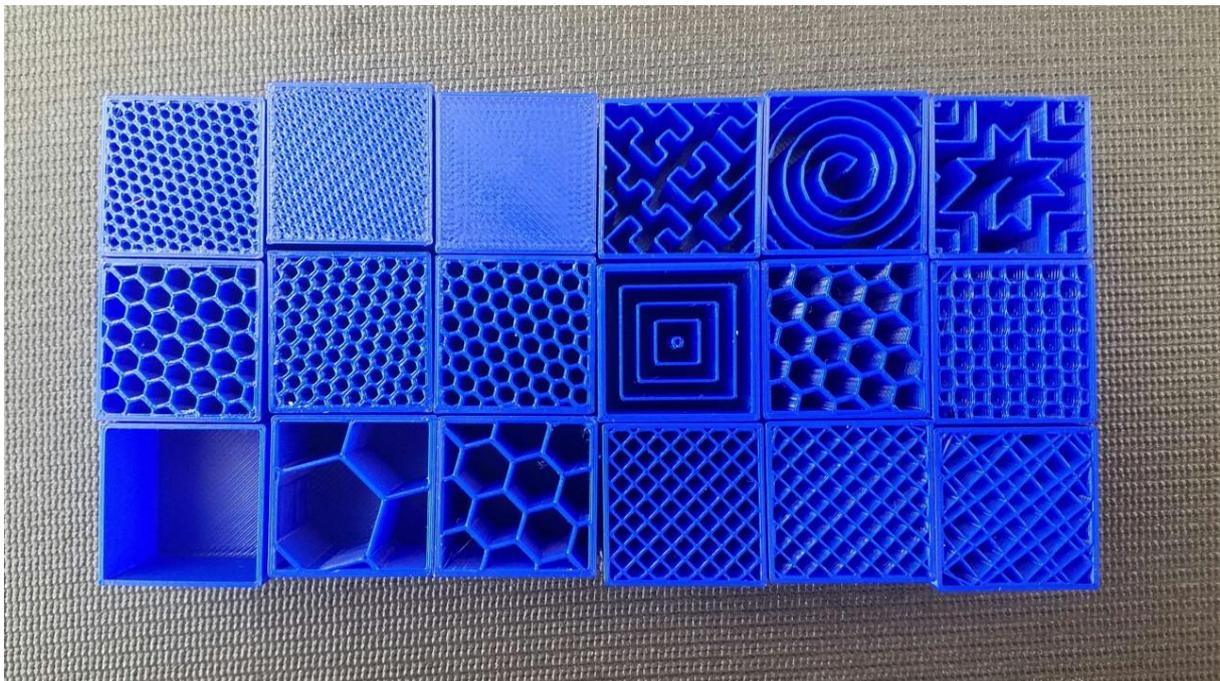
Como ya sabemos, la impresión FDM nos permite hacer piezas las cuales no son macizas pero tampoco huecas, por lo tanto ganamos en ligereza pero con una gran resistencia mecánica. Esta parte interior de la pieza es lo que llamamos relleno o infill. Dentro de este relleno, hay muchos parámetros que podemos elegir y controlar a la hora de diseñar y fabricar nuestra pieza, pero los más importantes son:

- la densidad de relleno, es decir la cantidad de material que va a existir en el interior de nuestra pieza, y se mide en %, siendo un 100% de relleno una pieza maciza, y un 0% una pieza hueca. Normalmente se usan valores de entorno al 20%, consiguiendo así tiempos de fabricación rápidos y sin comprometer la integridad estructural de la pieza, ya que su resistencia sigue siendo buena. Podremos así jugar con este parámetro en función del objetivo final de la pieza, y de nuestras preferencias. Por ejemplo si su cometido es ser un objeto simplemente decorativo bajaríamos la cantidad de relleno disminuyendo el tiempo de fabricación y el material utilizado y por tanto su coste de fabricación. Pero si por el contrario nuestra pieza va a tener una función estructural o que soportar algún tipo de esfuerzo o carga, podemos aumentar su densidad y así su capacidad para resistir ante las sollicitaciones deseadas. En la siguiente imagen podemos ver de una forma rápida e intuitiva lo expuesto anteriormente sobre la densidad de relleno.



Densidad de relleno [12]

- El patrón de relleno, esto es la forma de la estructura interior de la pieza. Es un parámetro clave a la hora de conseguir un buen diseño funcional y estructural para la pieza ya que dependiendo de uno u otro la misma pieza se comportará de forma muy diferente frente a las cargas y esfuerzos soportados y la aportará una rigidez y resistencia o por el contrario la hará más frágil y quebradiza. También cabe destacar que es un parámetro bastante especial, ya que puede depender del software utilizado, no todos los programas de laminado 3D tienen las mismas opciones, pero la mayoría de ellos son comunes, siendo los más frecuentes y utilizados: hexagonal o en panal de abeja, el cual se utiliza mucho ya que las piezas serán muy resistentes estructuralmente con respecto a los demás; cúbico; triangular; lineal; concéntrico; en zigzag...



Patrón de relleno [13]

4.3. Problemas a solucionar.

4.3.1. Warping.

El warping es uno de los problemas más comunes en las impresoras aditivas, y suele aparecer cuando se desea obtener piezas de mucha superficie plana. El origen del warping es la contracción del material (en este caso el ABS es más crítico que el PLA) que al enfriarse se contrae. En superficies planas y deposición de capa a capa lo que ocurre es que la contracción provoca que el material tire desde el centro y levante las esquinas, doblando ligeramente la superficie plana. La manera de corregirlo es añadirle material en la parte inferior de las esquinas (digamos que sería un símil a las mazarotas empleadas en otros procesos para corregir los rechupes) y así evitar que la contracción de la parte central levante las esquinas, que es donde hay menos material.

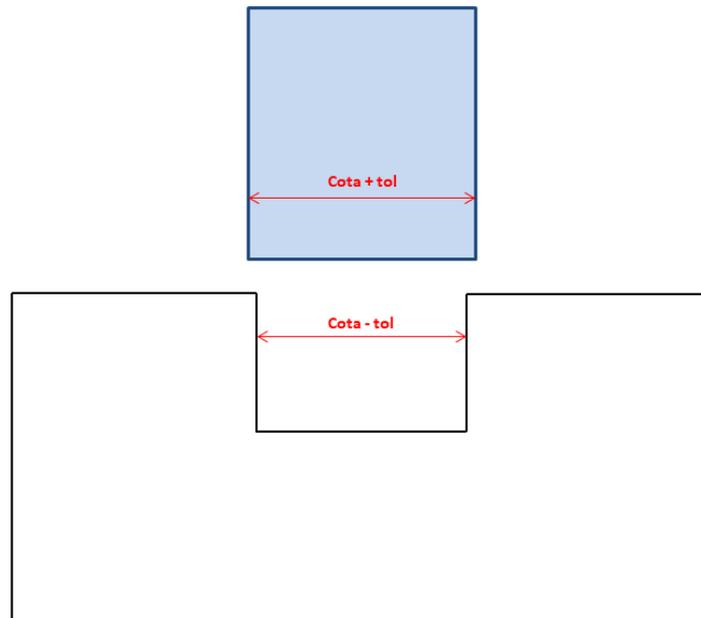
4.3.2. Precisión dimensional.

La precisión dimensional puede ser un gran problema capaz de arruinar nuestras impresiones en el caso que necesitemos hacer piezas muy precisas o cuando varias vayan a ir ensambladas entre sí, mediante ajustes finos.

En todas las impresiones, se presenta un error constante de dimensionamiento de las piezas en el plano horizontal XY, que en función del material será de entre 200 y 400 micras. Este error es independiente del tamaño de la pieza.

También hay que diferenciar entre medidas a planos exteriores o interiores, ya que el error cometido será constante pero contrario. Es decir, entre planos exteriores, el error cometido llevará a un sobredimensionamiento de nuestra pieza, mientras que entre planos interiores las cotas que teníamos en nuestro modelo CAD se verán reducidas.

Todo esto tiene una explicación que veremos a continuación y también el trabajo realizado para llegar a ella.



Expansion por aplastamiento

En esta imagen podemos ver una simplificación de la explicación de piezas con planos exteriores, interiores, sobredimensionamiento y rebaje. Se aprecia como para un ajuste

entre dos piezas (azul y blanca) los errores cometidos por las tolerancias de la impresión hacen imposible el montaje.

La pieza azul ha aumentado su cota horizontal entre superficies exteriores.

La pieza blanca, entre los planos interiores, ha disminuido su cota teórica.

Por esto es importante saber la tolerancia que nos aporta la impresión y en su caso, como corregirla.

Este problema de dimensionamiento tiene varias causas:

- **Tolerancias del motor paso a paso**

El motor paso a paso funciona a través de código Gcode, que es un lenguaje de programación que se encarga de dar las órdenes a la impresora y planificar sus movimientos.

En una impresora 3D, las pérdidas de pasos se traducen en una pieza incorrectamente fabricada, con capas desplazadas respecto al resto. El motor no puede detectar estos fallos de posicionamiento porque trabaja en bucle abierto, es decir no recibe retroalimentación de su posición y no puede corregirlo en caso de fallo.



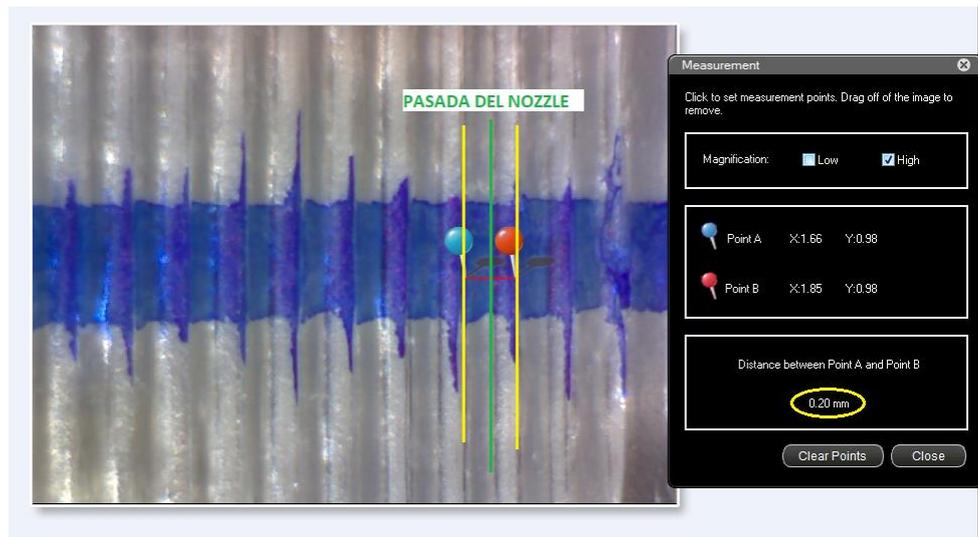
Fallo por motor paso a paso

Para calibrar los pasos por mm del motor existen manuales en las páginas de los fabricantes de cada impresora concreta.

Para programar el cambio de pasos por mm de dimensiones X Y Z y del extrusor E, se hace en una pestaña de Cura.

- Errores en el Gcode y parámetro de expansión horizontal.

La forma de funcionamiento del extrusor a partir del Gcode es la siguiente. El extrusor expulsa el material de forma simétrica hacia ambos lados, es decir, pone la mitad de la anchura de capa a cada lado (si la anchura de capa es 0.2 pone 0.1 a cada lado). (Ej: si la pieza tiene que llegar hasta la cota $y=20\text{mm}$ y la anchura de la capa es 0.2mm , el extrusor pasa por la cota $y=19.9\text{mm}$ rellenando de material desde la cota 19.8mm hasta 20mm)



El error dimensional no se debe a la trayectoria del extrusor ya que este se coloca de forma adecuada dependiendo de la anchura capa para que las dimensiones teóricas de la pieza sean las correctas.

Tampoco se debe al gcode, ya que tras comprobarlo, es correcto. A continuación podemos ver una imagen de cómo funciona el parámetro “expansión horizontal” a través del gcode.

```

;LAYER:1
M140 S80
M106 S2.6
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.11 Y122.11 Z0.4
M204 S500
M205 X5 Y5
;TYPE:SKIN
G1 F1500 X91.89 Y122.11 E46.03002
G1 X91.89 Y92.89 E46.21324
G1 X141.11 Y92.89 E46.52185
G1 X141.11 Y122.11 E46.70507
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.021 Y122.021
G1 F1500 X140.879 Y121.88 E46.70662
G0 F10227.3 X141.038 Y121.439
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 X140.438 Y122.039 E46.71194
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X140.155 Y122.039
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 X141.038 Y121.156 E46.71977
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.038 Y120.873
M204 S500
;LAYER:1
M140 S80
M106 S2.6
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.31 Y122.31 Z0.4
M204 S500
M205 X5 Y5
;TYPE:SKIN
G1 F1500 X91.69 Y122.31 E47.02868
G1 X91.69 Y92.69 E47.21441
G1 X141.31 Y92.69 E47.52553
G1 X141.31 Y122.31 E47.71126
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.162 Y122.163
G1 F1500 X141.021 Y122.021 E47.71385
G0 F10227.3 X141.238 Y121.521
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 X140.521 Y122.239 E47.72022
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X140.238 Y122.239
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 X141.238 Y121.239 E47.72908
M204 S2812
M205 X18 Y18
G0 F10227.3 X141.238 Y120.956
M204 S500

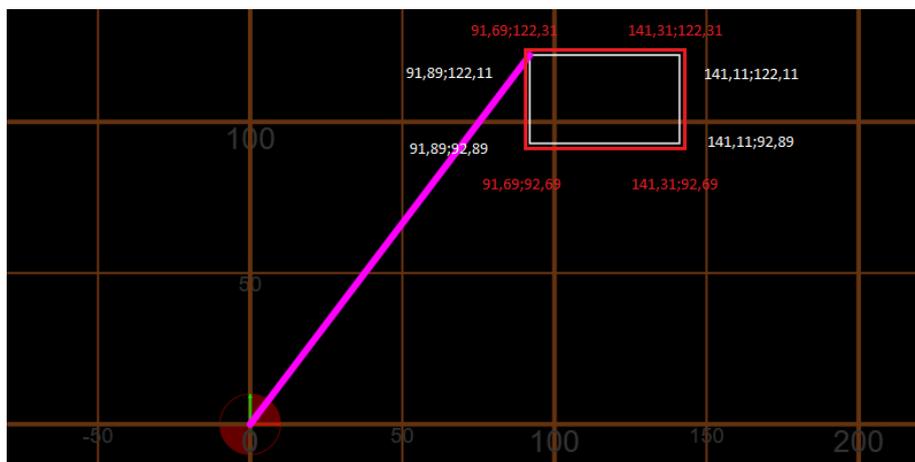
```

Como se puede observar, la parte de la izquierda, es el gcode de una pieza con una corrección de expansión horizontal de -0.2 y la parte de la derecha es la misma pieza pero sin corrección.

Se puede observar a simple vista, que el posicionamiento del cabezal de extrusión varía esos 0.2 mm programados para reducir las dimensiones de la pieza, colocándose así en posiciones más interiores y ajustando el tamaño final al deseado. Los valores de X e Y que aparecen en el gcode son los correspondientes a las coordenadas a las que debe llegar el extrusor, es decir, el punto de llegada, por tanto las cuatro primeras líneas de código corresponderán con las coordenadas de las cuatro esquinas exteriores, al tratarse de una probeta rectangular.

En la siguiente imagen se muestra una simulación del movimiento del cabezal extrusor mediante un visualizador de trayectorias del Gcode.

El programa lee el código como lo haría la impresora y dibuja las trayectorias, lo cual es muy útil para entender cómo funciona este código, los parámetros y comandos que sigue la impresora para trabajar como lo hace. Asimismo para detectar errores en Gcode, analizarlo y poder corregirlo en caso de dudas.



En esta imagen se puede ver la diferencia que existe al introducir el parámetro de corrección horizontal, el rectángulo blanco corresponde a las pasadas exteriores de la pieza con corrección, acompañado de las coordenadas de sus puntos extremos. En rojo se muestra como sería la misma pieza sin la corrección aplicada, junto con las cotas de sus puntos también en rojo.

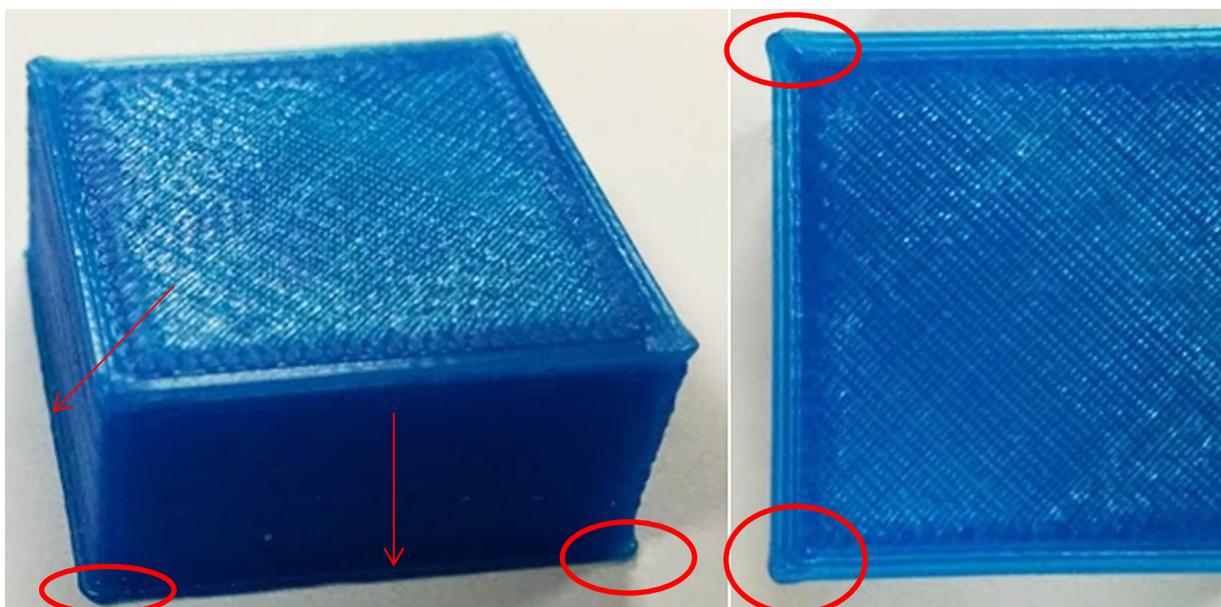
Este parámetro tiene una influencia en la pieza final con respecto a una pieza sin corrección, ya que al colocarse en posiciones más interiores y reducir el tamaño de la pieza, también reduce el número de pasadas de extrusión y por tanto la cantidad de material presente en dicha pieza.

- **Expansión por aplastamiento**

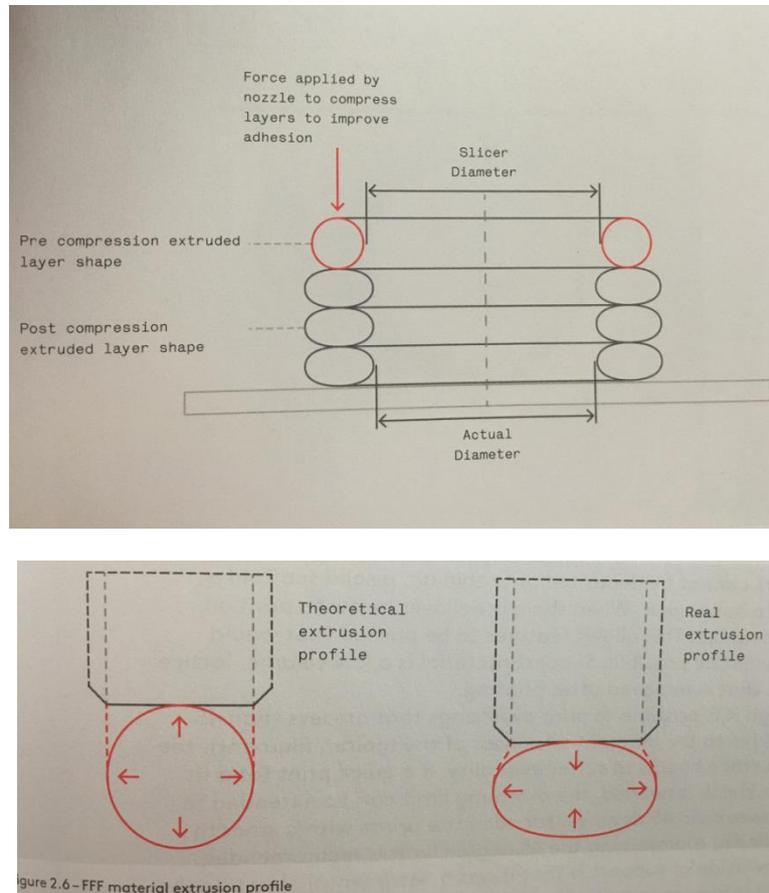
Al resto de causas que hemos visto, se le añade el aporte de la expansión de las líneas de impresión debidas al aplastamiento horizontal que sufren al ser impresas unas sobre otras. Esto añade un error de sobredimensionamiento (o rebaje entre superficies interiores) que afecta notablemente a la calidad dimensional de nuestra pieza. Este error será constante, es decir, independiente del tamaño de la pieza y variará en función del ancho/alto de cada línea de impresión, del tiempo que transcurra entre impresiones de capas ya que le afecta el tiempo de enfriado entre pasada y pasada.

Existe una forma de “controlar” esto y es definiendo la altura del extrusor respecto de la anterior capa, o de la placa si es la primera pasada. Esto es porque si el extrusor está a una distancia inferior al valor de la altura de capa, la línea de impresión no conseguirá la altura deseada y el material se verá obligado a expandirse hacia los lados, y en el caso contrario, si el extrusor está demasiado lejos podrían producirse problemas de adhesión del material entre capas, lo que suele ser un fallo muy común.

También es cierto, que para el caso de la primera capa y sobre todo en algunos materiales con problemas de adhesión, esta distancia se reduce bastante, provocando que el nozzle expulse el material muy cerca de la placa, ejerciendo una ligera presión para favorecer la adhesión. Esto provoca lo que se conoce como “pies de elefante” que consiste en que la primera capa se ve claramente más expandida en la dirección horizontal XY.

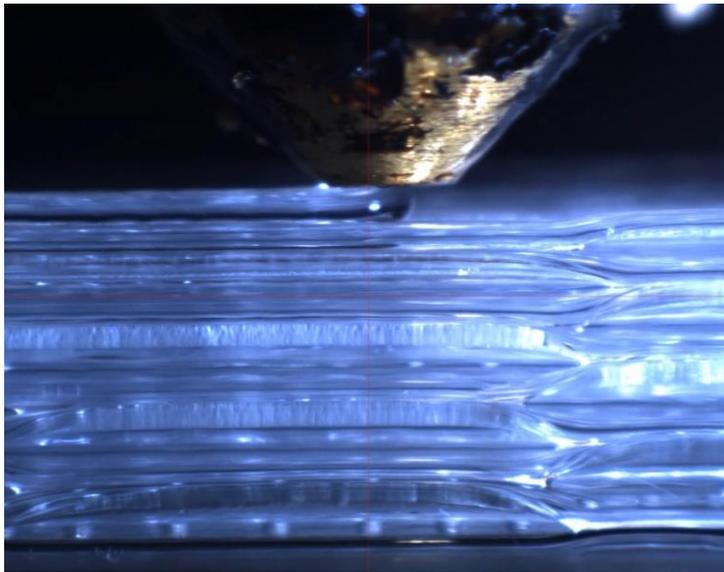


En la siguiente imagen sacada del libro “Additive Manufacturing Technologies” podemos ver una representación esquemática pero muy didáctica del fenómeno que nos ayuda a entender cómo se produce esta expansión del material.



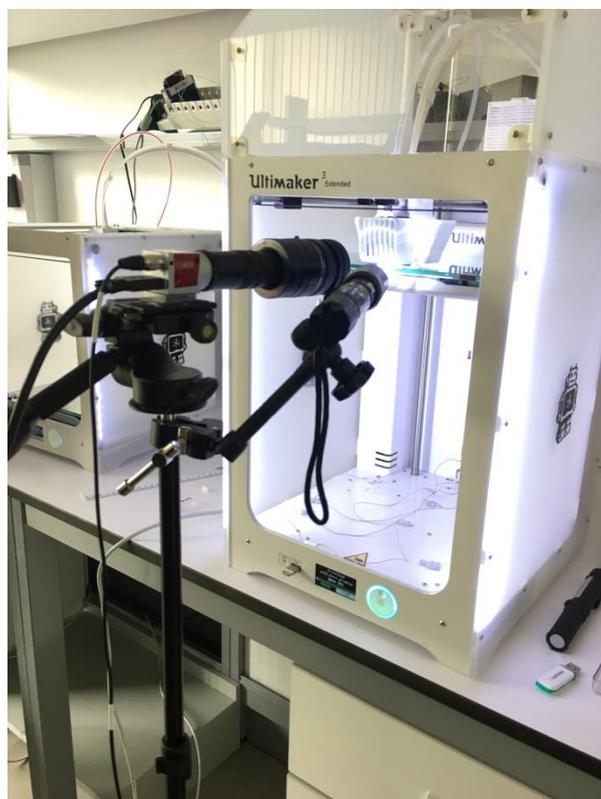
Expansión por aplastamiento [14]

Para solucionar este error, existe un parámetro en Cura que nos permite controlar la expansión horizontal, y que introduciendo un valor de -0.1 ó -0.2 se corrige el sobredimensionamiento y mejora la precisión de la pieza. Como hemos comprobado a través del Gcode, este parámetro lo que hace es variar la posiciones de las pasadas hacia una zona más interior de la pieza.



En esta imagen, podemos ver como es la forma de deposición del material desde el nozzle. Se puede observar que la distancia de la boquilla a la pieza es prácticamente igual a la de la altura de capa programada, esto provoca un ligero aplastamiento del material fundido en el plano perpendicular al de la foto. El material que se ha usado en este caso era PLA transparente.

La fotografía superior fue tomada gracias a una cámara de alta velocidad posicionada frente a la impresora y que grababa sus movimientos mientras construía la pieza como podemos ver a continuación. También se añadió una linterna de luz blanca para aumentar el brillo en la zona deseada y conseguir un buen resultado.

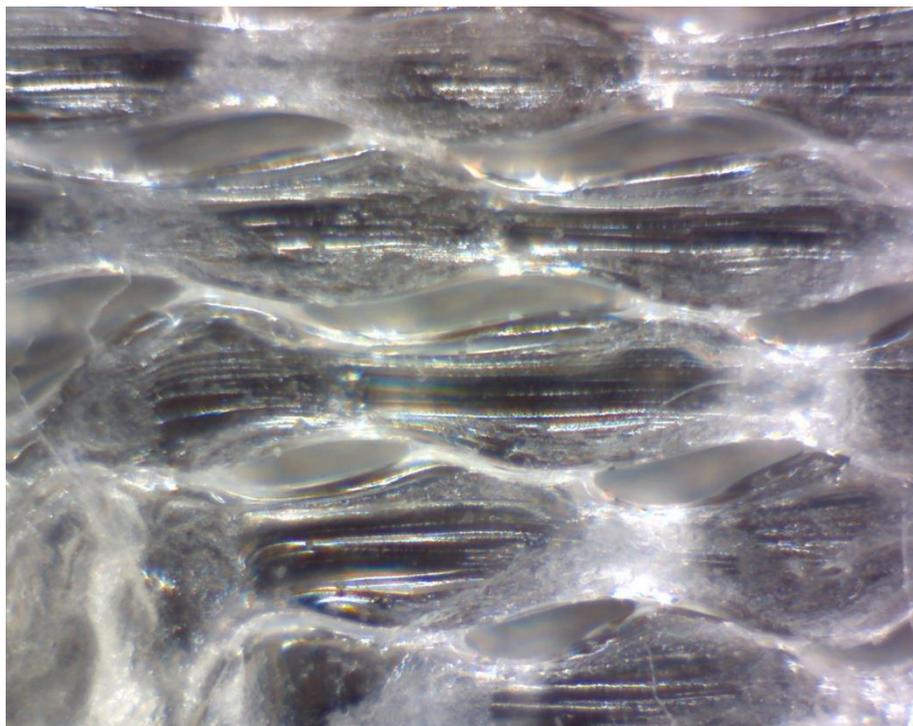


También hay pequeñas variaciones en la sección de la pieza en función de la posición y la velocidad de extrusión y por las pequeñas aceleraciones e impulsos que se producen cuando empieza a imprimir o llega a un punto final. En la siguiente imagen se observa una modelización a través de la cual nos hacemos una idea de cómo ocurre este fenómeno. Este factor no tendrá demasiada relevancia si se controlan adecuadamente las velocidades y aceleraciones de impresión a través del software.



Forma deposición material

Pero en cuanto a cambios de sección, los más acusados son los que se producen en los cambios de dirección o zonas interiores de relleno en las que se superponen unas capas sobre otras solo en determinados puntos, por ejemplo cuando el relleno es en forma de triángulos, pero no cuando es concéntrico.



- **Contracción del material por la temperatura**

En este caso es importante controlar la temperatura de extrusión para obtener un buen acabado tanto a nivel dimensional como de aspecto.

Cada material tiene una temperatura óptima de extrusión, que suele venir dada por el fabricante, para el caso del PLA transparente, por ejemplo, su temperatura es de 210°C y para el PLA rojo es de 200°C. Es conveniente imprimir a bajas temperaturas, en la medida de lo posible, para ajustar lo máximo la precisión dimensional de nuestras piezas.

Existen también varios factores para mejorar el problema del fallo por contracción del material:

- Programar el extrusor a bajas temperaturas (en la medida de lo posible)
- Mantener el entorno a unos 20°C o más caliente.
- Dejar la pieza en la impresora hasta que el plato de la impresora se estabilice con la temperatura ambiente
- Mantener la pieza 24h en condiciones ambientales.

Este fallo dependerá del tipo de material con el que se trabaje, ya que cada uno tiene un coeficiente de contracción diferente. En el caso del PLA, por ejemplo es muy bajo, y a veces ni si quiera se considera.

Tenemos varias soluciones para corregir el error de las 400 micras de sobredimensionamiento, y conseguir una precisión de unas 50 micras. El tipo de acción a tomar dependerá, como ya hemos comentado anteriormente, del material utilizado.

En el caso del PLA, se ha comprobado experimentalmente que mediante las siguientes soluciones se obtiene una mejora dimensional:

- Imprimir a 210°C (temperatura recomendada por el fabricante) y usar el parámetro de Cura de “expansión horizontal” con un valor de -0.2.
- Imprimir a 200°C, salvo la primera capa, que será a 210°C para evitar problemas de adhesión y warping.

En el caso del ABS la forma de proceder ha sido muy parecida. En primer lugar se han hecho varias probetas rectangulares de diferentes tamaños (80x30x3 ; 40x15x3 ; 25x10x3) y variando algún parámetro de impresión.



Los parámetros utilizados son los siguientes:

Calidad			
Altura de capa		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Altura de capa inicial		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Ancho de línea		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Ancho de línea ... pared exterior		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Ancho de línea...s) interna(s)		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Ancho de línea superior/inferior		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Ancho de línea de relleno		<input type="text" value="0.2"/>	mm
Perímetro			
Extrusor de pared		No reempl...	
Grosor de la pared		<input type="text" value="1"/>	mm
Recuento de líneas de pared		<input type="text" value="5"/>	
Grosor superior/inferior		<input type="text" value="0.4"/>	mm
Relleno			
Extrusor del relleno		No reempl...	
Densidad de relleno		<input type="text" value="20"/>	%
Patrón de relleno		Triángulos	
Material			
Temperatura de impresión		<input type="text" value="230"/>	°C
Temperatura de i... la capa inicial		<input type="text" value="235"/>	°C
Temperatura de l...aca de impresión		<input type="text" value="80"/>	°C
Diámetro		<input type="text" value="2.85"/>	mm
Flujo		<input type="text" value="100"/>	%

🕒 Velocidad ▼		
Velocidad de impresión	55	mm/s
Velocidad de relleno	55	mm/s
Velocidad de pared	30	mm/s
Velocidad de pared exterior	20	mm/s
Velocidad de pared interior	30	mm/s
Velocidad de desplazamiento	250	mm/s
Aceleración de la impresión	4000	mm/s ²
Aceleración de desplazamiento	5000	mm/s ²
Impulso de impresión	25	mm/s
Impulso de desplazamiento	30	mm/s
❄️ Refrigeración ▼		
Activar refrigeración de impresión	<input checked="" type="checkbox"/>	
Velocidad del ventilador	5	%
Velocidad inicial del ventilador	0	%

A partir de ahí se han sacado las tres probetas citadas anteriormente, y se han tomado medidas, donde se ha podido comprobar que todas las probetas tenían un sobredimensionamiento en el plano XY de unas 200 micras aproximadamente.

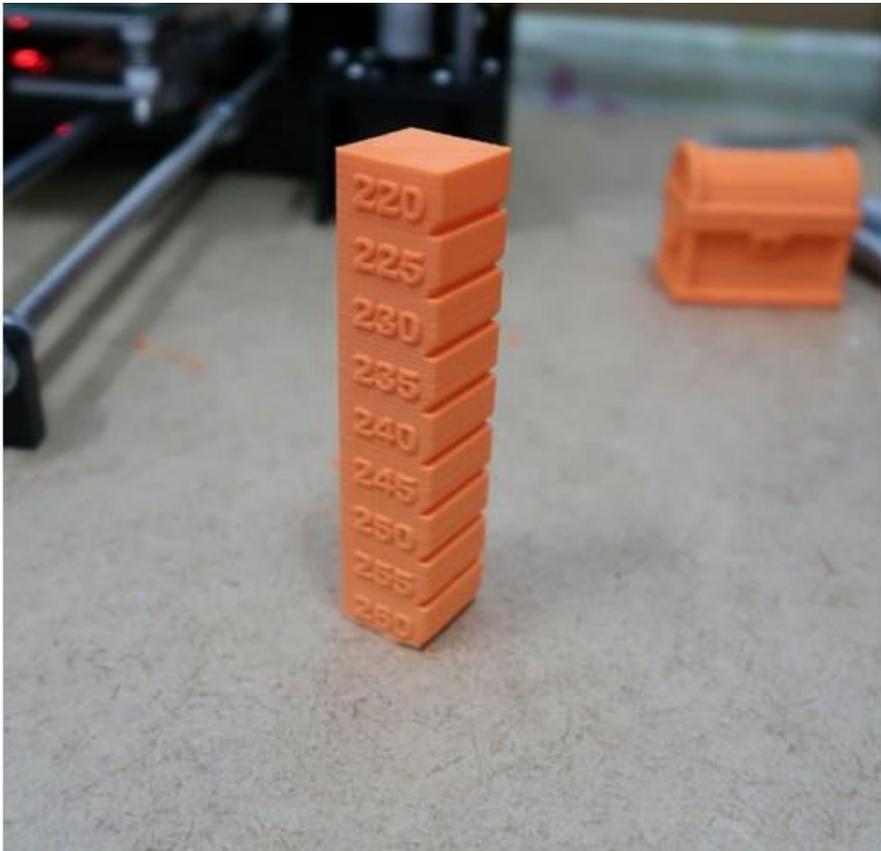
A continuación, para intentar corregirlo, se ha introducido el parámetro de corrección “expansión horizontal” con un valor de -0.1mm

Después de hacer esto, se han vuelto a imprimir las tres probetas con el resto de parámetros igual que en el caso anterior, obteniendo una precisión dimensional mucho mejor, de unas 50 micras como máximo.

PARA OTROS MATERIALES:

Cuando vayamos a usar nuevos materiales, uno de los parámetros más importante en la impresión 3D es la precisión dimensional, por tanto debemos controlarla muy bien.

En primer lugar, tenemos que saber cuál es la temperatura óptima de impresión de ese material, para ello, nos guiaremos por los parámetros recomendados por cada fabricante. También se puede hacer un ensayo sencillo que consiste en una torre de calibración de temperaturas, en la que se va imprimiendo en la dirección vertical, cambiando la temperatura cada cierto número de capas y podemos ver el resultado final de cada temperatura. Se ajustaría en el centro la temperatura recomendada por el fabricante y se hacen variaciones de 5°C por encima y por debajo, el resultado es el siguiente:



Torre de temperaturas

Sobre esta misma torre ya podríamos empezar a tomar medidas para comprobar si las dimensiones obtenidas se corresponden con las programadas, y sobre todo, si estas dimensiones varían en función de la altura de la pieza, es decir de zonas extruidas a diferente temperatura.

Una vez hecho esto, tendríamos que decidir que temperatura es la mejor en cuanto a acabado y precisión de medidas, aunque esta última no es tan importante ya que podemos ajustarlo posteriormente con el parámetro de corrección horizontal.

Una vez que tenemos definida la temperatura óptima de impresión para nuestro nuevo material, pasaríamos ya a control dimensional. Para ello, la forma de proceder será la misma que se ha explicado para los materiales anteriores:

-Imprimimos 3 probetas de diferentes tamaños, pequeña, mediana y grande, (80x30x3; 40x15x3; 25x10x3) por ejemplo estas tres, preferiblemente las tres en la misma impresión y con los mismos parámetros de cura. Una vez impresas, tomamos medidas sobre ellas y comprobamos si existe diferencia entre la pieza diseñada y la impresa.

En ese caso el siguiente paso es comprobar si esta diferencia es constante e independiente del tamaño de la pieza (es lo más normal). Comprobamos las medidas en los ejes X e Y, la desviación a la medida real debería ser la misma en estas direcciones. Una vez tenemos estas medidas y sus desviaciones correspondientes, podemos ajustarlo con el parámetro de Cura “corrección horizontal” en el que tenemos que introducir un valor, negativo si la pieza impresa es más grande de lo que debería, o positivo, si es más pequeña; y de valor la mitad de la desviación que tienen las piezas.

Después comprobamos que la dimensión de la pieza en el eje Z (vertical) se ajusta a la real con una precisión de unas 50 micras.

4.3.3. Adhesión en impresión multimaterial.

Problema soporte

Imprimiendo esta pieza la cual cuenta con una zona de voladizo, se ha observado el mal acabado superficial de la parte inferior del voladizo.

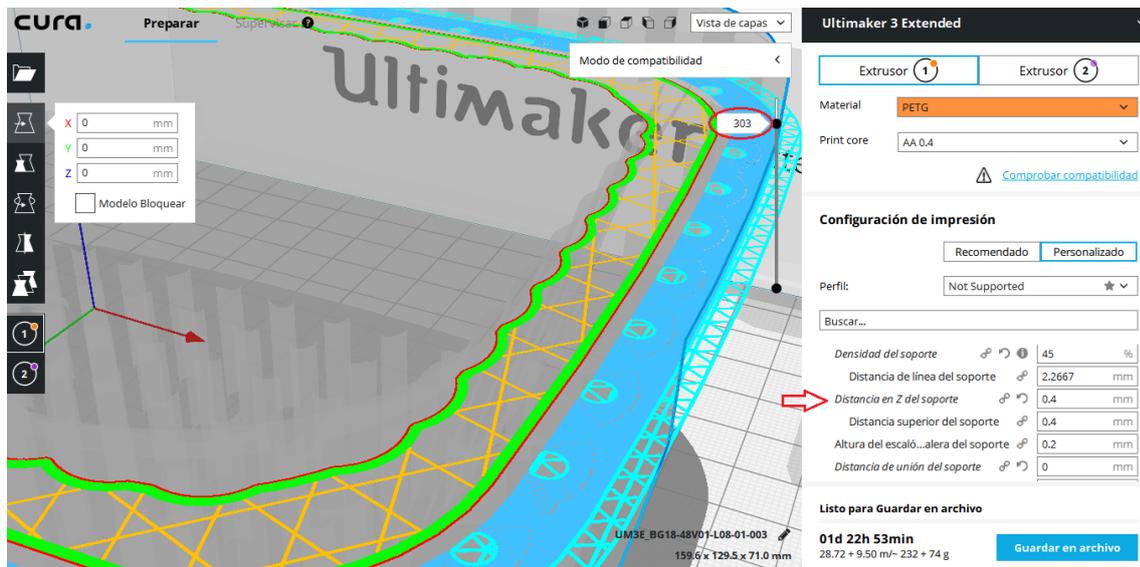


Acabado superficial en zona voladizo

Este fallo es debido a un parámetro ubicado en el menú de “soporte” de Cura, que se refiere a la distancia del soporte a la pieza cuyo objetivo es conseguir que posteriormente se pueda retirar mejor el material de soporte al dejar un pequeño gap entre la pieza y el soporte. Este parámetro está fijado, por defecto, en una distancia de unos 0.4 mm que equivalen a 2 capas de material de 0.2mm, para conseguir el objetivo previamente dicho.

El problema que esto genera, es que, al no existir un soporte inmediatamente inferior a nuestra pieza final, se imprime “sobre el vacío” provocando un mal acabado y fallos en la pieza.

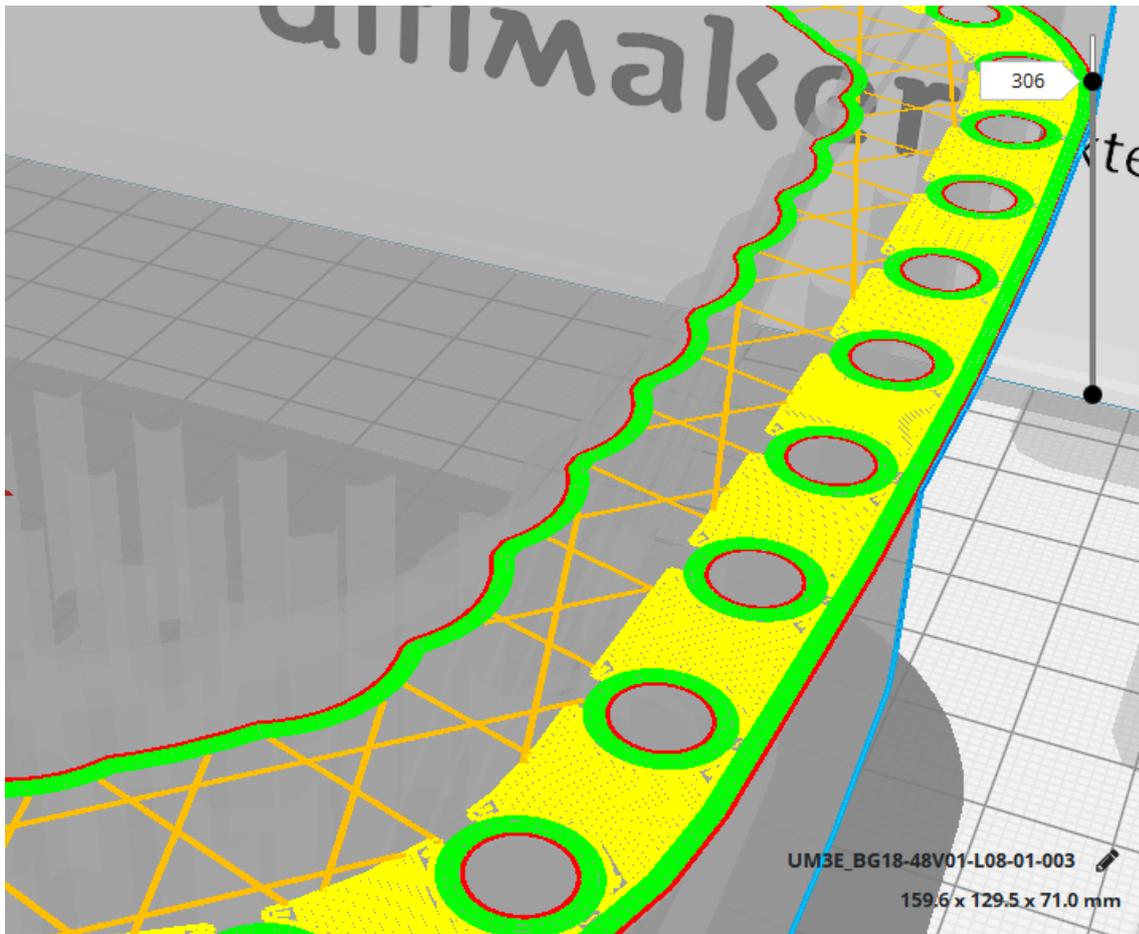
En esta imagen a la derecha en el menú de “soporte” se ve el parámetro de “distancia en Z del soporte” con un valor de 0.4mm, que provoca lo vemos a continuación. También podemos ver la última capa correspondiente al soporte.



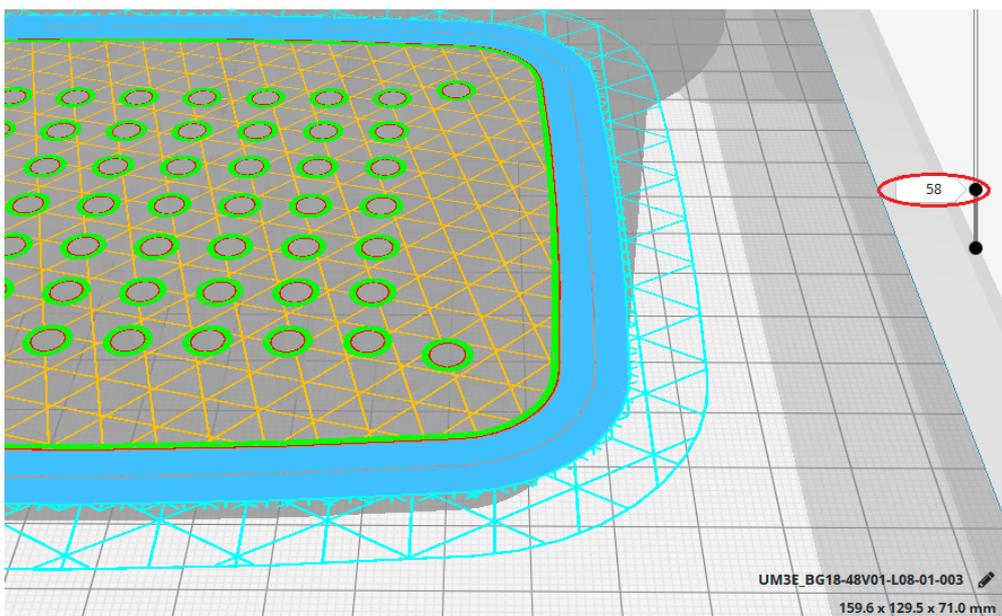
En esta imagen se ven las dos capas en las que no imprime el soporte.

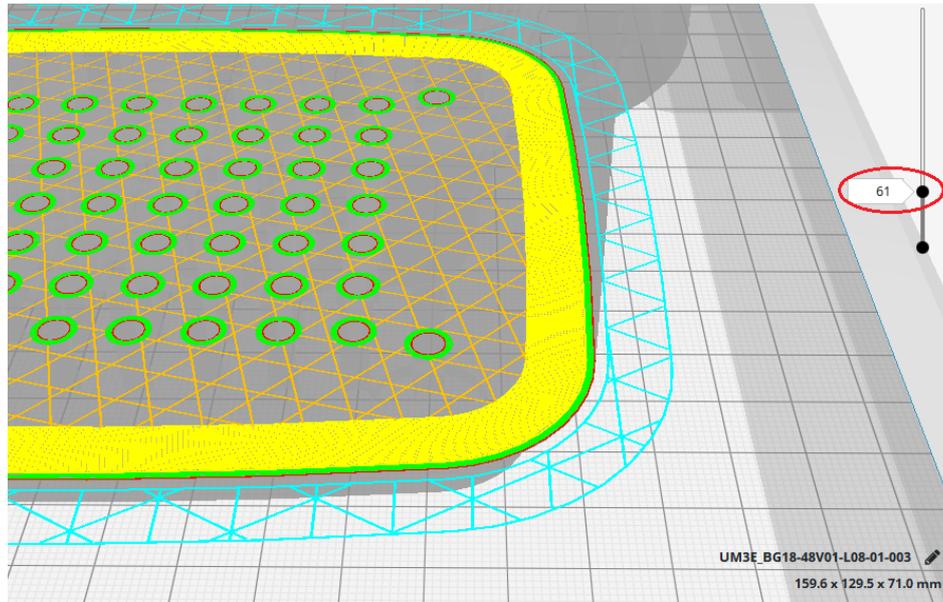
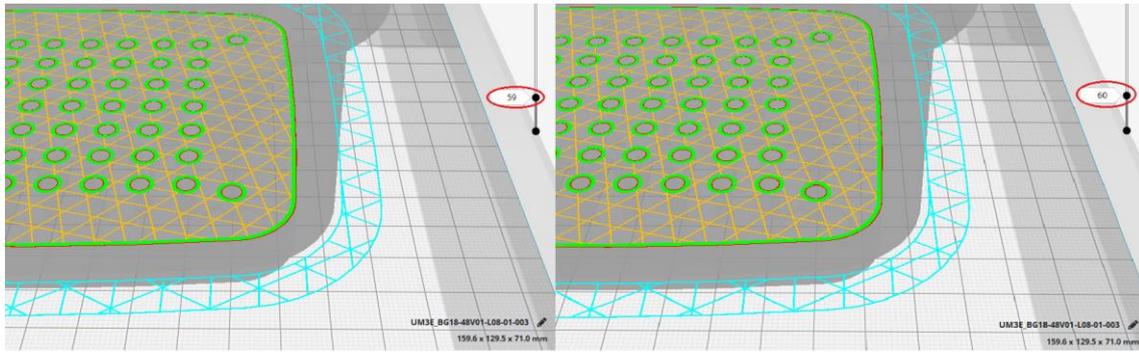


Y a continuación ya imprime la parte del voladizo de la pieza.



Esto pasa tanto en el voladizo superior como en el inferior, aunque este último consigue un buen acabado final (tal vez por la geometría sencilla y sin agujeros como el superior).





Para corregir este gap y error de adherencia basta con modificar el valor de este parámetro hasta 0mm y ya empezará a imprimir la pieza sobre el soporte.

Y el resultado obtenido es el siguiente:



4.4. Calibración.

La calibración de la impresora en cuanto a horizontalidad y planitud del plato con respecto al extrusor, y movimientos de este, es de suma importancia para conseguir unos resultados óptimos, por tanto, es necesario tener una buena técnica para conseguir esta calibración correcta.

Existen varios tips o consejos a seguir para construir piezas de calibración, para intentar abarcar todas las posibilidades de impresión de una forma rápida y eficiente. A continuación se muestra una lista de los más utilizados y comunes:

"Reglas" para las piezas de prueba

El artefacto de prueba estándar debería:

- ser lo suficientemente grande como para probar el rendimiento de la máquina cerca de los bordes de la plataforma así como cerca del centro,
- tener una cantidad sustancial de características pequeñas, medianas y grandes,
- tener tanto orificios como protuberancias para ayudar a verificar la compensación del ancho de la viga,
- no tardar demasiado tiempo para construir,
- no consumir una gran cantidad de material,
- ser fácil de medir, y
- tener muchas características que pueda tener una pieza "real" (por ejemplo, paredes finas, superficies planas, agujeros, etc.).
- tener formas geométricas simples, lo que permite una definición perfecta y un fácil control de la geometría,
- no requerir tratamiento posterior o intervención manual (p. Ej., No debe haber soporte)
- permitir mediciones repetitivas.

5. TIPOS DE IMPRESORAS Y SOFTWARE [15]

5.1. Impresora utilizada: Ultimaker 3 Extended*

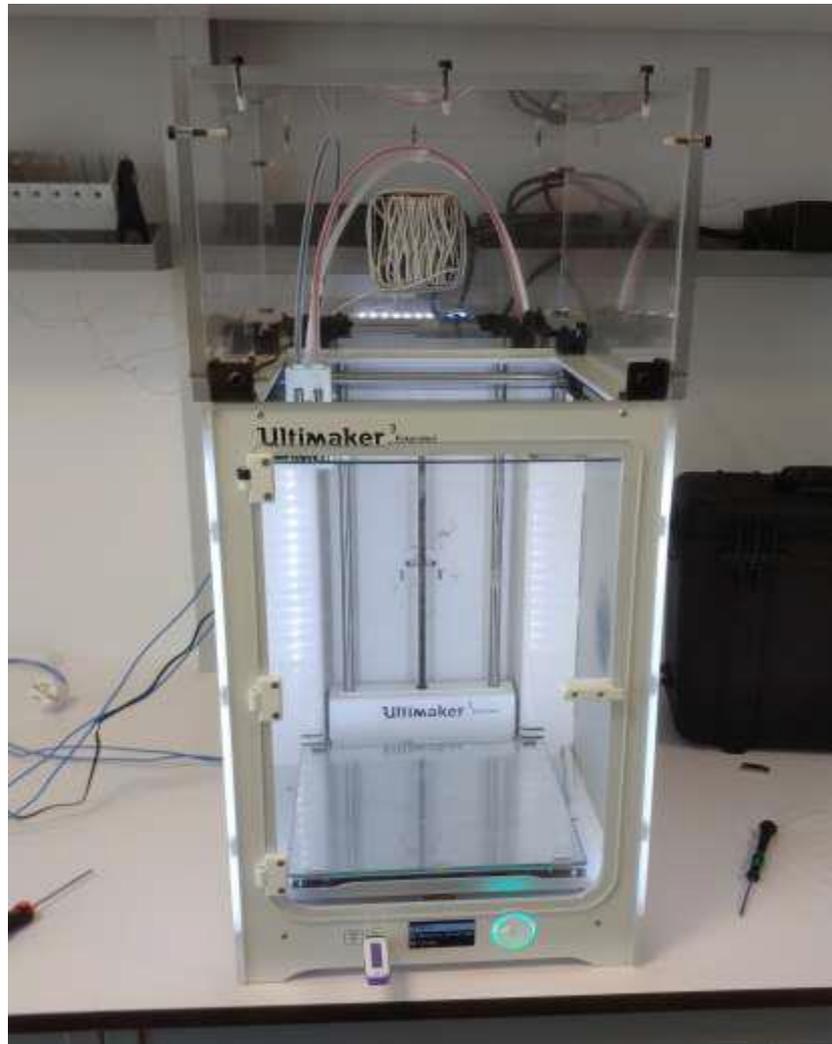
La impresora utilizada para llevar a cabo todo el proyecto ha sido la Ultimaker 3 Extended que podemos ver en la foto, pero con alguna modificación.



Impresora Ultimaker 3 Extended

Es una impresora que cuenta con doble cabezal de extrusión lo que nos permite realizar modelos con dos materiales; base caliente, capaz de alcanzar temperaturas cercanas a los 110°C; calibración automática del plato; un volumen de impresión de 200x200x300 mm; cabezales intercambiables de diferentes diámetros y materiales para poder imprimir filamentos reforzados con fibra de carbono...;

La modificación más significativa, es el añadido de una cámara climática, que tiene el objetivo de mantener una temperatura constante y superior a la ambiente durante toda la impresión. Esta cámara consta de los siguientes elementos: cubierta de metacrilato que aísla el interior de la impresora, una resistencia que genera el calor necesario, y un pequeño ventilador para distribuir el flujo de aire caliente.



Impresora Ultimaker con cámara climática

Esta característica nos permite conseguir una mayor calidad en nuestras impresiones, ya que evitamos cambios de temperatura según la altura de la pieza, ya que, al tratarse de una impresora con posibilidad de calentar la base, esta puede alcanzar una temperatura de hasta 100°C, pero según avanza la impresión y se llega a capas más altas, la temperatura es prácticamente igual a la temperatura ambiente.

También la aísla de posibles corrientes de aire, partículas de polvo o suciedad externas.

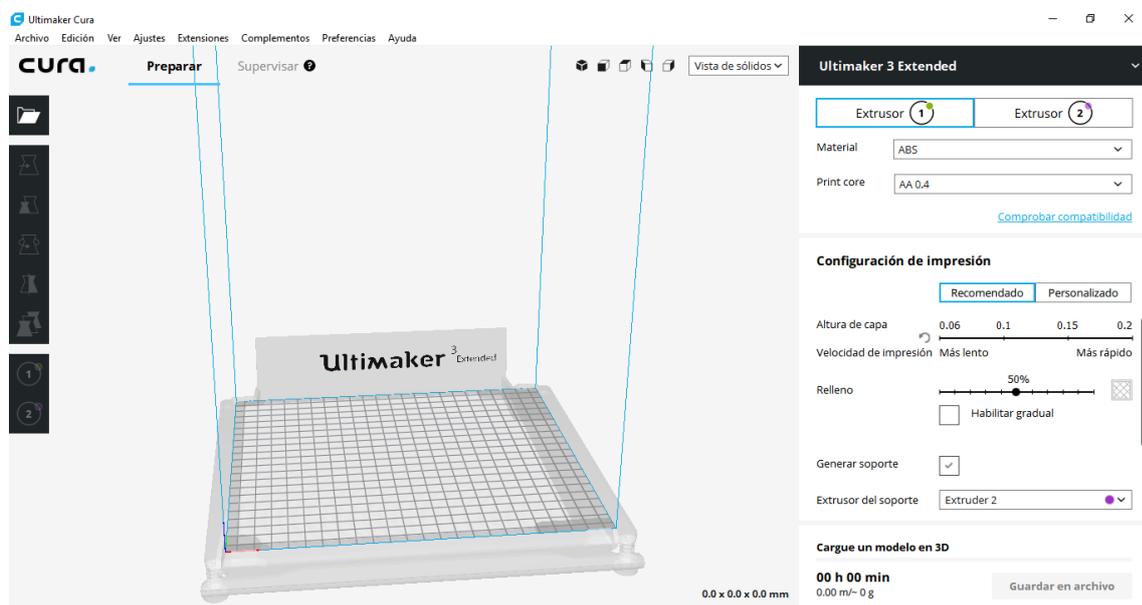
5.2. Software utilizado, Ultimaker Cura.

Cura 3D es un software de laminado de impresión 3D muy utilizado a nivel mundial debido a su sencillez y su carácter gratuito. Su trabajo consiste en transformar el archivo STL en G-Code que es el único lenguaje que es capaz de procesar la impresora. Es un software desarrollado por la empresa Ultimaker, por lo que nos será muy útil ya que también trabajamos con impresoras Ultimaker.

En sus orígenes, Cura se llamaba SkeinPyPy, nombre que viene como combinación de Skeinforge y PyPy. Skeinforge era también un laminador de impresión 3D, pero era demasiado lento por lo que se le incorporó el complemento PyPy haciéndolo más funcional y dando origen a “SkeinforgePyPy” que posteriormente pasaría a llamarse “SkeinPyPy”.

Finalmente en 2012 Ultimaker contrató al creador de este software para mejorarlo y evolucionarlo y pasó a llamarse Cura. Desde entonces ha habido numerosas versiones, hasta la actual con la que hemos trabajado que es la versión 3.3. la cual nos ofrece numerosas configuraciones.

Una vez descargado e instalado, lo abrimos y podemos ver este entorno:



Aquí podemos ver en la parte central una representación de la impresora que previamente hemos configurado, donde aparecerán los modelos que vayamos a laminar.

Ahora empezaremos a explicar todas las opciones de esta pantalla, empezaremos por la barra de la izquierda y de arriba hacia abajo.

En primer lugar vemos un icono de una carpeta, el cual nos permite cargar los archivos .STL que tenemos guardados en nuestro ordenador; los 4 siguientes iconos sirven respectivamente para mover, escalar, rotar y hacer un espejo a la pieza que hemos cargado antes. Y los dos que nos aparecen justo debajo son para seleccionar el material y el extrusor con el que queremos hacer cada pieza.

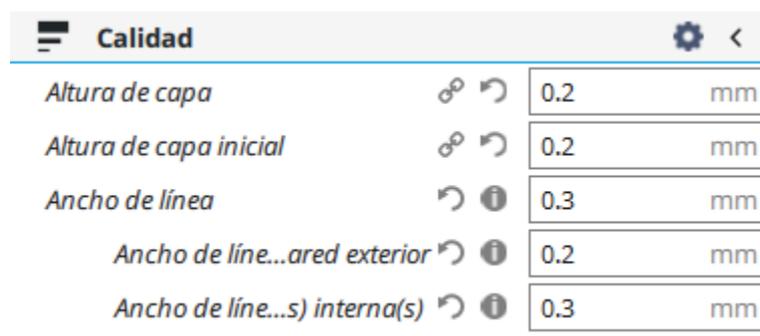
En la parte superior está el desplegable que nos permite cambiar la forma de ver la pieza, como un sólido, en rayos X, o vista por capas.

Ahora pasaremos al cuadro de la derecha, y lo veremos con más detalle. Empezando de arriba hacia abajo en primer lugar aparecen dos botones correspondientes a los dos extrusores de la impresora, y cuando los pulsamos podemos seleccionar el material que queramos.

A continuación está la configuración de la impresión en la que podemos diferenciar dos tipos: recomendado y personalizado. En el primero la mayoría de los parámetros vienen configurados por defecto y solo podemos incidir sobre 5 de los más importantes.

La configuración “personalizado” es la que utilizaremos en la que podremos controlar más de 200 parámetros, muchos de ellos muy útiles y necesarios. Más adelante veremos cómo usarlos y cuáles son los más influyentes e importantes.

Dentro de este menú hay varios subgrupos, calidad, perímetro, relleno, material, velocidad, desplazamiento, refrigeración, soporte, adherencia de la placa de impresión, extrusión doble, modos especiales y experimentales. En cada uno de estos subgrupos aparecen los parámetros a controlar, y aparte de los que vienen configurados por defecto cuando los abrimos podemos activar muchos más haciendo click en la ruleta que sale en el título del subgrupo como se ve en la siguiente imagen:



Calidad			
Altura de capa	🔒 ↺	0.2	mm
Altura de capa inicial	🔒 ↺	0.2	mm
Ancho de línea	↺ ⓘ	0.3	mm
Ancho de línea...red exterior	↺ ⓘ	0.2	mm
Ancho de línea...s) interna(s)	↺ ⓘ	0.3	mm

Una vez que hemos terminado de seleccionar todos los parámetros de nuestro proceso, el software segmenta automáticamente la pieza y nos da información del tiempo que tardará en imprimirse la cantidad de material que va a gastar y el precio de material de dicha impresión.

6. MATERIALES.

6.1. PLA

El PLA o ácido poliláctico es un polímero termoplástico que se obtiene del almidón. Es el plástico más utilizado en impresión 3D por diversas razones:

- Sus propiedades mecánicas son adecuadas, es un material rígido, y con una contracción muy baja, que incluso se puede considerar nula.
- La facilidad para imprimirlo, los rangos de temperatura de impresión van desde los 170°C por lo que no es necesario tener extrusores sofisticados, no necesita base caliente para adherirse la primera capa y no emite gases nocivos, como por ejemplo el ABS, y se pueden utilizar velocidades rápidas de impresión, entre 30 y 90 mm/s.
- Tiene un post-procesado sencillo, es fácil de lijar, taladrar, o cortar.
- El amplio rango de colores que ofrece.

Sin embargo, tiene una desventaja respecto al resto de termoplásticos más comunes, que es su temperatura de transición vítrea, la cual ronda los 60°C, y a partir de la cual pierde sus propiedades y se comporta como un material semi-fundido.

6.2. ABS

El ABS, acrilonitrilo butadieno estireno, es un termoplástico amorfo, al que también se le conoce como plástico de ingeniería ya que su elaboración y procesamiento es mucho más complejo que el del resto de plásticos comunes.

Tiene numerosas aplicaciones, tanto industriales como domésticas, debido a sus buenas propiedades mecánicas, resistencia a los golpes, a ataques químicos y estabilidad ante la temperatura.

En nuestro caso, lo que nos interesa es su aplicación a la impresión 3D, ya que junto con el PLA es el material más utilizado.

Se suele utilizar mayoritariamente, para modelos funcionales completos, ya que alcanza hasta el 80% de la resistencia que obtendríamos con la clásica tecnología de inyección.

Sin embargo, presenta varios problemas respecto al anteriormente citado PLA:

Produce gases nocivos al imprimirse, por lo que se recomienda aislar los gases de la impresión.

Uno de los mayores inconvenientes es el efector warping que presenta. Esto es, por el elevado coeficiente de contracción. Se puede solucionar utilizando una base caliente y algún tipo de adhesivo pero es difícil de controlar y puede arruinar la impresión. Por el mismo motivo, también suelen aparecer los fallos por cracking o delaminación, que tienen la misma explicación teórica, pero en capas superiores en vez de la primera junto con la base. Estos fenómenos se agravan con el tamaño de las piezas.

6.3. PVA

El acetato de polivinilo o PVA es un material fundamental en impresión 3D, por su posibilidad de ser disuelto en agua. Esto hace, que en las impresiones multimaterial, sea utilizado como material de soporte, para imprimir piezas con zonas huecas o de voladizo, donde es necesario crear una estructura de soporte sobre donde poder imprimir. Una vez acabada la impresión, esta se sumerge en agua, y es cuando el PVA se disuelve, quedando únicamente la pieza deseada de otro material.



Fases de eliminación de PVA

En la imagen adjunta podemos ver en color blanco semitransparente el material de soporte PVA en las zonas donde la pieza roja quedaría en voladizo, y el proceso de eliminación del soporte tras sumergirlo en agua.

Hay varias recomendaciones para el proceso de eliminación del PVA como por ejemplo aumentar la temperatura del agua para facilitar y acelerar la disolución, mantenerlo en movimiento y cambiar el agua tras cierto tiempo, ya que puede llegar a saturarse y por tanto no es capaz de disolver más PVA.

Uno de los grandes, sino el mayor, problemas de este material, es su tendencia a absorber humedad, lo que altera fuertemente sus propiedades. Cuando el material se mantiene durante varias horas en ambientes sin controlar, absorbe la humedad ambiente, lo que provoca que se formen microburbujas en el filamento y la impresión no sea buena. Cuando esto ocurre, es necesario secarlo en un horno para eliminar esta humedad.

La solución que se ha tomado para evitar este fenómeno, es aislar el material en unas cámaras que se han diseñado para mantener el rollo de una forma estanca aislado del ambiente. En la imagen inferior se pueden ver esta cámara con los conductos para dirigir el material hasta el motor de cebado en la parte trasera de la impresora.



Caja aislamiento PVA

6.4. PETG

El PETG es un copolímero obtenido a partir de la unión del PET (tereftalato de polietileno) con glicol. Es un material con numerosas aplicaciones que podemos encontrar en nuestro día a día, como por ejemplo en envases, botellas de agua, etc.

Esto es debido a la idoneidad de sus propiedades, es resistente, fácilmente moldeable... pero sin duda, lo que le diferencia del resto de plásticos es su resistencia a ataques ácidos y químicos. Esta cualidad lo hace apto para el uso alimentario. Es por esto que lo usaremos en nuestra aplicación ya que podría entrar en contacto con alimentos, a la hora de lavarlo o meterlo en el lavavajillas, etc.

En lo relativo a su impresión en FDM tiene características similares al PLA, es relativamente fácil de imprimir y controlar:

- Su temperatura de extrusión varía entre 220 – 250°C.
- La temperatura de la base debe estar controlada entre 60 – 90°C para mejorar su adhesión. También es recomendable utilizar algún tipo de adhesivo para la primera capa
- Buen comportamiento frente al warping, ya que tiene un coeficiente de contracción muy bajo.
- Tiene tendencia a absorber la humedad del ambiente, aunque no tanto como el PVA, es recomendable mantenerlo en zonas secas y aisladas.

7. APLICACIÓN.

7.1 Estudio de Benchmarking. [16]

La necesidad de que existan cuchillos de cocina con el mango recto, es especialmente debida a algunos tipos de enfermedades como pueden ser la artritis reumatoide y otros procesos articulares degenerativos. Estos provocan deformidades articulares que dificultan el agarre de un cuchillo convencional.

A continuación se muestra un pequeño estudio de benchmarking, con el objetivo de conocer el producto que se oferta en el mercado, cómo es, que tipos hay, y que ventajas e inconvenientes tienen, para así poder ofrecer una alternativa mejor, gracias a la impresión 3D.

Es obvio que los cubiertos adaptados son una necesidad con demanda por diversos motivos, aunque en la actualidad no sean productos muy conocidos y con oferta limitada. Para conseguir este tipo de objetos tenemos que recurrir a tiendas especializadas u ortopedias, por ejemplo. Lo cual puede ser un gran punto de mejora, ya que nos da la ventaja de trabajar con un archivo stl, el cual se puede colgar y compartir vía internet, donde cualquiera puede tener acceso de forma fácil, rápida.

Los artículos existentes en el mercado son básicamente los siguientes:



Cuchillo Reflex

El cuchillo Reflex, es lo más parecido que podemos encontrar a nuestro producto, con la diferencia que es un cuchillo de una única pieza, donde se sustituye el mango convencional por el de agarre en modo sierra. Puede presentar problemas de adaptación a diferentes tipos, tamaños o discapacidades de algunas manos.

Otro posible inconveniente puede ser su precio, 16,70€, el cual puede que muchas personas no estén dispuestas a pagar por un cuchillo, teniendo en cuenta que un cuchillo convencional cueste en torno a 1-2€ la pieza.

A continuación se muestra otro tipo de cuchillo, con mango a 90°, este presenta un mango abierto a diferencia del cuchillo réflex, y añade una función tenedor en el extremo. La idea es la misma, facilitar el corte y disminuir la fuerza necesaria para personas que puedan necesitarlo. Al igual que en el caso anterior se trata de un producto muy específico, con una oferta limitada y un precio elevado, llegando hasta los 30€.



Cuchillo con tenedor mango 90°

También podemos encontrar cuchillos como el que vemos en la siguiente imagen, convencionales, pero con el mango adaptado para diferentes tamaños.



Cuchillo con mango ancho

Visto esto, podemos decir que nuestro mango presenta muchas ventajas, respecto a lo visto en el mercado, entre ellas destacamos el hecho de la personalización de cada pieza adaptada al usuario, así como el precio de fabricación, la posibilidad de adaptarlo a diferentes cuchillos.

7.2 Definición de producto

El objetivo final de este trabajo es la fabricación de una pieza funcional, la cual se trata de un mango auxiliar para cuchillos.

Gracias a la colaboración con una residencia de ancianos de Valladolid, evaluamos varias propuestas y llegamos a la conclusión que este objeto es una necesidad que necesita ser cubierta, ya que algunos de los ancianos tienen dificultad para sostener y manejar funcionalmente este cubierto, y es realizable gracias a la impresión 3D.

Este tipo de mango permite un agarre en forma de sierra, el cual es más fácil y práctico que el convencional en caso de problemas de fuerza o similar, ya que se involucra toda la palma de la mano y consigues un mayor agarre.

Como hemos podido ver en el estudio de benchmarking anterior, existen cuchillos adaptados para esta función, de corte en modo de sierra para facilitar la función de corte. En nuestro caso, no será necesario comprar nuevos cuchillos, los cuales son poco comunes, ni si quiera sustituir o modificar el mango de un cuchillo normal, ya que basta con añadir el que imprimimos.

Además, la impresión 3D nos proporciona grandes ventajas:

Ya que el cuchillo que hemos visto anteriormente no es un producto muy extendido en el mercado, es difícil de encontrar, hay poca oferta y pocas variantes.

Por tanto, nuestra forma de diferenciarnos mejorando el producto, es la capacidad de fabricar el mango auxiliar, para no tener que comprar cuchillos nuevos, y simplemente añadirlo a los que ya tenemos, y la posibilidad de realizar unidades personalizadas sin incrementar el coste por ello.

Se podría personalizar el agujero de asiento para el cuchillo, customizado para cada tipo de cuchillo, también la forma o el tamaño del mango, para cada tipo de mano, etc.

Todo ello, lo conseguimos partiendo de un diseño base de CAD, en el que podemos variar estos parámetros. Se trata de extraer la forma del mango del cuchillo deseado y hacer la contra forma en nuestro modelo. Lo mismo con la longitud y diámetro del mango, pudiendo modificarlo para tamaños de manos, forma de los dedos, etc.

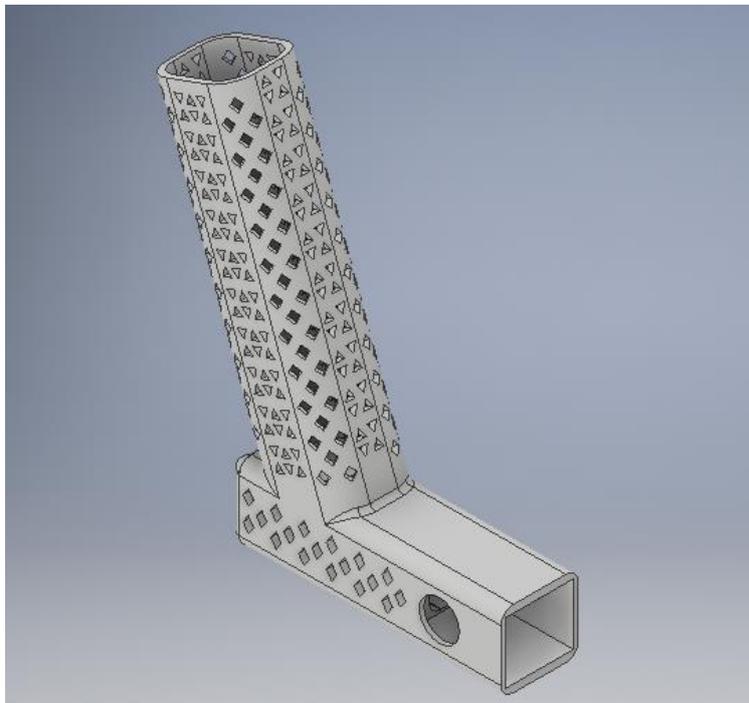
En este caso, adaptaremos la pieza a un cuchillo concreto, el que vemos en la imagen siguiente:



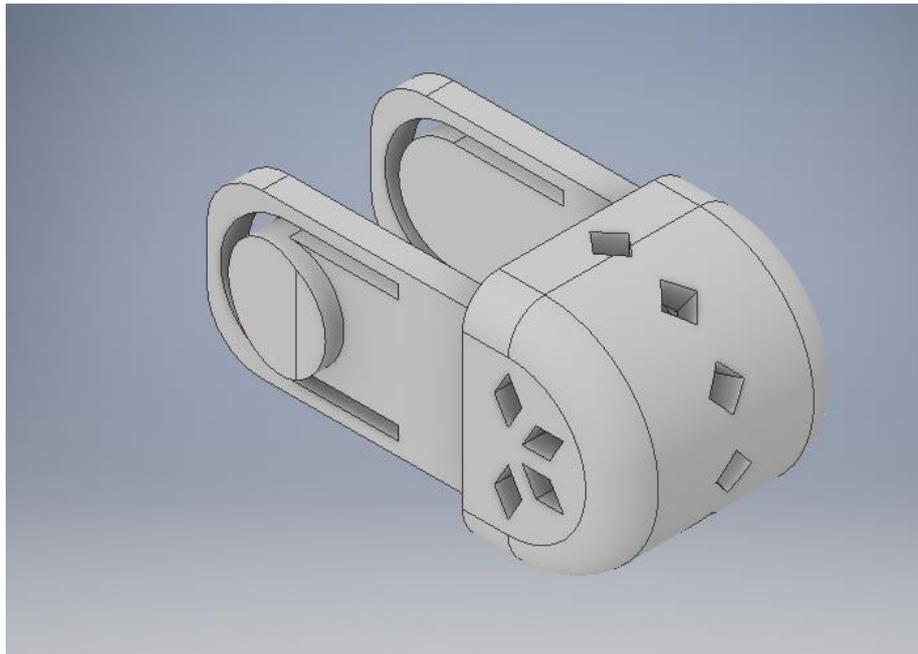
Cuchillo utilizado

Para ello, el primer paso es hacer las mediciones correspondientes sobre el cuchillo, para tener la información necesaria y poder trasladarla al formato CAD donde sobre nuestra pieza mango, crearemos la forma necesaria para el encaje del cuchillo.

Una vez tenemos las medidas del cuchillo, pasamos al diseño CAD. Aquí es donde elegimos forma exterior, interior de nuestro mango, diseño, vaciados, etc.



Pieza 1 "Mango"



Pieza 2 "Tapón"

En las imágenes superiores se observa el diseño final de las piezas. Como podemos ver, el producto consta de dos partes: el mango donde se inserta el cuchillo y una segunda pieza a modo de cierre que se coloca en la parte trasera, cuyo objetivo es sujetar el cuchillo y evitar que salga durante su utilización.

La unión de estas piezas ha sido diseñada para que se unan mediante un clipado rápido. La pieza "mango" cuenta con dos agujeros cilíndricos en los laterales donde encajarán las contra formas salientes de la pieza "tapón". En estos clips cilíndricos se ha creado una forma de rampa ascendente para favorecer la entrada en la pieza 1. También se cuenta con unos vaciados para que pueda flexionar fácilmente y facilitar el montaje y desmontaje del conjunto.

Como podemos ver en las fotos que se han realizado numerosos "taladros" con el objetivo de aligerar la pieza, reducir material de impresión y por tanto su coste. Otro de los objetivos es, como comentaremos posteriormente, evitar la retención de agua dentro de la pieza.

A parte de los taladros, la pieza está vaciada en su interior, contando únicamente con las paredes de 2mm de espesor. Todo ello, sin comprometer su resistencia estructural.

En cuanto al material utilizado para la fabricación, es PETG, que como ya sabemos es un plástico con una gran resistencia química y apto para el uso alimentario, detalle muy importante y eliminador para otro tipo de materiales, porque nuestro producto podría tener contacto con la comida, puede lavarse en máquinas lavavajillas, etc.

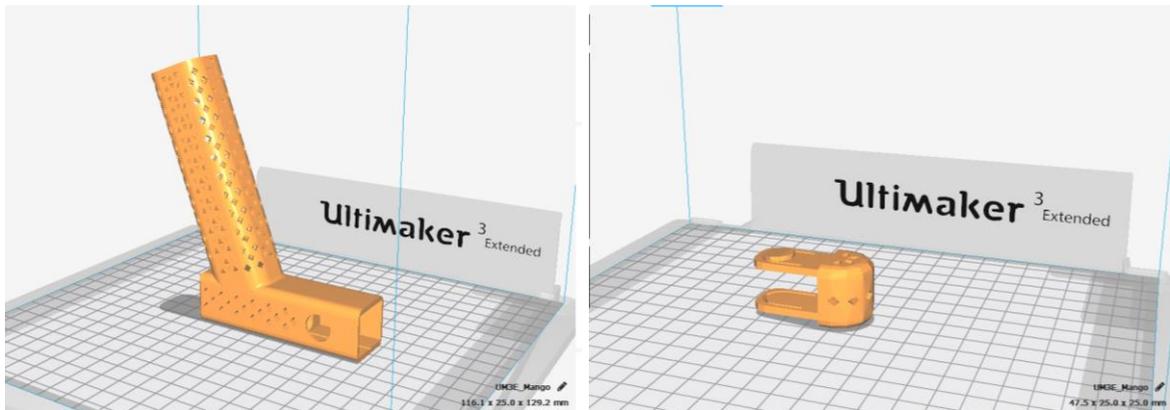
Un pequeño problema que nos podría introducir el hecho de fabricarlo con la técnica FDM es que, al ser un material poroso, al lavarlo absorbe mucha agua, y tardaría mucho en secarse tras entrar en contacto con agua, por ejemplo en el caso de un lavado. Como ya hemos dicho, esto lo evitamos en la fase de diseño con el reducido espesor de las paredes y los taladros con los que cuenta.

7.3 Fabricación

Para la fabricación del mango adaptado, se han utilizado unos parámetros tratando de optimizar la relación calidad-tiempo de fabricación, es decir, no se ha priorizado el acabado de la pieza ya que no será necesario un acabado demasiado fino para cumplir su función. Se ha ajustado convenientemente las tolerancias para conseguir el correcto montaje y desmontaje entre las dos piezas que componen el mango y tapón.

Las principales características y parámetros para la impresión han sido:

La orientación de ambas piezas ha sido la siguiente:



El motivo de la orientación de ambas piezas ha sido reducir el material de soporte y por tanto los tiempos de fabricación.

Aunque en la primera pieza (imagen izquierda) tenemos una parte en voladizo, no es necesario utilizar material de soporte bajo ella, ya que el ángulo que forman con la horizontal es mayor a 60° y por tanto es factible la fabricación con un solo material con un buen resultado.

En cuanto a los parámetros de altura y anchura de capa, ambos están fijados a 0.2 mm con un perímetro de grosor y altura de pared de 1mm, es decir, 5 capas de material.

El patrón de relleno utilizado es en forma triangular y con una densidad del 20% lo cual nos aporta una resistencia estructural suficiente para el trabajo que realizará y con un ahorro de material óptimo.

En cuanto al gasto de materiales y tiempos de fabricación son los siguientes:

- Para el material de soporte PVA, será necesaria una cantidad de material de 0.89m, lo que equivale a unos 7 gramos de filamento. Teniendo en cuenta el precio del material supone un coste de unos 0.94€ de PVA.
- Para el material PETG, son necesarios 6.18m de filamento, que suponen unos 49 gramos aproximadamente. Teniendo en cuenta el precio del material, supone unos 1.08€ de PETG.

- El tiempo de fabricación de ambas piezas en conjunto es de 13 horas y 25 minutos.

Teniendo en cuenta todo esto, el resultado final es el que podemos ver en la foto:



7.4. Resultado final, conclusiones y líneas futuras.

Tras el estudio de este trabajo de fin de grado, podemos obtener las siguientes conclusiones.

Hemos conseguido un conocimiento amplio de la técnica de manufactura de la impresión 3D, así como de sus variantes, en especial el moldeo por deposición fundida, FDM. También conocemos cuáles son los parámetros más importantes a controlar para conseguir resultados óptimos y gracias a todo esto hemos sido capaces de dar solución a un problema tal como la necesidad de fabricar un mango auxiliar adaptado para un cuchillo para personas con discapacidades o dificultades. El hecho de trabajar con impresión 3D nos permite fabricarlo de forma personalizada tanto para cada tipo de persona como para cada tipo de cuchillo. Las posibilidades son muy amplias. Por todo ello el producto final ha sido un éxito ya que se trata de una pieza totalmente funcional.



Como líneas futuras de avance en este TFG podríamos destacar varias. Estas serían la fabricación de otro tipo de cubertería adaptada (tenedores, cucharas) donde también existen necesidades por cubrir, o siguiendo por el camino del mango del cuchillo adaptado, se podría explorar la posibilidad de conseguir la funcionalidad, mediante la fabricación del objeto de una sola pieza, evitando así clipajes y desclipajes; la adaptación a diferentes tipos de cuchillos y sus mangos, o personalización de la zona de agarre para diferentes tipos y tamaños de manos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://es.digitaltrends.com/fotografia/historia-de-la-impresion-en-3d/>
- [2] <http://diwo.bq.com/impresion-3d-historia/>
- [3] <https://impresiontresde.com/cosas-impresion-3d-medica-puede-hacer-ya/>
- [4] <https://es.quora.com/C%C3%B3mo-funcionan-las-impresoras-3D-que-utilizan-luz-C%C3%B3mo-la-usan>
- [5] <https://formizable.com/como-funciona-la-estereolitografia/>
- [6] <http://es.3dilla.com/impresora-3d/selective-laser-sintering/>
- [7] <https://tridimx.com/blog/todos-los-detalles-sobre-la-tecnologia-de-impresion-3d-fdm/>
- [8] http://www.creatu3d.com/p/calidad-de-impresion_74.html
- [9] <http://www.dima3d.com/consejos-de-impresion-en-3d-con-tecnologia-fff-1a-parte>
- [10] https://filament2print.com/es/blog/9_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html
- [11] <https://latrebejeria.blogspot.com/2019/04/aspectos-basicos-de-la-impresion-3d-fdm.html>
- [12] <https://www.impresoras3d.com/guia-rapida-de-terminos-basicos-en-impresion-3d/>
- [13] <https://www.crear4d.com/relleno-impresion-3d/>
- [14] Ian Gibson, David Rosen, Bren Stucker; Additive Manufacturing Technologies.
- [15] <https://ultimaker.com/>
- [16] <https://www.ortoweb.com/equipamiento-hogar/ayudas-tecnicas-para-el-hogar-1/cubiertos-adaptados>
- <https://www.leon-3d./guia-de-esolucion-de-problemas/>
- <https://todo-3d.com/>
- <https://filament2print.com/es>
- Kai Chua C, Fai Leong K; 3D printing and additive manufacturing; Londres; 2017.
- Redwood B, Schöffner F, Garret B; The 3d Printing Handbook, technologies, design and applications; Amsterdam; 2017.

ANEXOS

Anexo 1. Características Ultimaker Extended 3

Tecnología de impresión	FDM (Fused Deposition Modeling)	
Cabezal de impresión	Cabezal de doble extrusión con autonivelado y printcores intercambiables	
Volumen máximo de impresión	Ultimaker 3: Boquilla izquierda: 215x215x200 mm Boquilla derecha: 215x215x200 mm Dos boquillas: 197x215x200 mm	Ultimaker 3 extended Boquilla izquierda: 215x215x300 mm Boquilla derecha: 215x215x300 mm Dos boquillas: 197x215x300 mm
Diámetro de filamento	2.85 mm	
Resolución de capa	0.25 mm: 150-60 micras 0.4 mm: 200-20 micras 0.8 mm: 600-20 micras	
Precisión XYZ	12.5, 12.5, 2.5 micras	
Velocidad de movimiento del cabezal	30-300 mm/s	
Velocidad de extrusión	<24mm ³ /s	
Plato de impresión	Plato de cristal calentado	
Temperatura del plato de impresión	20-100 °C	
Nivelado del plato de impresión	Nivelado activo	
Materiales aceptados	Nylon, PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, Breakaway	
Diámetro de boquilla	0.2, 0.4, 0.8 mm	
Temperatura de boquilla	180-280 °C	
Tiempo de calentamiento de la boquilla	<2 min	
Tiempo de calentamiento del plato de impresión	<4 min (20 → 60 °C)	

Sonido durante la impresión	50 dB	
Reconocimiento de material	Tecnología de escáner NFC	
Conectividad	Wi-fi, LAN, puerto USB	
Monitorización	Cámara en vivo	
DIMENSIONES FÍSICAS		
Dimensiones	342x380x389 mm	342x380x489 mm
Dimensiones con accesorios	342x505x588 mm	342x505x688 mm
Peso neto	10.6 Kg	11.3 Kg
Peso de envío	15.5 Kg	16.8 Kg
Dimensiones de la caja de envío	390x400x565 mm	390x400x680 mm
REQUISITOS DE POTENCIA		
Entrada	100-240 V 4ª, 50-60 Hz 221W max	
Salida	24V DC, 9.2ª	
CONDICIONES AMBIENTALES		
Condiciones ambientales de temperatura	15-32 °C, 10-90% RH sin condensación Ver las especificaciones de los materiales para condiciones optimas	
Temperatura de no operación	0-32°C	
SOFTWARE		
Software soportado	CURA	
Sistemas operativos aceptados	MacOS, Windows, Linux	
Tipos de archivo	STL, OBJ, X3D y 3MF G y GCODE BMP, GIF, JPG y PNG	

ANEXO 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS FILAMENTOS

PLA

Características mecánicas	Valor típico	Método de ensayo
Modulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa	ISO 527
Alargamiento a la deformación	3,3 %	ISO 527
Alargamiento a la rotura	5,2 %	ISO 527
Resistencia a la flexión	103,0 MPa	ISO 178
Modulo de flexión	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod	5,1 KJ/m ²	ISO 180
Dureza	83 (Shore D)	Durómetro

Características térmicas	Valor típico	Método de ensayo
Índice de fluidez (MFR)	6,09 g/10 min	ISO 1133
Transición vítrea	60 °C	ISO 306
Temperatura de fusión	145-160 °C	ISO 296
Temperatura de impresión	200-220 °C	Dato
Temperatura placa de impresión	60 °C	Dato

ABS

Características mecánicas	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	1681,5 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la deformación	39,0 Mpa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la rotura	33,9 Mpa	ISO 527
Alargamiento a la deformación	3,5 %	ISO 527
Alargamiento a la rotura	4,8 %	ISO 527
Resistencia a la flexión	70,5 Mpa	ISO 178
Modulo de flexión	2070,0 Mpa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod	10,5 KJ/m2	ISO 180
Dureza	76 (Shore D)	Durómetro

Características térmicas	Valor típico	Método de ensayo
Índice de fluidez (MFR)	41 g/10 min	ISO 1133
Transición vítrea	97 °C	ISO 306
Temperatura de fusión	225-245 °C	ISO 296
Temperatura de impresión	230-260 °C	Dato
Temperatura placa de impresión	80 °C	Dato

PVA

Características térmicas	Valor típico	Método de ensayo
Índice de fluidez (MFR)	17-21 g/10 min	ISO 1133
Transición vítrea	60,2°C	ISO 306
Temperatura de fusión	163°C	ISO 11357
Temperatura de impresión	190-220°C	Dato
Temperatura placa de impresión	60°C	Dato

PETG

Características mecánicas	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	2200 MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la deformación	53 Mpa	ISO 527
Esfuerzo de tracción a la rotura	26 Mpa	ISO 527
Alargamiento a la deformación	4,00%	ISO 527
Alargamiento a la rotura	35,00%	ISO 527
Resistencia a la flexión	79 Mpa	ISO 178
Modulo de flexión	2070,0 Mpa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod	6,5 KJ/m2	ISO 180
Dureza	115 (Shore D)	Durómetro