



Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

Análisis del alcance de aplicación  
(resolución-dimensiones-velocidad) de un robot de uso  
industrial para impresión 3D

Autor:  
Carlos Rubio Sanz

Directores:  
David Fraiz Cosano, José Porras Galán

Firma del autor: \_\_\_\_\_

Firma de los directores: \_\_\_\_\_

Madrid, julio 2020



# **ANÁLISIS DEL ALCANCE DE APLICACIÓN (RESOLUCIÓN.DIMENSIONES-VELOCIDAD) DE UN ROBOT DE USO INDUSTRIAL PARA IMPRESIÓN 3D**

**Autor: Rubio Sanz, Carlos.**

Director: Fraiz Cosano, David.

Director: Porras Galán, José.

Entidad Colaboradora: ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### **Introducción:**

En los últimos años, la robótica y la Fabricación Aditiva no han dejado de innovar. Surgen estructuras complejas con gran libertad de movimiento, a la par que los procesos de fabricación se abaratan y llegan al público en general. Este proyecto busca analizar la validez de la solución presentada por Dobot: un brazo robot de 3 G.D.L. con un cabezal apto para extrusión de material (impresión FDM) [1]. Para ello, será necesario realizar una serie de análisis de cara a comparar sus capacidades frente a otras impresoras de estructura tradicional o cartesiana. De cara a facilitar unas condiciones óptimas para la comparativa, se construirá una plataforma de trabajo que otorgue la estabilidad suficiente. Igualmente, será necesario entender los avances y las investigaciones en curso dentro de ambas áreas, así como los resultados que ha proporcionado la combinación de ambas áreas.

### **Metodología:**

Primero, será necesario construir un espacio de trabajo apto para que el brazo robot trabaje en unas condiciones controladas. Para ello, se escogerá un carrito según catálogo comercial adaptado a las dimensiones del espacio de trabajo y con capacidad de almacenamiento de otros recursos que puedan ser de interés. El carrito escogido puede consultarse en los Anexos de la memoria. Con este espacio preparado, se realizarán una serie de ensayos divididos en diferentes áreas. Estas son, mecánicos, resolución o característica fabricable, dimensionales, velocidad y repetibilidad. Cada categoría empleará los especímenes asignados en el capítulo de ensayos, siendo estos probetas para ensayo de tracción, tests geométricos de calibración y cubos XYZ.



Figura 1: Instalación del espacio de trabajo en la bandeja superior de carrito escogido

### **Resultados:**

Sobre los ensayos realizados, se realizarán distintos análisis de cara a determinar la validez y calidad del brazo robot Dobot. Los ensayos de velocidad y resolución o característica mínima fabricable podrán evaluarse visualmente en función del grado de aparición de defectos como el warping o ghosting. En cuanto a las áreas de mecánicos, dimensionales y repetibilidad, se escogerá la mediana de los valores obtenidos en cada tanda de ensayos, consistiendo cada una en un total de siete especímenes. En la parte mecánica se estudiará la relación de la tensión de rotura, elongación de rotura y módulo de Young de las probetas fabricadas por Dobot frente a probetas fabricadas por el resto de impresoras. Igualmente, se analizará el efecto de la altura de capa y del porcentaje de relleno en distintas probetas, buscando la existencia de cualquier relación lineal o no lineal. Los ensayos dimensionales estudiarán



la precisión y exactitud de fabricación del robot, siendo posible realizar una comparativa con las otras máquinas disponibles en el laboratorio. Por último, los ensayos de repetibilidad estudiarán si existen diferencias en las propiedades mecánicas de las probetas en función de la posición escogida en la cama de impresión para su fabricación.

#### **Conclusiones:**

Si bien no ha sido posible realizar los ensayos deseados debido al cierre de las instalaciones por la situación especial vivida, se ha querido aprovechar el apartado de conclusiones para guiar futuros trabajos relacionados con este proyecto. De esta forma, se detallan distintos análisis recomendables para llevar a cabo, un análisis del grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente.

### **ANALYSIS OF THE APPLICATIONS (RESOLUTION - DIMENSIONS - SPEED) OF AN INDUSTRIAL ROBOT FOR 3D MANUFACTURING**

#### **Introduction:**

Over recent years, robotics and Additive Manufacturing have not stopped innovating. Complex structures with higher degrees of freedom are made, at the same time that manufacturing processes get less expensive and become available to all kinds of users. This project aims to analyse the product created by Dobot: a robotic arm of 3 D.O.F. with an extruder head ready for 3D printing (FDM) [1]. In order to achieve this, it is needed to conduct a series of analysis and comparatives with 3D printers made over traditional structures (cartesian or delta). A build platform needs to be built in order to obtain valid results for the comparative. This platform will provide stability and a constant work frame. Last but not least, it is necessary to fully understand the developments and research that is going on both areas, as well as the results obtained when combining both.

#### **Methodology:**

It is needed to provide an stable-conditions work area for the robot arm. To achieve this, a commercial platform will be chosen according to the workspace dimensions, with special attention to the possibility of including a storage space on itself. The chosen platform can be consulted in the final Annex. Once this space is set up, a series of different experiments will be conducted. These experiments are divided in different areas: mechanical, resolution or minimum feasible geometry, dimensional, speed and repeatability. Each area will use the different test objects described in the experiments section. These are, traction probes, standard geometry tests for 3D printing and XYZ cubes.

**Results:**

From the data obtained in the different experiments, a series of different analysis can be performed. This analysis aim to determine if any significant difference exists between the Dobot robot arm and conventional 3D printing machines. The speed and minimum feasible geometry can be evaluated visually, following the degree of appereance of typical defects like ghosting or warping. For the mechanical, dimensional and repeatability areas, the focus will be set on the median value obtained for each set of probes (seven each). A compàrative between the values obtained for yield stregh, Young Modulus and final length, will be done for the Dobot arm and other conventional 3D printers. In addition, this project will analyse the effect of the layer height and the infill percentage on the mechanical properties of the different test probes. The analysis will look for any kind of linear or non linear relation in the obtained results. The dimensional tests will determine the precission and accuracy of the Dobot arm, allowing to compare the results with other machines. Last, repeatability tests will determine if any difference exist on the mechanical properties of different objects printed over different points of the 3D printing bed.



Figura 2: Installation of the work space with the chosen platform

**Conclusions:**

Due to the closure of the laboratories over the pandemic situation, it has not been possible to manufacture and carry on any of the planned tests. Nevertheless, this project aims to set up a reference guide for any future works in this area, and so it provides a view of different possible options for the results analysis. This section will also be used to determine which objectives have been met despite the difficult situation.

A mi familia, amigos, profesores y 3Dmaniacos

# Índice general

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción y planteamiento del proyecto</b>              | <b>1</b>  |
| <b>2. Estado del arte</b>                                        | <b>5</b>  |
| 2.1. Fabricación Aditiva . . . . .                               | 5         |
| 2.1.1. Breve Introducción . . . . .                              | 5         |
| 2.1.2. Historia y desarrollo . . . . .                           | 5         |
| 2.1.3. Preparación y procesado . . . . .                         | 7         |
| 2.1.4. Clasificación . . . . .                                   | 10        |
| 2.2. Defectos típicos en fabricación FDM . . . . .               | 30        |
| 2.2.1. Warping . . . . .                                         | 31        |
| 2.2.2. Ghosting . . . . .                                        | 33        |
| 2.2.3. Calibración . . . . .                                     | 34        |
| 2.2.4. Característica mínima fabricable . . . . .                | 34        |
| 2.3. Robótica . . . . .                                          | 36        |
| 2.3.1. Historia . . . . .                                        | 36        |
| 2.3.2. Clasificación . . . . .                                   | 41        |
| 2.4. Fabricación no planar o multiplano . . . . .                | 44        |
| 2.4.1. Sistemas de 3 G.D.L. . . . .                              | 45        |
| 2.4.2. Sistemas de más de 3 G.D.L. . . . .                       | 46        |
| <b>3. Preparación</b>                                            | <b>49</b> |
| 3.1. Evaluación de opciones . . . . .                            | 49        |
| 3.2. Distribución del espacio de trabajo . . . . .               | 50        |
| 3.3. Instalación y primeros ensayos . . . . .                    | 50        |
| <b>4. Ensayos</b>                                                | <b>55</b> |
| 4.1. Mecánicos . . . . .                                         | 58        |
| 4.1.1. Comparativa configuración fija . . . . .                  | 59        |
| 4.1.2. Comparativa configuración variable (sólo Dobot) . . . . . | 59        |
| 4.2. Resolución . . . . .                                        | 59        |
| 4.3. Dimensionales . . . . .                                     | 60        |

|           |                                          |            |
|-----------|------------------------------------------|------------|
| 4.3.1.    | Comparativa configuración fija . . . . . | 60         |
| 4.3.2.    | Comparativa <i>slicers</i> . . . . .     | 60         |
| 4.4.      | Velocidad . . . . .                      | 60         |
| 4.5.      | Repetibilidad . . . . .                  | 61         |
| 4.5.1.    | Comparativa dimensional . . . . .        | 61         |
| 4.5.2.    | Comparativa mecánica . . . . .           | 61         |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones</b>                      | <b>63</b>  |
| <b>6.</b> | <b>Anexos</b>                            | <b>67</b>  |
| 6.1.      | Integración de los ODS . . . . .         | 67         |
| 6.2.      | Planos y documentos de interés . . . . . | 69         |
|           | <b>Bibliografía</b>                      | <b>111</b> |

# Índice de figuras

|       |                                                                                                                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Instalación del espacio de trabajo en la bandeja superior de carrito escogido . . . . .                                                                                         | IV |
| 2.    | Installation of the work space with the chosen platform . . . . .                                                                                                               | VI |
| 2.1.  | Primeros pasos de la fabricación SLA, Hideo Kodama (1981). Cortesía de TCT Magazine . . . . .                                                                                   | 6  |
| 2.2.  | Esquema de las tecnologías que se tratan en el estado del arte. Elaboración propia . . . . .                                                                                    | 7  |
| 2.3.  | Tolerancias de conversión. Elaboración propia, originales de Mariano Jiménez y David Fraiz . . . . .                                                                            | 8  |
| 2.4.  | Proceso desde el formato CAD al formato GCODE junto a la comparativa del parámetro de altura de capa. Elaboración propia, originales de Mariano Jiménez y David Fraiz . . . . . | 9  |
| 2.5.  | Impresora Mendel. Cortesía de RepRap . . . . .                                                                                                                                  | 10 |
| 2.6.  | Fabricación FDM, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide . . . . .                                                                                           | 11 |
| 2.7.  | Ejemplo de anisotropía en FDM. Cortesía de Factoryza . . . . .                                                                                                                  | 12 |
| 2.8.  | Propiedades mecánicas según material, para FDM. Cortesía de Janne Hämäläinen . . . . .                                                                                          | 13 |
| 2.9.  | De izquierda a derecha: soporte sólido, soporte soluble, soporte mixto. Cortesía de Prusa Research . . . . .                                                                    | 14 |
| 2.10. | Fabricación LOM, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide . . . . .                                                                                           | 15 |
| 2.11. | Charles «Chuck» Hull. Cortesía de 3DSystems . . . . .                                                                                                                           | 16 |
| 2.12. | Fabricación SLA, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide . . . . .                                                                                           | 17 |
| 2.13. | Cubeta y brazo, Formlabs 2. Cortesía de Formlabs . . . . .                                                                                                                      | 18 |
| 2.14. | Comparativa en detalle, FDM y SLA. Cortesía de Formlabs . . . . .                                                                                                               | 19 |
| 2.15. | Fabricación DLP, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide . . . . .                                                                                           | 20 |
| 2.16. | Comparativa de calidad entre SLA, DLP y LFS. Cortesía de formlabs . . . . .                                                                                                     | 21 |

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.17. Captura del proceso MSLA, con la matriz de LEDs en la parte inferior. Cortesía de Structo 3D . . . . .                                                         | 22 |
| 2.18. Ejemplo de fabricación DOD para joyería. Cortesía de 3dlink . . . . .                                                                                          | 23 |
| 2.19. Fabricación SLS, SLM y DMLS, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide . . . . .                                                              | 24 |
| 2.20. Fabricación MJF, esquema del proceso. Cortesía de HP . . . . .                                                                                                 | 27 |
| 2.21. Ejemplo de fabricación EBM (Ti-6Al-4V). Cortesía de Laurence Murry y col. [31] . . . . .                                                                       | 28 |
| 2.22. Pieza con warping. Cortesía de Simplify 3D . . . . .                                                                                                           | 31 |
| 2.23. A la izquierda, adición de líneas de contorno adicionales. A la derecha, geometría adicional en un punto de riesgo. Imágenes propias . . . . .                 | 32 |
| 2.24. Ejemplo de ghosting. Cortesía de Simplify 3D . . . . .                                                                                                         | 33 |
| 2.25. Presencia de huecos en las letras, especialmente visibles en las tres primeras. Imagen propia . . . . .                                                        | 35 |
| 2.26. Unimate #001. Cortesía de Process Technology [40] . . . . .                                                                                                    | 37 |
| 2.27. Evolución de las distintas versiones de ASIMO. Cortesía del Daily Mail . . . . .                                                                               | 38 |
| 2.28. De izquierda a derecha: proyectos Atlas y AlphaDog. Cortesía de Boston Dynamics . . . . .                                                                      | 39 |
| 2.29. Evolución del espacio de trabajo compartido a medida que aumenta el HRC. Cortesía de Mike Beaupre, KUKA Robotics . . . . .                                     | 40 |
| 2.30. Robot KUKA compartiendo espacio de trabajo con operaria. Cortesía de KUKA Robotics . . . . .                                                                   | 41 |
| 2.31. Ejemplos de articulaciones y G.D.L. proporcionados. Redondeados en azul, prismática y de revolución. Cortesía del Dpto. de Ingeniería Mecánica, ICAI . . . . . | 42 |
| 2.32. Comparativa del comportamiento entre AGVs y AMRs. Cortesía de orientalmotor . . . . .                                                                          | 43 |
| 2.33. Ejemplo de descomposición en subgeometrías. Cortesía de Chenming Wu et al. . . . .                                                                             | 44 |
| 2.34. Visualización de la interferencia entre la boquilla del extrusor y la pieza. Cortesía de Hackaday . . . . .                                                    | 45 |
| 2.35. Ejemplo de perfil aerodinámico fabricado de forma no planar. Cortesía de Hackaday . . . . .                                                                    | 46 |
| 2.36. Ejemplo de fabricación FDM en 5 G.D.L.. Cortesía de Makezine . . . . .                                                                                         | 47 |
| 3.1. Máquinas FDM del laboratorio de Fabricación Aditiva. Imagen propia . . . . .                                                                                    | 49 |
| 3.2. Esquema general de la distribución. Medidas y mayor detalle en Anexo . . . . .                                                                                  | 51 |
| 3.3. Elementos necesarios para la construcción del espacio de trabajo. Imagen propia . . . . .                                                                       | 51 |



|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4. Carrito terminado, siguiendo la distribución indicada en el esquema anterior . . . . .                                                                             | 53 |
| 4.1. Dimensiones de las probetas para el ensayo de rotura. Norma ISO 527-2 . . . . .                                                                                    | 57 |
| 4.2. Orientación de las capas para el proceso de fabricación (1A). Norma UNE 11605 . . . . .                                                                            | 58 |
| 4.3. A la izquierda, cubo XYZ para el ensayo de velocidad. A la derecha, geometría de muestra para el ensayo de resolución. Archivos obtenidos de Thingiverse . . . . . | 58 |
| 6.1. Lista de los ODS. Cortesía de la ONU . . . . .                                                                                                                     | 68 |



# Capítulo 1

## Introducción y planteamiento del proyecto

Este proyecto surge a raíz del fuerte desarrollo que han experimentado en la última década en las áreas de la robótica y de la Fabricación Aditiva. Por la parte de la robótica, desde sus orígenes con los primeros manipuladores industriales hasta el día de hoy, con sistemas colaborativos y elevados G.D.L., la complejidad alcanzada permite su integración en una gran variedad de entornos y aplicaciones. Dentro de estos entornos, cada vez se posibilita más la colaboración entre robot y operario, mejorando la eficiencia y optimizando recursos en multitud de casos. Por la parte de la impresión 3D, la liberación de patentes en FDM y recientemente en SLA, han permitido un abaratamiento muy acelerado tanto de las máquinas como de los materiales, haciendo estas técnicas accesibles al público general.

Sin embargo, estas dos áreas se han mantenido por lo general sin mucha conexión. Más allá de las estructuras convencionales en configuración delta o cartesiana, la mezcla entre robótica e impresión 3D no ha evolucionado significativamente en los últimos años.

Para entender los avances que se han producido recientemente, primero es necesario entender que lo que se conoce como impresión 3D no hace un uso real y continuo de los 3 ejes. El objeto se descompone en capas, contenidas en una misma altura. En cada capa se realizan los desplazamientos respecto a X e Y, reservando el cambio en Z para cuando sea necesario pasar a la siguiente capa. Es por esto que a veces se habla de impresión 2.5D o fabricación planar, ya que nunca se emplean al mismo tiempo los 3 ejes.

El concepto de fabricación no planar surge inicialmente como un método para evitar un defecto siempre asociado a la fabricación por capas: el efecto escalera.

Este efecto escalera se produce debido a que la descomposición por capas es incapaz de seguir a la perfección contornos curvos, quedando huecos o escaleras entre la geometría real y la fabricada. Este efecto puede ser especialmente perjudicial en aplicaciones donde el acabado superficial sea fundamental, como puede ser en aerodinámica o en la fabricación de moldes.

La fabricación no planar propone tratar las capas próximas a la superficie de la pieza como elementos de altura variable, fabricados a lo largo de los 3 ejes de forma continua. Con esto, se reduce significativamente el efecto escalera, pero no es aplicable a todas las geometrías. El principal limitante se encuentra en las colisiones que se producen entre el cabezal de extrusión y el objeto en sí. Las estructuras cartesianas y delta tradicionales son insuficientes para este nuevo planteamiento, ya que son incapaces de ajustar la posición de la boquilla extrusora respecto a la pieza.

Por suerte, los avances en robótica, con manipuladores de hasta 6 G.D.L., han demostrado ser la herramienta perfecta para volver a complementar a la impresión 3D. Los manipuladores de 5 G.D.L. ya ofrecen la libertad suficiente de movimiento para hacer frente a la mayoría de geometrías. Es en este punto en el que se produce el más reciente de los avances en la optimización de la fabricación FDM.

Este avance hace frente a uno de los mayores limitantes de la fabricación por extrusión de material. Estos son los voladizos, que necesariamente conllevan el empleo de material de soporte. Este material puede ser soluble en sistemas con doble cámara de extrusión, pero lo más común es que se trate del mismo material de modelo. La eliminación de este material suele dejar marcas sobre la pieza, perjudicando a su acabado general y requiriendo un postprocesado mayor para corregirlos.

Con esta libertad de movimiento para el extrusor, se ha desarrollado recientemente la descomposición multiplanar de los objetos previamente a su fabricación. El objeto se descompone en subgeometrías, que el extrusor fabricará perpendicularmente a cada uno de los planos de referencia. El resultado final es una pieza obtenida sin soportes, lista para su uso.

Estas aplicaciones son muy recientes, y requieren un conocimiento previo de las tecnologías empleadas. Por ello, este proyecto plantea como paso inicial el análisis de la solución aportada por Dobot. Se trata de un manipulador sencillo de 3 G.D.L., con posibilidad de emplear un cabezal de extrusión. El análisis de este robot, con su comparativa frente a estructuras cartesianas, permitirá sentar el conocimiento y manejo necesarios de cara a un futuro análisis en manipuladores de 5 o más G.D.L..

---

Los objetivos del proyecto, primarios y secundarios, son los siguientes:

**Objetivos principales:**

- Fabricación de un banco de trabajo que permita la continuidad y comparación de los resultados entre ensayos.
- Analizar las capacidades del brazo robot en cuanto a resolución, dimensiones y velocidad.
- Comparar las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante esta técnica frente a las de una estructura cartesiana.
- Analizar la repetibilidad del brazo robot a lo largo de distintos puntos de un mismo plano.

**Objetivos secundarios:**

- Analizar la viabilidad de realizar los mismos ensayos en un robot de 5 o 6 ejes.
- Analizar el uso de la impresión continua en 3 ejes (fabricación no planar).
- Implantación de una RaspberryPi que permita el uso del robot sin necesidad de una conexión permanente a un PC.



# Capítulo 2

## Estado del arte

### 2.1. Fabricación Aditiva

#### 2.1.1. Breve Introducción

La Fabricación Aditiva, popularmente conocida como Impresión 3D, tiene sus inicios en la década de 1980 [2]. Los primeros objetos creados mediante esta técnica de fabricación se basaron en la tecnología SLA (estereolitografía), que consiste en el curado de una resina mediante la incidencia de un haz láser. En estos 40 años, los avances en multitud de tecnologías de Fabricación Aditiva han sido muy significativos, y aun hoy en día hay abiertos multitud de campos de investigación [3]. Como ejemplos, en el campo de la salud cabe destacar la extrusión de tejidos vivos [4] y la fabricación estructuras de soporte o *scaffolds* en apoyo a la regeneración ósea [5]. En el campo de la fabricación, la creación de sistemas híbridos (aditivo y sustractivo) supone un paso adelante en cuanto a flexibilidad y reducción de costes en la línea de producción [6].

El estado del arte cubrirá estos avances a través de las principales tecnologías que se han desarrollado, su clasificación, propiedades y limitaciones para cada caso.

#### 2.1.2. Historia y desarrollo

Como se ha mencionado en la breve introducción, la impresión 3D cuenta con sus inicios en la década de 1980 [2]. Por aquel entonces, la industria de la fabricación ya contaba con técnicas sustractivas (como pueden ser torneado y fresado), de inyección, deformación o de forja entre muchas otras. Pero en ningún caso se planteaba la fabricación mediante adición de material de forma automatizada.

El primer enfoque se basó en la estereolitografía (SLA). Esta técnica consiste en el endurecimiento de polímeros fotosensibles mediante exposición a luz ultravioleta. La investigación llevada a cabo por Hideo Kodama en 1981 [7] consiguió los primeros resultados satisfactorios de los que hoy en día se conoce como Fabricación Aditiva. En esta primera etapa, la denominación más correcta es la de Prototipado Rápido. El objetivo era la materialización de conceptos abstractos e ideas de cara al diseño y fabricación de una pieza final mediante técnicas más tradicionales. El abanico de materiales disponibles era reducido, consistiendo en su mayoría de polímeros, cerámicos y algunos metales. [8]

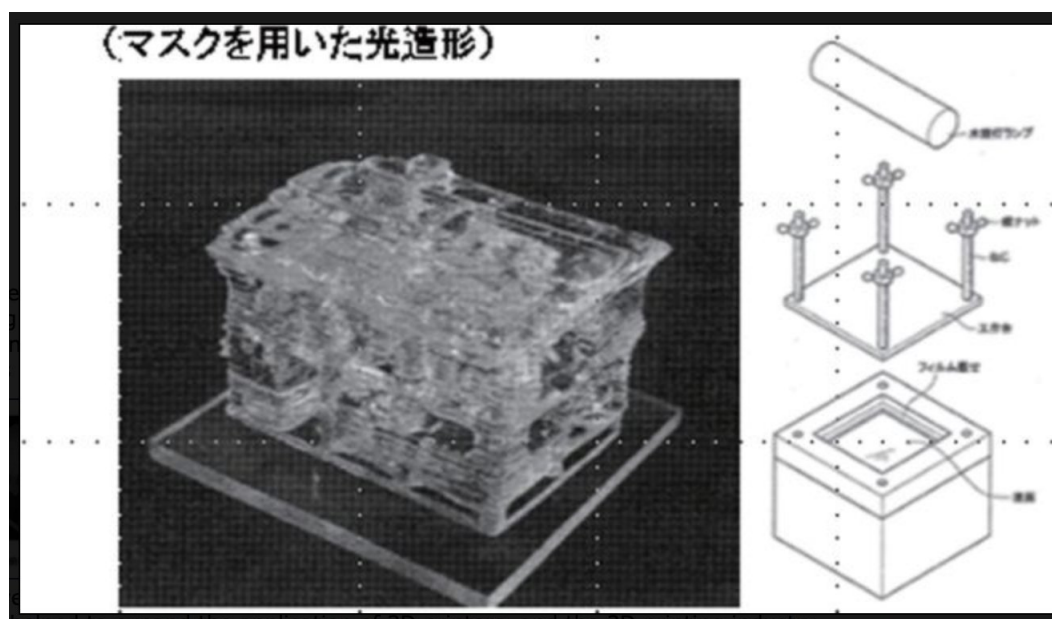


Figura 2.1: Primeros pasos de la fabricación SLA, Hideo Kodama (1981). Cortesía de TCT Magazine

El siguiente paso en su evolución llevó a lo que se conoce como *Rapid Tooling*. En esta etapa, la Fabricación Aditiva se emplea como complemento a la fabricación tradicional mediante técnicas como son la inyección de material, moldeo, soplado o termoconformado. [9]

Finalmente, y en especial a lo largo de esta última década, la liberalización de patentes ha permitido un crecimiento acelerado de las distintas técnicas. En este punto se procede a hablar de *Rapid Manufacturing*, puesto que el objetivo pasa a ser la creación de piezas completamente funcionales y listas para su uso. El rango de materiales se ha ampliado, llegando a permitir el uso de elementos biocompatibles así como de metales más avanzados. [10]



Para entender más a fondo las distintas técnicas que se agrupan bajo el término de Fabricación Aditiva, es necesario estudiarlas en el contexto del subgrupo al que pertenece cada una. Esta clasificación puede realizarse en función del material (plástico, cerámico, metálico), del principio empleado para su deposición (extrusión o haz de alta energía) o según el estado base del material (líquido, polvo, sólido/filamento). Se empleará esta última, ya que es la más común.

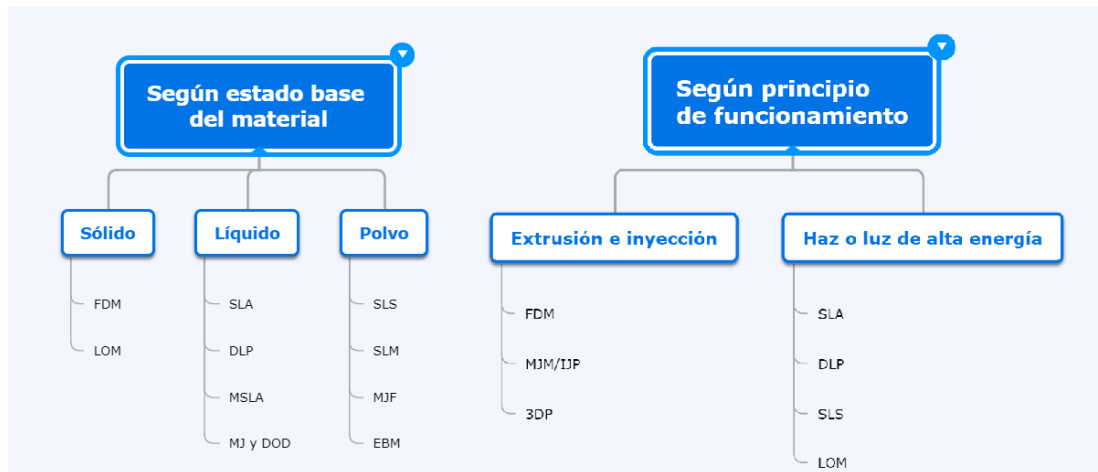


Figura 2.2: Esquema de las tecnologías que se tratan en el estado del arte. Elaboración propia

Igualmente, es necesario conocer el flujo de trabajo que existe desde el diseño CAD hasta el fichero .GCODE que lee la máquina de Fabricación Aditiva. Se verá esto en primer lugar, ya que se trata de un concepto común asociado a las distintas técnicas y tecnologías.

### 2.1.3. Preparación y procesado

La Fabricación Aditiva actual requiere contar con unos conocimientos mínimos de diseño en software CAD. Mediante estas herramientas, se crea una representación tridimensional de la geometría que se desea fabricar. Este objeto se exporta posteriormente a un formato de intercambio como puede ser el .STL (*STereoLit-hography*, formato estándar, aunque existen otras opciones como pueden ser los ficheros .STEP, *Standard for The Exchange of Product data*). El archivo .STL puede emplear formato ASCII y formato binario para almacenar la geometría. El primero es más detallado, lo cual supone un problema a medida que se trabaja con figuras más complejas. Para solucionarlo, el formato binario trata la información de manera optimizada, ahorrando espacio. En ambos casos es necesario prestar atención a los parámetros de tolerancia de conversión, o de lo contrario se corre el riesgo

de comprimir en exceso la forma original. Estos parámetros definen la desviación máxima admisible en el teselado de la pieza respecto a su original. Por una parte se fija una tolerancia de ángulo, que marca el ángulo máximo entre las normales de triángulos contiguos durante el proceso de subdivisión. Un ángulo pequeño, como puede ser  $3^\circ$ , implica un mayor número de subdivisiones y por tanto mayor detalle. A su vez se fija una tolerancia de cuerda, que marca la desviación máxima de la geometría simplificada respecto a cualquier curvatura presente. Cuanto mayor sea esta desviación respecto a la forma original, mayor será la compresión del archivo y menor el detalle. Todo esto se puede visualizar en la Figura 2.3.

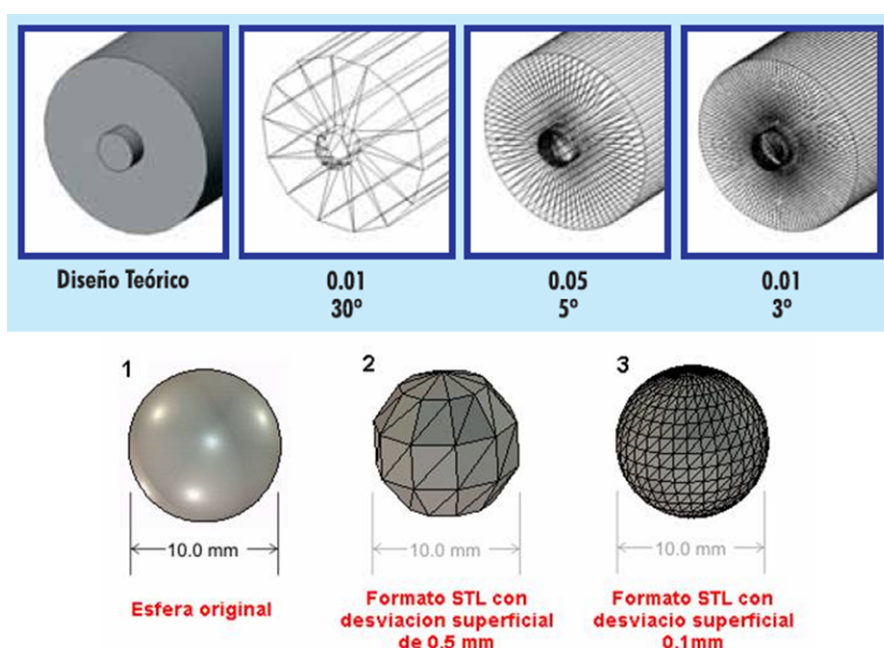


Figura 2.3: Tolerancias de conversión. Elaboración propia, originales de Mariano Jiménez y David Fraiz

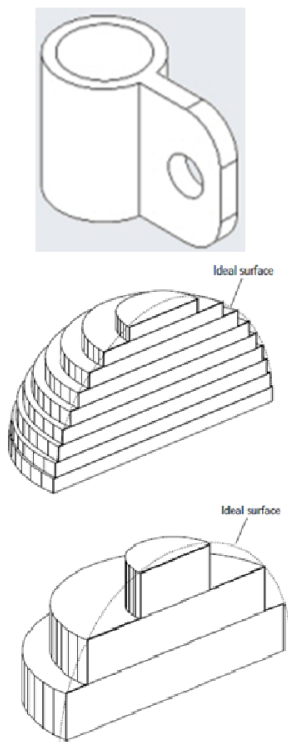
Si se tiene interés en las texturas (cuando se trabaja con tecnologías que permitan la adición de color), el tipo de archivo a emplear será .OBJ. Este tipo de fichero guarda la información de la textura a la par que la geometría [11].

Además de los mencionados hasta ahora, recientemente los formatos .AMF y .3MF están cogiendo fuerza. El primero, *Additive Manufacturing Format* permite añadir información relacionada con el color, posición dentro de un conjunto y metadatos adicionales. Es el formato empleado por ISO y ASTM para el intercambio de archivos 3D, según la norma ISO/ASTM 52915:2020. En cuanto al formato .3MF (*3D Manufacturing Format*), surge en colaboración de múltiples empresas del sec-

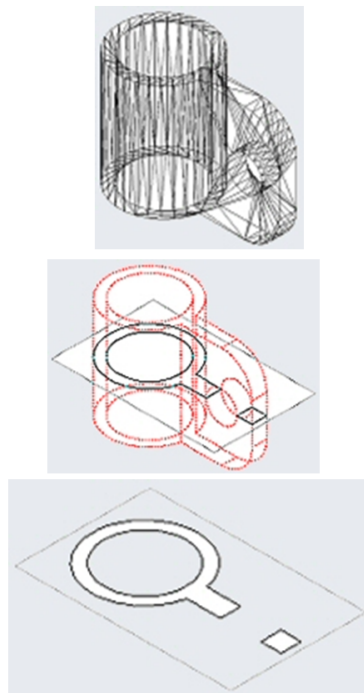
tor como HP, Stratasys, NetFabb y 3D Systems. Además, cuenta con el apoyo de Microsoft para su integración en plataformas. Este formato también recoge información adicional relacionada con el color y el material que se vayan a emplear [12].

El software de trabajo de la máquina tomará estos archivos como datos de entrada. A través de una descomposición por capas del objeto en función de la altura (*slicing* o fileteado), creará las instrucciones para el posicionamiento del cabezal de extrusión. Las capas se distribuirán de forma constante en función del parámetro de altura de capa, que define la variación de altura entre cada una de ellas. Una mayor altura de capa permite tiempos menores de fabricación, a coste de la calidad y la rugosidad superficial de la pieza, mientras que una altura menor aumenta los tiempos y la calidad final. Estas instrucciones son lenguaje máquina, conocido como .GCODE. Además de la posición, el .GCODE incluye más datos como la temperatura del cabezal o la velocidad con la que se realizan los desplazamientos.

### Modelo CAD 3D



### Modelo STL



### Cortes en Plano Z

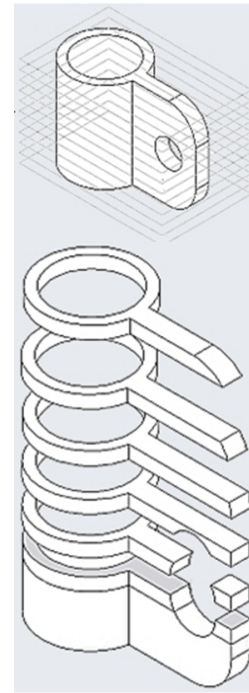


Figura 2.4: Proceso desde el formato CAD al formato GCODE junto a la comparativa del parámetro de altura de capa. Elaboración propia, originales de Mariano Jiménez y David Fraiz

Este software de preparación puede clasificarse según su propiedad. Por una parte, el software cerrado o propiedad del fabricante (como el que emplea Stratasys o 3D Systems), impide la comunicación con la máquina a través de cualquier software que no sea el oficial. Cada máquina requiere un software específico. El caso contrario, el software abierto, permite su uso con distintas máquinas de fabricantes diversos. En este sector se puede encontrar software gratuito como Cura o Slic3r, o de pago como Simplify3D.

### 2.1.4. Clasificación

#### Sólido

A día de hoy, es el subgrupo más popular a nivel del usuario particular. Puede emplear filamento o pellets (FDM), así como láminas (LOM).

Comenzando por **FDM**, su denominación procede del inglés, *Fused Deposition Modeling*, que se traduce como Deposición de Material Fundido. Patentada en 1992 por Scott Crump [13] (fundador de la compañía Stratasys), la sencillez de la técnica, junto al abaratamiento de los materiales disponibles y la eliminación posterior de la patente a comienzos de siglo, ha permitido un desarrollo muy intenso durante los últimos 20 años, pasando por los proyectos RepRap [14], y hasta hoy. A partir de la liberación de su patente, pasa a conocerse como **FFF** (*Fused Filament Fabrication*) para máquinas no pertenecientes a la marca Stratasys.

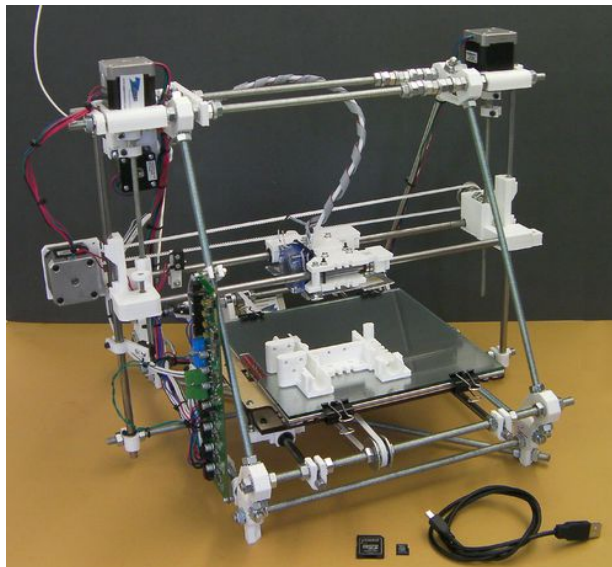


Figura 2.5: Impresora Mendel. Cortesía de RepRap

Si bien a día de hoy lo más correcto sería referirse a esta técnica como FFF, el término FDM se sigue empleando con bastante frecuencia. La maquinaria empleada presenta los costes más bajos entre todas las técnicas, sin entrar en conflicto con la calidad de las piezas producidas, que pueden ser completamente funcionales.

La técnica, basada en la extrusión de un polímero (PLA, ABS, PETG, ASA, HIPS, Nylon...) o de un cerámico (por ejemplo, cemento), realiza el aporte de material siguiendo el contorno de la pieza asignado para cada altura. La sucesión de capas da lugar a la geometría final, que puede emplearse directamente como pieza final y funcional.

En la siguiente Figura 2.6 se observan con claridad los distintos componentes de la tecnología. Empezando por la marca (1), se encuentra la cama caliente. Esta superficie, calefactada para ciertos materiales, es la base sobre la que se fabrica la pieza. Pasando a (2), se observa la bobina de materia base. En (3), se muestra el sistema de engranaje encargado de empujar y guiar el filamento hasta la cámara de fusión del material (4). Desde aquí, saliendo por el extrusor, se realiza la deposición de material. Como detalle, la marca (5) muestra una estructura de soporte, imprescindible frente a estructuras en voladizo. [15]

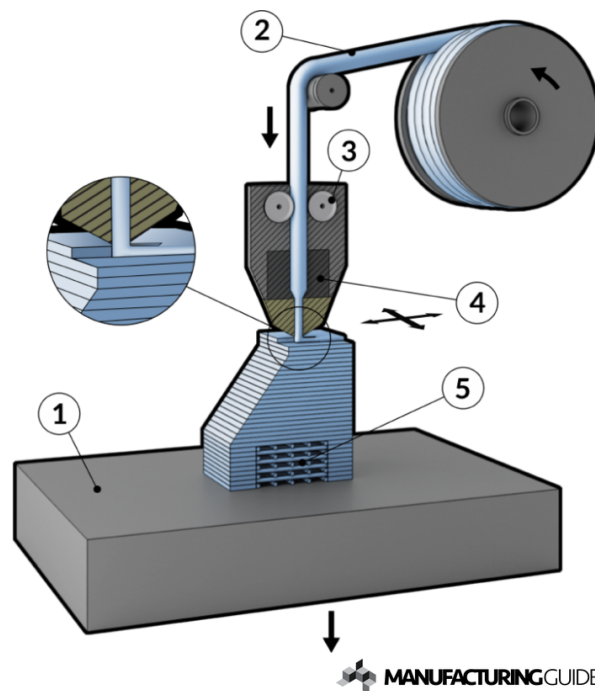


Figura 2.6: Fabricación FDM, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide

Si bien no es una técnica que logre las mejores resoluciones, es capaz de proporcionar valores muy aceptables en comparación con la inversión media que requiere. El parámetro que define esta resolución es, principalmente, la altura de capa. Puede proporcionar valores mínimos de alrededor de 0,06mm, siendo la altura más empleada 0,2mm. Esta resolución también depende del ancho de la boquilla de extrusión o *nozzle*. El valor más común es 0,4mm, pero existen boquillas de diámetros superiores (0,6mm, 0,8mm) así como inferiores (0,25mm). Dados los valores más habituales para ambos parámetros, el defecto más común en la tecnología FDM es el efecto escalera. Este efecto aparece por la naturaleza del proceso, que acumula capas de material horizontalmente en función de la altura de capa. Una menor altura de capa logra reducir este efecto, mientras que una altura mayor lo amplifica. Este escalonamiento de capas es más visible en superficies con cierta curvatura, ya que las capas no son capaces de adaptarse por completo al contorno. [16]

En cuanto a las propiedades mecánicas, la fabricación FDM, al igual que la mayoría de técnicas de Fabricación Aditiva, es una técnica anisotrópica. La anisotropía es un concepto que aplica a objetos cuyas propiedades mecánicas no son homogéneas en todas las direcciones. Es una propiedad presente en mayor o menor medida en todas las técnicas de Fabricación Aditiva. Por ello, la resistencia de la pieza final en dirección paralela a las capas no será la misma que en dirección perpendicular. Los mejores valores se consiguen aplicando fuerzas paralelas a la orientación de las capas, ya que es el propio filamento el que soporta las tensiones aplicadas. Sin embargo, la aplicación de una fuerza perpendicular a las mismas implica que en este caso son las ligeras uniones entre capas (fusión parcial por efecto térmico) las que hacen frente a las cargas. Esto proporciona valores inferiores en cuanto a resistencia [17].

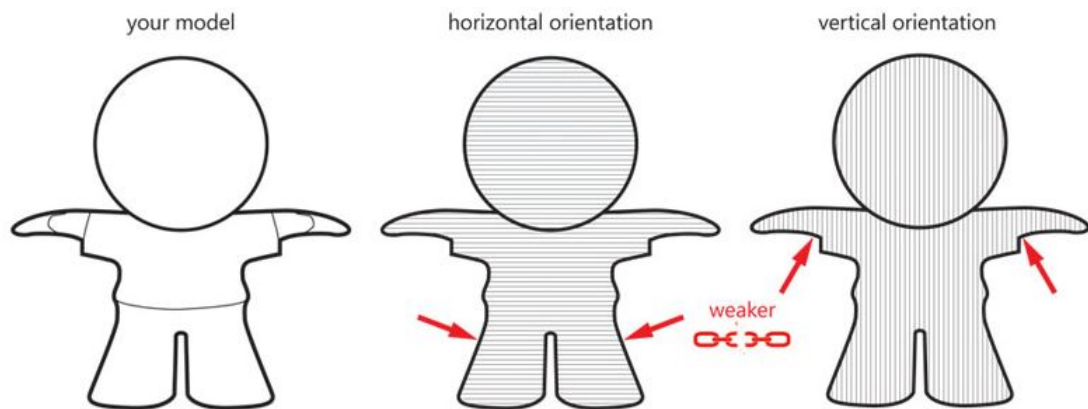


Figura 2.7: Ejemplo de anisotropía en FDM. Cortesía de Factoryza

Una de las principales ventajas de la fabricación FDM se encuentra en la naturaleza del proceso. Al tratarse de un proceso de extrusión y deposición de material, el fabricante puede configurar la densidad de la pieza a través del parámetro de relleno. Este se expresa en porcentaje, variando desde el 0 % (pieza completamente hueca) al 100 % (completamente sólida). Este ajuste permite ahorrar material y tiempo en piezas que no van a someterse a esfuerzos mecánicos especialmente exigentes. Además, la variedad de materiales permite escoger el más adecuado en función de las condiciones de trabajo a las que se vaya a someter la pieza final. Desde materiales de uso sencillo y propiedades mecánicas medias (PLA y ASA), materiales con alta resistencia al reblandecimiento térmico (Nylon), de alta durabilidad (ABS), aptos para el aislamiento eléctrico (HIPS) o incluso biocompatibles (variantes del ABS). [18]

| Material                              | Density at<br>20 °C<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Tensile<br>Strength<br>(MPa) | Elongation<br>(%) | Young's<br>Modulus<br>(MPa) |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| High Density Polyethylene (HDPE)      | 0.94-1                                      | 13-51                        | 250-1200          | 800                         |
| Polypropylene (PP)                    | 0.84-0.91                                   | 26-32                        | 10-140            | 1200-2000                   |
| Polyethylene Terephthalate (PET)      | 1.3-1.4                                     | 24-41.4                      | 100-250           | 2000-2700                   |
| Polycarbonate (PC)                    | 1.19-1.22                                   | 55-88                        | 66-140            | 2390-2600                   |
| Polylactic Acid (PLA)                 | 1.21-1.29                                   | 52-72                        | 4-6               | 3700-4100                   |
| Polyetherimide (PEI)                  | 1.27-1.31                                   | 53-124                       | 14-50             | 3000                        |
| Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) | 1.03-1.09                                   | 25-65                        | 8-20              | 2300                        |
| Polyamide-12 (PA-12)                  | 1.01-1.03                                   | 50-70                        | <50               | 460-1900                    |
| Polyamide-6.6 (PA-6.6)                | 1.05-1.14                                   | 70-88                        | 10-45             | 173-508                     |

Figura 2.8: Propiedades mecánicas según material, para FDM. Cortesía de Janne Hämäläinen

Por contra, la fabricación FDM cuenta con un problema común a otras técnicas, como puede ser la SLA. Este problema es la necesidad de material de soporte en estructuras o geometrías en voladizo, ya que de lo contrario, el material caería por gravedad o no quedaría correctamente unido al resto de la geometría. Este problema es objeto de varias investigaciones, que buscan solucionarlo mediante distintos enfoques.

Por una parte, la solución más sencilla y económica, puesto que no requiere modificaciones en el hardware de la máquina, es el empleo de materiales solubles en agua como estructura de soporte (PVA). Los aspectos negativos de esta solución se encuentran en la necesidad de contar con dos extrusores en la misma máquina (extrusor de modelo y extrusor de soporte, ya que son materiales con distinto punto



de fusión), así como en el precio superior del material. De cara a paliar este último aspecto negativo, se está planteando la fabricación mediante soportes mixtos, que emplean material de soporte soluble únicamente en las capas próximas al objeto que se está imprimiendo. [19]



Figura 2.9: De izquierda a derecha: soporte sólido, soporte soluble, soporte mixto. Cortesía de Prusa Research

La otra solución, que se verá en mayor profundidad en su sección correspondiente, es la fabricación no planar o multiplano. [20] Hasta ahora, la fabricación FDM ha consistido en la deposición capa a capa de material, capas que son paralelas entre sí y cada una situada en una altura concreta. La fabricación no planar o multiplano plantea el uso de distintos planos de referencia con distintas orientaciones. Este cambio en la orientación puede venir dado por la cama o superficie de impresión o por el propio extrusor. De esta forma, al subdividir la pieza en distintas orientaciones para su fabricación, es posible ahorrar cualquier estructura de soporte. [21]

La otra técnica que emplea material en estado sólido, se conoce como **LOM** (*Laminated Object Manufacturing*). En este caso el fundamento no es la extrusión de material como ocurre en FDM, si no la superposición de láminas de material base sobre las que se trabaja.

Para ello, la máquina cuenta con un rollo de material laminado (o en modelos más rudimentarios, láminas ya cortadas del material) que se desplaza sobre el área de trabajo hasta cubrir toda su superficie. Una vez en posición, el cabezal realiza las operaciones de corte y aplicación de pegamento o aglutinante sobre la lámina. El corte se realizará a lo largo del contorno de la geometría, y puede realizarse empleando una cuchilla o bien por corte láser. Posteriormente, se aplicará el adhesivo en el área interior de la misma. Una vez finalizada la operación, se cubre el área



de trabajo con una nueva capa de material, se comprime contra las capas previas si fuera necesario, y se repite el proceso. [13]

En la siguiente figura se pueden distinguir los elementos base. La plataforma de fabricación (1), sobre la que se deposita el material laminado en rollo (2). Posteriormente, se aplica el pegamento o aglutinante mediante el rodillo (3) o un cabezal independiente. El corte se realiza mediante cuchilla o láser (4), como es el caso. [15]

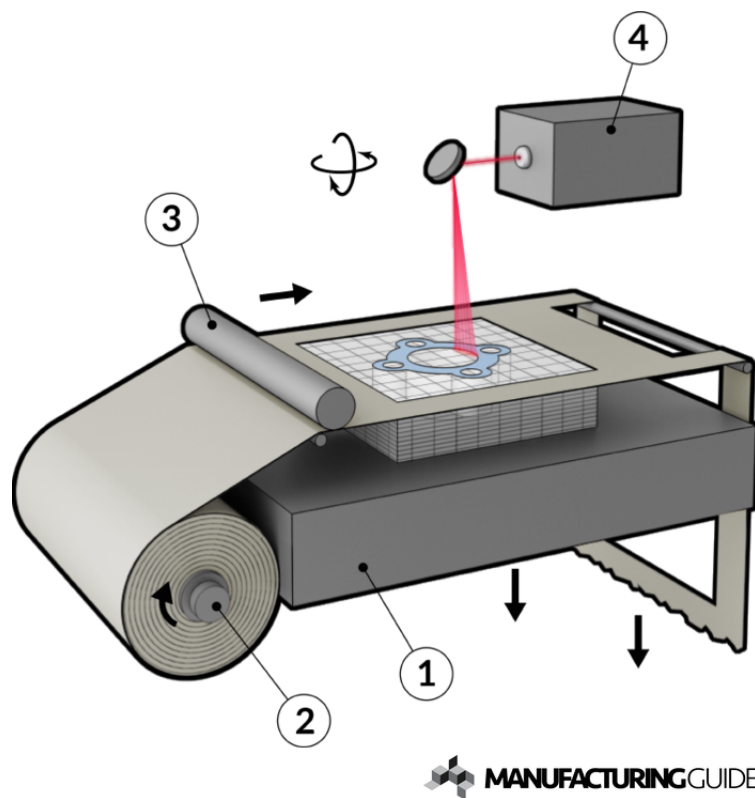


Figura 2.10: Fabricación LOM, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide

El material base puede ser un polímero o papel. En el primer caso, existe la opción de trabajar con compuestos transparentes o translúcidos, logrando piezas con las mismas características. Esto supone una ventaja frente al FDM, donde como mucho es posible conseguir piezas con cierto grado de translucidez, pero no completamente transparentes. El uso de papel como materia base también cuenta con ventajas. Su coste es significativamente bajo, e igualmente permite el uso de colorantes. Con todo esto, es posible obtener piezas a todo color, económicas y de resistencia aceptable.

Al igual que la tecnología FDM, la fabricación LOM es una técnica anisotrópica. Por tanto, los valores de resistencia mecánica serán distintos en función de la dirección de aplicación de la fuerza respecto a la orientación de las capas.

Dado que en este caso no se extruye material, si no que se depositan láminas, la resolución depende únicamente del grosor del material empleado. En el caso del papel, la altura de cada capa puede ser de 0,16mm a 0,52mm. El gran defecto de la fabricación LOM es la imposibilidad de realizar geometrías huecas y cerradas, ya que no habría forma de retirar el material situado en su interior.

### Líquido

Este grupo fue el más potente en los inicios de la Fabricación Aditiva. A día de hoy, sigue distinguiéndose gracias a la gran calidad y resolución que es capaz de alcanzar mediante diversas técnicas. Entre estas, se verá la fabricación SLA, DLP y MSLA. Hay otras variantes dentro de esta categoría, como podrían ser MJ (*Material Jetting*) y DOD (*Drop On Demand*), pero no se verán en detalle al no encontrarse tan extendidas.

Comenzando por la más conocida del grupo, la fabricación **SLA** (*Estereolitografía*) también se destaca por ser la primera técnica desarrollada dentro del ámbito de la Fabricación Aditiva. En base a las investigaciones realizadas por el Dr. Hideo Kodama en 1981 [7], fue Charles «Chuck» Hull quien patentó la tecnología en 1986.

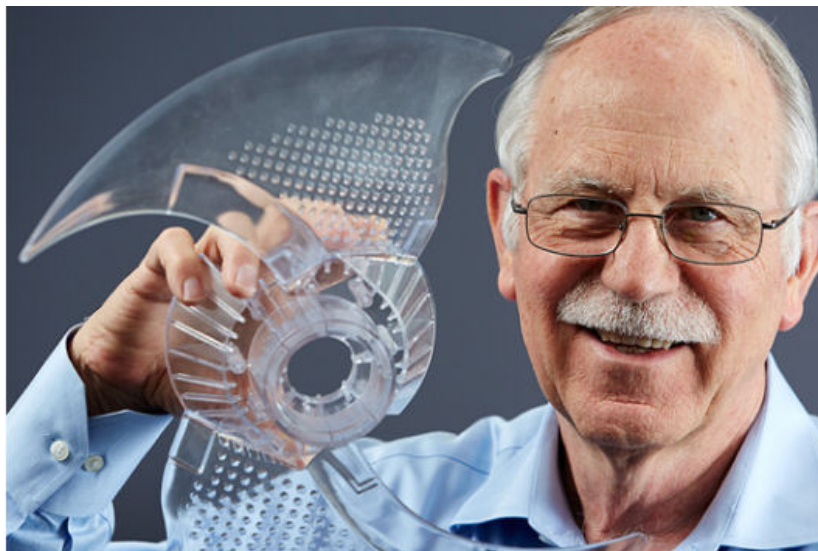


Figura 2.11: Charles «Chuck» Hull. Cortesía de 3DSystems

La tecnología se basa en el curado de una resina fotosensible, capa a capa. Para ello, se basa en un haz láser [16], que es dirigido a coordenadas exactas al reflejarse en espejos (en inglés, *galvanometers* o *galvos*), situados uno en el eje X y otro en el eje Y. Sin ser una de las tecnologías más veloces, el posicionamiento del láser mediante pequeños movimientos de los espejos, permite a la tecnología SLA ser mucho más rápida y precisa que las tecnologías FDM o LOM.

En cuanto a los materiales empleados, en sus orígenes se limitó a resinas fotodurables sin ningún tipo de aditivo. Con el paso de los años, se comenzó a experimentar con resinas biocompatibles, otros combinados con partículas cerámicas o pequeñas fibras de vidrio o carbono. A día de hoy, existe una amplia variedad, en función de la resistencia mecánica deseada, el acabado o la función final de la pieza. [22]

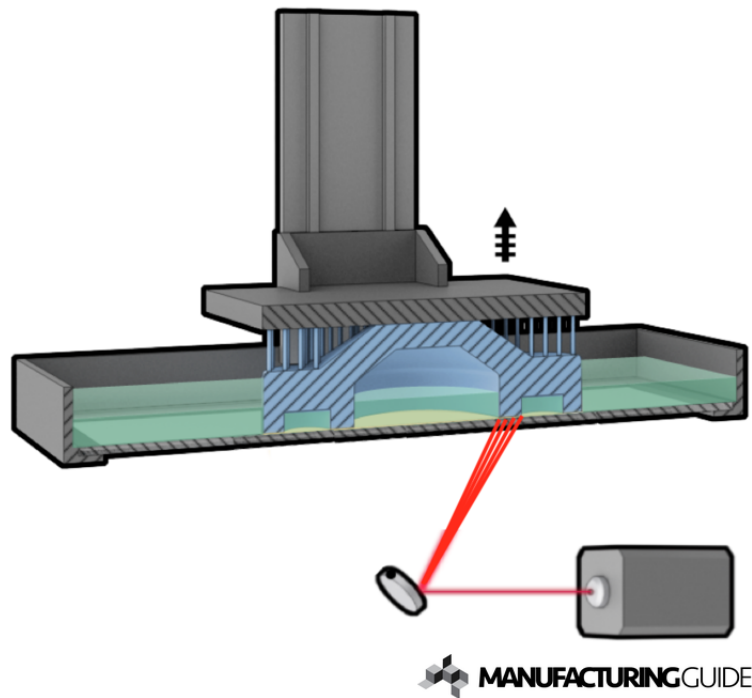


Figura 2.12: Fabricación SLA, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide

Como se ha mencionado anteriormente, el funcionamiento de la tecnología SLA es sencillo. La variante más extendida a día de hoy es la fabricación SLA con cama inversa (eje Z invertido, como se muestra en la figura). En esta técnica, el láser junto a los espejos se sitúa en la parte inferior de la estructura. Este haz pasa a través de la cubeta transparente, donde se sitúa la resina. La superficie de impre-

sión, con movimiento a lo largo del eje Z, desciende hasta situarse por completo en el interior de la resina. Es entonces cuando comienza el proceso de curado siguiendo el contorno asociado a la capa correspondiente. Una vez finalizado, se eleva de vuelta la superficie de impresión, a la par que se aprovecha para remover cualquier resto de resina sólida que pueda haberse separado de la pieza. Este proceso es opcional, y se consigue mediante un pequeño brazo que se desplaza a ras de la superficie de la resina, logrando uniformidad en el material.

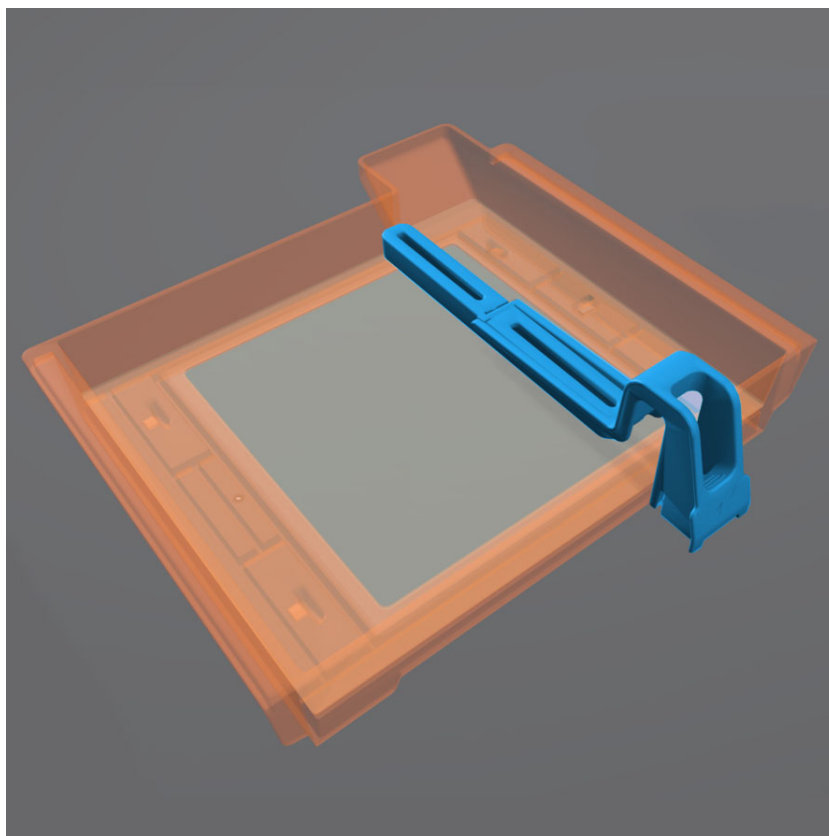


Figura 2.13: Cubeta y brazo, Formlabs 2. Cortesía de Formlabs

Dado que el proceso se basa en el curado de una resina, la resolución y la altura de capa ofrecen mejor calidad frente a procesos de extrusión FDM. Todos los valores mencionados a continuación van a depender del modelo y el fabricante, pero son válidos como referencia de cara a una comparativa. La altura de capa mínima alcanzable se sitúa alrededor de 0,025mm, tres veces menor que en FDM (0,06mm) y mucho menor respecto a LOM (0,16mm). Por otra parte, el diámetro del haz láser proyectado se sitúa alrededor de los 0,14mm. Con estos dos parámetros, la fabricación SLA puede lograr un nivel de detalle (referido a menudo como

*minimum printable feature*) claramente superior, siendo únicamente superado por métodos como la fabricación EBM (*Electron Beam Melting*, que trabaja con un diámetro de 0,05mm).

En cuanto a las propiedades mecánicas, la impresión SLA cuenta con ventajas frente a la FDM. El propio proceso de curado logra una uniformidad mayor a lo largo del eje Z, permitiendo prácticamente hablar de isotropía en toda la pieza. Además, el uso de resinas reforzadas con microfibras de vidrio o carbono, proporciona unos valores aceptables ante esfuerzos de tracción.

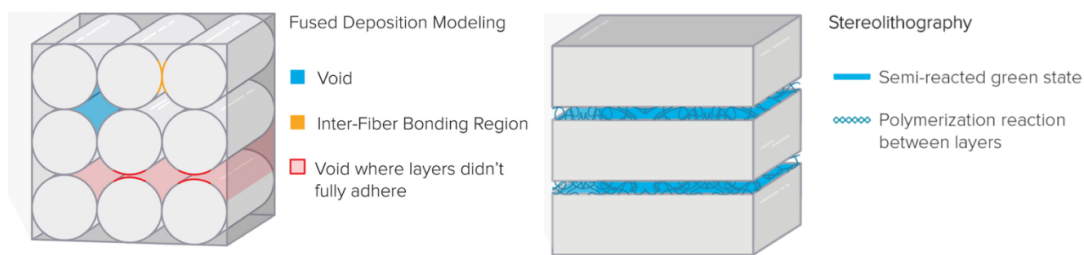


Figura 2.14: Comparativa en detalle, FDM y SLA. Cortesía de Formlabs

Con todas las ventajas mencionadas, no hay que olvidar que ningún proceso de fabricación es perfecto. La tecnología SLA también se encuentra limitada por el uso de material de soporte. Como la resina se sitúa en una única cubeta, no existe la posibilidad de emplear ningún tipo de material soluble. Estos soportes, generados a partir del .STL, implican una eliminación posterior, que impide un acabado perfecto de la superficie con la que ha estado en contacto. Además, los tiempos de post-procesado suelen ser mayores frente a la fabricación FDM. Antes de retirar los soportes, la pieza debe pasar por un breve lavado en agua de aproximadamente 10 minutos. Tras retirar los soportes, se debe realizar un curado completo de la pieza. Este proceso puede tardar como mínimo una hora, en función de los parámetros aconsejados por el fabricante. Por último, se pueden añadir otros procesos de acabado como son la pintura o el barnizado, pero se trataría de procesos generales aplicables a muchas otras técnicas de Fabricación Aditiva.

La otra limitación de la tecnología SLA es el tamaño. El movimiento vertical de la cama de impresión, junto a las tensiones superficiales y la gravedad, limita el tamaño máximo de fabricación. Es en este punto en el que entra una nueva variante en desarrollo, conocida como LFS (*Low Force Stereolithography*). Con este método, es posible reducir en parte la estructura necesaria como soporte a la vez que se aumenta la precisión y resolución. [22]

La siguiente tecnología dentro de este grupo es la fabricación **DLP** (*Digital Light Processing*). Al igual que SLA, la tecnología DLP se basa en el principio del endurecimiento de una resina mediante un haz de luz ultravioleta. La diferencia se encuentra en la fuente de luz, que ya no consiste en un haz láser. Su patente se realiza en 1987, por Texas Instruments. [13]

La base de materiales disponibles para trabajar es prácticamente idéntica a la disponible en SLA. Por tanto, es posible escoger entre distintos tipos de resinas según sus propiedades mecánicas, color o aditivos (fibras, cerámicos, biocompatibles...).

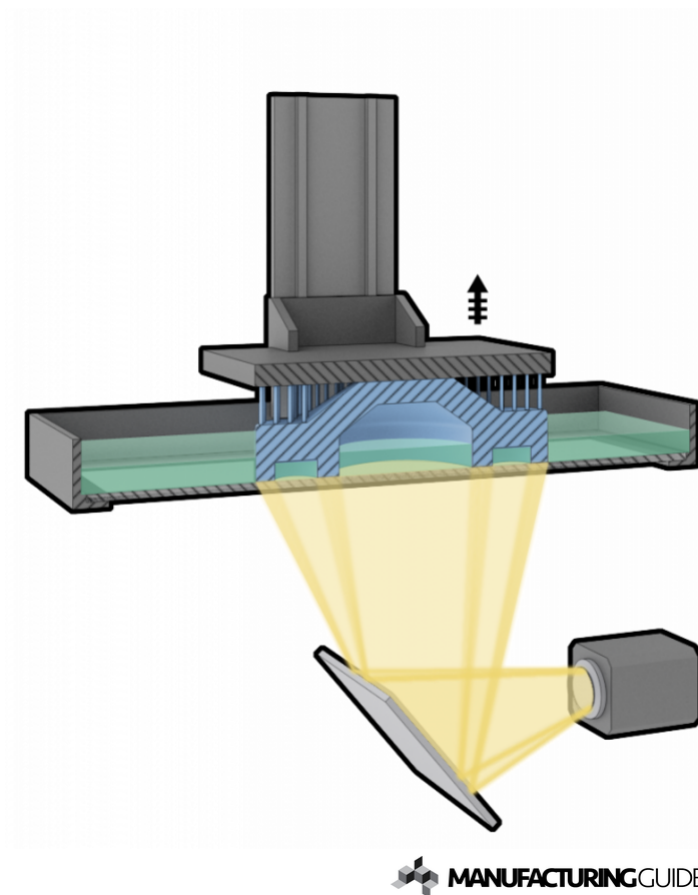


Figura 2.15: Fabricación DLP, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide

Como se ha mencionado brevemente, la diferencia de la tecnología DLP frente a SLA se encuentra en la proyección de luz. En este caso, se proyecta una máscara

de luz con la capa completa a solidificar. La luz se refleja en un espejo, incidiendo en la resina contenida en la cubeta. Esta máscara está compuesta de píxeles, ya que proviene de una fuente digital como puede ser un proyector de luz convencional. Esto define su resolución en lo que se conocen como *voxels*, la geometría mínima fabricable. De media, esta resolución se sitúa entre los 0,035mm y los 0,1mm. Aun siendo valores inferiores al diámetro del láser que se utiliza en SLA (0,14mm), no implican un acabado superior. Esto se debe a la definición del píxel, que siempre forma un área en forma de cuadrado. Aun siendo más pequeño que el diámetro del láser, tiende a lograr una menor resolución en cuanto la geometría exige cualquier tipo de superficie curva. [23]

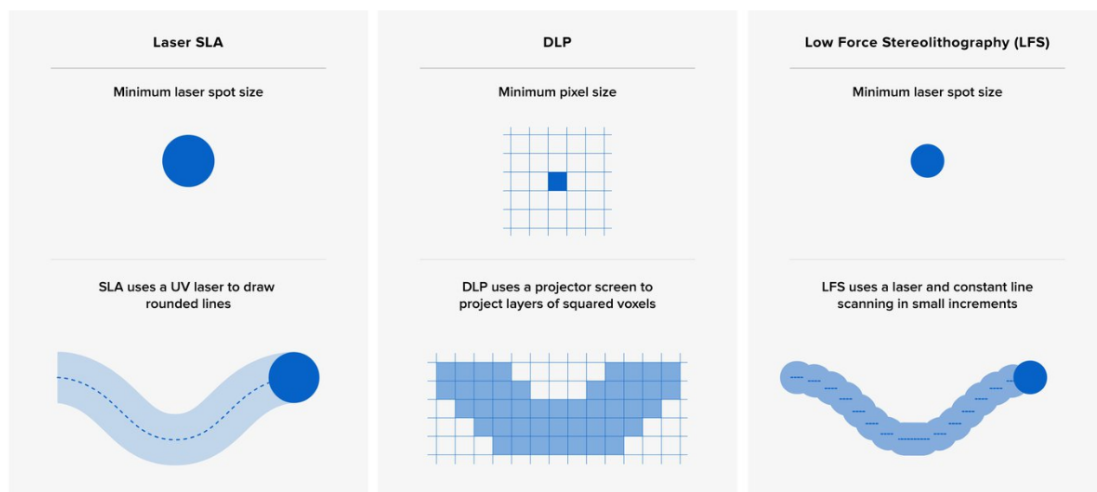


Figura 2.16: Comparativa de calidad entre SLA, DLP y LFS. Cortesía de formlabs

Sus propiedades mecánicas se sitúan en el mismo rango que la fabricación SLA. Al ser un proceso que no se basa en la extrusión de material, se maximiza la isotropía de la pieza, logrando piezas más aptas para un uso final.

La gran ventaja de la fabricación DLP frente a cualquier otro método es su velocidad. Al proyectar capas completas en cuestión de segundos, el tiempo requerido se reduce significativamente. No obstante, al igual que SLA, esta tecnología requiere el uso de estructuras de soporte. Estas estructuras reducen la calidad del acabado superficial, a la vez que incrementan ligeramente los tiempos de fabricación. Además, al trabajar con resina, será necesario realizar un post-procesado similar al SLA. Se realizará un pequeño lavado por inmersión en agua (alrededor de 10 minutos), seguido por la eliminación de soportes y el curado de la resina (mínimo una hora, según parámetros del fabricante).



Cabe destacar una variante de la fabricación DLP, conocida como MSLA (*Masked Stereolithography*). En esta variante, la fuente de luz la compone una matriz de LEDs, frente al emisor único en DLP. La luz emitida atraviesa una máscara, que filtra la luz que debe pasar al tanque de resina en función del contorno de la capa que se esté fabricando. Al igual que en DLP, la resolución depende del tamaño usado para los píxeles, y es necesario el uso de material de soporte. El coste y consumo inferior de los LEDs frente al proyector usado en DLP o el láser en SLA, la convierten en una alternativa interesante.



Figura 2.17: Captura del proceso MSLA, con la matriz de LEDs en la parte inferior. Cortesía de Structo 3D

Por último, aunque no se verán en detalle, existen las tecnologías **MJ** y **DOD** (*Material Jetting* y *Drop On Demand* respectivamente). Ambas técnicas trabajan mediante deposición de gotas de material (polímero o cera), situadas capa a capa. Si bien ambas requieren material de soporte, su punto fuerte se encuentra en la combinación de alta precisión con alta velocidad. En MJ, se deposita el material a la par que se cura mediante una lámpara UV, logrando realizar cada capa en menos de 5 segundos (de media). La deposición de material se realiza al igual que la tinta de las impresoras de papel convencionales, mediante un cabezal con cientos de micro-extrusores. El material de soporte se deposita desde un segundo cabezal, que permite el uso de soportes solubles. La fabricación DOD comparte esta característica de doble cabezal y micro-deposición, solo que en este caso se trabaja con materiales posteriormente calcinables, ideales para fundición a la cera perdida en joyería de precisión. Además, cuenta con un cabezal que se encarga de garantizar la planitud de la superficie de trabajo entre cada capa. [16]



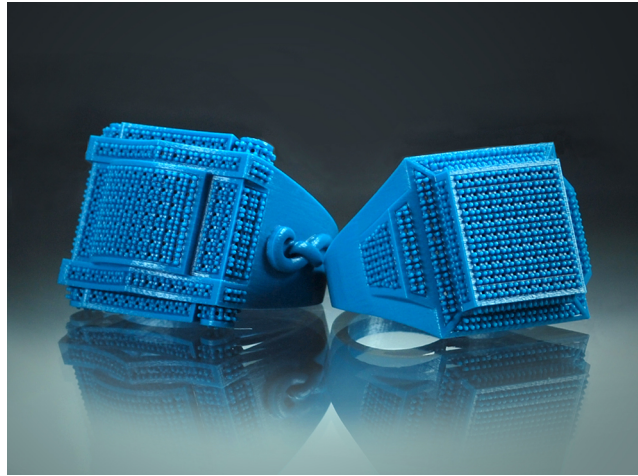


Figura 2.18: Ejemplo de fabricación DOD para joyería. Cortesía de 3dlink

## Polvo

El subgrupo que emplea polvo como materia prima es el último a tratar en este estado del arte, pero no por ello es el menos interesante. Las principales tecnologías dentro de este conjunto son la fabricación SLS (con sus variantes SLM y DMLS), MJF y EBM. Estas técnicas destacan por combinar precisión con el uso de materiales que otorgan propiedades mecánicas excelentes.

Comenzando por **SLS** (*Selective Laser Sintering*), sus inicios se remontan a 1988, año en el que se lanza al mercado la primera impresora SLA. [13] Patentada por Carl Deckard, la técnica inicialmente no destacó por su precisión, pero sentó las bases para una mejora continua hasta hoy en día.

Esta técnica parte del uso de material en forma de polvo. A partir de la incidencia de un haz láser, se logra calentar el material hasta producir la fusión con las partículas colindantes. Entre los materiales disponibles, se cuenta principalmente con variantes de poliamidas como PA11 y PA12, poliestirenos (PS), elastómeros termoplásticos (TPE) y PAEK. [24] La fabricación SLS no cubre el uso de metales, puesto que estos se encuentran en las variantes conocidas como SLM (*Selective Laser Melting*) y DMLS (*Direct Laser Metal Sintering*). Las tecnologías SLM y DMLS incluyen materiales como aceros, aluminios, titanio, níquel, cobalto, e incluso metales preciosos. [25]

Las tres técnicas comparten la base de funcionamiento. En la Figura 2.19, el material de trabajo se sitúa en una cuba aparte (1) de la zona donde se fabrica la geometría. Esta cuba, junto al área de trabajo, puede moverse en vertical. Inicial-

mente, el área de trabajo (2) se situará en su altura máxima, mientras que la de material se colocará en su altura mínima. A lo largo de la impresión, la cuba de material irá elevándose en cada capa, mientras que el área de trabajo irá descendiendo. Mediante el uso de un brazo (3) o *recoater*, se reparte una capa uniforme de material a lo largo de toda el área de trabajo. El láser (4) trabaja sobre el material que se acaba de colocar, para repetir de nuevo el proceso en la siguiente capa. El láser se basa en el uso de pequeños espejos (*galvanometers*) para su posicionamiento exacto, al igual que en SLA. Como diferencia fundamental, todas las técnicas que trabajan con material en formato de polvo requieren calentar el interior de la máquina de cara a facilitar la fusión realizada por el láser. Este requerimiento convierte a estas tecnologías en las más caras respecto a consumo energético.

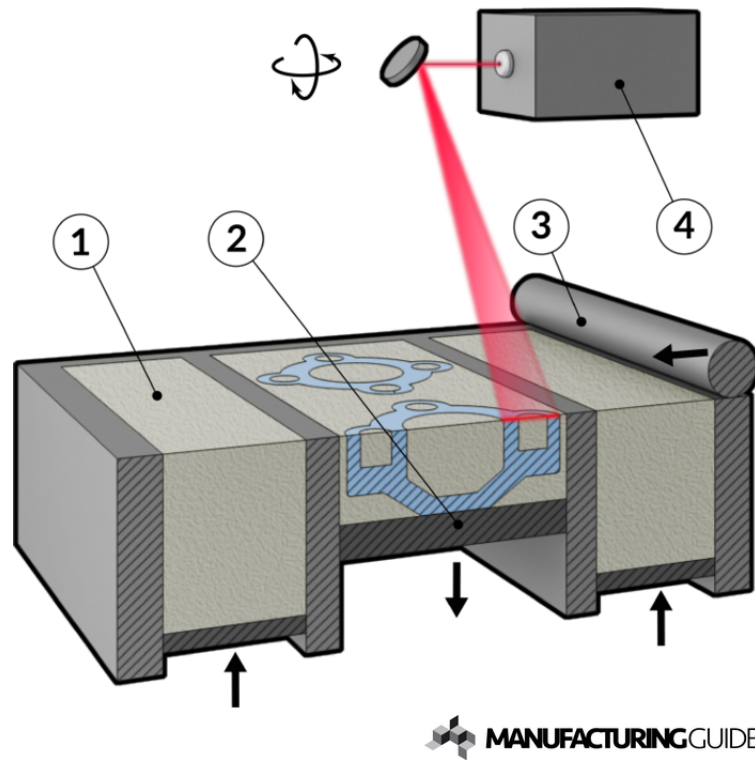


Figura 2.19: Fabricación SLS, SLM y DMLS, esquema de funcionamiento. Cortesía de Manufacturing Guide

Las diferencias entre estos procesos son mínimas. Por una parte, SLS se limita al uso de plásticos con comportamiento semicristalino [24] mientras que SLM y DMLS trabajan con metales. Entre estos dos, la diferencia se encuentra en el grado de fusión del material. En SLM, la fusión es completa, y por tanto es un proceso ideal para mezclas puras de material (la mezcla generaría escoria). Por contra, los

costes asociados al consumo de energía son los mayores de todas las técnicas existentes de Fabricación Aditiva. La tecnología DMLS no realiza una fusión completa del material, si no que se asemeja más a una microsoldadura de las partículas para conformar una geometría concreta. Gracias a esto, es posible realizar mezclas de material incluso con polímeros, beneficiándose de las propiedades mecánicas y de acabado. [25]

La altura de capa para estos procesos depende fundamentalmente del diámetro del material en polvo. El rango de alturas se sitúa entre los 0,02mm y los 0,4mm. Al igual que en otros procesos, una mayor altura de capa permite reducir los tiempos a coste de la calidad final y al contrario. La resolución depende del diámetro del haz láser empleado, siendo un valor habitual 0,05mm. [26]

La gran ventaja del conjunto de estas técnicas es la ausencia de soportes. Dado que el material base se sitúa a lo largo de toda el área de trabajo, siempre se cuenta con material para mantener en su sitio la estructura. Esto supone una ayuda a la hora de realizar uniones articuladas o con movimiento relativo, ya que se consigue una geometría perfecta y un rozamiento mínimo en el movimiento. Con todo esto, puede considerarse que estas técnicas no cuentan con limitaciones geométricas de ningún tipo, más allá de las dimensiones de la propia impresora.

Otro aspecto positivo es la reutilización continua del material que no ha sido empleado en el proceso de fusión. Algunos, como las poliamidas (PA) si requieren renovar parcialmente la mezcla para evitar perder propiedades mecánicas, pero otros como los TPE pueden emplearse en diferentes impresiones sin mayores requisitos. Esto es fundamental en términos económicos, ya que la materia base y los costes de operación de la maquinaria son los más altos en todas las técnicas de Fabricación Aditiva.

El mayor aspecto negativo se encuentra en la porosidad. Si bien es algo que no afecta especialmente a SLS o SLM, la fabricación DMLS requiere un postprocesado adicional si se quieren mejorar las propiedades mecánicas de la pieza final. Este postprocesado logra reducir la porosidad, a la vez que permite liberar las tensiones que hayan podido generarse debido a la dilatación térmica de la pieza. Este problema de acumulación de tensiones es común a SLM y DMLS, ya que emplean metales como materia prima. [27]

Pasando a la siguiente técnica, se encuentra la solución desarrollada por Hewlett Packard, la fabricación **MJF** (*Multi Jet Fusion*). Para ello, se basa en la fabricación SLS pero añadiendo el uso de unos cabezales de impresión cargados

con dos tipos de agentes. [28] Si bien se trata de una técnica reciente, se encuentra en términos similares de desarrollo que la SLS, siendo incluso superior en algunos aspectos.

El rango de materiales disponibles para esta técnica es muy limitado, ya que a día de hoy sólo cuenta con el PA12. Además, en sus inicios, este polvo sólo podía ser de color negro, ya que era el único capaz de absorber la energía suficiente de cara a la fusión del material.

Para entender correctamente esta tecnología, hay que estudiar más a fondo su funcionamiento. Sus bases son similares a cualquier otro proceso basado en el polvo: un área de trabajo, separada de las cubas de aporte de material, y todas ellas con posibilidad de movimiento vertical. Al igual que en las técnicas ya cubiertas, un brazo extiende la capa de material a lo largo de toda la superficie de trabajo. A continuación, un cabezal similar a los empleados en la impresión convencional en papel, recorren la superficie depositando un agente de fusión y otro agente de detalle. Mientras que el agente de detalle es simplemente agua, el agente de detalle puede contener colorantes, que permiten obtener piezas a color. El polvo base ha sido calentado hasta temperaturas muy próximas a su punto de fusión. Gracias a la adición de los agentes, el polvo mezclado con el agente de fusión termina el proceso y forma la geometría, mientras que el agente de detalle enfría el contorno y evita su fusión, para lograr mayor precisión. [29]

La resolución de esta técnica se determina en función del tamaño de *voxel*. El *voxel* representa el cubo de menor tamaño fabricable, siendo de 0,07mm a 0,12mm de lado. Si bien en sus inicios el material base impedía la adición de color, hoy en día es posible colorear de forma individual cada uno de los *voxels*. El color asignado puede ser uno de los tres empleados como base cromática, de forma que la combinación resultante permite un amplio rango de color. Los *voxels* a colorear serán únicamente los situados próximos a la zona superficial de la pieza, ya que no tiene sentido alguno gastar material en zonas siempre ocultas. [30]

Cabe destacar que, dado que existe la posibilidad de añadir una textura que incluya color, la fabricación MJF no solo emplea .STL como archivo de partida, si no que puede trabajar con archivos .OBJ cuando sea de interés. La única diferencia a efectos prácticos se encuentra en que el archivo .OBJ está asociado a un mapa de color para la geometría a fabricar.

En cuanto a las propiedades mecánicas, superan ligeramente a la tecnología SLS incluso tratándose del mismo material. Esto se consigue dado que MJF fu-

siona un volumen mínimo mayor, que no depende exclusivamente de la altura de capa. Con esto, se logra una mayor cohesión e isotropía en la pieza final. Además, el consumo energético del proceso es menor, resultando en un abaratamiento de costes. El postprocesado requerido es similar para MJF y SLS: limpieza y tamizado del material a reusar. [29]

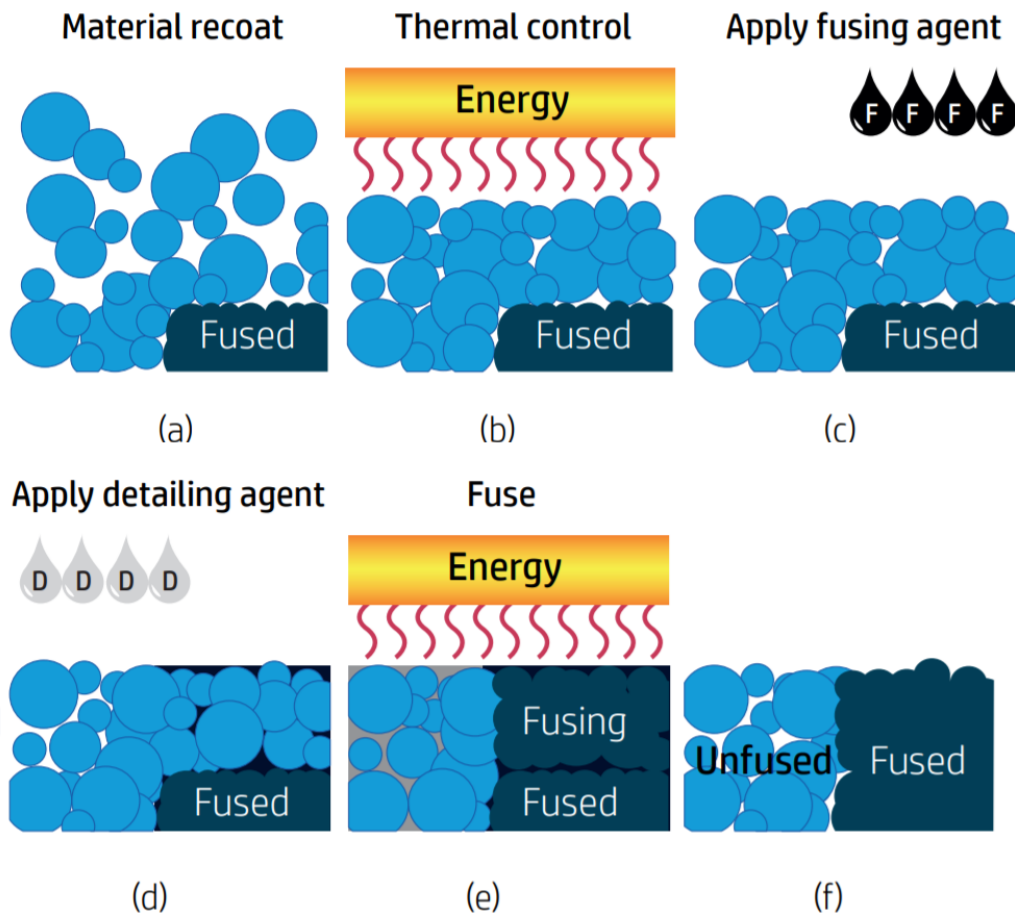


Figura 2.20: Fabricación MJF, esquema del proceso. Cortesía de HP

Las desventajas de la fabricación MJF se encuentran principalmente en el consumo añadido de consumibles. El uso de distintos componentes mecánicos en el proceso (extender material, deposición agentes, fusión) aumenta las necesidades de mantenimiento.

Por último, se cuenta con la tecnología **EBM** (*Electron Beam Melting*). A diferencia de las otras técnicas que trabajan con polvo metálico, la fabricación EBM emplea un haz de alta energía para realizar el proceso de fusión. Esto permite ganar

velocidad en el proceso, pero a coste de la calidad del detalle mínimo fabricable. [16]

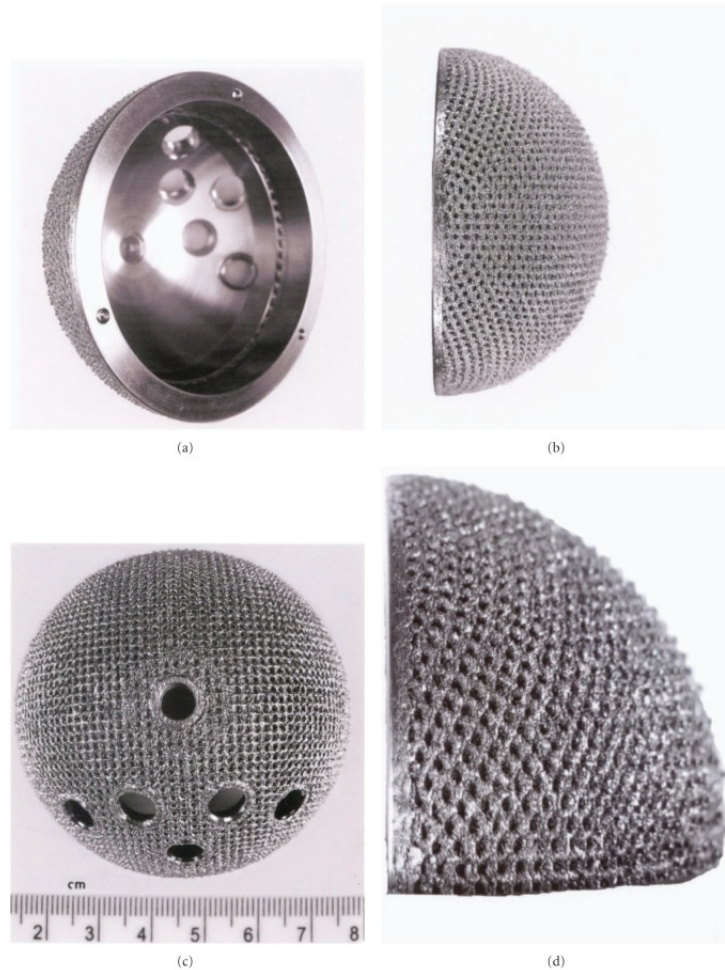


Figura 2.21: Ejemplo de fabricación EBM (Ti-6Al-4V). Cortesía de Laurence Murry y col. [31]

Como se ha indicado, esta técnica trabaja metales en formato de polvo. El catálogo disponible es menor, ya que se limita a metales conductores (como el titanio, ciertos aceros, y alguna aleación de cobalto). [32] La deposición del material sobre el área de trabajo se realiza con un brazo, al igual que en MJF o SLS. Este material se calienta hasta temperaturas próximas a su fusión, la cual se completa mediante la incidencia de los haces de electrones. La gran diferencia se encuentra en la atmósfera de trabajo, sobre la que se practica un vacío que evita partículas extrañas y la formación de óxidos durante el proceso. Además, este proceso sí que requiere el uso de estructuras de soporte, que evitan una deformación excesiva de la geometría. Las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso permiten

que la acumulación de tensiones sea menor que en otras técnicas. [16]

La ventaja fundamental se encuentra en la reducción de tiempos de fabricación, si bien los tiempos de postprocesado aumentan debido a los soportes. Esto convierte a la fabricación EBM en una opción interesante para ciertas geometrías, pero no tanto a medida que aumenta el uso de soportes.

## 2.2. Defectos típicos en fabricación FDM

Para entender las referencias en cuanto a defectología que se emplearán a lo largo de esta memoria, es necesario profundizar en los defectos más comunes dentro de la tecnología FDM. Estos defectos pueden agruparse en: configuración, calibración, mecánicos y mantenimiento. La clasificación es propia, pero la información sobre varios de los defectos se apoya en la guía creada por Simplify 3D. [33]

- **Configuración:** Este grupo trata fallos debidos a una configuración incorrecta de los parámetros de impresión en el software *slicer*. Estos parámetros son principalmente la altura de capa, la distancia de retracción, la temperatura y la velocidad. Los errores más comunes son la sobreextrusión e infraextrusión, la presencia de hilos finos alrededor de la pieza (*stringing/oozing* en inglés), el despegue de la pieza de la superficie de impresión durante la fabricación (*warping*), superficies con agujeros o huecos entre líneas, y la aparición de vibraciones en las paredes verticales (*ghosting*). Aparte de los anteriores, también es frecuente encontrar fallos de diseño en la geometría. Estos fallos suelen traducirse en características demasiado pequeñas para ser fabricadas, y por tanto son ignoradas por el *slicer* durante la preparación.
- **Calibración:** Los fallos en esta categoría son debidos a errores durante el proceso de calibración de la distancia entre cama de impresión y extrusor, que llevan a una deposición incorrecta del material. Son rápidos de detectar, ya que se dan en la primera capa de impresión, y su solución suele ser recalibrar con más atención.
- **Mecánicos:** Estos fallos se producen a partir de una construcción incorrecta de la estructura (desalineamientos entre ejes), exceso o defecto de presión en la alimentación de material, o fallos en los motores que desplazan el extrusor en cada eje. Los fallos en un motor están en parte relacionados con una falta de mantenimiento, y suelen producir pérdidas del control del movimiento en un eje. Esto conlleva desplazamientos en el plano de una capa respecto a la anterior, distorsionando la geometría y estropeando la impresión.
- **Mantenimiento:** La falta de mantenimiento, como se menciona en el grupo anterior, puede ser la causa de numerosos fallos. Este grupo se centra en aquellos que son consecuencia única y directa de un mal mantenimiento. El resultado más común suele ser la infraextrusión de material o el atasco completo de la boquilla, que se deben a una falta de limpieza tanto interior como exterior del extrusor. Las partículas que producen los atascos a nivel interno



pueden ser simplemente suciedad del ambiente o restos de otro material con distinto punto de fusión.

De todos los anteriores, se van a explicar en detalle los más relevantes de cara al desarrollo de la memoria: *warping*, *ghosting*, calibración y característica mínima fabricable.

### 2.2.1. Warping

El *warping* consiste en la separación de las primeras capas de la pieza respecto de la cama de impresión. Es un fenómeno debido a la dilatación del plástico cuando es expuesto a un gradiente de temperatura. Si se trabaja con una cama no calefactada, este gradiente será más pronunciado, lo que conlleva contracciones en el material que dan lugar a este despegue. [34]

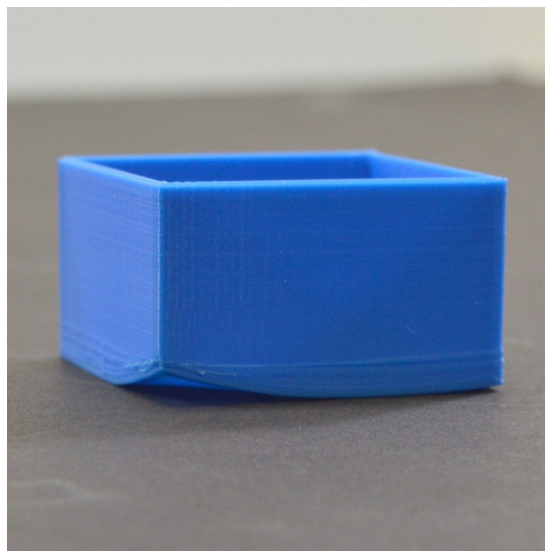


Figura 2.22: Pieza con warping. Cortesía de Simplify 3D

Es un defecto especialmente presente en materiales con gran deformación térmica, como son el ABS, el HIPS o el Nylon. En materiales como el PLA, que es el empleado de cara a los ensayos, es mucho menos frecuente, ya que es un material que permite incluso trabajar con una cama de impresión a temperatura ambiente. Aun así, si la temperatura de extrusión es demasiado elevada, el gradiente de temperatura puede afectar lo suficiente como para dar lugar a un poco de *warping*.

La solución suele combinar tres variables: elevar la temperatura de la cama de impresión (siempre que sea posible), mejorar las propiedades de adherencia en la superficie, y como última opción, modificar la geometría. [34]

La primera variable debe manejarse con cuidado. Los materiales empleados en FDM son termoplásticos, y por tanto pueden reblandecerse tantas veces como sea necesario. Si la temperatura de la cama de impresión es superior a la temperatura de reblandecimiento, existe un riesgo elevado de que la pieza se adhiera en exceso a la cama y que se dañe al ser retirada. En la mayoría de termoplásticos, esta temperatura se sitúa alrededor de los 70 a 90 °C. [35]

En cuanto a la mejora de la adherencia, la opción más sencilla y barata consiste en aplicar una fina capa de laca sobre la cama de impresión. Esta capa logra una adherencia suficientemente buena, y es un elemento imprescindible en camas sin calefactar así como en el uso de materiales con grandes contracciones (ABS, Nylon...). [35]

La última opción consiste en añadir geometría adicional optimizada para reducir el efecto del *warping* sobre la pieza. Esta geometría suele consistir en pequeños círculos, colocados en puntos de alto riesgo y que deben ser eliminados posteriormente. Actualmente, la mayoría de softwares *slicer* permiten añadir unas líneas de contorno adicionales en la primera capa que realizan esta misma función. Ambas se muestran en la siguiente Figura 2.23:

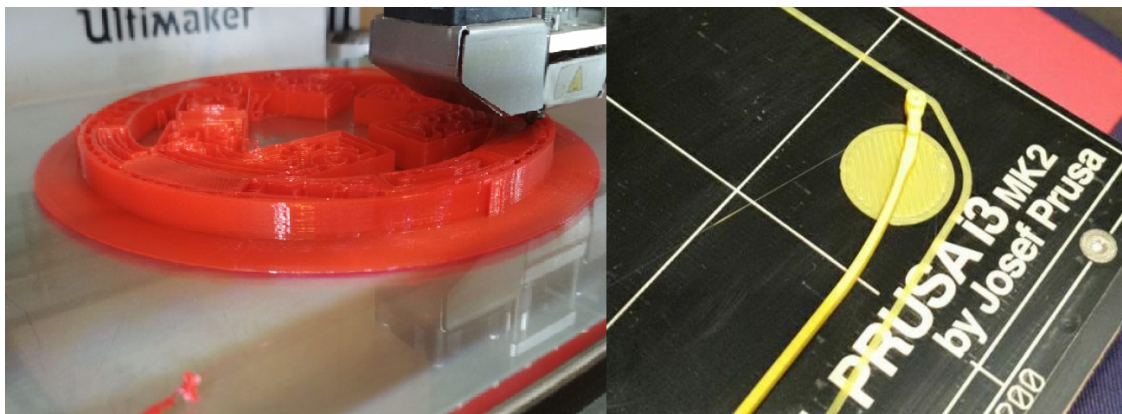


Figura 2.23: A la izquierda, adición de líneas de contorno adicionales. A la derecha, geometría adicional en un punto de riesgo. Imágenes propias

### 2.2.2. Ghosting

Este defecto se puede visualizar en la mayoría de paredes verticales de cualquier pieza. En lugar de obtener una superficie completamente lisa, se podrán observar pequeñas olas o relieves a lo largo de la misma. La impresora 3D se basa en una estructura que proporciona rigidez, y como cualquier otro sistema mecánico está expuesto a vibraciones durante su operación. Si se emplea una estructura con cama de altura variable en el eje Z y extrusor móvil en X y en Y, la vibración se originará principalmente a partir de los movimientos del cabezal. Si por contra se utiliza una estructura de cama móvil en X, con extrusor móvil en Y y en Z, las vibraciones serán aun mayores. En el caso de emplear un brazo robot, como se desarrolla en esta memoria, la rigidez del conjunto será significativamente menor y por tanto es de esperar que el defecto del *ghosting* esté fuertemente presente.

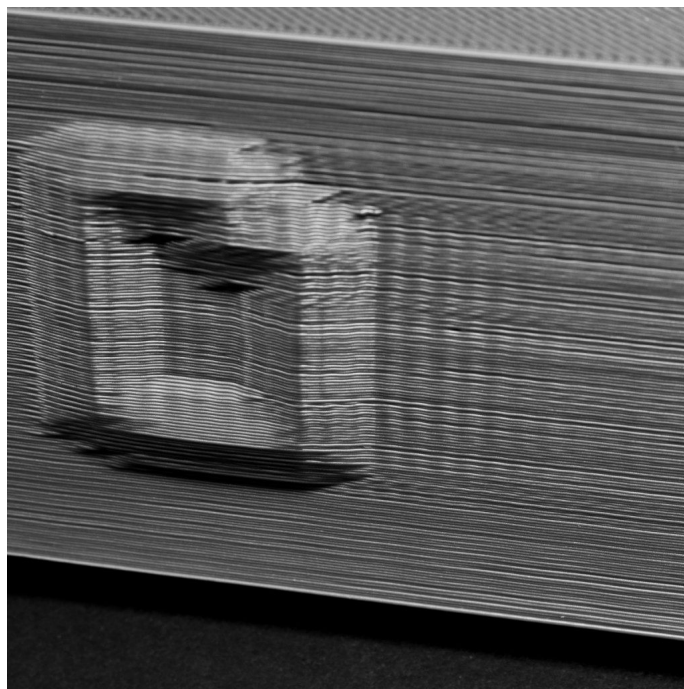


Figura 2.24: Ejemplo de ghosting. Cortesía de Simplify 3D

La solución general suele pasar por emplear velocidades de impresión más bajas y asegurar una tensión correcta en las correas y elementos que transmiten el movimiento a lo largo de cada eje.

### 2.2.3. Calibración

La calibración es un proceso esencial en cualquier método de fabricación, tanto aditiva como sustractiva. En el caso de la impresión 3D, la calibración más importante es la de la altura del extrusor respecto a la cama de impresión. Una calibración defectuosa puede traducirse en una altura excesiva entre extrusor y cama, impidiendo la correcta adherencia del material. En el caso contrario, una altura excesivamente baja puede llevar a dificultades en la extrusión de material, ya que se obstaculiza el flujo del mismo. Para calibrar correctamente, la distancia entre ambos debe situarse en el entorno de 0,1mm a 0,16mm. Esta distancia se corresponde con el rango de grosor medio de un folio, por lo que puede emplearse a falta de galgas.

Las camas de impresión suelen contar con entre 3 y 4 puntos de ajuste. Se debe mover el extrusor hasta cada uno de ellos, y realizar el ajuste deslizando un folio entre medias hasta que se note cierto roce. En el caso de emplear galgas, lo ideal será lograr que la de 0,05mm pase limpia, la de 0,1mm note cierto roce, y que la de 0,2mm no pase. Otros sistemas cuentan con mecanismos para regular la altura dentro del propio cabezal de extrusión, mientras que la cama se mantiene fija. En el caso concreto del brazo robot Dobot, basta con ajustar un único punto y configurarlo dentro del software como la referencia  $Z=0$ .

### 2.2.4. Característica mínima fabricable

Este subapartado trata un error muy común cuando se diseña sin contar con ninguna experiencia previa en Fabricación Aditiva. Todas las técnicas aditivas cuentan con un límite en su definición, que viene dada por el tipo de tecnología que emplean. En el caso de FDM, lo que define el detalle mínimo que se puede lograr es el diámetro de la boquilla de extrusión. Por lo general se sitúa en 0,4mm, aunque existe una amplia variedad con valores como 0,25mm, 0,3mm, 0,6mm o 0,8mm, entre otros.

El software *licer* parte de la información del diámetro de boquilla para determinar qué partes son fabricables y cuáles no. En el caso de emplear la boquilla de 0,4mm, el software ignorará cualquier característica que se encuentre por debajo de este grosor, lo cual ha de tenerse siempre en cuenta. Del mismo modo, el software cubrirá cada capa de impresión mediante pasadas contiguas del mismo ancho. Siguiendo con el ejemplo de la boquilla de 0,4mm, si se quiere fabricar una geometría con un ancho de 0,6mm, lo más probable es que aparezcan defectos en forma de huecos en la superficie, ya que no es posible cubrir la totalidad del área.



Figura 2.25: Presencia de huecos en las letras, especialmente visibles en las tres primeras. Imagen propia

La solución a estos problemas pasa por el empleo de extrusores más finos, pero a coste de aumentar los tiempos de fabricación. Es más sencillo tener en cuenta el proceso de fabricación que se vaya a emplear durante el proceso de diseño, y en última instancia, emplear otras tecnologías de Fabricación Aditiva con mayor resolución si es necesario.

## 2.3. Robótica

### 2.3.1. Historia

Según la R.A.E., **Robot**: «Del inglés *robot*, y este del checo *robota* 'trabajo, prestación personal'. Máquina o ingenio electrónico programable que es capaz de manipular objetos y realizar diversas operaciones.» [36] En el año 1920, el escritor checo Karel Čapek acuña el término en su obra *R.U.R., Robots Universales Rossum* [37]. En esta, se introduce la existencia en la ficción de seres autómatas de apariencia humana que son creados con el fin de simplificar el trabajo de las personas.

Años más tarde, y aún en la ficción, Isaac Asimov introduce en su obra *Runaround* [38] las tres leyes de la robótica:

1. «Un robot no hará daño a un ser humano ni, por inacción, permitirá que un ser humano sufra daño.»
2. «Un robot debe cumplir las órdenes dadas por los seres humanos, a excepción de aquellas que entren en conflicto con la primera ley.»
3. «Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la primera o con la segunda ley.»

Si bien estas leyes no tuvieron una aplicación práctica directa, sentaron un precedente en la relación entre humanos y robots.

En la misma década, en 1948, George C. Devol crea el primer robot industrial. El robot consistió en un manipulador programable bastante simple, pero supuso el inicio de la aplicación de la robótica en procesos de fabricación industrial. En 1956 conoce a Joseph F. Engelberger, con quien fabrica un primer prototipo funcional un año después (1957). Tras un profundo proceso de desarrollo, se instala por primera vez un manipulador programable en la línea de producción de General Motors (año 1959), el Unimate #001. [39]

Gracias al éxito en su aplicación, a partir de 1961 inician la producción a gran escala de la serie Unimate 1000. El manipulador se integra principalmente en procesos de fundición y colada, donde las condiciones de trabajo son menos aptas para los trabajadores humanos por altas temperaturas.



Todo este desarrollo inicial se centró en Estados Unidos, hasta su expansión global en 1966. Aliados con Nokia en Europa y con Kawasaki en Japón, la aplicación en distintas industrias se acelera. En la industria del motor, su implementación permite duplicar la producción hasta los 110 coches por hora. [39] Los fabricantes europeos siguen el precedente creado por General Motors, incrementando rápidamente el número de robots presentes en la industria.

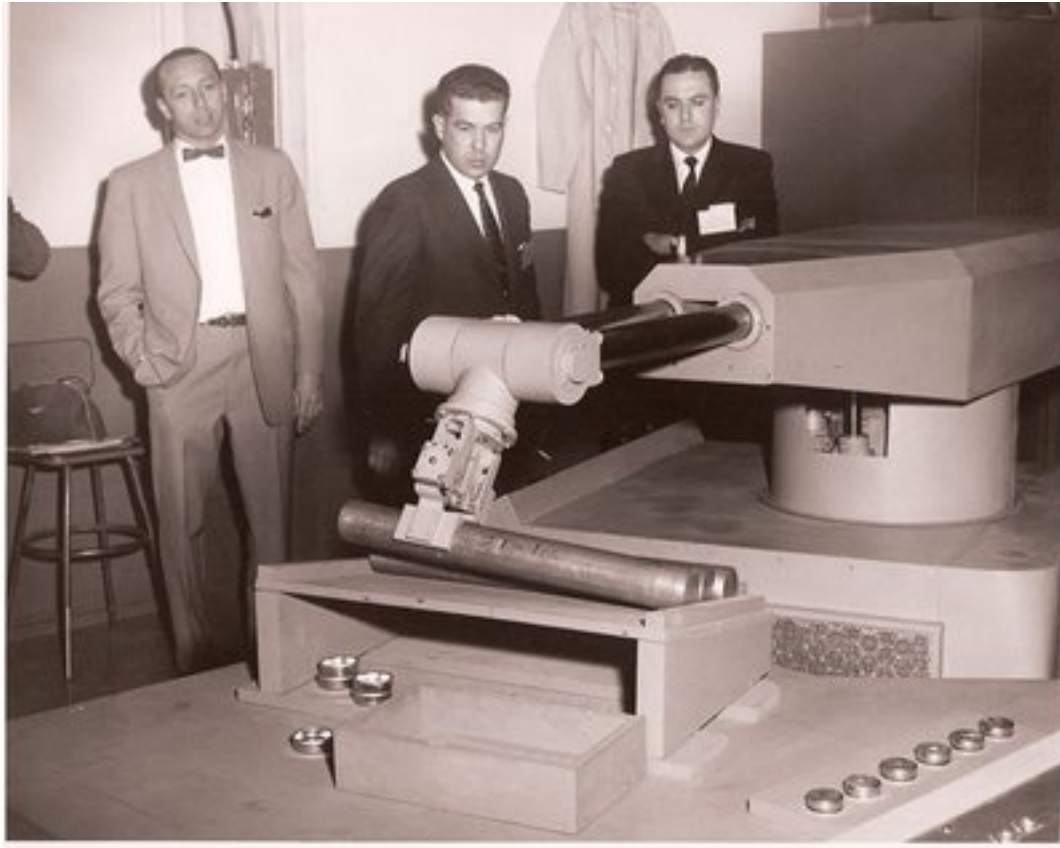


Figura 2.26: Unimate #001. Cortesía de Process Technology [40]

Otro nombre importante en el desarrollo de la robótica es el de Victor Scheinman. Durante sus estudios en Stanford, desarrolla el primer robot de 6 ejes en el año 1972. En 1975 la empresa Unimation compra el diseño y continúa con su desarrollo en colaboración con General Motors. Este diseño evoluciona hasta los robots PUMA (*Programmable Universal Machine for Assembly, o Programmable Universal Manipulation Arm*). [41]

Si bien el avance hasta este punto había sido importante, la imagen que plantea-

ba Čapek en su obra aun quedaba bastante lejos. En el año 1986 Honda comienza a desarrollar el primer planteamiento de robot humanoide: ASIMO. Este robot no fue presentado hasta el año 2000, capaz de caminar y transportar objetos en terrenos sencillos y sin demasiados obstáculos. Sus primeros prototipos (E1, E2, E3) se centraron en el desarrollo de un par de piernas capaces de caminar. Los siguientes E4, E5 y E6 desarrollaron el área de la estabilidad y la capacidad de superar escaleras. Una vez añadida la cabeza y unos brazos, la versión P1 supuso la creación del primer robot con forma humanoide. La versión P2 mejoró su aspecto exterior y incluyó un diseño más compacto, que terminó de desarrollarse en la versión P3. Hoy en día, ASIMO puede desplazarse por multitud de superficies de cierta dificultad a la par que es capaz de reconocer individuos y objetos. [42]

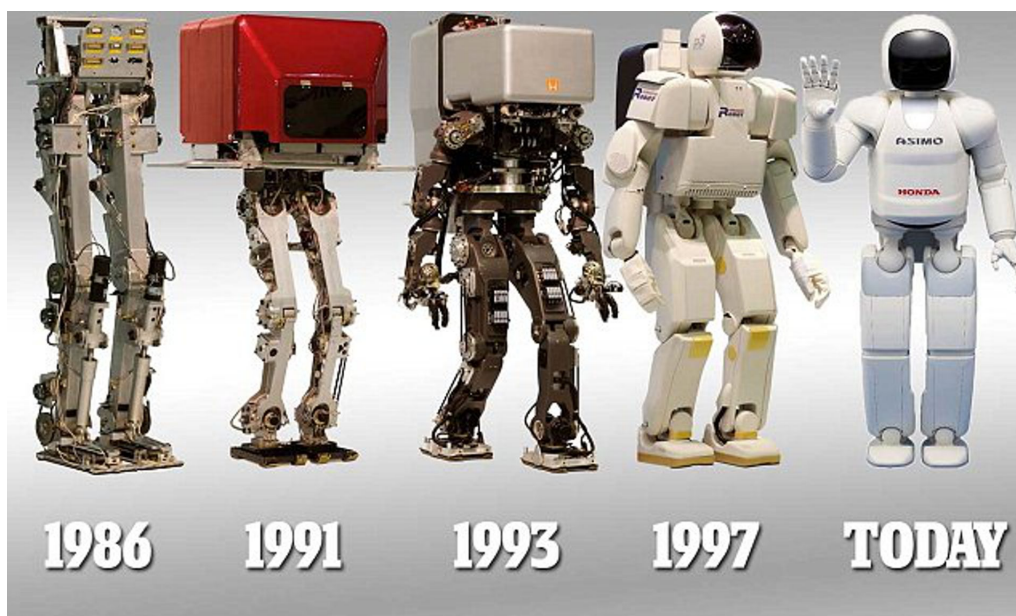


Figura 2.27: Evolución de las distintas versiones de ASIMO. Cortesía del Daily Mail

Boston Dynamics nace en 1992 con un planteamiento completamente distinto, inspirados fuertemente en la anatomía animal. Sus robots van más allá de la geometría sencilla de los brazos robot y se aleja inicialmente de las formas humanoides que desarrollaba Honda. También se aleja de los planteamientos de aplicación a la industria y de los robots de servicio, puesto que se centra en el uso de la robótica dentro del sector militar. [43]

Con los años y principalmente debido al cambio de sus principales contribuidores económicos (pasa de DARPA a Google y después a Softbank), el abanico de aplicaciones y enfoques se ensancha. Comenzando en 2005, con apoyo de DARPA,



se inicia el desarrollo de una serie de robots cuadrúpedos. La primera versión, BigDog, tiene como objetivo facilitar el transporte de cargas por terrenos irregulares. Años después, en 2009, la creación de LittleDog supone un avance en la compactación del sistema. En 2011, AlphaDog Proto incluye un motor de combustión interna que le permite desplazarse de forma menos ruidosa. El siguiente avance en 2012, con el LS3, supone un gran avance ya que permite al robot volver a levantarse por si solo en caso de volcar. Además, su software es capaz de seguir a un objetivo o «liebre». En 2013 se añade un brazo manipulador, pero el foco ya está puesto en el siguiente proyecto: Spot. [44]

Entre 2015 y 2016 se introducen Spot y SpotMini. Basados en todo el trabajo previo, los nuevos diseños son mucho más ágiles y se basan en sistemas completamente eléctricos, eliminando la hidráulica del sistema. Las nuevas versiones de 2017 y 2018 abren el abanico de posibilidades, ya que se trata de robots de exploración versátiles adaptables a distintas funcionalidades. Entre estas, exploración de minas, obras, mapeo 3D de edificios y más. [45]

Si bien Boston Dynamics cuenta con multitud de proyectos, hay otro más que merece la pena destacar. El robot Atlas, con forma humanoide, sigue el camino iniciado por ASIMO de Honda. Su desarrollo se inicia en 2013, siendo un robot apenas capaz de mantenerse en equilibrio. Con el paso de los años, su diseño se compacta y desde 2016 es capaz de recorrer terrenos de cierta dificultad o irregulares. En 2018, su desarrollo llega al punto de que es capaz de correr sin soporte alguno en campo abierto, así como realizar saltos de poca altura sin perder el equilibrio. [46]



Figura 2.28: De izquierda a derecha: proyectos Atlas y AlphaDog. Cortesía de Boston Dynamics

Volviendo a los brazos robot más convencionales (manipuladores de 6 G.D.L.), el enfoque actual se centra en el campo de la colaboración tanto entre robots como entre humanos y máquinas. En función del grado de colaboración e interacción entre persona y robot (HRC por sus siglas en inglés), es posible realizar una clasificación de los mismos: [47]

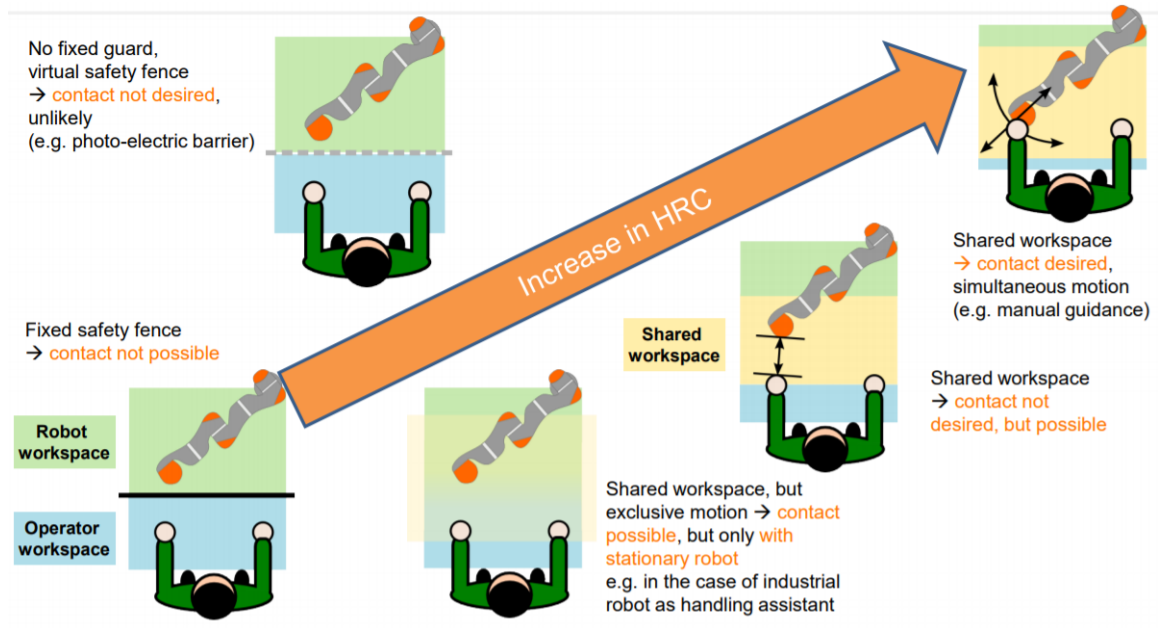


Figura 2.29: Evolución del espacio de trabajo compartido a medida que aumenta el HRC. Cortesía de Mike Beaupre, KUKA Robotics

Si bien en ciertas aplicaciones puede no ser deseable el contacto entre operario y máquina (manipulación de objetos a altas temperaturas, por ejemplo), otras operaciones (como ciertos pasos de la instalación de la electrónica en un coche) se benefician altamente de la agilidad que proporciona la integración del robot en el trabajo del operario. Un ejemplo de esta configuración puede permitir al operario realizar el trabajo de mayor detalle y especialización, mientras que el brazo robot se asigna para proporcionar al operario las herramientas necesarias en cada paso del proceso de montaje. [48]

Como se ha mencionado anteriormente, esta colaboración también puede darse entre robots. Los ejemplos más extendidos los encontramos en los almacenes e inventarios, donde pueden encontrarse sistemas de clasificación, almacenaje y reparto prácticamente automatizados. [49]



Figura 2.30: Robot KUKA compartiendo espacio de trabajo con operaria. Cortesía de KUKA Robotics

### 2.3.2. Clasificación

Para entender bien las distintas clases de robots, es necesario aclarar previamente una serie de conceptos. El primero de todos es el concepto de articulación dentro de la estructura de un brazo robot. Existen cinco tipos (prismática, rotacional, cilíndrica, planar y esférica) aunque en la práctica se emplean principalmente las prismáticas y las de revolución. En el caso de las prismáticas, se cuenta con un desplazamiento relativo de una de ellas a lo largo de la otra. En el caso de las de revolución, el movimiento se realiza en forma de giro sobre la otra articulación. Ambas articulaciones se caracterizan por proporcionar un único G.D.L. a la estructura.

Los G.D.L. se entienden como los movimientos realizables por la articulación de forma independiente respecto a su articulación anterior. A medida que aumenten, el robot contará con mayor facilidad para evitar colisiones y alcanzar posiciones más exigentes.

Del mismo modo, hay que destacar las definiciones de espacio de trabajo y puntos singulares. El primero se refiere al espacio total en el que es capaz de desplazarse el robot, y puede verse limitado por factores geométricos, mecánicos o choques, y constructivos (ángulo mayor del permitido en cualquier articulación). Los puntos singulares se encuentran dentro de este espacio de trabajo, pero se

caracterizan por ser posiciones en las que la dificultad de manipulación del robot es especialmente alta [50].

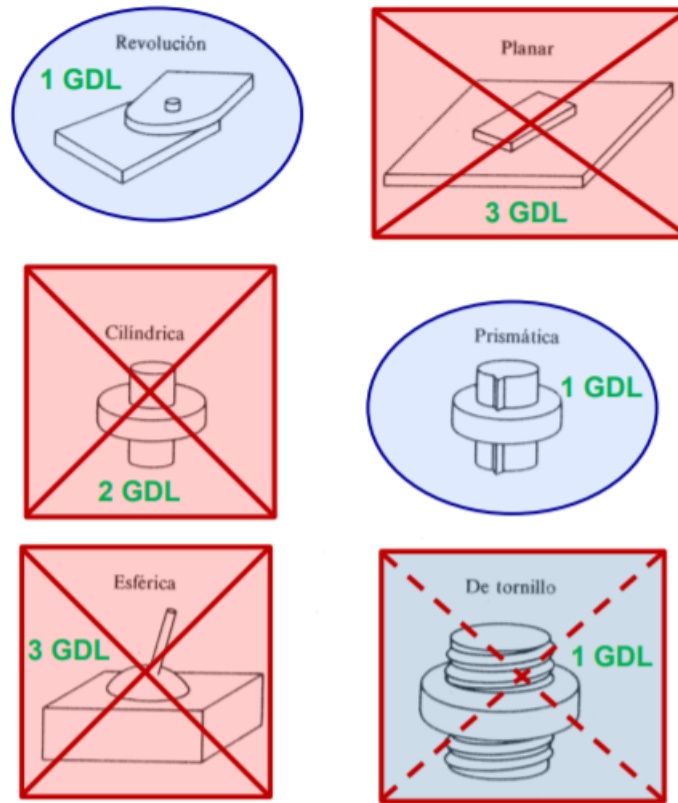


Figura 2.31: Ejemplos de articulaciones y G.D.L. proporcionados. Redondeados en azul, prismática y de revolución. Cortesía del Dpto. de Ingeniería Mecánica, ICAI

Con todo esto, se puede proceder a la clasificación de los distintos tipos:

- **Stand-alone:** Esta categoría engloba distintas estructuras: antropomórfica, paralela, esférica, cilíndrica, delta, cartesiana y SCARA. Son robots que trabajan individualmente y sus movimientos se definen en función de su estructura. Por detallar algún ejemplo, los cartesianos (empleados con gran frecuencia en FDM) están compuestos por articulaciones que permiten el desplazamiento lineal de unas sobre otras. Otro ejemplo son los SCARA, definidos por dos articulaciones excéntricas y una lineal paralela a las mismas.
- **Colaborativo:** El empleo conjunto de distintos robots, como los mencionados anteriormente, se clasifica como robots colaborativos. Esta colaboración

puede ser entre robot y operario como el ejemplo de los Cobots [51], o solo entre robots.

- **Exoesqueletos:** Esta clase de robots está ideada como un refuerzo a la estructura del propio operario. Permiten levantar mayores cargas sin daños en la columna, aumentando las capacidades físicas de la persona. Sus campos de aplicación son el ejército y ciertos sectores de la industria pesada.
- **AGVs y AMRs:** *Autonomous Guided Vehicles* y *Autonomous Mobile Robots*. Este tipo de robots choca con el concepto de manipulador tradicional, ya que simplemente se desplazan dentro del área de trabajo asignada, pero se incluye debido a su aplicación en combinación con robots colaborativos y stand-alone. Esta combinación permite aumentar el alcance del manipulador montado en la parte superior, como se ha realizado en ciertos estudios [52]. Si bien ambos vehículos se desplazan de forma autónoma, los AGVs siguen siempre una ruta preconfigurada y son incapaces de rodear cualquier obstáculo que se presente en su camino. Por contra, los AMRs disponen de una alta libertad para desplazarse entre dos puntos y son capaces de adaptar su recorrido a cualquier obstáculo que pueda aparecer. El punto a favor de los AGVs se encuentra en la facilidad para combinar un gran número de ellos, ya que se comportarán según unas rutas completamente conocidas.

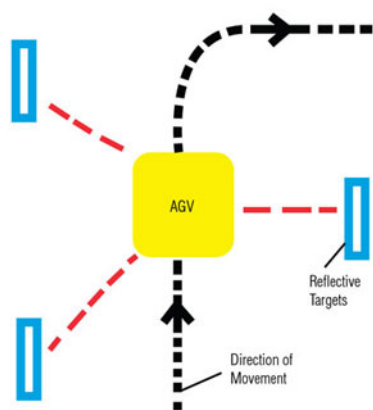


Figure 1 Assisted Navigation

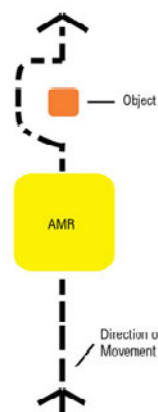


Figure 2 Smart Navigation Type

Figura 2.32: Comparativa del comportamiento entre AGVs y AMRs. Cortesía de orientalmotor

## 2.4. Fabricación no planar o multiplano

Como último punto del estado del arte, pero para nada menos importante, se trata la fabricación no planar o multiplano. A lo largo del texto se han explicado las distintas técnicas de fabricación y se ha profundizado en los distintos tipos de robot y manipuladores existentes. La fabricación no planar o multiplano surge como una combinación de la fabricación FDM con estructuras de mayor número de grados de libertad que los sistemas delta o cartesianos.

Hay que desmentir primero el "3" que acompaña al nombre de la impresión 3D. Hasta hace poco, este método de fabricación no era capaz de emplear simultáneamente los 3 ejes que lleva en su nombre. El objeto se descomponía por capas de altura constante, sobre las que el extrusor realizaba los desplazamientos dentro del mismo plano XY. Una vez finalizado, realizaba el salto en Z para proceder con la siguiente capa. El gran problema asociado a este método de trabajo es el llamado efecto escalera, que produce la rugosidad característica de las tecnologías de Fabricación Aditiva, y especialmente notable en FDM debido a las mayores alturas de capa. La fabricación no planar propone el empleo continuo de los 3 ejes, para lo cual es necesario descomponer el objeto en capas de altura fija y capas de altura variable [53]. Una vez procesado el archivo, todo depende del tipo de robot empleado y su capacidad de movimiento.

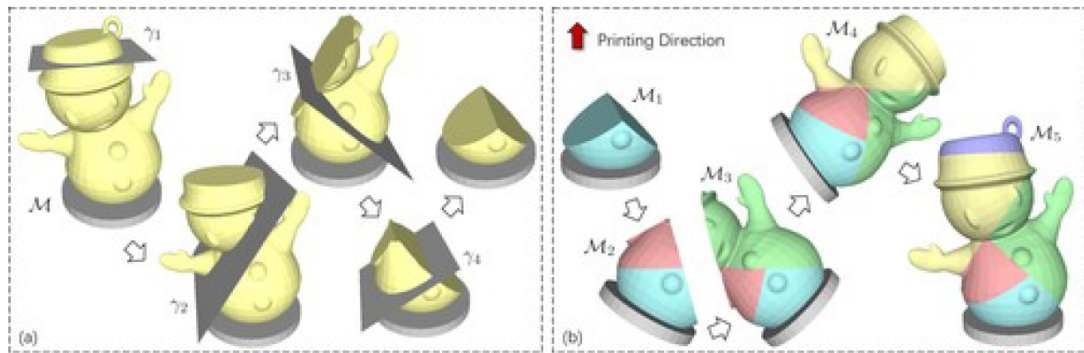


Figura 2.33: Ejemplo de descomposición en subgeometrías. Cortesía de Chenming Wu et al.

El objetivo de este nuevo campo de investigación no es otro que el de ahorrar material y optimizar el posicionamiento de las capas de cara a la aplicación de esfuerzos. Igualmente, puede emplearse para reducir el efecto escalera siempre presente en las piezas obtenidas mediante Fabricación Aditiva. Con estos objetivos en mente, caben dos enfoques principales:



- El primero y más sencillo, y que en ciertos casos puede emplearse sin adición de grados de libertad, es el llamado Fabricación Aditiva continua en 3 ejes. Lo habitual en FDM y en cualquier otra técnica es tratar el objeto por capas individuales, cada una fija en una misma altura constante para todo su recorrido. La fabricación en 3 ejes continuos rompe con esta constante de altura para permitir fabricar capas en las que la altura sea variable y por tanto sea necesario emplear los 3 ejes de forma continua.
- El enfoque anterior encuentra los límites en los choques entre el extrusor y la geometría de la pieza. Es decir, es un enfoque que no es capaz de hacer frente a pendientes pronunciadas ni a geometrías altamente complejas. Aquí es donde un grado de libertad adicional puede resultar de gran ayuda. Por ejemplo, con un grado de libertad que permita el desplazamiento siempre perpendicular al plano de la superficie, las limitaciones de la geometría se reducen significativamente. Esta adición de grados de libertad puede llevarse hasta el extremo, con sistemas de 5 o 6 grados.

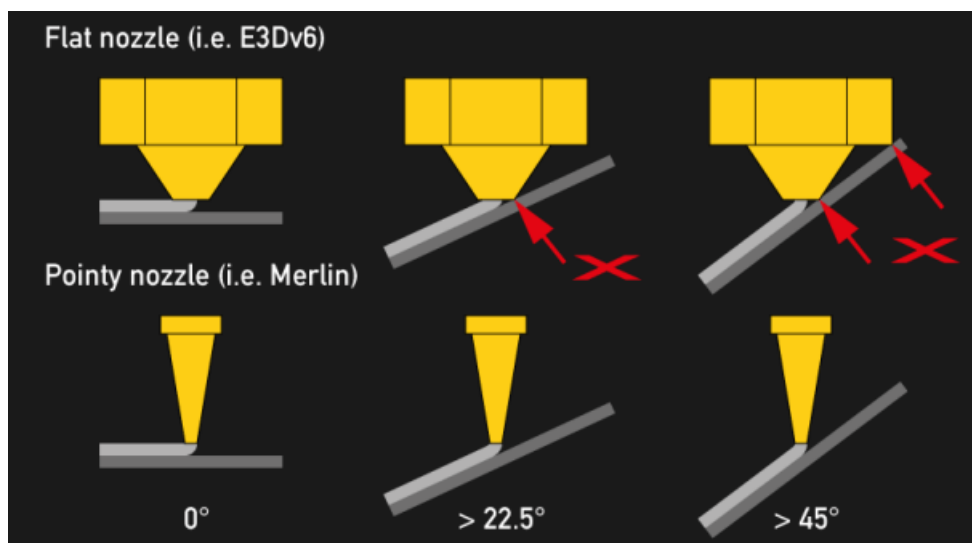


Figura 2.34: Visualización de la interferencia entre la boquilla del extrusor y la pieza. Cortesía de Hackaday

### 2.4.1. Sistemas de 3 G.D.L.

Como se ha explicado anteriormente, estos sistemas no requieren modificaciones en el hardware de la impresora que se esté empleando. Esta limitación en el

movimiento no permite su aplicación en el ahorro de material, ya que es incapaz de hacer frente a voladizos más allá de lo habitual. No obstante, con una ligera modificación en el software que se esté empleando, se pueden lograr acabados superficiales mucho más elaborados, útiles en sectores donde el efecto escalera afecta negativamente al resultado final (modelos aerodinámicos, moldes, etc...).

Tal como se mencionó anteriormente, este planteamiento encuentra su principal dificultad en la ausencia de grados de libertad adicionales, ya que emplea estructuras tradicionales sin ninguna modificación. Esta restricción en la libertad de movimiento se traduce en choques entre el cabezal de extrusión y la pieza que se esté fabricando [54]. El robot podrá hacer frente a pendientes inferiores el ángulo entre la boquilla de extrusión y el extremo del cabezal [55]. Esta limitación geométrica se explica perfectamente en la figura del apartado anterior.

El hecho de estar limitada no implica que los resultados obtenibles sean de poca calidad [54]. La descomposición de capas por altura variable, incluso cuando el extrusor permanece siempre perpendicular a la cama de extrusión, mejora significativamente la calidad superficial de las piezas, tal como se puede observar en la imagen:

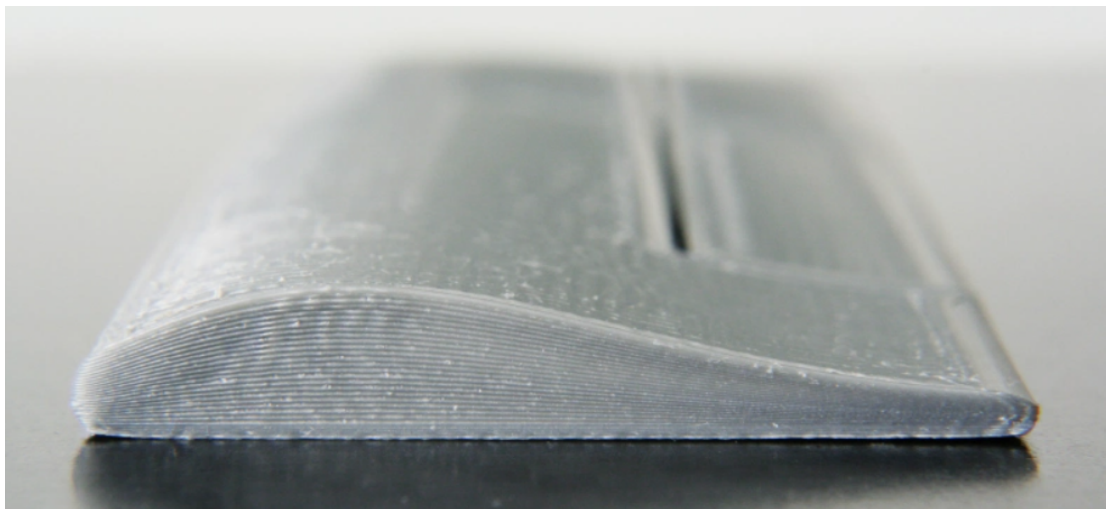


Figura 2.35: Ejemplo de perfil aerodinámico fabricado de forma no planar. Cortesía de Hackaday

### 2.4.2. Sistemas de más de 3 G.D.L.

Los sistemas con más de 3 G.D.L. son capaces de superar esta restricción geométrica. La adición de un grado de libertad a partir de una articulación para



el cabezal de extrusión, permite que este se desplace perpendicular a la superficie de la pieza en al menos un plano [56]. Si se añade un quinto G.D.L., la libertad de movimiento permite un desplazamiento perpendicular a la geometría en prácticamente la totalidad de casos.

Esta libertad adicional de movimiento permite plantear la eliminación total de soportes. Para ello, es necesario descomponer el objeto original en una serie de subgeometrías, las cuales se fabricarán perpendicularmente a cada uno de los planos de referencia [21]. Si bien las aplicaciones en cuanto a optimización de esfuerzos mecánicos aun están limitadas en función del grado de fusión del material entre subgeometrías (puede llegar a ser contraproducente), su aplicación a piezas decorativas o no sometidas a esfuerzos tiene gran interés por el ahorro de material al que está asociado.

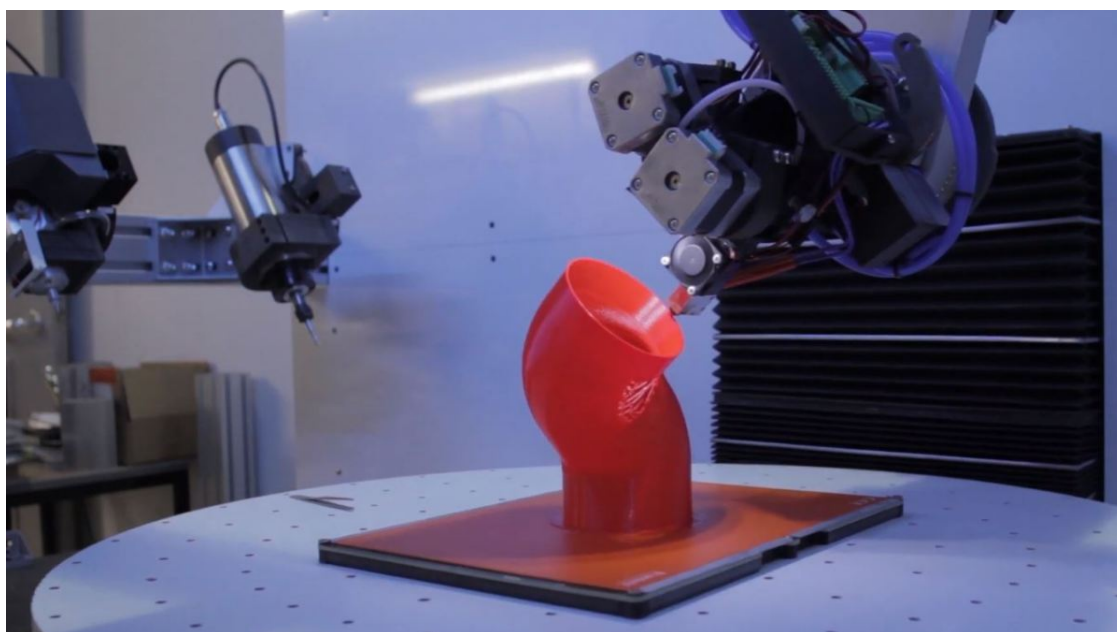


Figura 2.36: Ejemplo de fabricación FDM en 5 G.D.L.. Cortesía de Makezine



# Capítulo 3

## Preparación

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido para la construcción o compra del espacio de trabajo, opciones valoradas, contratiempos y resultado final.

### 3.1. Evaluación de opciones

La primera variable que se tuvo en cuenta fue la portabilidad. El brazo robot Dobot constituye una herramienta perfecta de cara a cursos de impresión 3D, por lo que es de gran interés facilitar su transporte.

Con esto en mente, se escoge la plataforma / carrito móvil como base de construcción frente a la configuración habitual fija de otras máquinas presentes en el laboratorio de Fabricación Aditiva:



Figura 3.1: Máquinas FDM del laboratorio de Fabricación Aditiva. Imagen propia

La plataforma a su vez debe cumplir una serie de requisitos mínimos:

- **Superficie:** la superficie de trabajo debe ser suficientemente grande como para alojar el brazo robot, la superficie de impresión o cama, la bobina de material y un ordenador portátil.
- **Estabilidad:** las ruedas del carrito deben contar con freno individual en cada una de ellas. De no ser así, las vibraciones producidas por el movimiento del brazo robot pueden llegar a afectar negativamente a la calidad de las piezas obtenidas.
- **Almacenaje:** se valora positivamente la inclusión de bandejas adicionales en la parte inferior. Estas bandejas resultan adecuadas para guardar los distintos accesorios y cabezales compatibles con el brazo robot, así como material de impresión y ejemplos creados por el mismo.
- **Ergonomía:** de cara al manejo del software instalado en el ordenador portátil, resulta conveniente instalar un asa plana sin elevación respecto al carrito. De esta forma, se evita entorpecer las manos del usuario a la hora de inicializar o ajustar el equipo.

Si bien inicialmente se considera la opción de fabricar desde cero el carrito de trabajo, finalmente se determina que de cara a plazos, carga de trabajo y facilidades, resulta mucho más conveniente escoger un carrito según catálogo que cumpla con los requisitos exigidos.

### 3.2. Distribución del espacio de trabajo

El espacio de trabajo superior se reparte entre el brazo robot, la cama de impresión, la bandeja para herramientas adicionales (cepillo, espátula...), la bobina de material y el ordenador portátil. La distribución final se muestra en el siguiente esquema, incluido en mayor detalle dentro del Anexo:

### 3.3. Instalación y primeros ensayos

El carrito final se encarga a Aslak (ref. 751503000), con dimensiones totales de 820\*780\*425 y se procede a su montaje según llega al laboratorio de Fabricación. Debido a un error del fabricante, sólo una de las cuatro ruedas cuenta con un freno. Se procede a la compra de un nuevo pack de 4 ruedas, apto para las dimensiones y posición de los orificios de anclaje en la parte inferior. Una vez montado, se

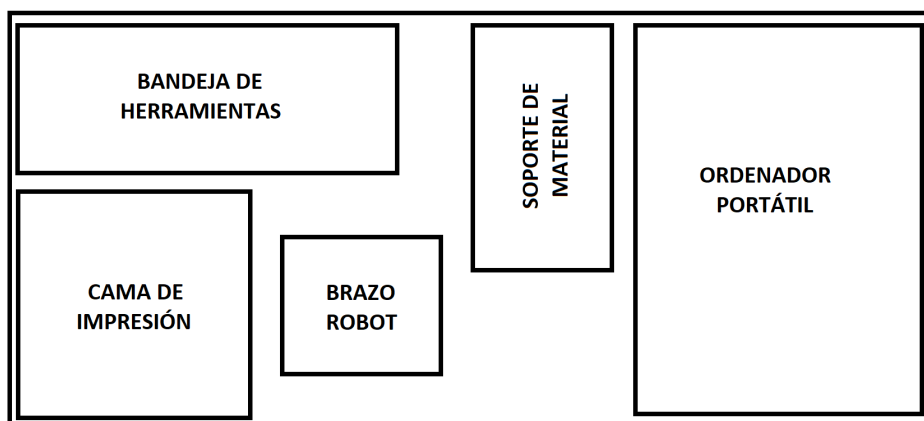


Figura 3.2: Esquema general de la distribución. Medidas y mayor detalle en Anexo

procede a la instalación de todo el conjunto.

La parte superior sigue la instalación detallada en el esquema del apartado anterior. En la bandeja inmediatamente inferior se instala una regleta para dar corriente tanto al brazo robot como al ordenador portátil. El cableado correspondiente se instala de forma que entorpezca lo mínimo posible, empleando bridas y cinta de doble cara para fijar los distintos elementos.

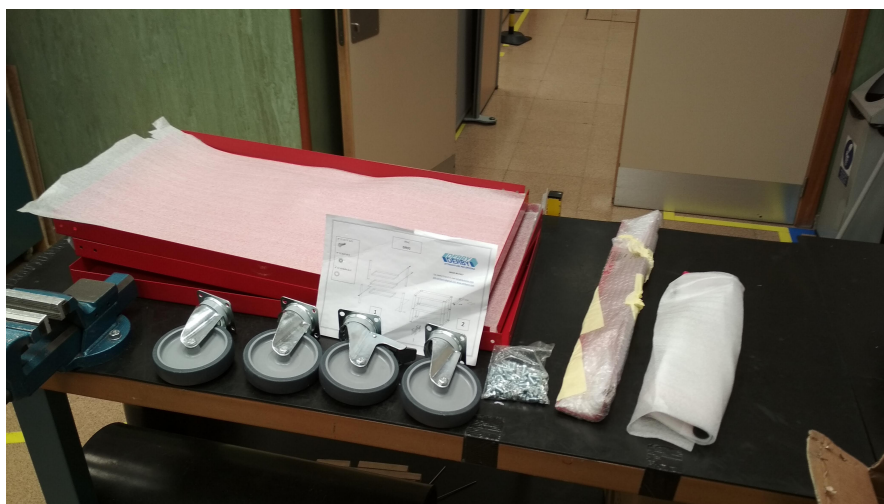


Figura 3.3: Elementos necesarios para la construcción del espacio de trabajo. Imagen propia

La última bandeja queda libre para transportar ejemplos fabricados y otras piezas de interés para la Fabricación Aditiva.

De cara a asegurar que la instalación ha sido correcta, se llevan a cabo una serie de comprobaciones y una primera impresión. Las comprobaciones consisten en:

- Revisión del cableado entre el cabezal y la base del brazo robot
- Comprobación de desplazamiento del brazo robot. Se realiza desde la propia consola de control del software Dobot
- Calentado del extrusor y extrusión de filamento. Al ser PLA, se fija una temperatura de 210 °C
- Homing del brazo robot y calibración de Z=0. El homing se puede realizar automáticamente, pero para fijar la referencia en altura es necesario emplear la consola de comandos (GCODE) para enviar la instrucción. Esta se corresponde con el comando M415, para más detalles consultar el manual de uso de Dobot

Al resultar todos correctos, se da por concluída la instalación del brazo robot.



Figura 3.4: Carrito terminado, siguiendo la distribución indicada en el esquema anterior





# Capítulo 4

## Ensayos

Debido a la situación de pandemia vivida en este año, no ha sido posible acceder a tiempo a las instalaciones de la universidad para fabricar y ensayar las probetas necesarias. Aun así, se ha decidido incluir el siguiente capítulo de cara a orientar el trabajo en caso de que se quiera continuar con él en un futuro.

El objetivo es lograr una comparativa entre la calidad de fabricación del brazo robot Dobot frente a otras máquinas de Fabricación Aditiva. Se emplearán boquillas de 0,4mm en la impresión, y el material base será PLA. Lo ideal será emplear impresoras DaVinci, DT o Ultimaker para la comparativa. Es importante comprobar que la configuración de la impresora es la correcta, ya que de lo contrario algunos resultados no podrán considerarse comparables.

Los parámetros de geometría de relleno, ancho de extrusión, temperatura de extrusión, temperatura de cama, número de líneas de contorno, número de capas base y número de capas tope serán comunes a lo largo de todos los ensayos. El parámetro porcentaje de relleno se modificará en caso de ser necesario, así como la altura de capa y la velocidad de extrusión. Cualquier otro parámetro no mencionado, se mantendrá también constante.

La nomenclatura recomendada a seguir es:

### Probeta **EE-MQ-RR-AA-OO**

- **EE:** Tipo de ensayo. Mecánico (MEC), Resolución (RES), Dimensional (DIM), Velocidad (VEL), y Repetibilidad (REP).
- **MQ:** Máquina, DB (Dobot), UM (Ultimaker), DT (DT600), DV (DaVinci)
- **RR:** Relleno en porcentaje, desde 00 a 99.

- **AA:** Altura de capa, en décimas de mm. Desde 01 hasta 03.
- **OO:** Otra información adicional que se considere, opcional.

Ejemplos:

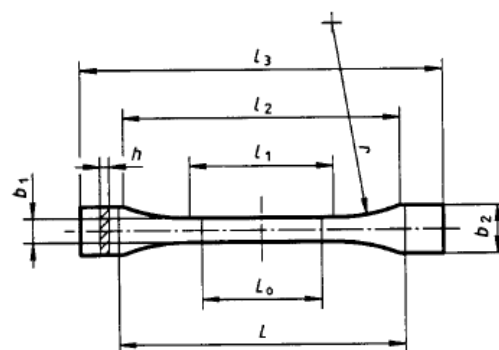
- Probeta MEC-DT-50-02.
- Test RES-DV-50-02.
- Probeta DIM-DB-30-02-CURA.
- Test VEL-DB-30-02-30 (en este caso la información adicional se corresponde con la velocidad en  $mm/s$ ).
- Probeta REP-DT-30-02-SI (en este indica la posición en la cama, SI = Superior Izquierda).

Se busca determinar:

- MEC: Valores de tensión y elongación a rotura. Comparativa entre máquinas, comparativa según altura de capa (para 0,1mm, 0,2mm y 0,3mm. Solo Dobot) y comparativa según porcentaje de relleno (5 %, 30 %, 50 %, 70 % y 100 %. Solo Dobot). Total de 70 probetas.
- RES: Característica mínima fabricable, ángulo máximo de voladizo admisible. Comparativa entre máquinas. Altura de capa de 0,2mm y 50 % de relleno. Total de 4 tests.
- DIM: Desviación respecto a las dimensiones del archivo original. Comparativa entre máquinas, comparativa entre *slicers* (solo Dobot). Altura de capa de 0,2mm y 30 % de relleno. Total de 7 probetas nuevas (se pueden aprovechar probetas anteriores).
- VEL: Velocidad máxima de funcionamiento sin presencia de *ghosting* grave. Velocidad inicial de 30mm/s, incrementos de 10mm/s hasta los 80mm/s. Altura de capa de 0,2mm y 30 % de relleno. Dobot, opcional comparativa con otras máquinas si diera tiempo. Mínimo de 6 tests, máximo de 24.
- REP: Consistencia de los valores dimensionales y las propiedades mecánicas en función de la posición en la cama de impresión. Aparte de la posición central, se tendrán en cuenta las posiciones superior e inferior a izquierda y derecha. Altura de capa de 0,2mm y 30 % de relleno. Total de 28 probetas nuevas (se pueden aprovechar probetas anteriores).

Siguiendo las especificaciones de la norma UNE 116005 para la determinación de propiedades mecánicas, en todos los ensayos destructivos se debe emplear un mínimo de 5 especímenes, llegando a 7, 9 o más según se busque mayor precisión. Se ha considerado la opción de emplear 7 especímenes como la más adecuada, ya que cumple el compromiso entre unos resultados fiables y un tiempo de fabricación y ensayo aceptable. **Sólo serán válidos los ensayos con rotura en el tercio longitudinal interior de la pieza.** Del total ensayado, se tomará únicamente la mediana como dato válido, tal como se indica en la misma norma. [57]

Estas probetas para el ensayo de tracción han de seguir las dimensiones especificadas en la norma UNE-EN ISO 527-2: [58]



Medidas en milímetros

| Tipo de probeta |                                        | 1BA          | 1BB          |
|-----------------|----------------------------------------|--------------|--------------|
| $l_3$           | Longitud total                         | $\geq 75$    | $\geq 30$    |
| $l_1$           | Longitud de la zona paralela estrecha  | $30 \pm 0,5$ | $12 \pm 0,5$ |
| $r$             | Radio                                  | $\geq 30$    | $\geq 12$    |
| $l_2$           | Distancia entre zonas paralelas anchas | $58 \pm 2$   | $23 \pm 2$   |
| $b_2$           | Anchura en los extremos                | $10 \pm 0,5$ | $4 \pm 0,2$  |
| $b_1$           | Anchura en la zona estrecha            | $5 \pm 0,5$  | $2 \pm 0,2$  |
| $h$             | Espesor                                | $\geq 2$     | $\geq 2$     |
| $L_0$           | Distancia entre marcas                 | $25 \pm 0,5$ | $10 \pm 0,2$ |
| $L$             | Distancia inicial entre mordazas       | $l_2^{+2}_0$ | $l_2^{+1}_0$ |

Figura 4.1: Dimensiones de las probetas para el ensayo de rotura. Norma ISO 527-2

Las probetas se fabricarán únicamente según la orientación 1A indicada en la norma UNE 11605 [57].

Para el ensayo de velocidad se empleará un cubo de calibración XYZ, obtenido

de Thingiverse. Para el ensayo de resolución se empleará una geometría de muestra, también obtenida de Thingiverse.

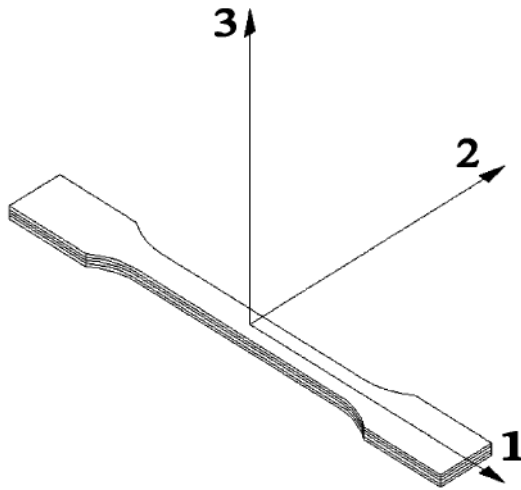


Figura 4.2: Orientación de las capas para el proceso de fabricación (1A). Norma UNE 11605

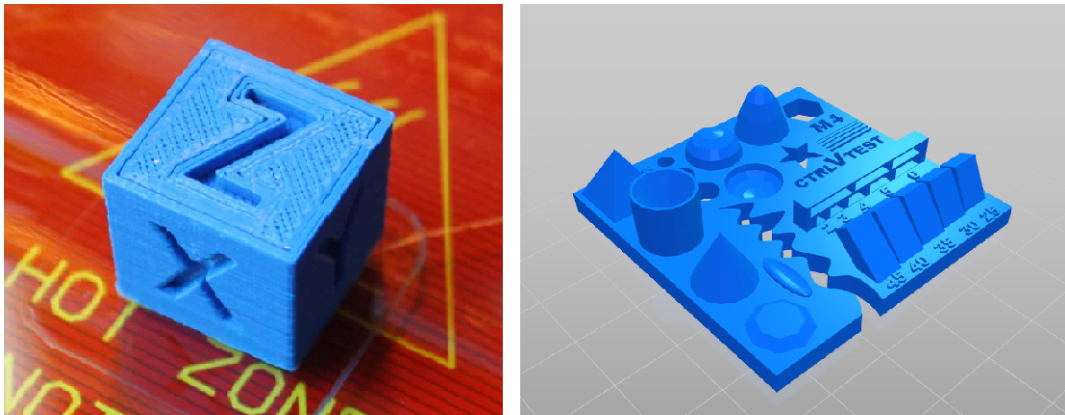


Figura 4.3: A la izquierda, cubo XYZ para el ensayo de velocidad. A la derecha, geometría de muestra para el ensayo de resolución. Archivos obtenidos de Thingiverse

### 4.1. Mecánicos

Como se menciona anteriormente, se busca determinar los valores de tensión y elongación a rotura. Con estos datos, se podrá realizar una comparativa entre

máquinas, una comparativa según altura de capa (para 0,1mm, 0,2mm y 0,3mm. Solo Dobot) y otra comparativa según porcentaje de relleno (5 %, 30 %, 50 %, 70 % y 100 %. Solo Dobot). Total de 70 probetas, siguiendo el criterio de 7 especímenes.

#### **4.1.1. Comparativa configuración fija**

A partir de las probetas ensayadas, todas fabricadas con configuraciones similares, se procederá a la comparativa de los distintos valores de elongación y tensión a rotura. Es de esperar que se obtengan resultados similares que permitan llegar a la conclusión que el brazo robot Dobot es capaz de fabricar objetos con unas propiedades mecánicas similares a las de cualquier otra impresora. Total de 28 probetas, 7 en cada máquina. Altura de 0,2mm y relleno del 50 %.

#### **4.1.2. Comparativa configuración variable (sólo Dobot)**

Esta comparativa estudiará el efecto de dos variables por separado: la altura de capa y el porcentaje de relleno. Respecto al segundo parámetro, es esperable obtener una mayor resistencia a la rotura, ya que se cuenta con una mayor cantidad de material sometido a esfuerzos a la par que se aumenta la sección resistente en la estructura interna de la probeta. En cuanto a la altura de capa, se pueden esperar mejores resultados para alturas menores, aunque no deberían distar mucho de las alturas mayores. Esto es debido a que, al comprimir el apilado de las distintas capas, se reducen los intersticios presentes entre los distintos segmentos de filamento, aumentando ligeramente el área resistente de la probeta. Total de 14 probetas para el apartado de altura de capa (7 a 0,1mm y 7 a 0,3mm, relleno al 50 %) y otras 28 para la comparativa de relleno (5 %, 30 %, 70 % y 100 %, se aprovechan los datos de las ya fabricadas al 50 %).

### **4.2. Resolución**

En este apartado se buscará determinar la característica mínima fabricable, ángulo máximo de voladizo admisible, calidad de la geometría y distancia máxima salvable, entre otras. Se llevará a cabo una comparativa entre máquinas. La configuración será común a todas ellas, con altura de capa de 0,2mm y 50 % de relleno. Total de 4 tests.

### 4.3. Dimensionales

Este apartado tratará las desviaciones presentes en los especímenes respecto a las dimensiones del archivo original. Se llevará a cabo una comparativa entre máquinas y otra comparativa entre *slicers* (solo Dobot). La configuración será común a todas las máquinas, altura de capa de 0,2mm y 30 % de relleno. Total de 7 probetas nuevas (se pueden aprovechar probetas anteriores).

#### 4.3.1. Comparativa configuración fija

El objeto de la comparativa con configuración fija es determinar si la precisión del brazo robot Dobot está a la altura de otras máquinas. Es de esperar que los resultados dimensionales del brazo robot tengan menor precisión y exactitud que máquinas de corte más industrial como puede ser la DT. La configuración del extrusor de Dobot en voladizo al final del propio brazo también constituye un factor en contra, ya que su propia inercia puede contribuir a aumentar la cantidad de desviaciones respecto a la trayectoria original o ideal. No es necesario fabricar probetas nuevas, se aprovecharán las de 0,2mm y 30 % de relleno antes de que sean ensayadas.

#### 4.3.2. Comparativa *slicers*

Los distintos *slicers* disponibles comparten un mismo objetivo independientemente de como hayan sido creados: cortar la geometría por capas para programar los movimientos del extrusor siguiendo la forma del objeto deseado. Esto se puede lograr con un mayor o menor grado de optimización, resultando en ocasiones en resultados ligeramente distintos. Estas diferencias suelen ser menores, por lo que es esperable no obtener diferencias significativas en esta parte de los ensayos. Se imprimirán 7 probetas a 0,2mm y 30 % con el nuevo *slicer* (lo normal sería emplear *slic3r* en la mayoría de probetas, ya que es el que está configurado por defecto. Las nuevas probetas se procesarían con Cura en este caso).

### 4.4. Velocidad

Esta sección busca encontrar la velocidad máxima de fabricación del brazo robot. Opcionalmente, podrían añadirse comparativas con las otras máquinas. Para cada máquina, se fabricará el cubo XYZ con 0,2mm de altura y relleno del 30 %. La velocidad inicial será de 30mm/s, con incrementos de 10mm/s hasta alcanzar

los 80mm/s o bien sea imposible lograr piezas aceptables (a mayor velocidad, aumentará la presencia de *ghosting* y vibraciones sobre la pieza a fabricar). El total de tests se situará entre 6 y 24, dependiendo del número de máquinas que se quieran emplear en la comparativa. En caso de comparar con, por ejemplo, la DT, es de esperar que esta sea capaz de trabajar a grandes velocidades sin presencia de defectos. Esta impresora cuenta con una estructura de alta rigidez y realiza los desplazamientos con alta precisión. Los resultados del brazo robot Dobot seguramente sean inferiores en cuanto a calidad.

## 4.5. Repetibilidad

El objeto de este apartado es analizar la consistencia de los valores dimensionales y las propiedades mecánicas en función de la posición en la cama de impresión. Aparte de la posición central, se tendrán en cuenta las posiciones superior e inferior a izquierda y derecha. Altura de capa de 0,2mm y 30 % de relleno. Total de 28 probetas nuevas (se pueden aprovechar probetas anteriores), 7 en cada esquina de la cama de impresión.

### 4.5.1. Comparativa dimensional

En este apartado se analizará la precisión y exactitud dimensional del brazo robot en función de la posición en la que se fabrique la pieza en la cama. Es de esperar que en posiciones alejadas de la base del brazo se obtenga una menor precisión.

### 4.5.2. Comparativa mecánica

Posteriormente, se ensayarán las probetas para determinar si la falta de precisión en ciertas posiciones se puede asociar a unas propiedades mecánicas inferiores. Se puede esperar que, al disminuir la precisión del movimiento del brazo, disminuya la cohesión entre las distintas capas de material y con ello los valores de resistencia a tracción de la misma.





# Capítulo 5

## Conclusiones

Analizando los objetivos planteados al inicio del proyecto, se puede concluir que se ha logrado cubrir con éxito parte de los propuestos originalmente. Los objetivos originales son:

### **Objetivos principales:**

- Fabricación de un banco de trabajo que permita la continuidad y comparación de los resultados entre ensayos.
- Analizar las capacidades del brazo robot en cuanto a resolución, dimensiones y velocidad.
- Comparar las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante esta técnica frente a las de una estructura cartesiana.
- Analizar la repetibilidad del brazo robot a lo largo de distintos puntos de un mismo plano.

### **Objetivos secundarios:**

- Analizar la viabilidad de realizar los mismos ensayos en un robot de 5 o 6 ejes.
- Analizar el uso de la impresión continua en 3 ejes (fabricación no planar).
- Implantación de una RaspberryPi que permita el uso del robot sin necesidad de una conexión permanente a un PC.

De los anteriores, por orden, se ha logrado:

- Construcción del banco de trabajo. Este espacio otorga la estabilidad necesaria para poder realizar comparativas entre distintas piezas fabricadas por el brazo robot. Adicionalmente, sirve como punto de almacenaje de herramientas, material y otros accesorios que facilitan el flujo de trabajo.
- Por otra parte, este proyecto ha permitido recabar el conocimiento necesario para entender las tendencias y tecnologías planteadas en el campo de la fabricación no planar. Este es un paso previo necesario a la implantación de la tecnología FDM en sistemas de más de 3 G.D.L., concluyendo que actualmente resulta muy interesante plantear una futura investigación en este campo.

Si bien no ha sido posible realizar los ensayos mecánicos necesarios, se quiere dejar una serie de sugerencias de cara al análisis estadístico que puedan llevarse en un futuro.

El análisis que se plantea a partir de la norma UNE 116005 [57] es sencillo, ya que solo exige emplear la mediana de cada 7 probetas (mínimo de 5, ya se comentó en el capítulo de Ensayos que este proyecto emplearía 7) como dato válido. Esta reducción no es interesante de cara a ciertos análisis estadísticos como ANOVA, ya que se elimina información que quizá pueda resultar útil.

El análisis principal deberá realizarse de acuerdo a la norma mencionada, ya que esta es la que permite las comparativas dentro de un marco válido. Aun así, se deberán observar los datos con cuidado, ya que se estará empleando directamente la mediana. Será útil comprobar que no existen indicios de datos con dispersión elevada (baja precisión) o influenciados por otros factores que no se hayan tenido en cuenta por error.

De cara a asegurar la validez de los datos, puede plantearse un análisis ANOVA sobre la varianza de cada tanda de probetas para un cierto intervalo de confianza. En este aspecto habría tres escenarios posibles:

- En el primer caso, las varianzas de cada tanda de probetas, independientemente de la máquina, resultan similares. Este escenario es poco probable, ya que cada máquina se ha construido con elementos diferentes e incluso se cuenta con estructuras distintas.

- 
- El segundo escenario podría ser la obtención de varianzas similares en las tandas de probetas fabricadas en una misma máquina. Este escenario resultaría muy positivo, ya que sería un indicador de que la precisión de la máquina es elevada. Igualmente, es el escenario más probable.
  - El tercer caso consistiría en varianzas dispares entre las tandas de probetas fabricadas en una misma máquina. Este es el escenario menos deseable, ya que indicaría que la máquina empleada carece de precisión necesaria para proporcionar datos de calidad.

Una vez realizada esta comprobación adicional sobre la calidad de los datos, puede procederse al análisis entre distintos ensayos.

En los análisis planteados de cara a relación entre porcentaje de relleno y altura de capa (véase los ensayos planteados en 4.1.2), puede resultar interesante estudiar si existe una correlación mediante regresión. Para ello, primero será necesario representar los valores obtenidos en una gráfica para comprobar si se debe realizar un estudio lineal o no lineal.

En el resto de análisis (comparativas entre máquinas, como en 4.1.1), puede ser interesante plantear un análisis ANOVA sobre la media de cada tanda en relación a otras máquinas y para un cierto intervalo de confianza. Lo más sencillo sería ignorar la norma y tomar todos los valores obtenidos en los ensayos, pero lo ideal sería repetir las tandas el número suficiente de veces como para llegar a conclusiones significativas.



# Capítulo 6

## Anexos

En la siguiente sección se muestran los planos y documentos de especial interés. Igualmente, se muestra los avances del proyecto dentro del marco de los ODS. Estos anexos incluyen el plano orientativo para la distribución del espacio de trabajo, la referencia comercial del carrito y el manual de usuario del brazo robot Dobot (páginas de impresión 3D).

### 6.1. Integración de los ODS

Como breve introducción a esta sección, los ODS surgen como una guía de cara a mejorar las condiciones de vida del ser humano en todo el planeta, garantizando un desarrollo sostenible. Estos se dividen en distintas categorías, contando con metas de cara a 15 años (año 2030). [59]

La lista de objetivos es extensa, alcanzando las 17 áreas de trabajo. Este proyecto puede enmarcarse en tres de estas:

- «Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos»
- «Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación»
- «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles»

Comenzando por el objetivo 4 («Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos»), uno de los fines de este proyecto consistía en la fabricación del banco de



Figura 6.1: Lista de los ODS. Cortesía de la ONU

trabajo adecuado para el brazo robot. Este robot, al igual que otras impresoras 3D disponibles en el laboratorio, constituye un elemento de muestra con fines educativos ideal, ya que se desarrolla con la portabilidad como uno de sus elementos clave. La inclusión de tecnologías innovadoras dentro de las aulas no hace si no incrementar la calidad de la educación que se imparte. [60]

El siguiente objetivo, el n° 9 («Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación»), también resulta aplicable al proyecto. Los dos campos principales tratados en el proyecto (robótica y fabricación aditiva) son áreas de gran innovación, especialmente durante los últimos años. Ambos campos, a través de su combinación, han logrado grandes avances en la optimización de procesos industriales y de los procesos de fabricación. [61]

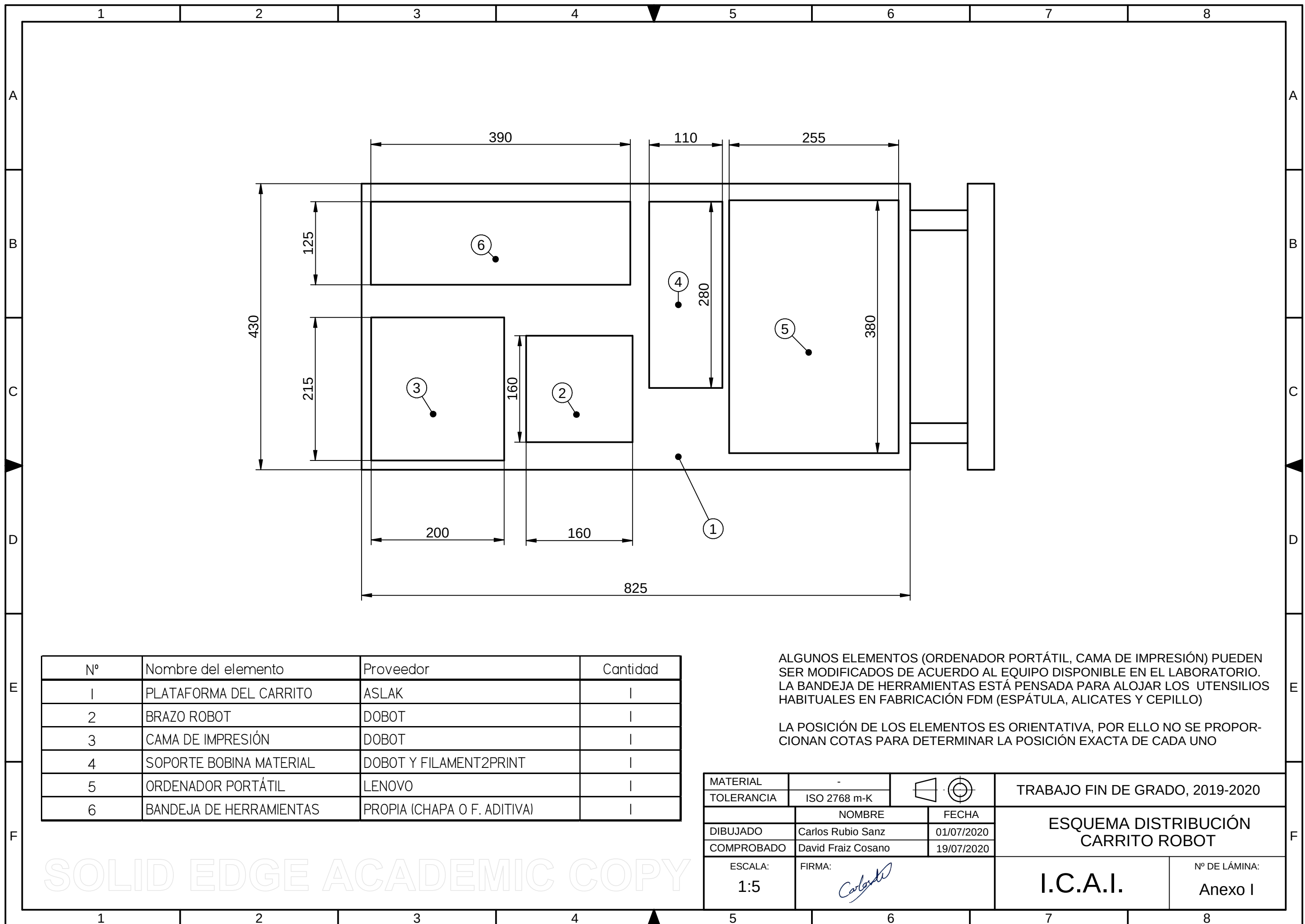
Por último, el objetivo n° 12 («Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles») es completamente compatible en el ámbito de la Fabricación Aditiva. Esta área ha aumentado el grado de optimización de recursos, tanto en el desarrollo de nuevas técnicas como en la mejora de la gestión del material empleado y la de sus residuos. Además, la impresión 3D constituye un recurso muy

valioso a la hora de agilizar los procesos de creación y prototipado, donde logra grandes ahorros tanto en tiempo como en materiales y recursos. Cabe destacar que la composición química del PLA, material empleado como alimentación del brazo robot, se basa en el maíz como ingrediente principal. Esta composición permite que los residuos generados no reciclados se puedan descomponer de forma natural en plazos mucho menores a la mayoría de los plásticos. Del mismo modo, hay que recordar que el PLA se engloba en la categoría de los termoplásticos, por lo que las piezas defectuosas o restos de soportes pueden ser fundidos y extruidos de nuevo tantas veces como sea necesario. [62]

## 6.2. Planos y documentos de interés

En esta sección se muestran los planos y documentos de interés mencionados anteriormente.

- **Documento 1:** Plano de la vista superior del carrito. Distribución de los elementos
- **Documento 2:** Información comercial del carrito escogido.
- **Documento 3:** Manual de uso del brazo Dobot para impresión 3D





## CARRITO PORTAUTENSILIOS GR05

REF: 751503000

**METALWORKS**



### Descripción

El Carrito Portautensilios GR05 de Metal Works consta de 3 bandejas y un sistema de 4 ruedas con frenos. Dispone de un asa atornillada a la estructura para facilitar su transporte y permite una carga de 70 kilos por estante.

### Características técnicas

- ✓ **Peso neto:** 22 kg
- ✓ **Dimensiones:** 820 x 425 x 780 mm mm
- ✓ **Espesor máx. de chapa:** 1,5 mm mm
- ✓ **Ø de las ruedas:** 100 mm

## 8. The Tutorial of 3D Printing

The whole flow chart of 3D printing as shown below:



### 3D printing can use Repetier Host and Cura:

- Cura: Slicing is fast and stable, has strong inclusiveness to 3D model structure, less parameter settings, more users.
- Repetier-Host: It can slice, check and modify G-Code, and control 3D printing manually. While it doesn't offer built in slicing, it can use 3<sup>rd</sup> party slicing software, such as CuraEngine, Slic3r and so on. Finally, it has more parameter settings, making it very flexible.

Here will introduce the details separately from the second step.

**Note:** On Mac OS, Dobot can only use Cura, [please refer to the tutorial of Cura](#).

### 8.1 Installation of Accessories of 3D Printing

3D printing accessories: extruder, hotend, motor cable and filament, as shown below:

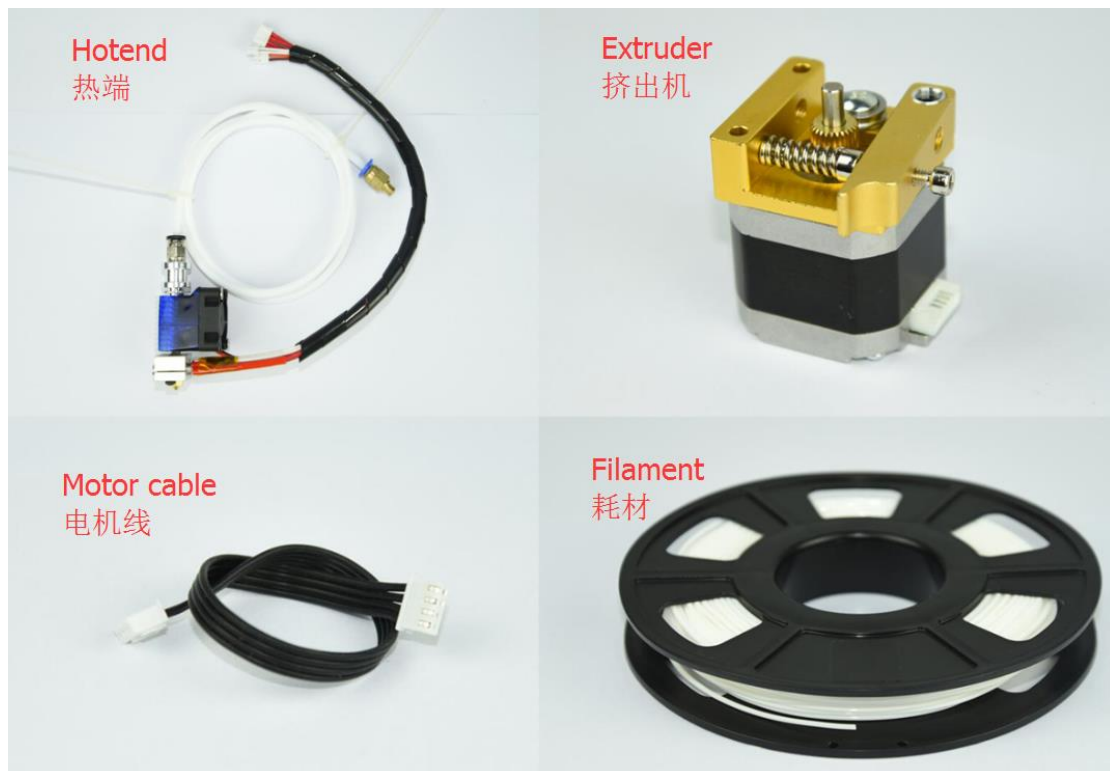


Figure 8.1 Accessories of 3D Printing

The steps as follows:

1. Press down the lever on the extruder by hand, and push down the filament to the bottom of the hole via the pulley.

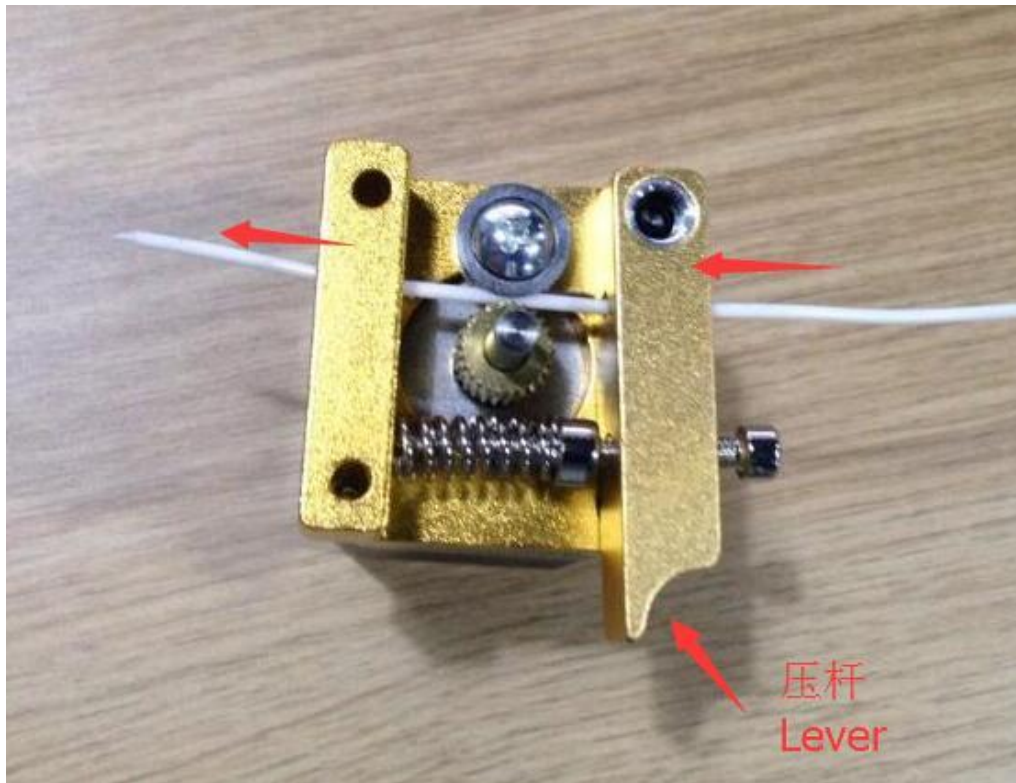


Figure 8.2 Insert filament

2. Insert the filament to PTFE Tube and push it down the bottom of the hotend, then tighten the Push-in fitting on the extruder. Notice: Make sure the PTFE Tube itself is pushed down to the hotend bottom. Otherwise, it will cause abnormal discharge.

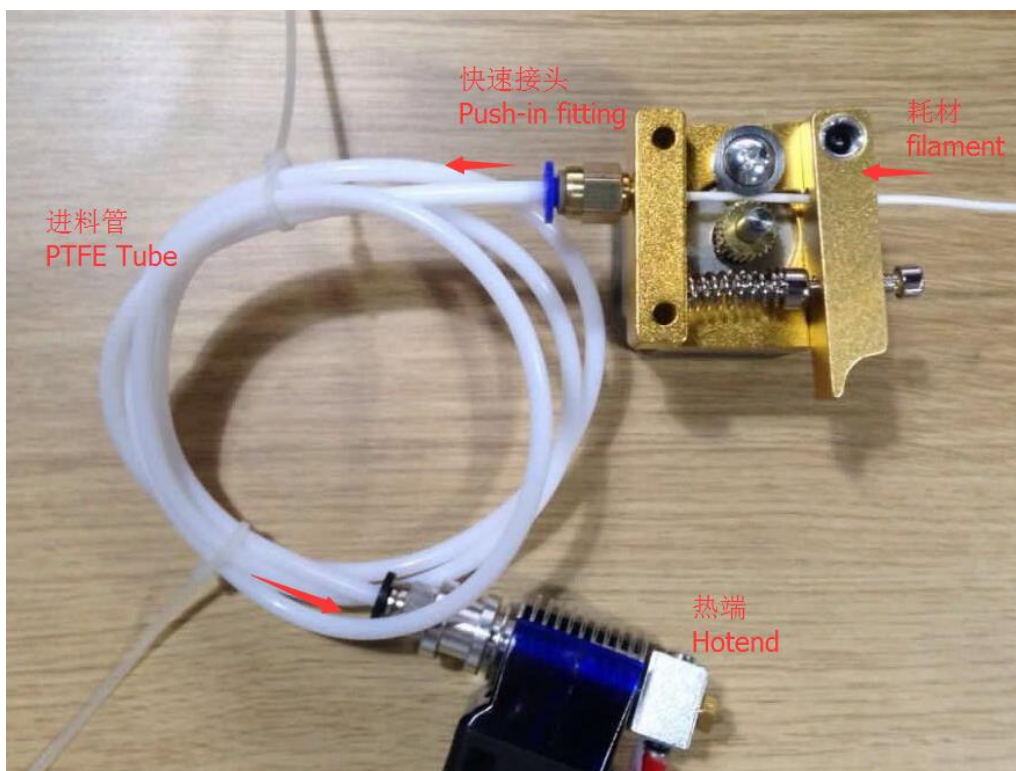


Figure 8.3 Connect extruder and hotend

3. Fasten hot end with butterfly nut;
4. Connect power line of heating cable with interface 4 on the forearm, link power line of fan with interface 5, and connect thermistor line with interface 6.

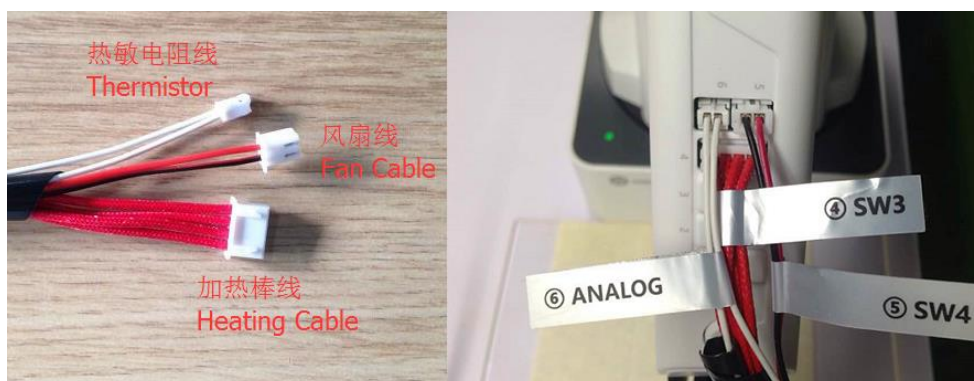


Figure 8.4 Connection of forearm

5. Connect extruder motor line with Stepper1 on the controller.



Figure 8.5 Connection of extruder

6. The whole kit should look like this:

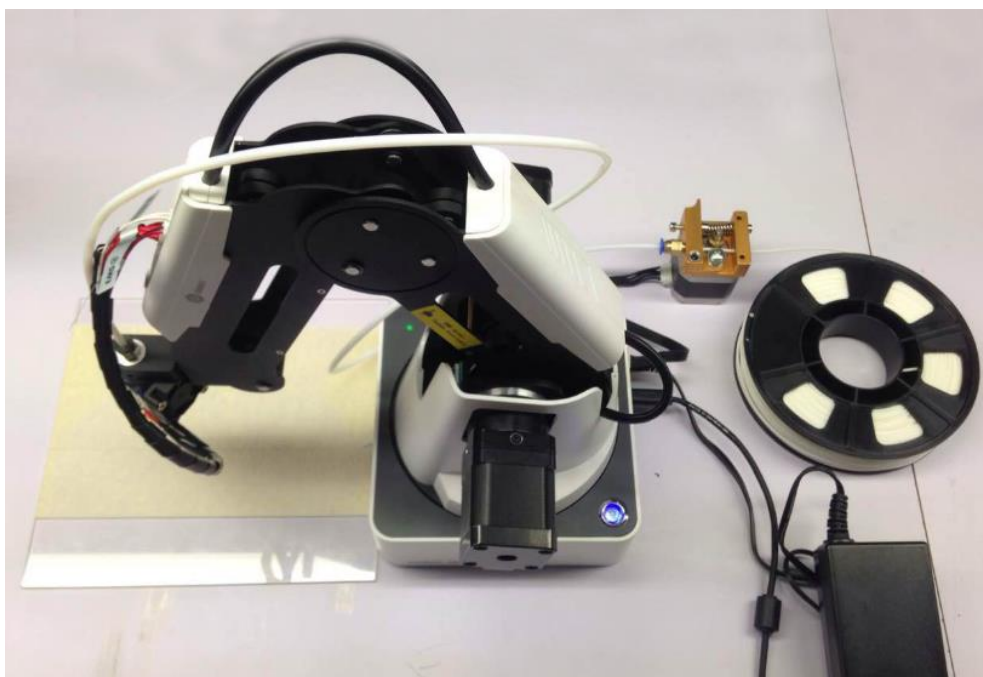


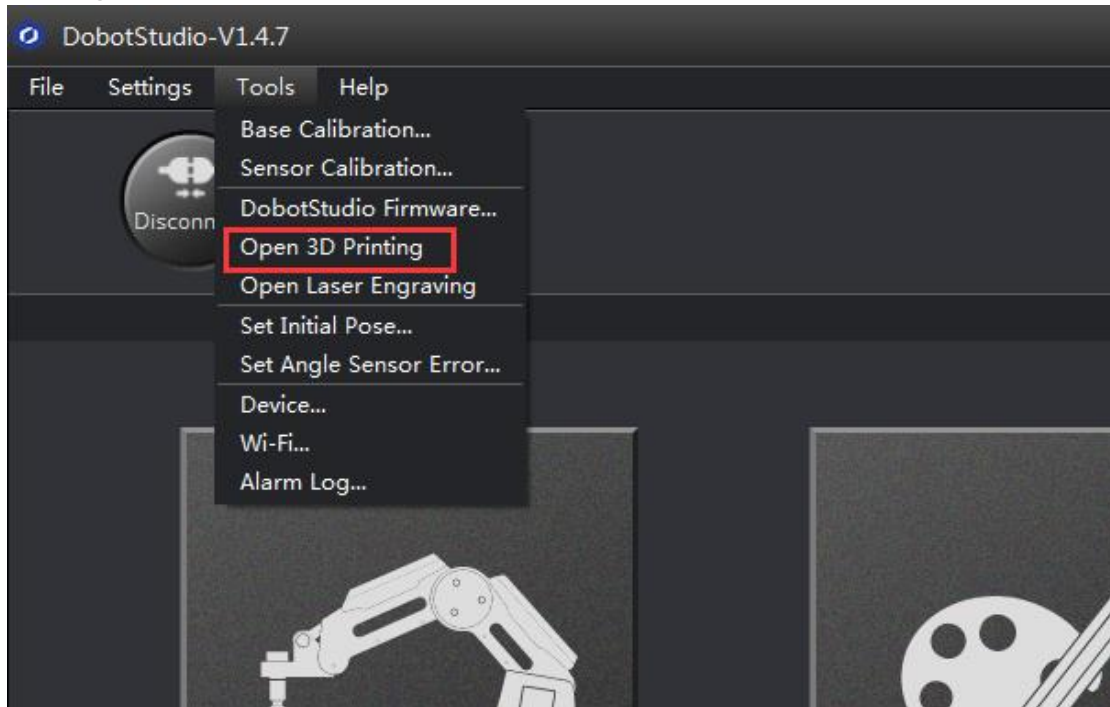
Figure 8.6 3D printing installation



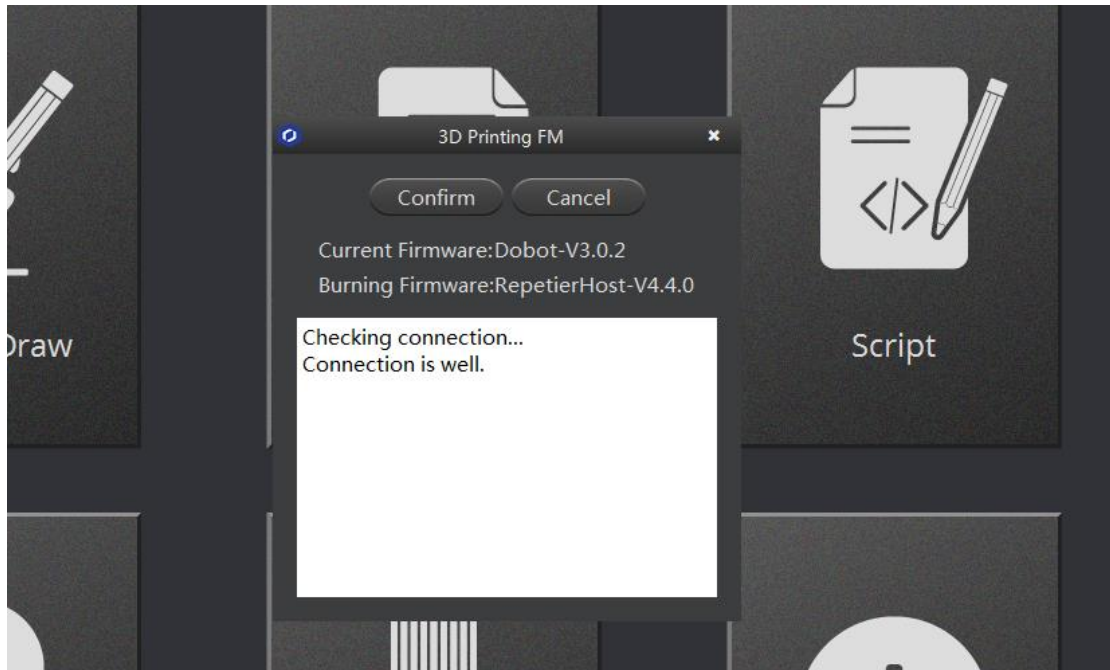
## 8.2 Repetier Host

### 8.2.1 Switch into 3D printing

Repetier host has been built into DobotStudio. Open DobotStudio, click **Tools-> Open 3D Printing**:



A pop up a dialog of 3D printing burning firmware will appear. Click **Confirm**, and then Repetier Host will pop up automatically, as shown below:



The interface of Repetier Host:

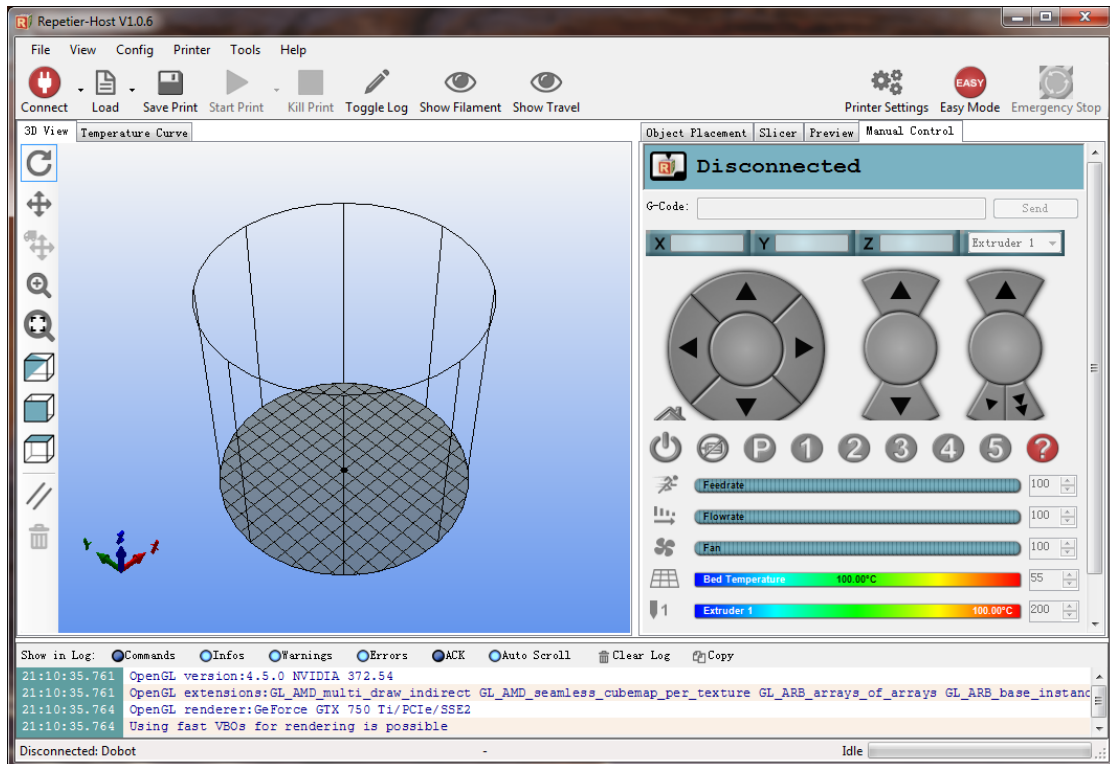


Figure 8.7 Repetier host

Note: If the current software is set for 3D printing, you can open DobotStudio directly when you want to use next time. Click **Connect**, select **Ok**, and then you can switch to Repetier Host, as follows:

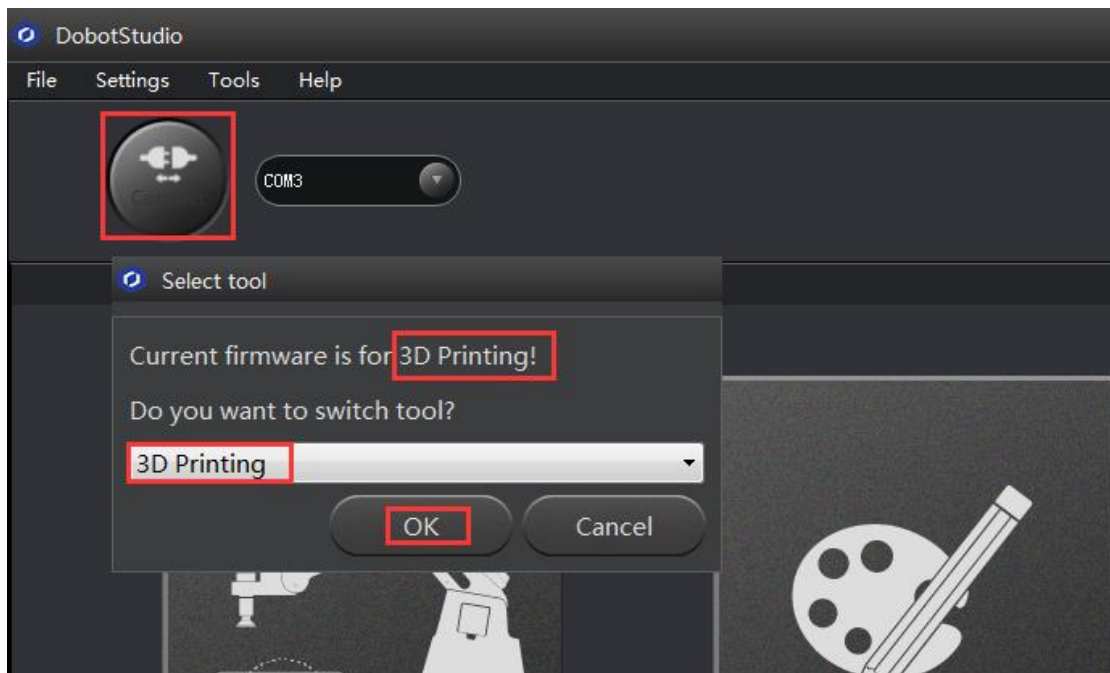


Figure 8.8 Switch into 3D printing automatically

## 8.2.2 Parameter Settings of 3D printing for the first time

Set this up when you use it for the first time ONLY. (You don't need to do this twice!)

Click '**Printer settings**' in the top right corner of the interface, and set related parameters in the pop up dialogue box:

(1) Connection lable settings

Printer Name: Dobot ( can be named by oneself)

Select Dobot Serial Port: Dobot serial port

Baud Rate: 115200

Reset on connect:DTR low->high->low

Reset on Emergency: Send emergency command+DTR high->low( If failed to connect, please try other options )

Receive cache size: 63

The rest keep the default settings, click **Apply** after setting.

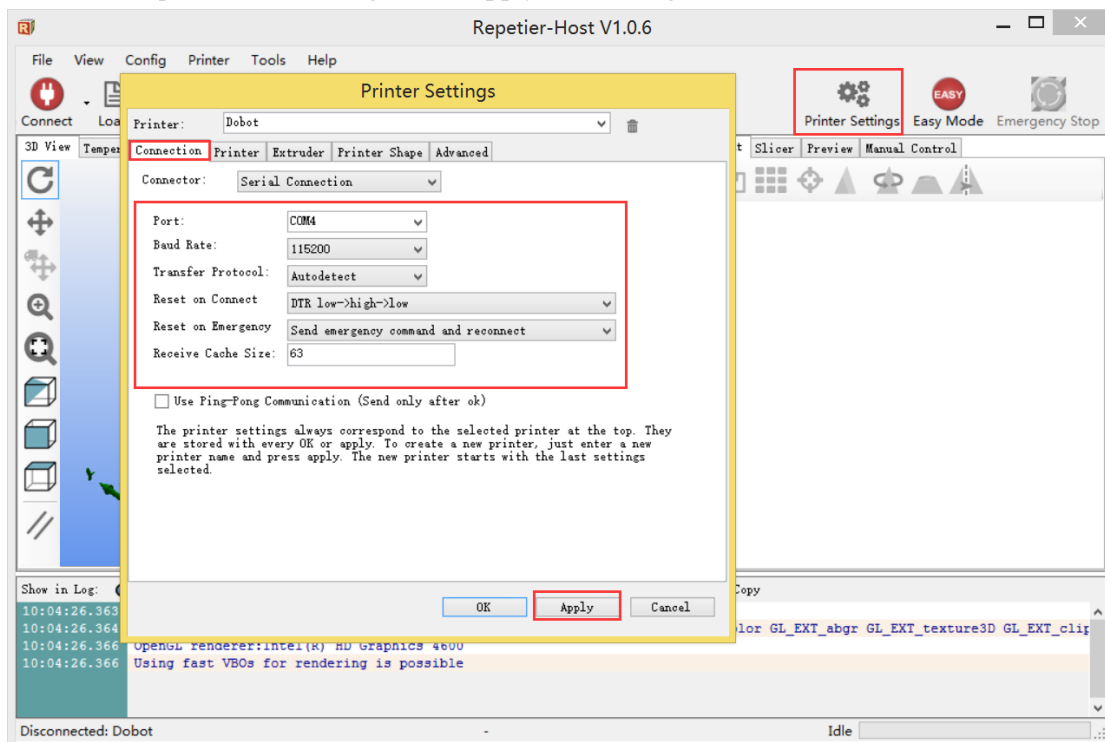


Figure 8.9 Connection Settings

(2) Connection Lable Settings

uncheck the following three settings and keep the rest default:

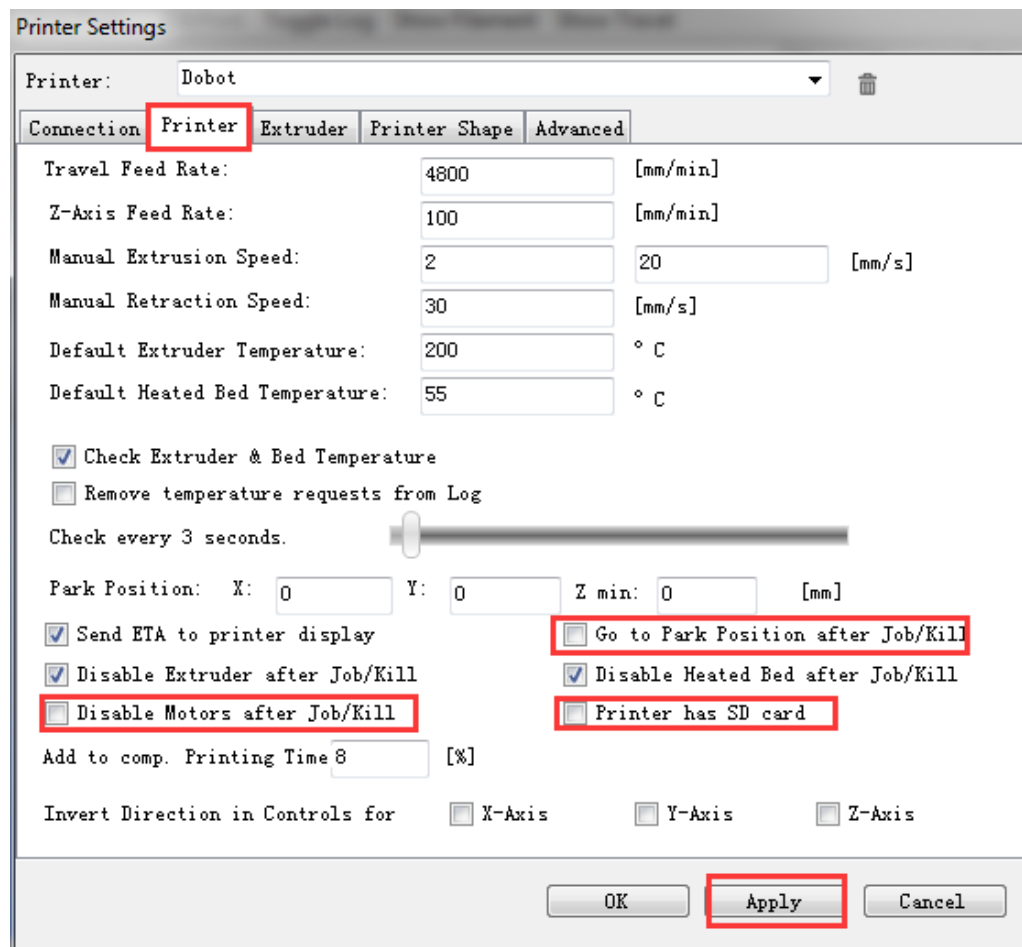


Figure 8.10 Printer settings



### (3) Extruder Settings

The number of extruder setting: 1

The nozzle diameter: 0.4mm

Keep the rest default.

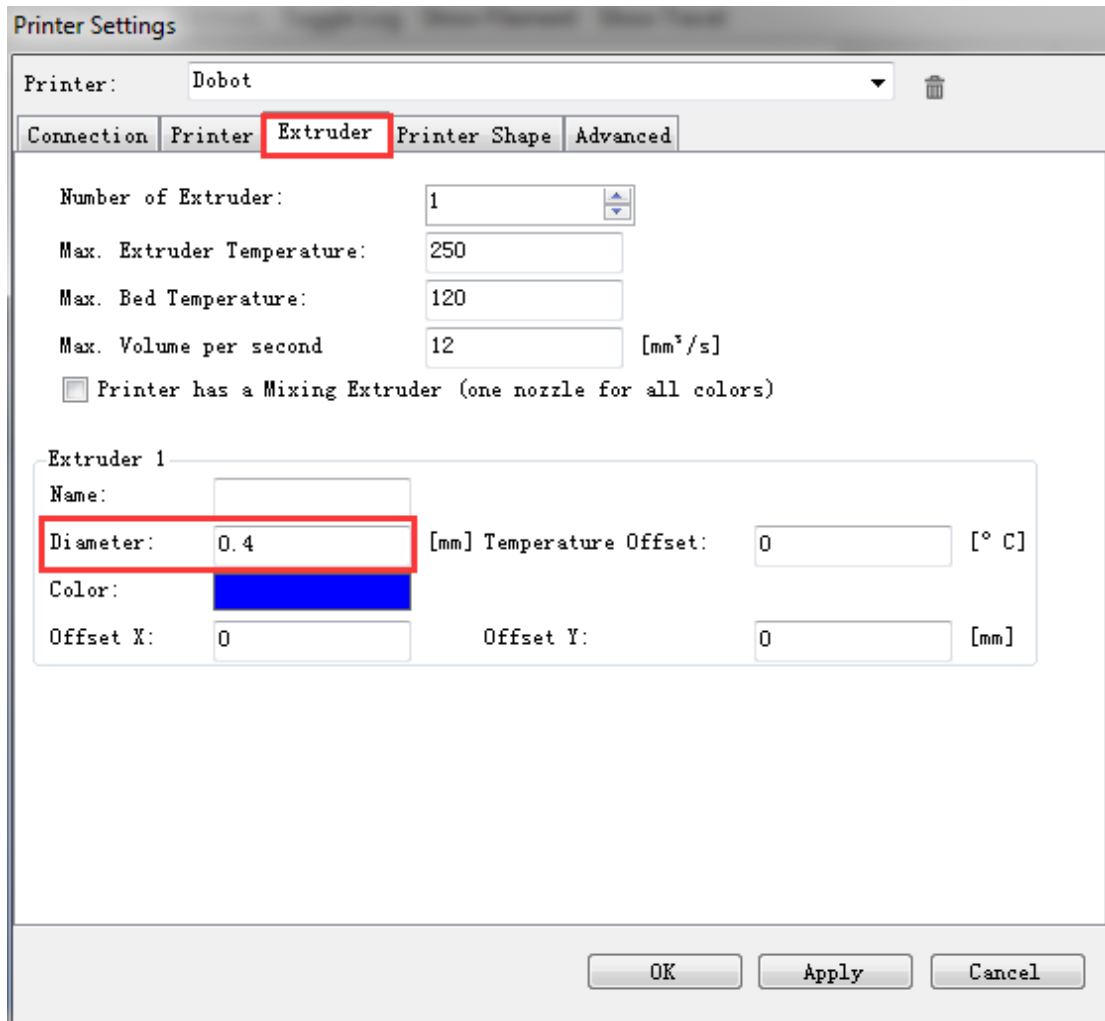


Figure 8.11 Extruder Settings

### (4) Printer Shape Settings

Select **circle printer** and the detailed parameters as follows:

Home X: Min

Home Y: Min

Home Z: 0

Print area radius: 80mm

Print area height: 150mm

Click **Apply** after setting.

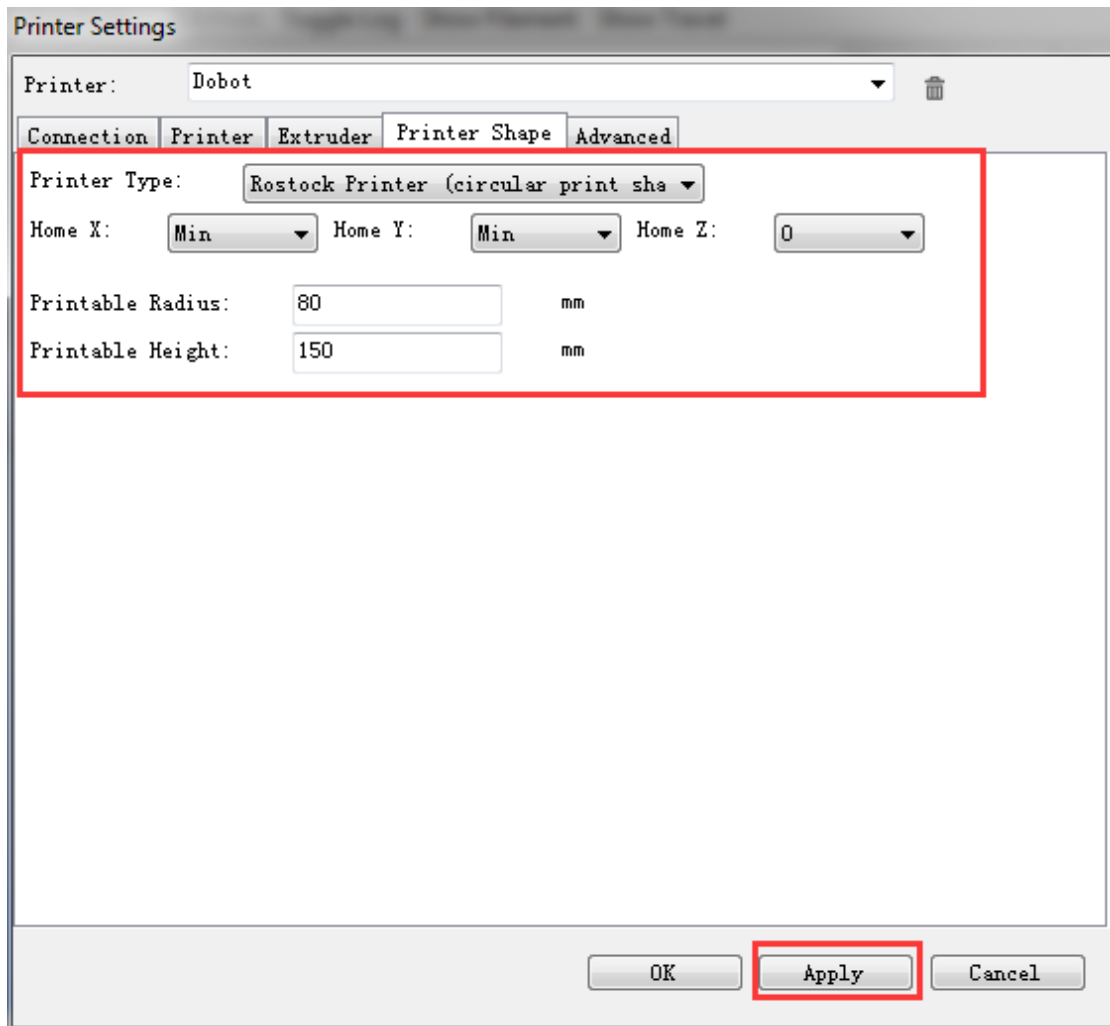


Figure 8.12 Printer Shape Settings

After setting parameters, return to the main interface. Open the Dobot main power supply, insert USB, and click **Connect** at the top left corner of main interface. Then, we can connect Dobot. The LED will turn green and the temperature will be shown below the interface:

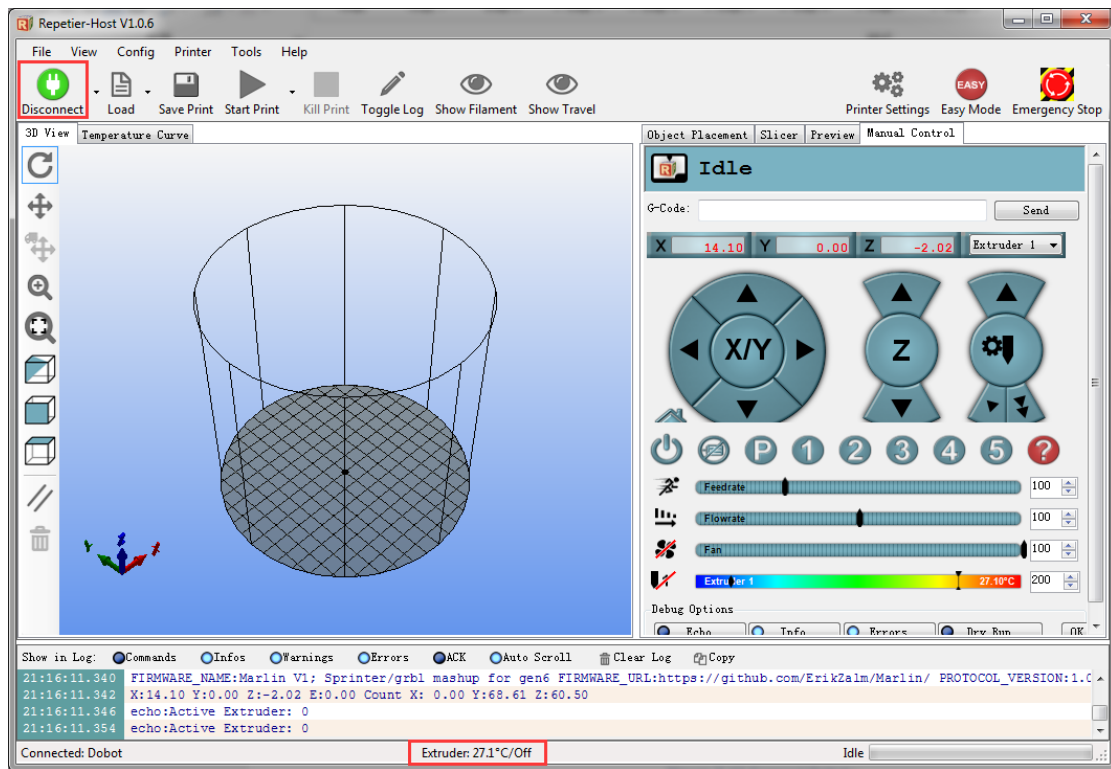


Figure 8.13 Connect Dobot

### 8.2.3 Preparation before Printing

We need to melt the plastic to be able to have it flow properly, so we first heat the extrusion head.

Here, set heating temperature to 200°C and then click the **heating button**  on the control panel to heat it. s

#### Notice:

- The heating rod will produce high temperature up to 250°C, so please be careful !
- DO NOT let children play with it alone.
- The process needs to be monitored when it is running.
- After the process, please turn off the equipment promptly.

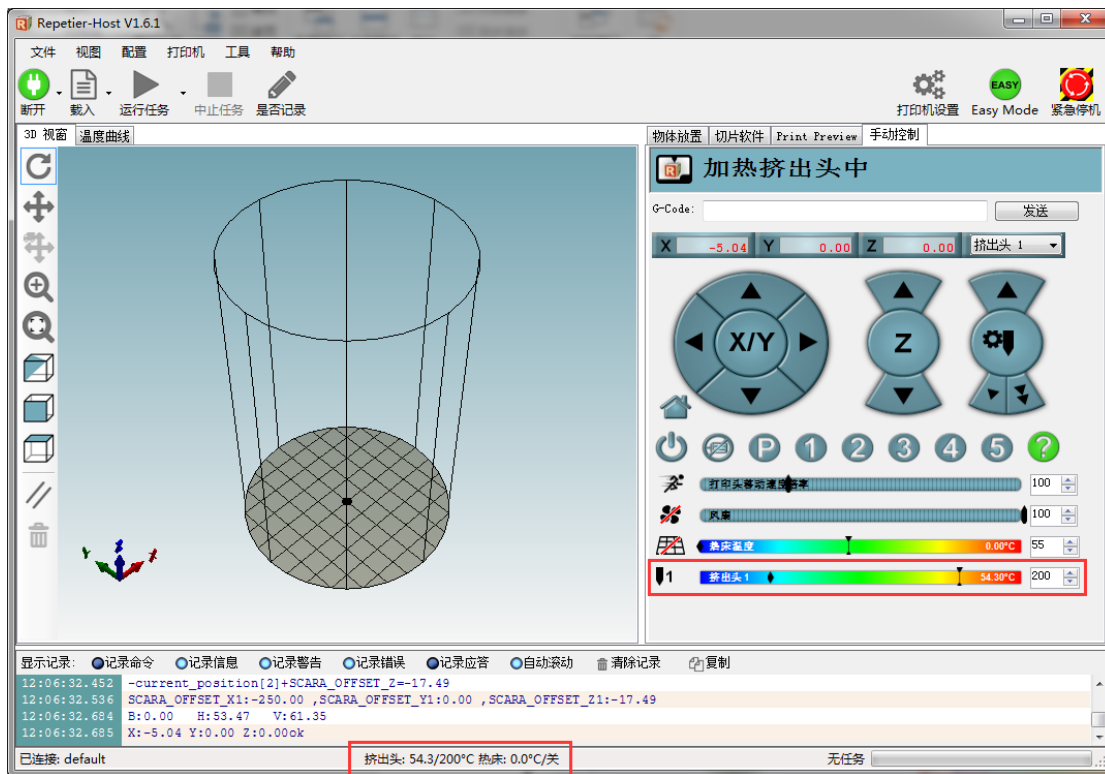


Figure 8.14 Heat the Extrusion Head

When the heating temperature is up to 200°C, click the extruder feeder and feed up to 10-30mm, as shown below:

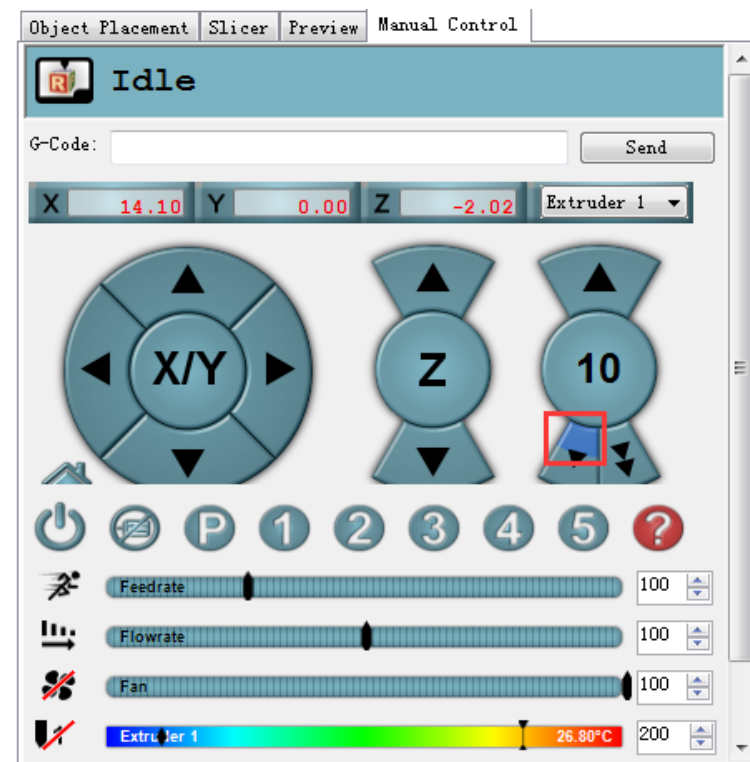


Figure 8.15 Extrude filaments

If melted materials flows from nozzle of the extruder, then it means the extruder is working properly:

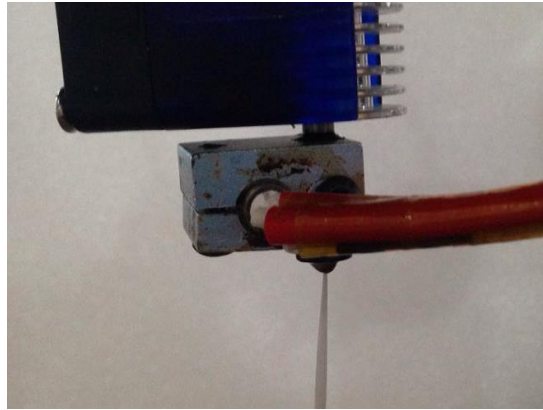


Figure 8.16 Filament Extrusion

**Note:** If the filament extrusion is in the opposite direction, simply remove the filament, turn the extruder around, and replace the filament.

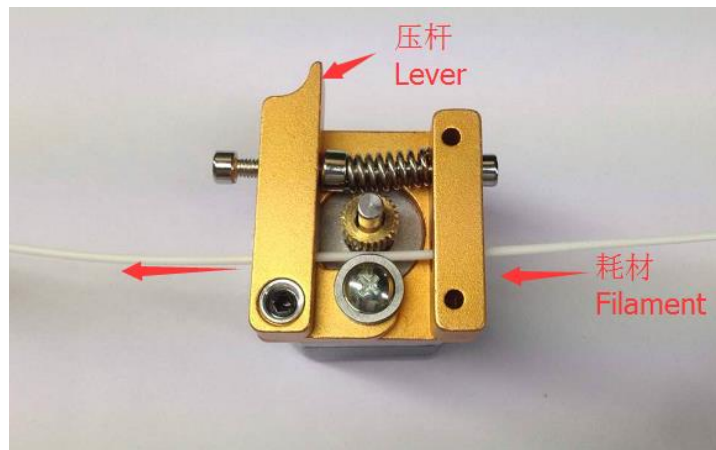


Figure 8.17 Reverse installation diagram of the extruder

#### 8.2.4 Adjust the printing space and get printing coordinates

During printing, if the distance between the nozzle and print is too large to paste the print bed of the first layer or if the distance is too small, which will cause a blockage, we need to adjust the proper distance for smooth printing. Generally, the thickness of a sheet of paper is OK so paste a layer of masking tape on the glass print bed in order to have the first layer printed adhere better.

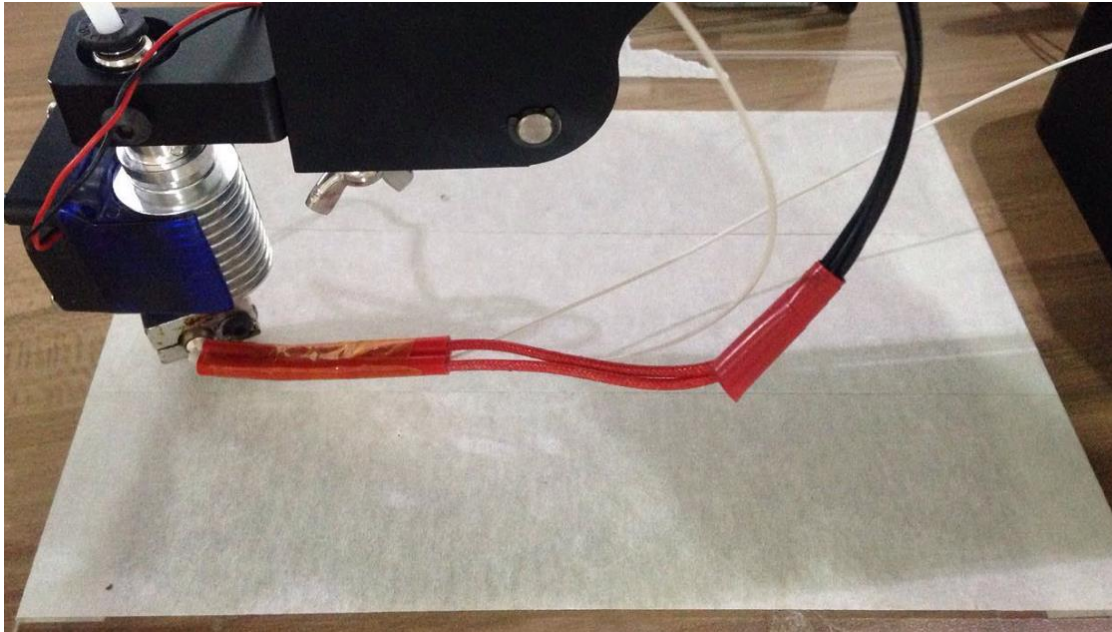


Figure 8.18 Masking tape

Adjustment process: Press the **Unlock** key on the forearm and drag the printing head to contact the surface of the masking tape. Then, press “key” at the base of the Dobot to save the current Z value (or insert **M415** in the command line, enter and get the current Z value).

**Notice:**

After sending M415 or press “KEY”, Dobot will get current coordinates, if it is successful, you will hear a beep. Also, you don't have to insert the command next time when printing.

The window of command is shown below:

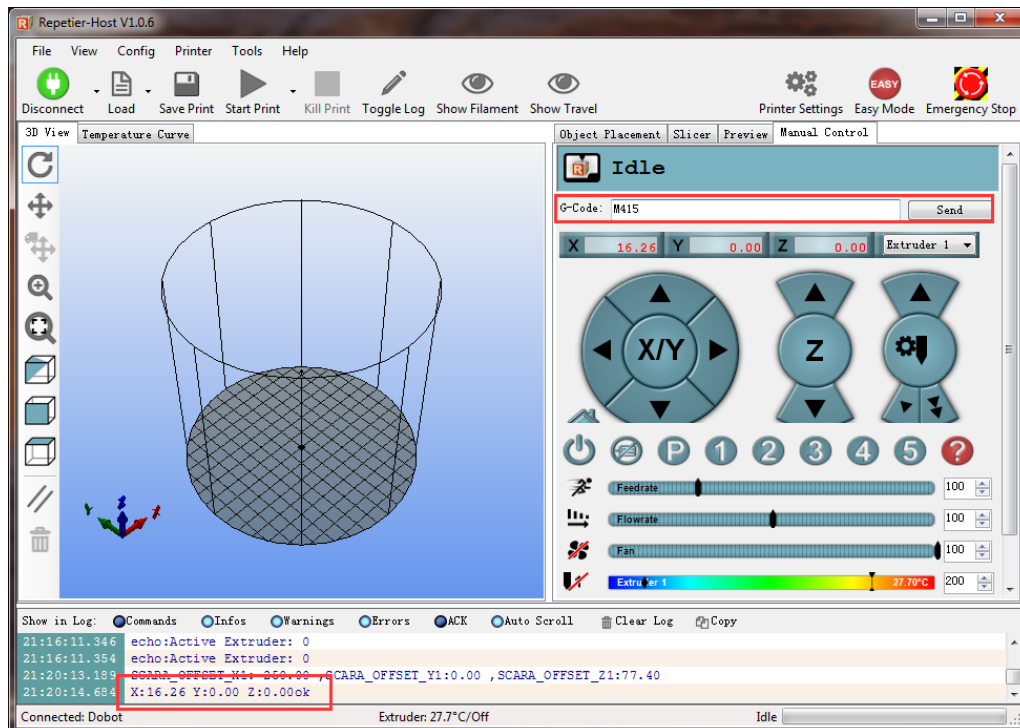
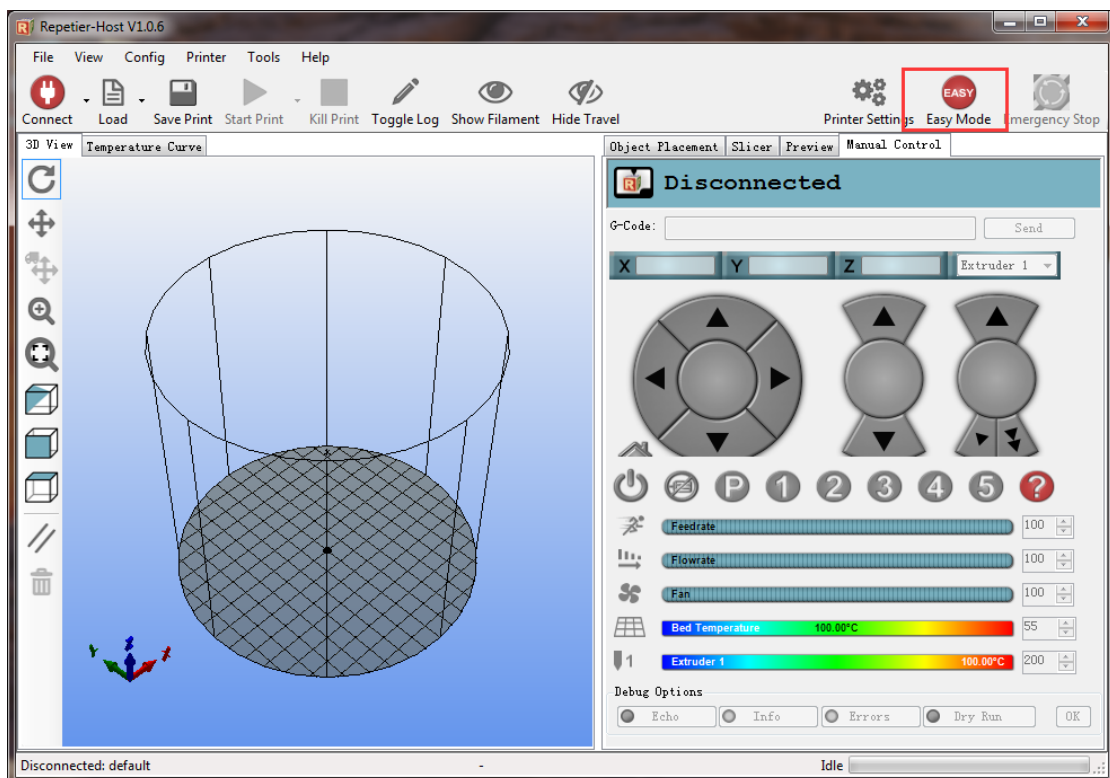
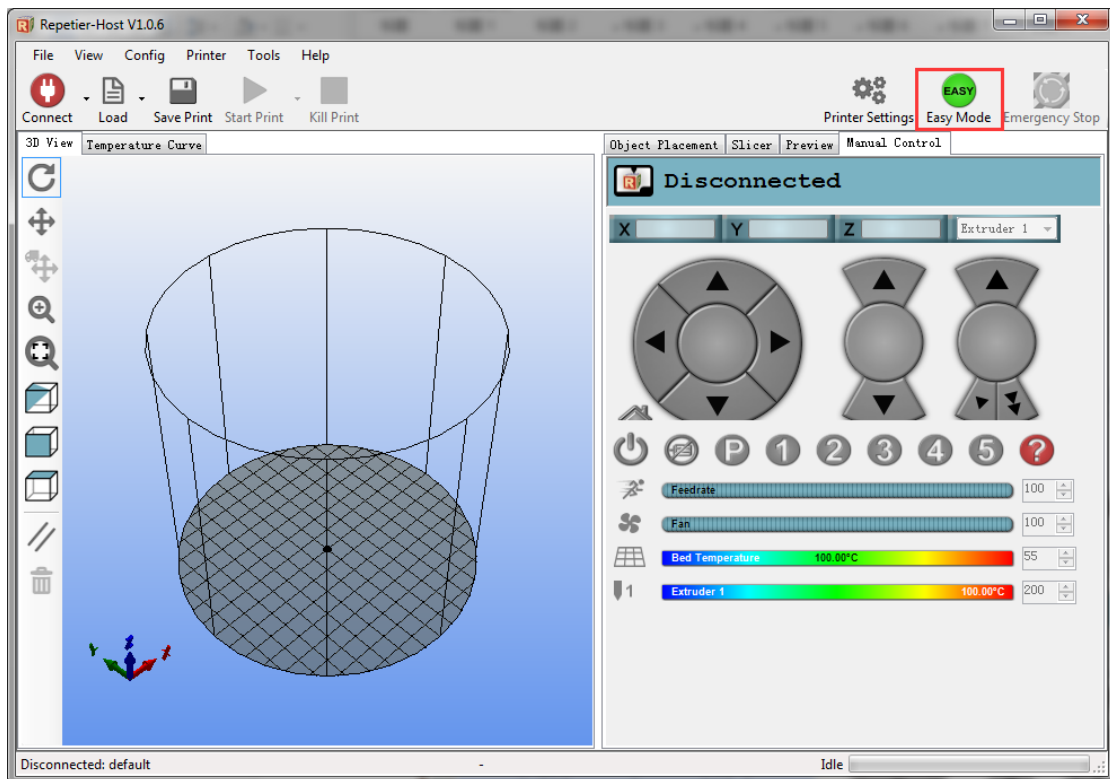


Figure 8.19 Sending out M415 command

If you cannot find the command line window, please close **Easy mode**, as shown below:



## 8.2.5 Import Model

The file format of 3D printing is STL, which is employed universally.

Users can build one's own 3D model and transfer it into a STL file, or search for free models to import them directly. Click open, import 3D model file (in STL format), as shown below:



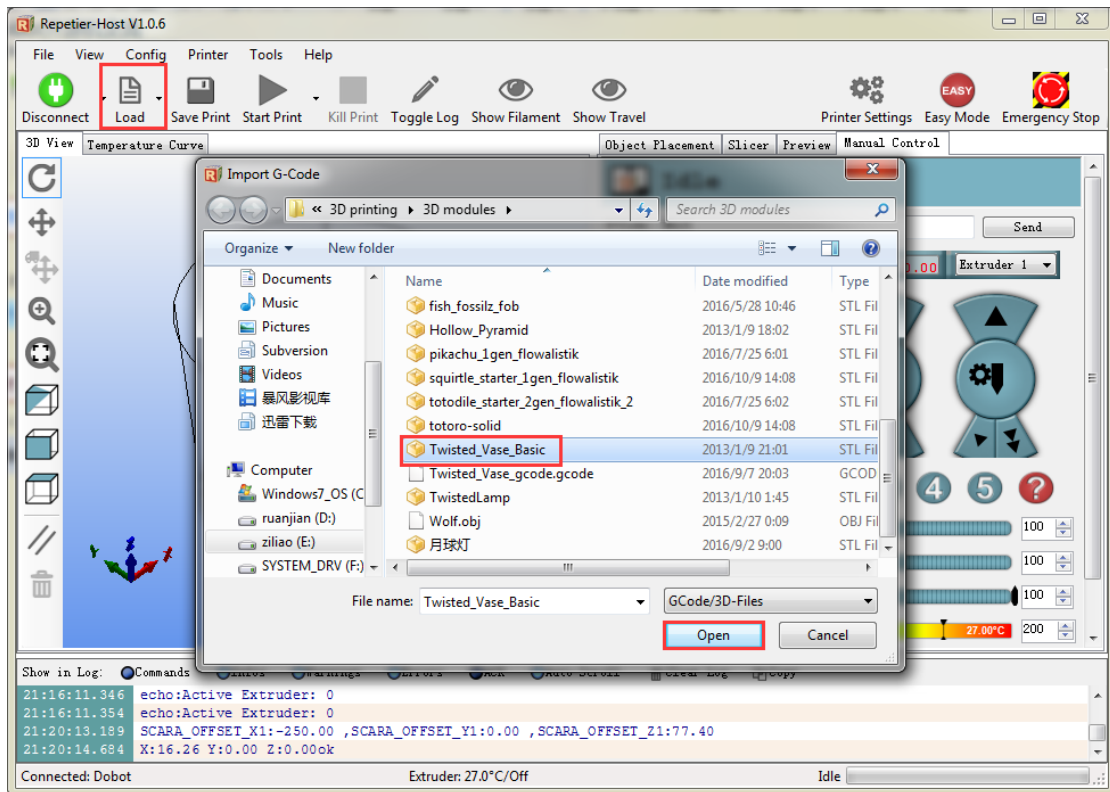


Figure 8.20 Import Models

Model Center/Scale: Users can operate the model to place in the middle, zoom or rotate and any other functions.

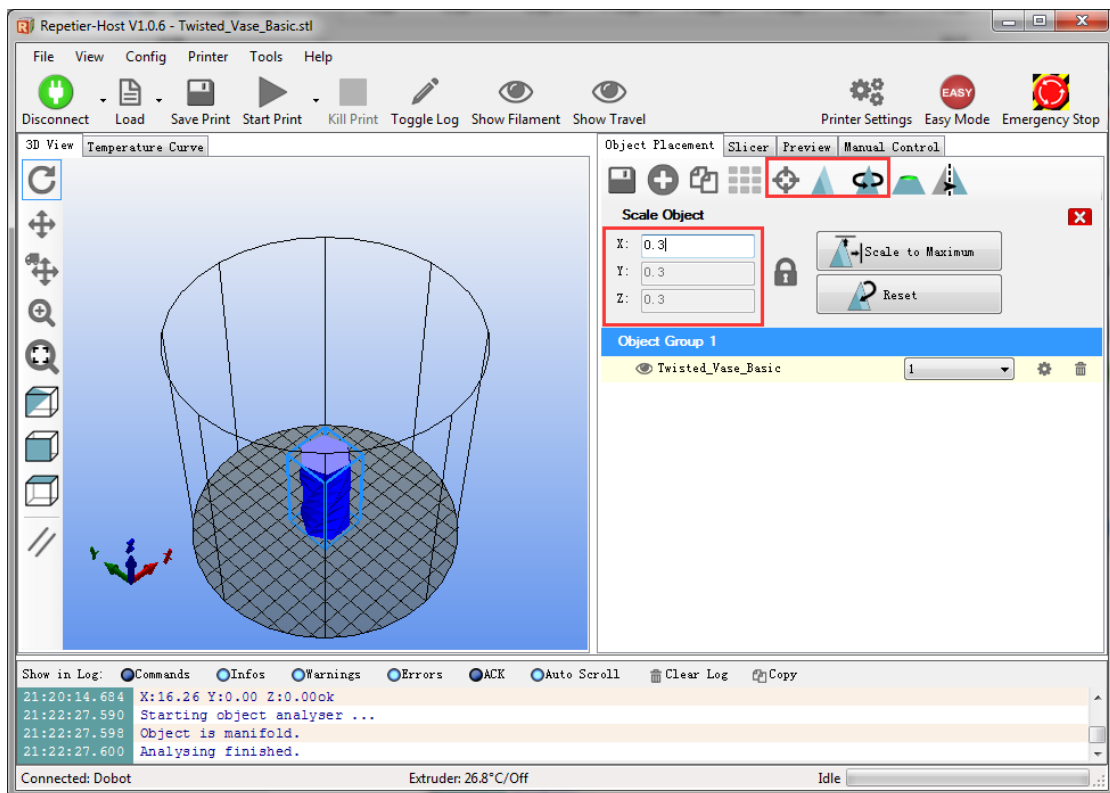


Figure 8.21 Model Center/Scale

## 8.2.6 Set slice parameters and slice up

Select slice engine Slic3r and click Configuration to set slice parameters.



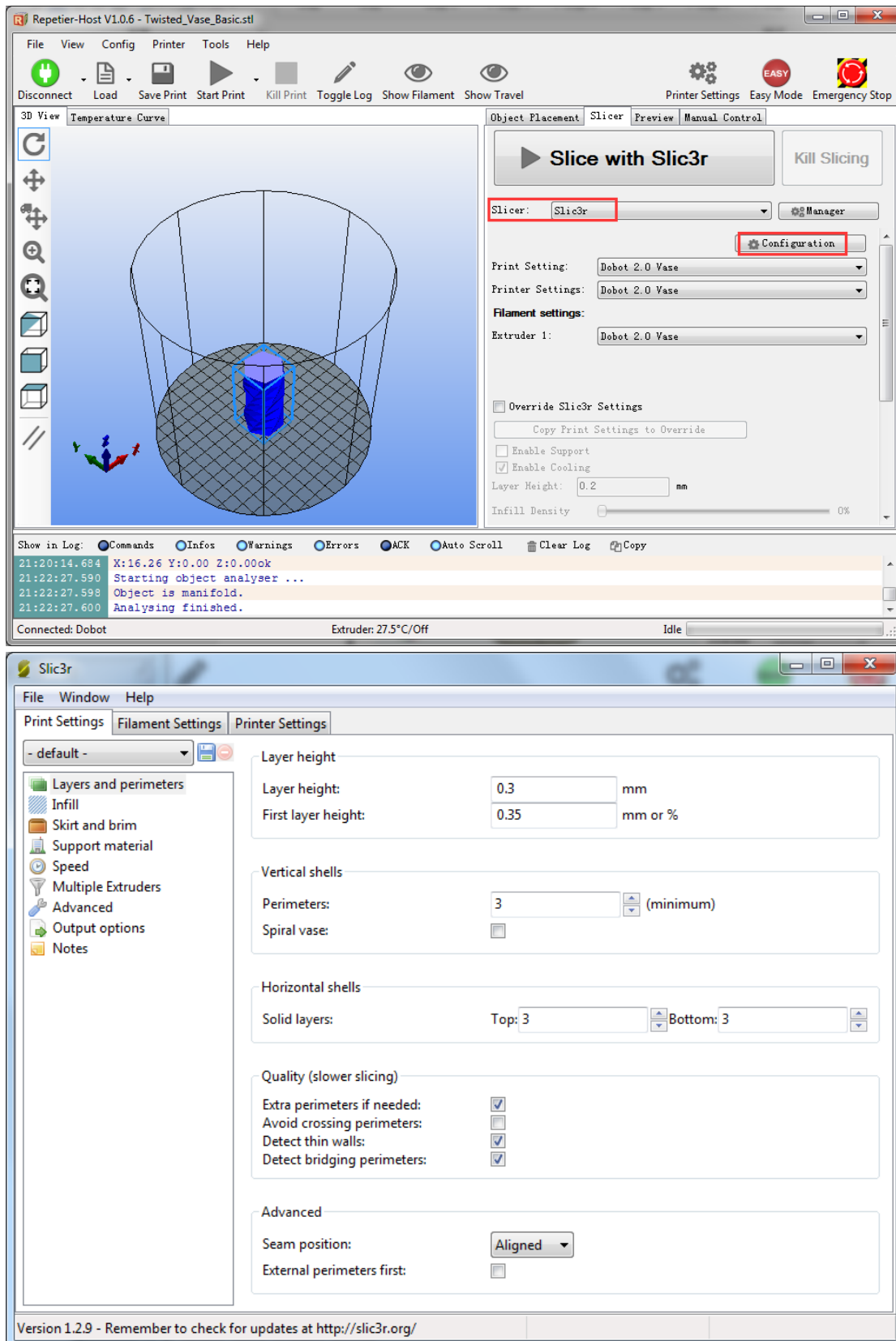


Figure 8.23 Main interface of parameter settings

It's important to set slice parameters, so users should get the best slice parameters according to printed models and tested performance of the equipment. Here we suggest a configuration file that can be imported from **attachment** of DobotStudio:

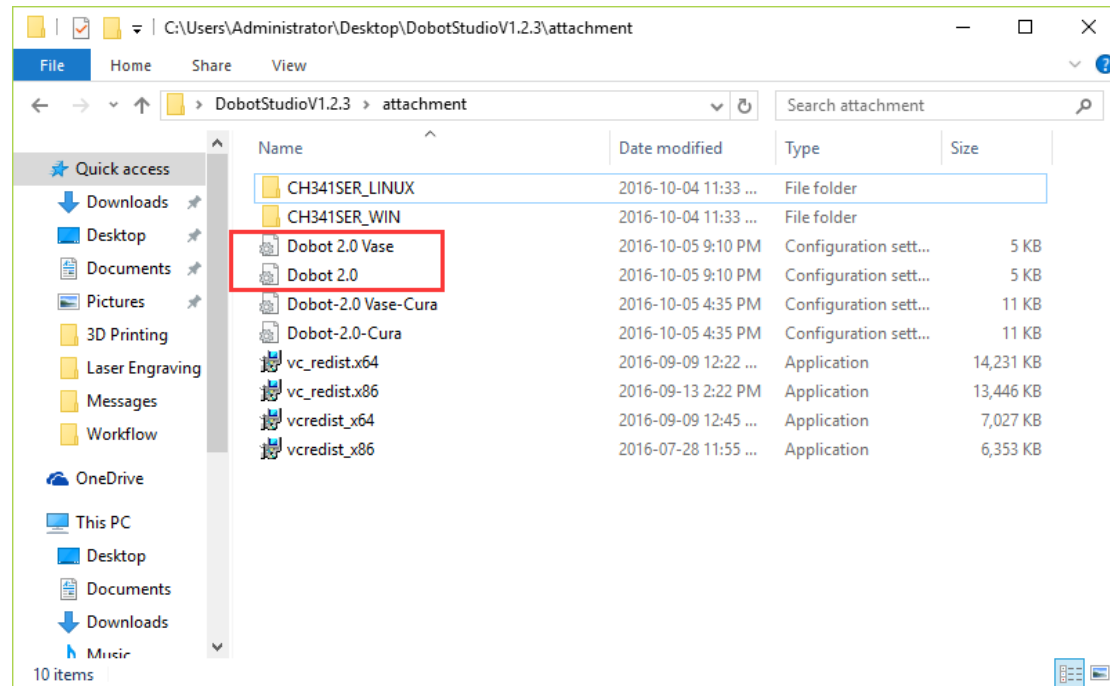


图 8.24 Config files

**Dobot-2.0-Vase.ini** is used for printing a thin-valled vase, while **Dobot-2.0.ini** is used for filling, (the filling rate is 15%).

Import the file after downloading: Click **File->Load configto load.ini** file.

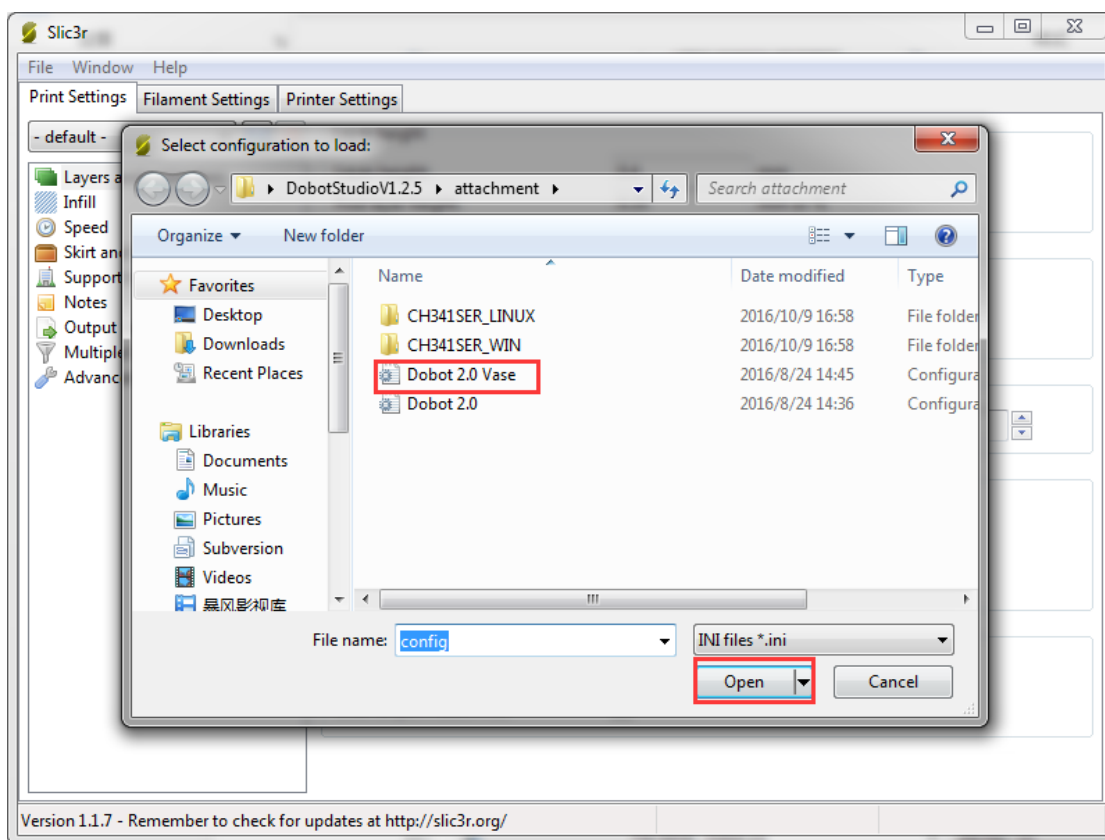
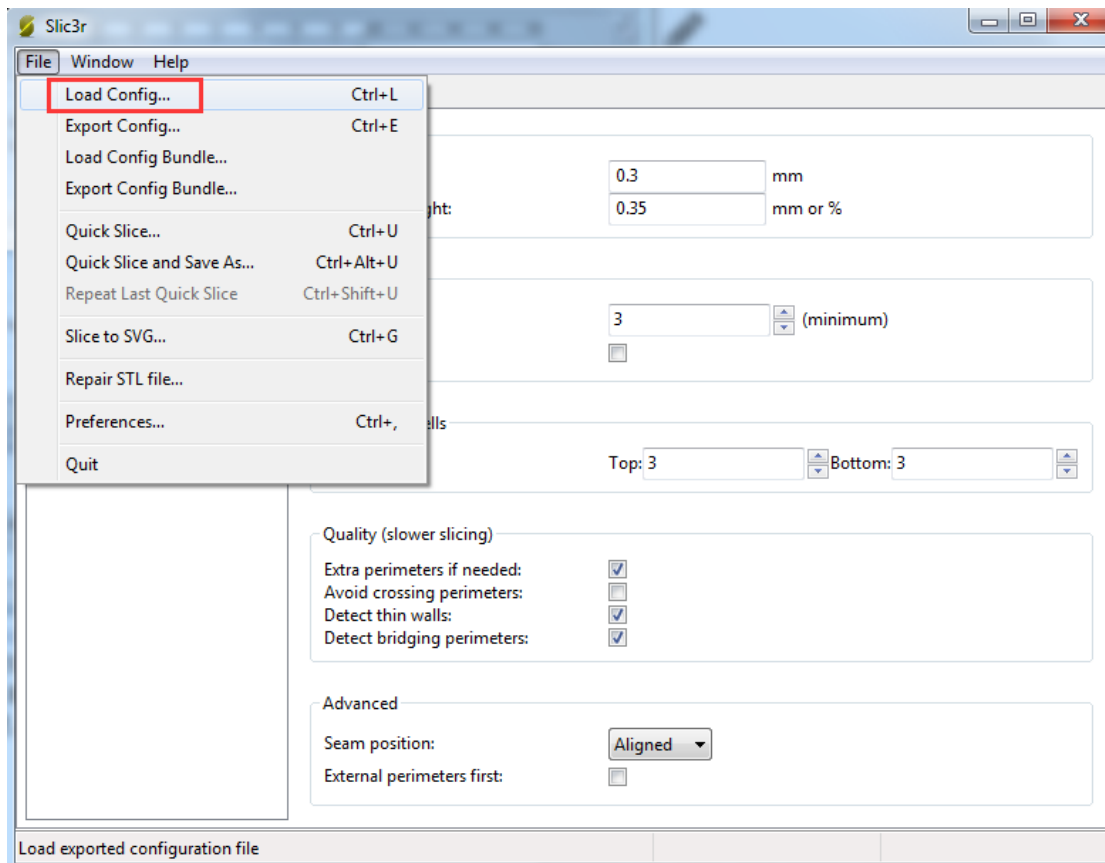


Figure 8.25 Import configuration file

After importing the file, users need to save the three labels: Print settings, Filament settings and Printer settings. Users can rename them, but the default names are recommended for clarity:

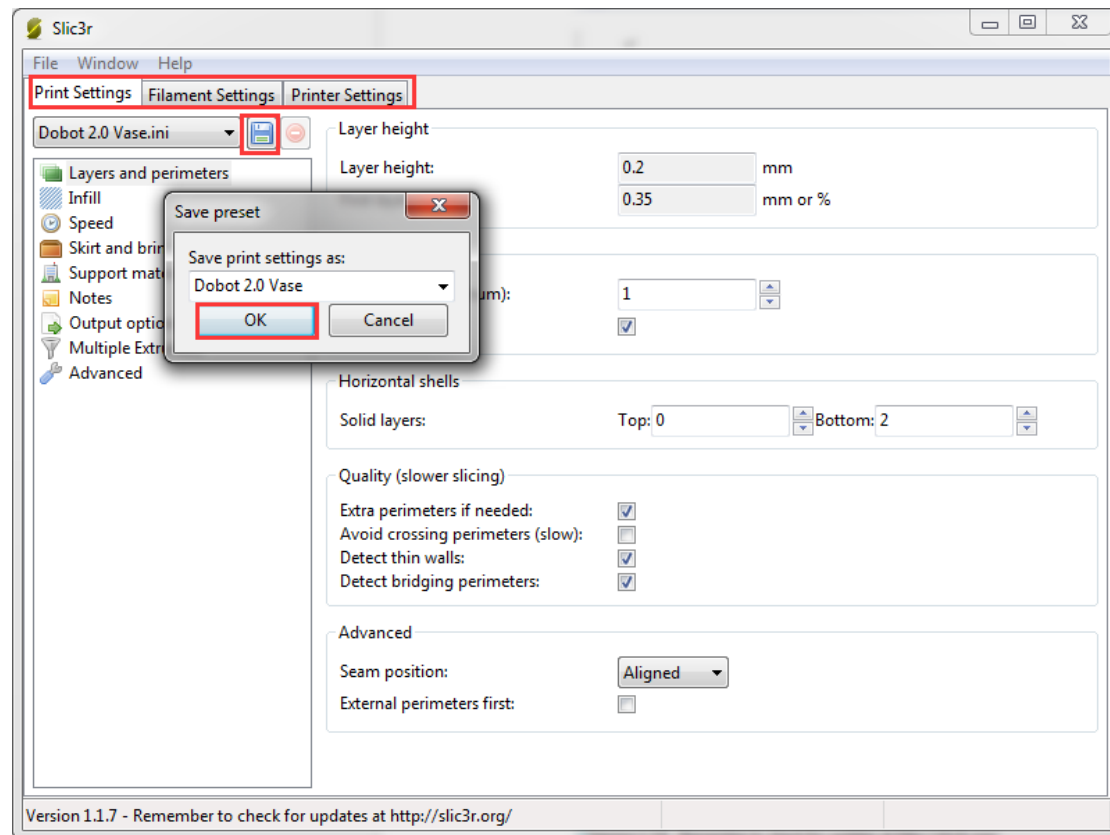


Figure 8.26 Save configuration file

Slice: After finishing above settings, save the settings of each label, and return to main interface. Select **slic3r**, import slice settings and **click Slice with Slic3r.io**

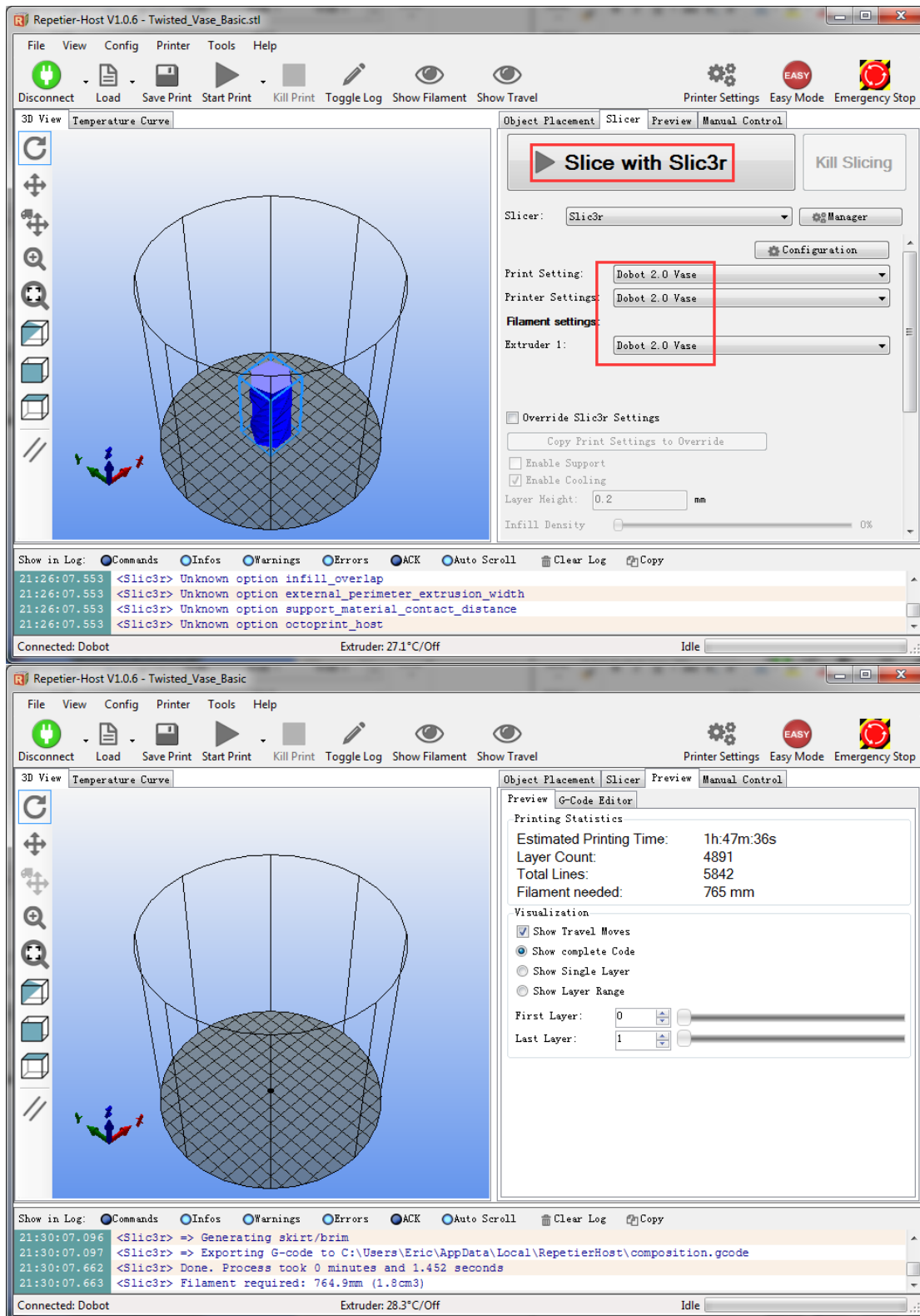
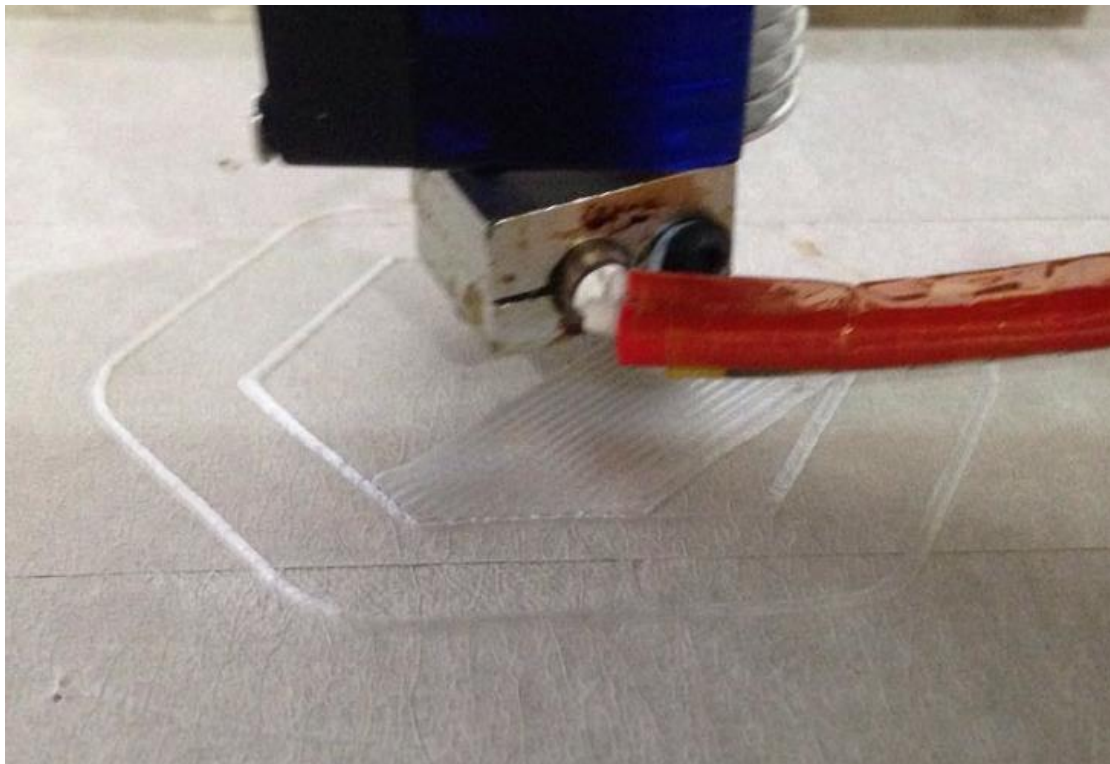
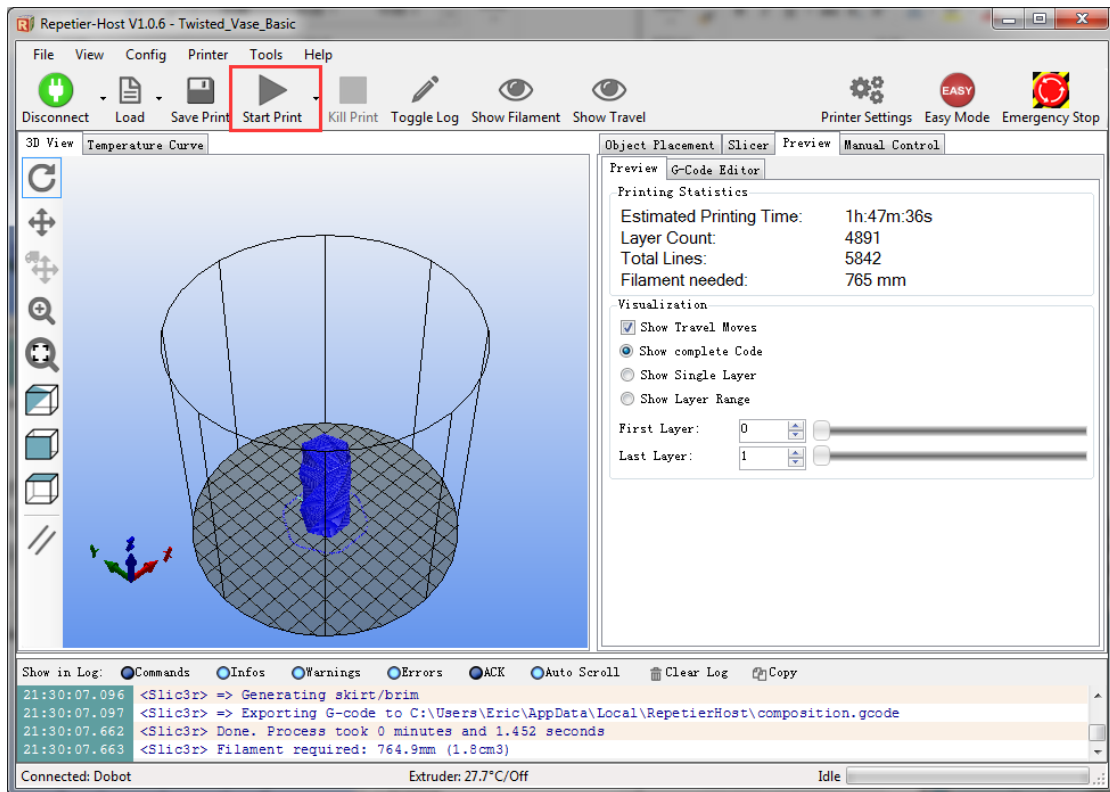


Figure 8.27 Finish slice

## 8.2.7 Start to Print

Now, click **Start print** at the top left corner of main interface to print:



Here we choose **vase mode**, and the product after printing as follows:



Figure 8.28 The Product of Printing

## 8.3 Cura Introduction for 3D printing

If you want to use Cura for 3D printing, the details seen as follows:

Notice: Installation of accessories and firmware burning shown as Repetier Host 3D printing.[8.2 Repetier Host](#)

### 8.3.1 Cura parameter settings

Cura is a free software that can be downloaded on its official website. We recommend you to use Version **V14.07**. You can download the software here:

<https://ultimaker.com/en/products/cura-software/list>

The software interface is as follows:

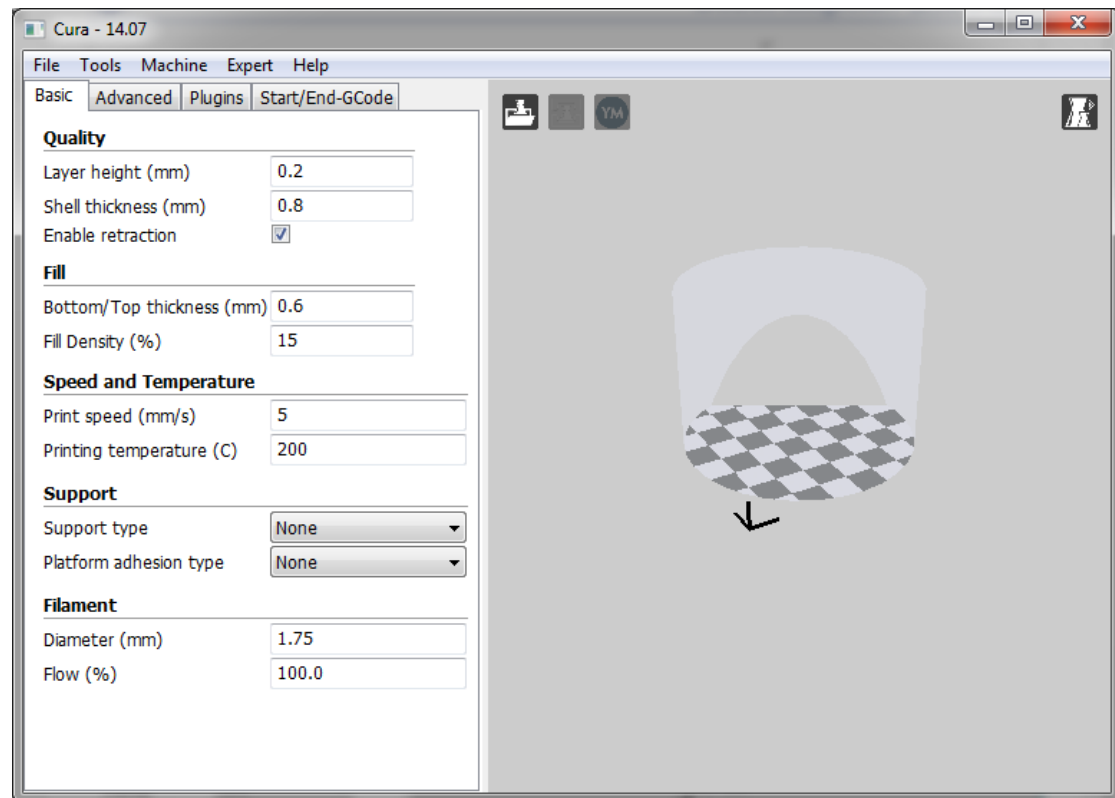


Figure 8.29 Cura interface

**Machine->machine settings**, set related parameters in the pop-up dialog:

(1) Connection label settings

**maximum width:** 80mm **maximum depth:** 80mm **maximum height:** 150mm;

Machine center 0,0: Need tick

Build Platform shape: Circular

COM port setting: The corresponding COM port in the device management

Baud rate: 115200

You can also choose to change the machine's name. Keep the rest of the default settings and click OK after finishing.



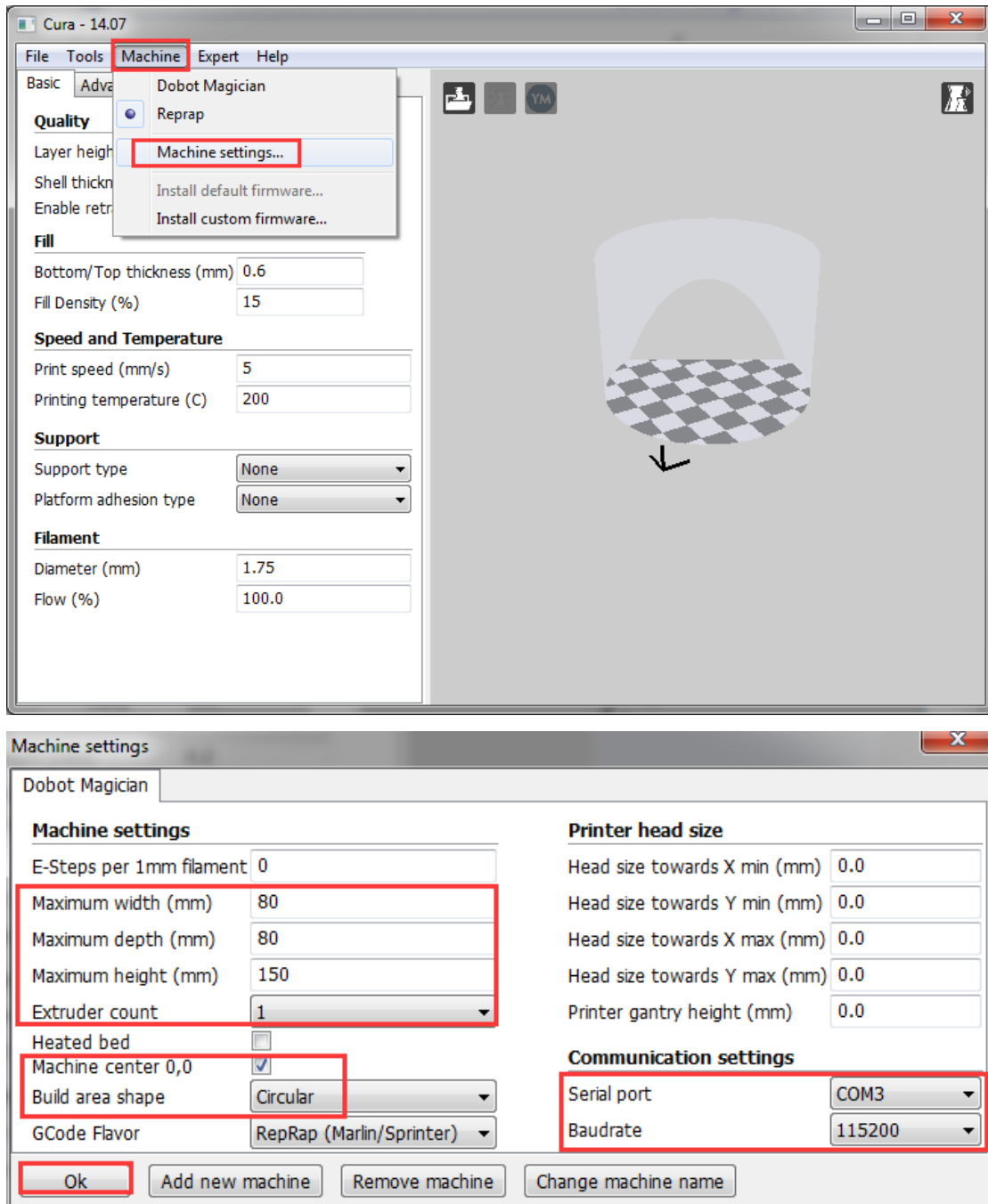


Figure 8.30 Machine settings

## (2) Import configuration file

It is vital to set slice parameters so users should get the best slice parameters according to printed models and tested performance of equipment. Here we suggest a configuration file that can be imported from **attachment** of DobotStudio:



Import the file after downloading: Click **File->Load Profile**.



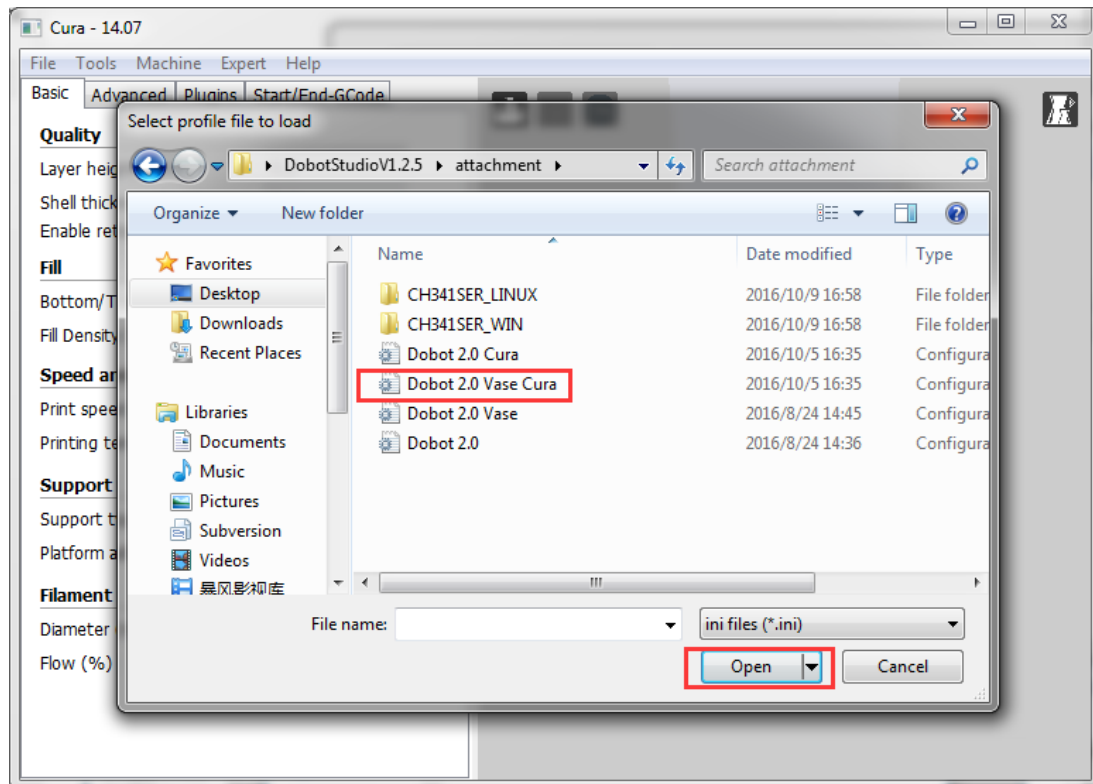
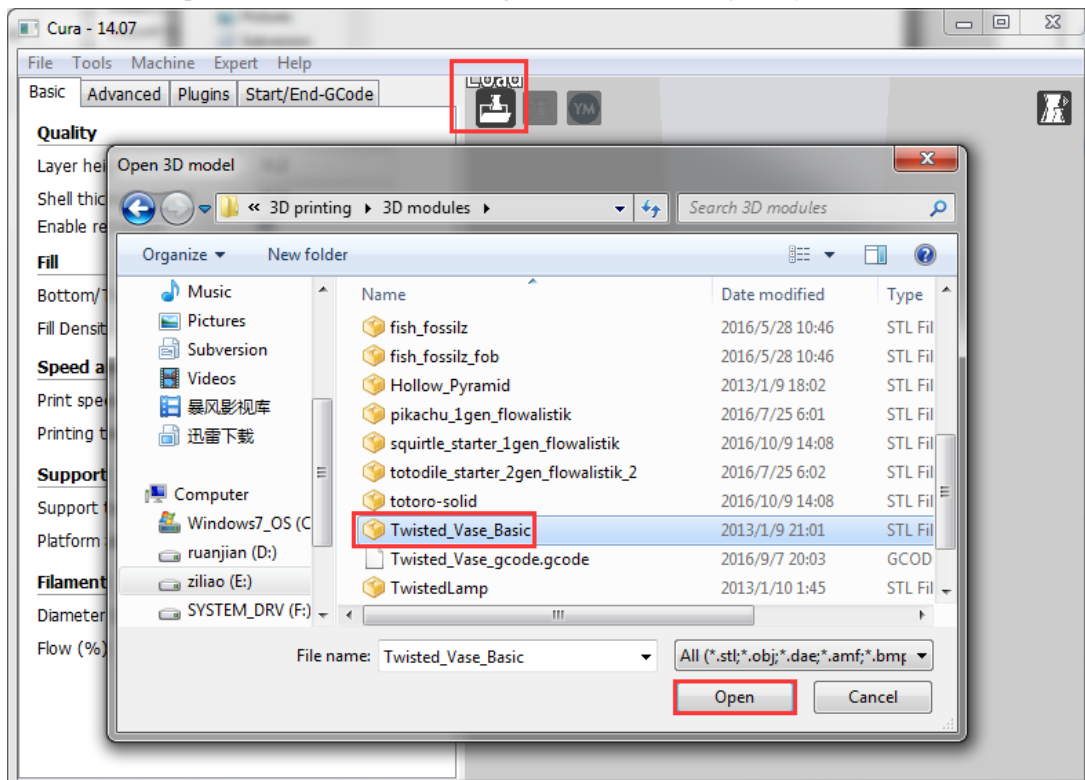


Figure 8.32 Import configuration settings

**For more detailed printing parameters, go to the Cura website!**

(3) Open the model and connect Dobot

Click **Load**, import a 3D model, and Cura will slice up automatically. You can also select different modes in the drop-down list located on the right to check if its trajectory is correct or not:



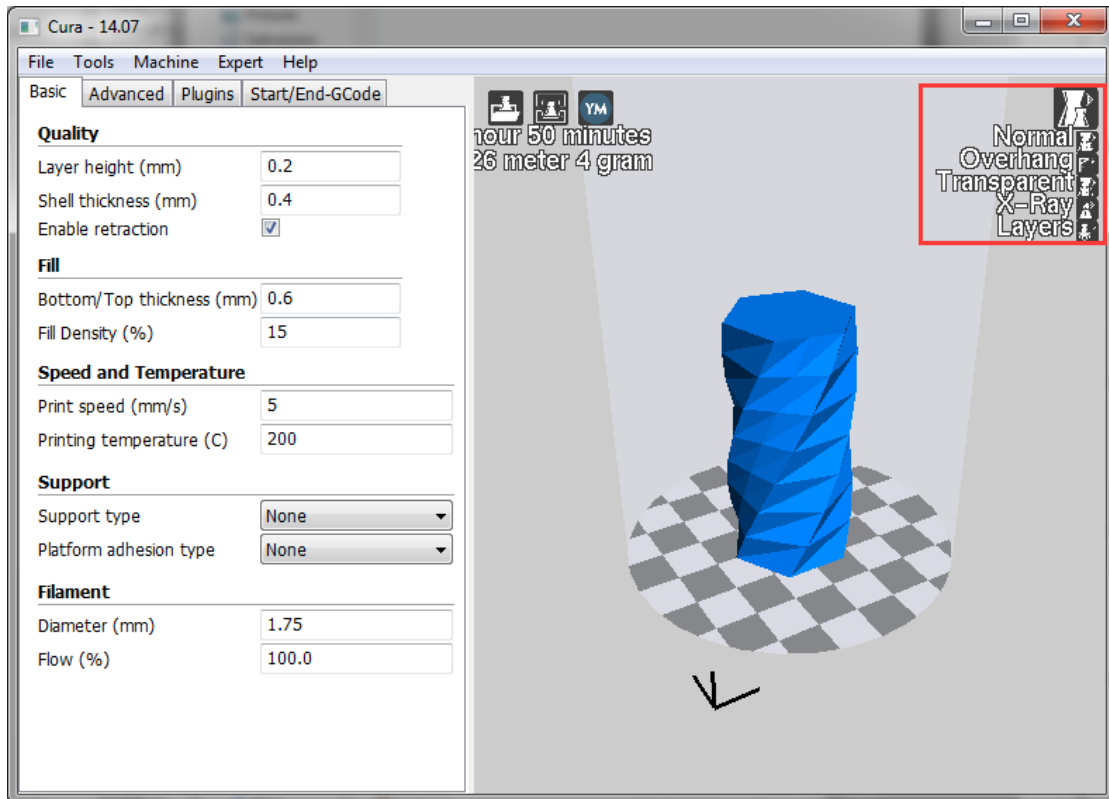
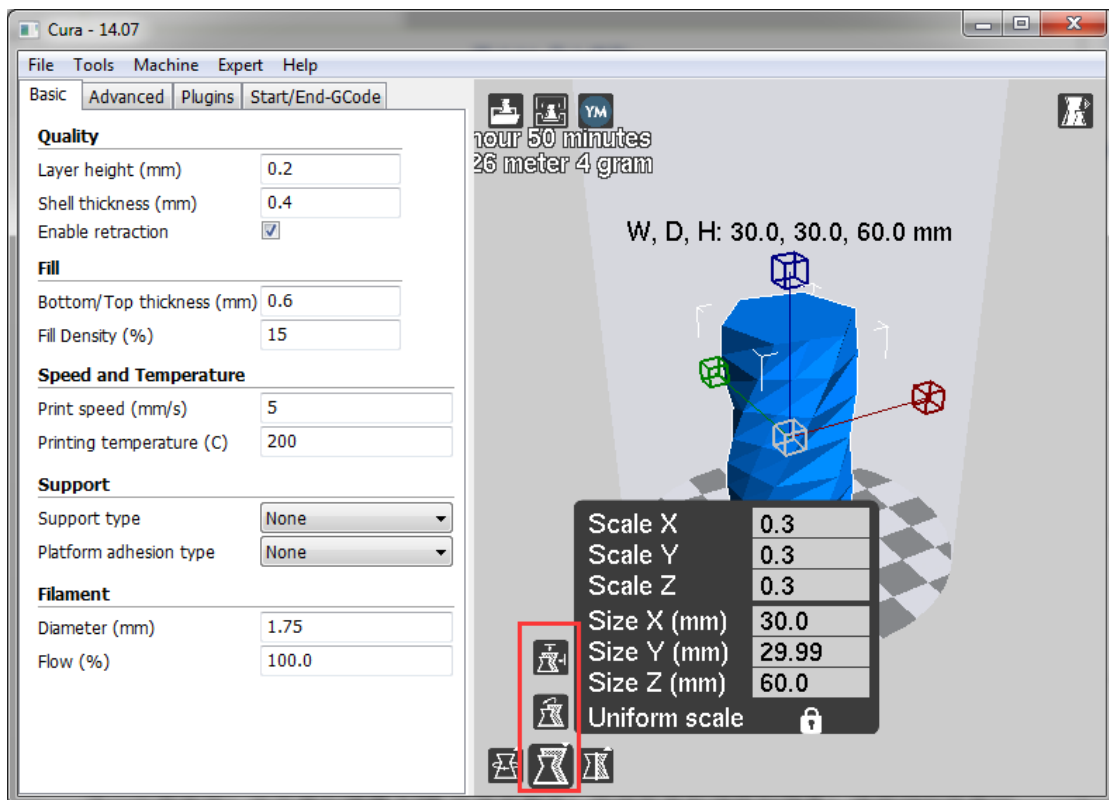


Figure 8.33 Import a model

Click the model to operate it. You can place it in the middle, zoom or rotate, as well as other functions.



After importing a model, **Print with USB** on the main interface will be activated. Click it to connect to Dobot automatically. The screen will show the current printing temperature on the top corner of the window. At the same time, the Printing key will be activated, as shown below:

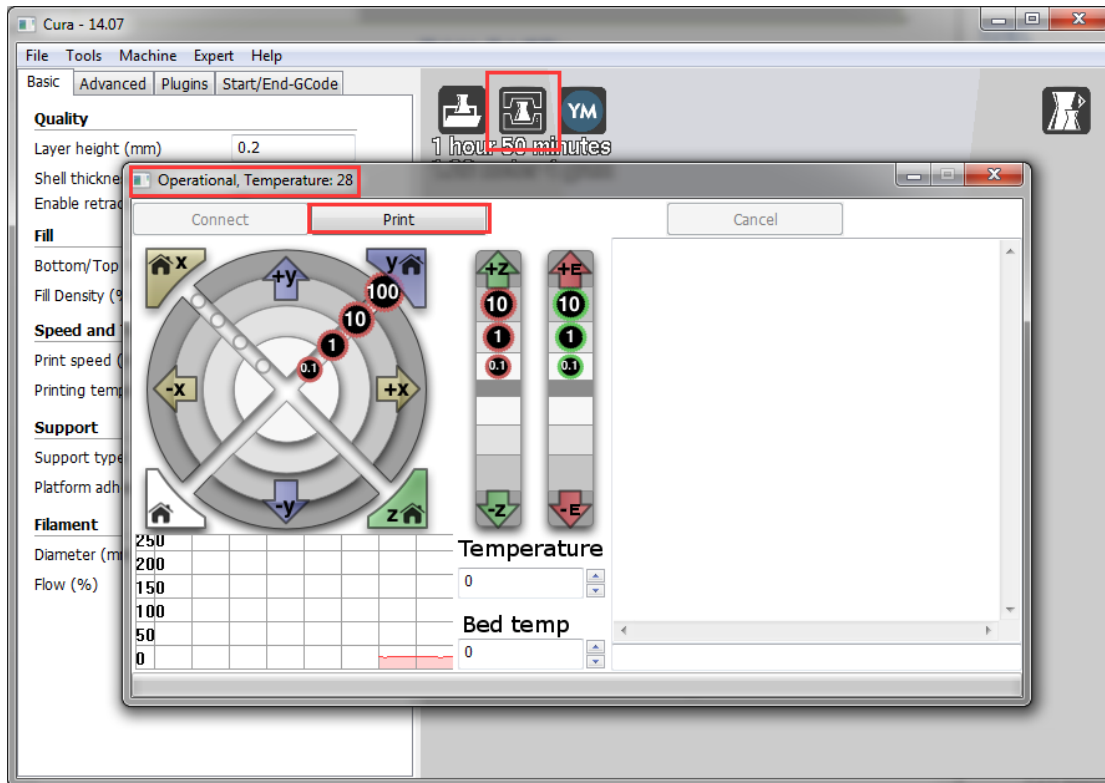


Figure 8.34 Connect Dobot

### 8.3.2 Preparation before Printing

Before printing, test the function of the extruder. Test to see if the filament flows in and out and if the direction of the filament is in reverse. Set the heating temperature to 200°C and then press enter to heat the nozzle.

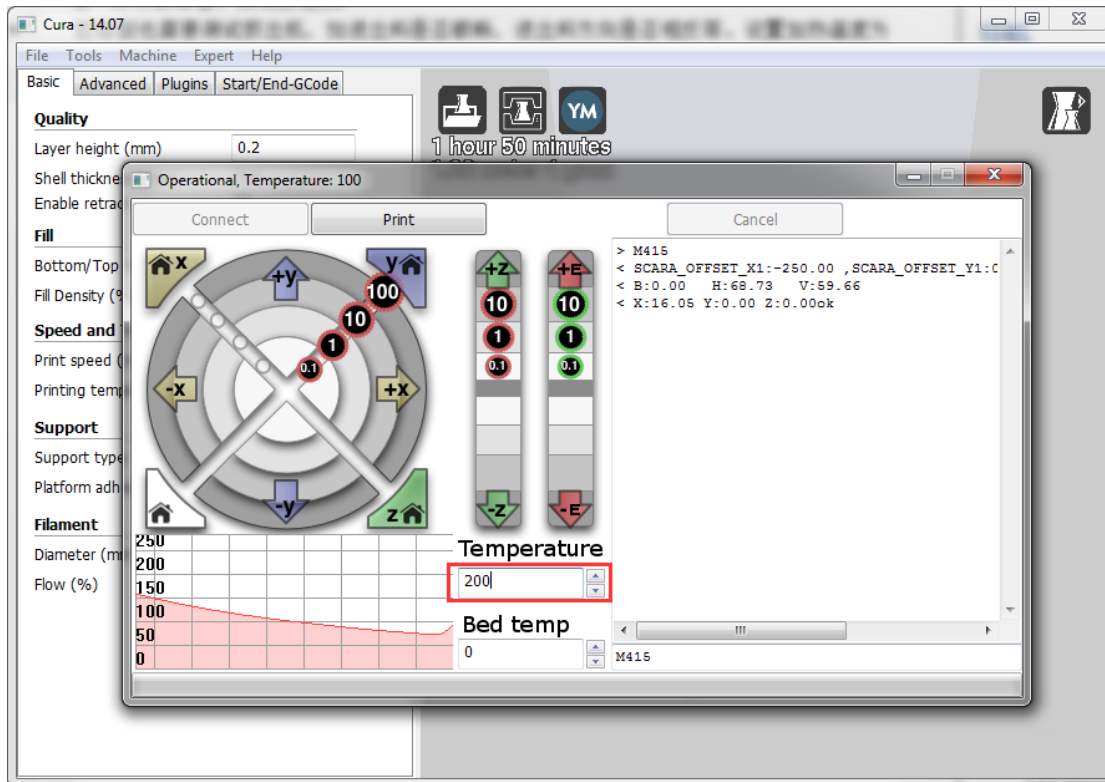
#### ⚠ Notice:

The heating rod will produce high temperatures up to 250°C, please be careful!

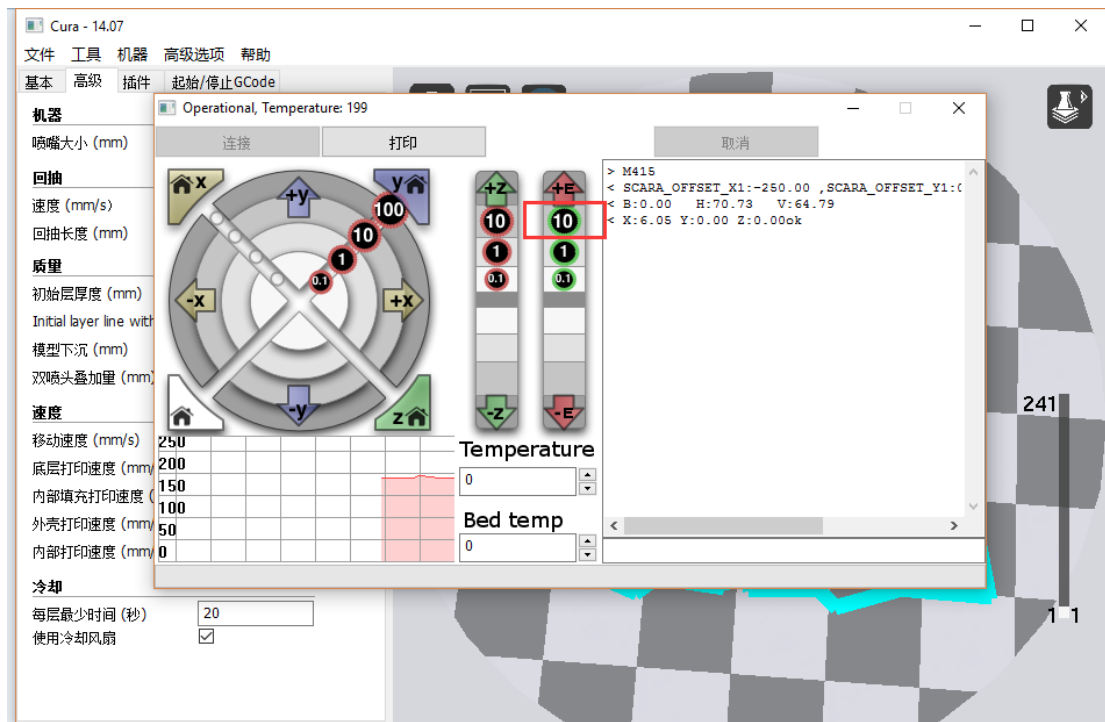
DO NOT let children play with it alone.

The process needs to be monitored when it is running.

After the process, please turn off the equipment promptly.



In the heating process, the fan will turn on automatically. When the heating temperature is up to 200°C, click the feedstock extruder and feed up to 10-30mm, as shown below:



If melted filament flows from the nozzle of the extruder, then it means the extruder is working properly:

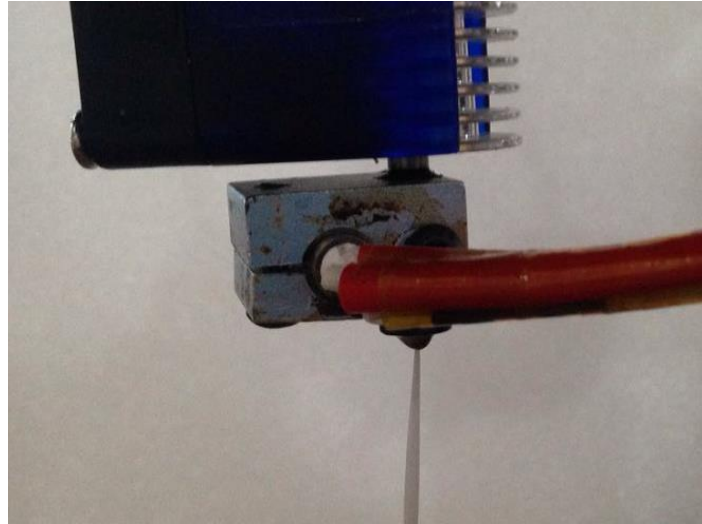


Figure 8.35 Filament Extrusion

**Note:** If the filament extrusion is in the opposite direction, simply remove the filament, turn the extruder around, and replace the filament.

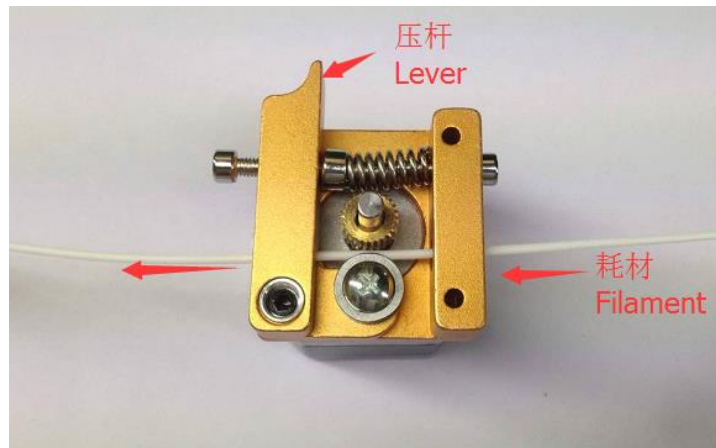


Figure 8.36 Reverse installation diagram of the extruder

### 8.3.3 Adjust the printing space and get printing coordinates

Note: For more detailed steps, please refer to the above [chapter Repetier Host](#).

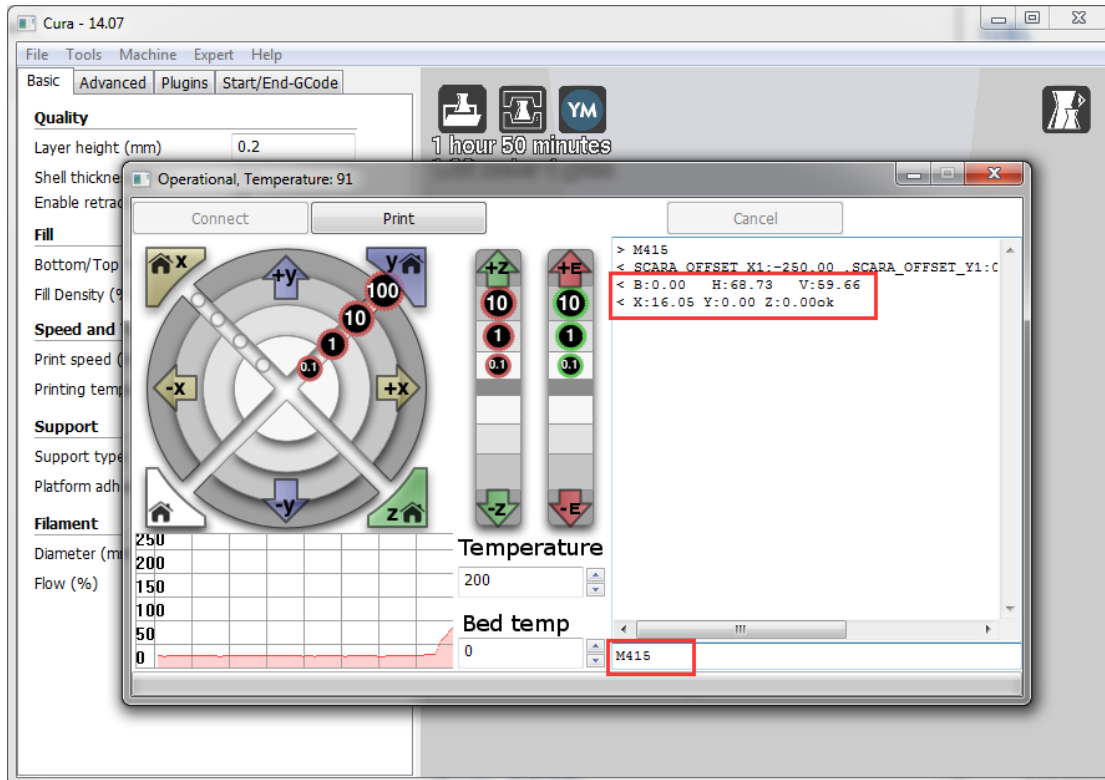
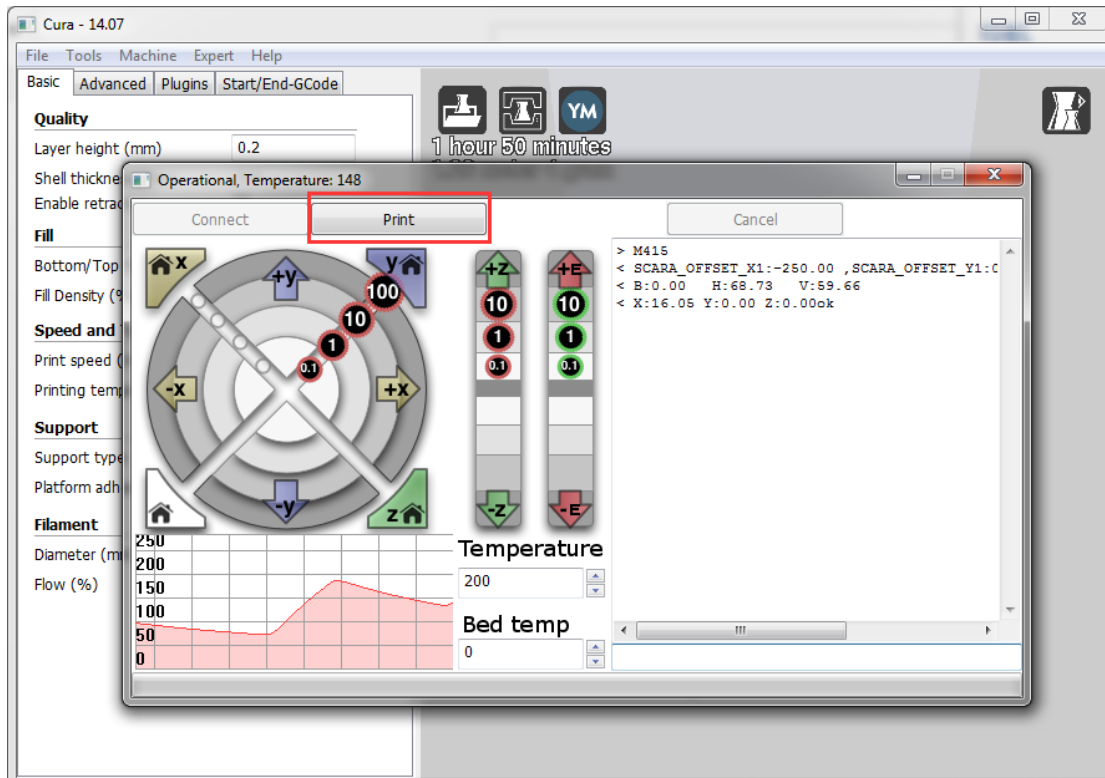


Figure 8.37 Distance adjustment

### 8.3.4 Start printing

Just click **Print**, and then start printing.





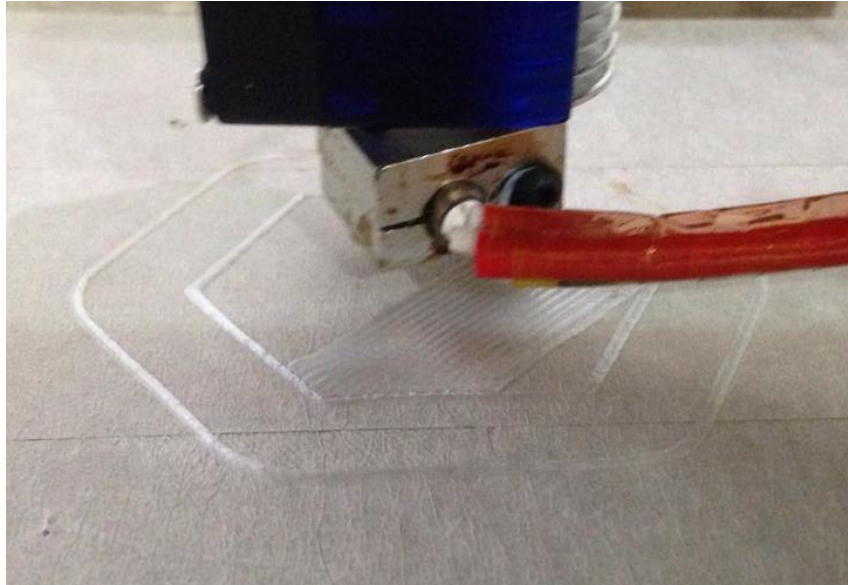


Figure 8.38 Start printing

Note: During the printing, if the distance between the nozzle and print is too large or too small to paste the print bed of the first layer, there may be a blockage. We need to adjust the proper distance for smooth printing. If it is not proper height when printing the first layer, we can change the parameters in the **initial-layer thickness**. (For example, -0.1mm or +0.1mm.) After fixing it, Cura will slice the model automatically. Then you can test the print again. After testing, the default height of first layer is 0.07mm.

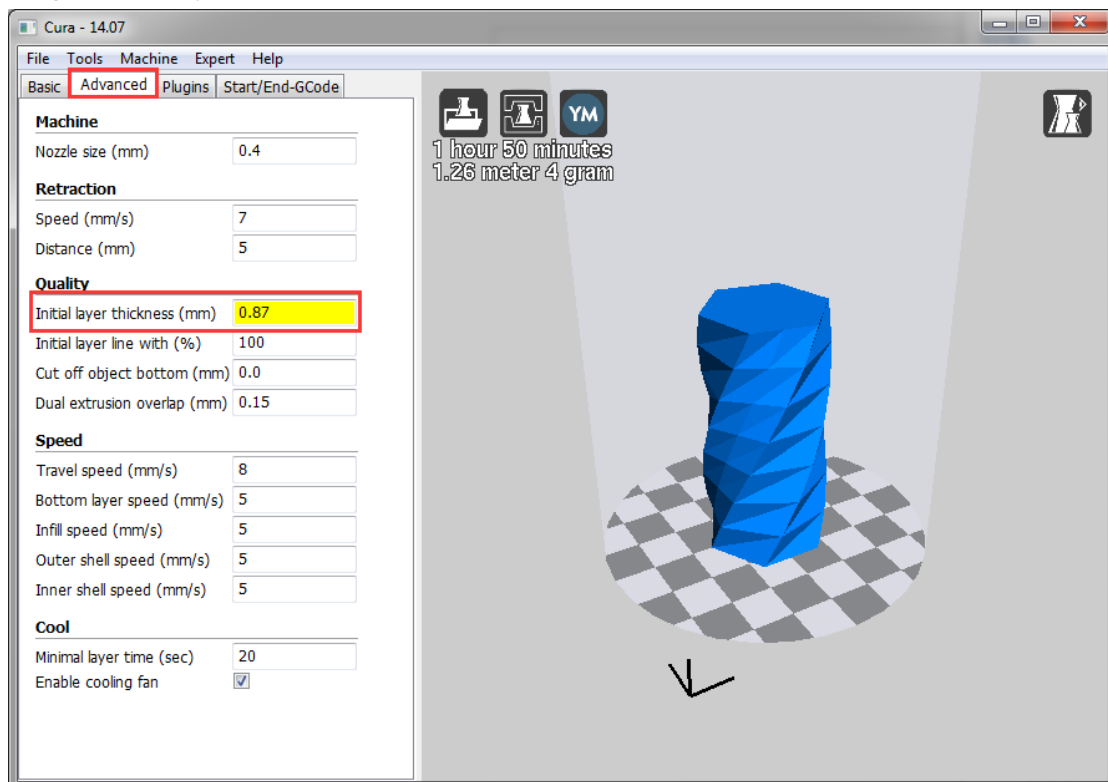


Figure 8.39 Amend the height of first layer

Here we choose **vase mode**, and the product after printing as follows:



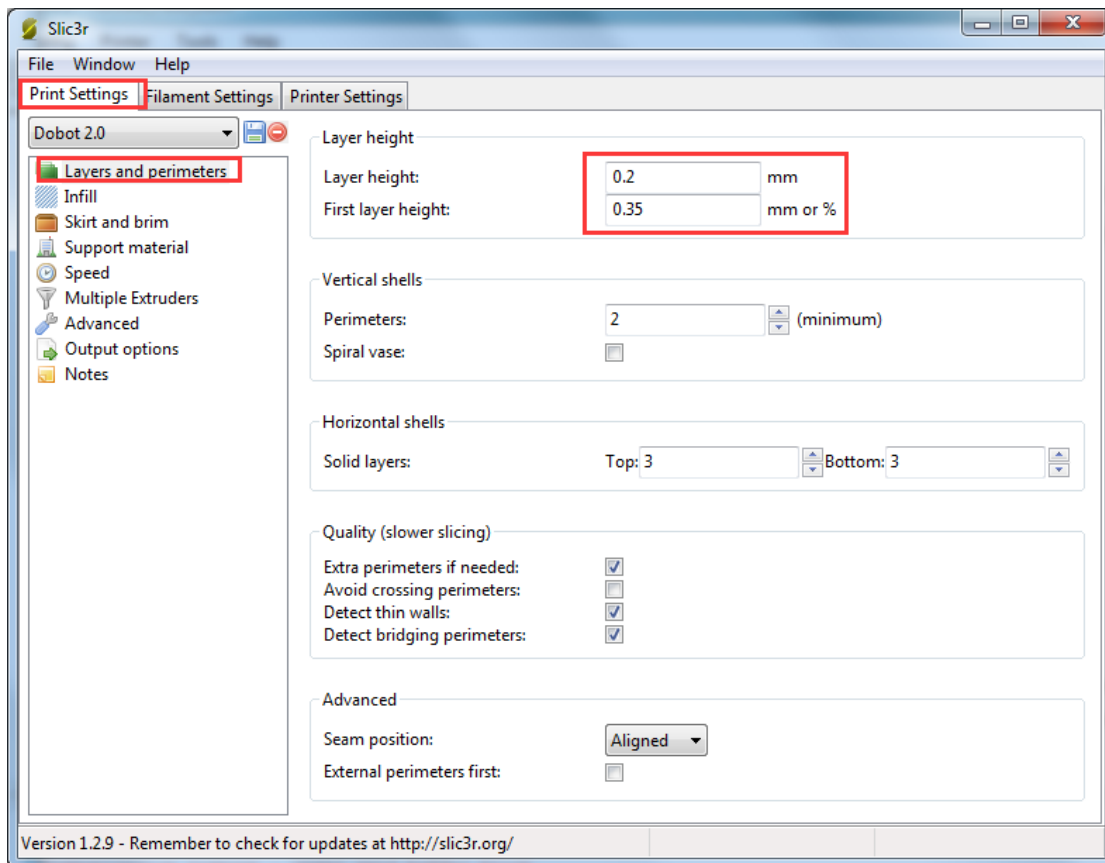
Figure 8.40 The Product of Printing

### 8.3.5 Text note

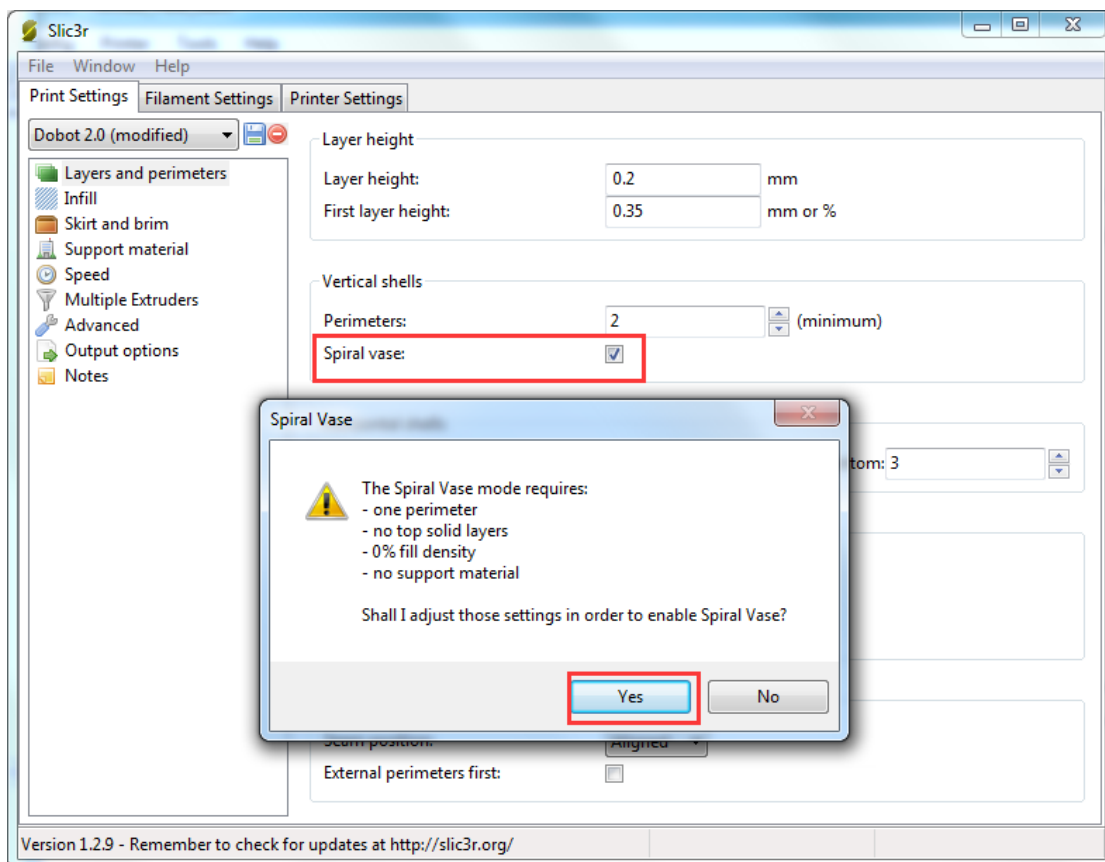
Parameters Introduction of 3D printing

Here we only introduce necessary parameter settings, and one can review the related links about the rest parameters: <http://manual.slic3r.org/>

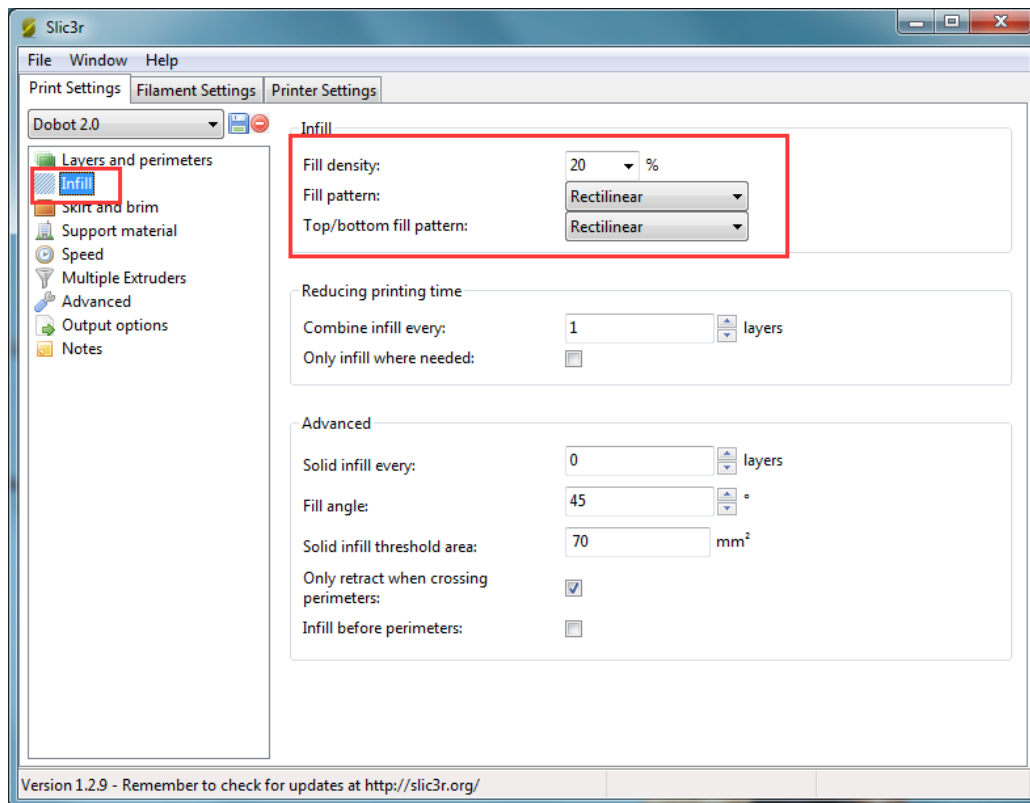
- (1) Printer settings
  - Set the height of print layer: 0.2mm;
  - The height of first layer: 0.35mm;



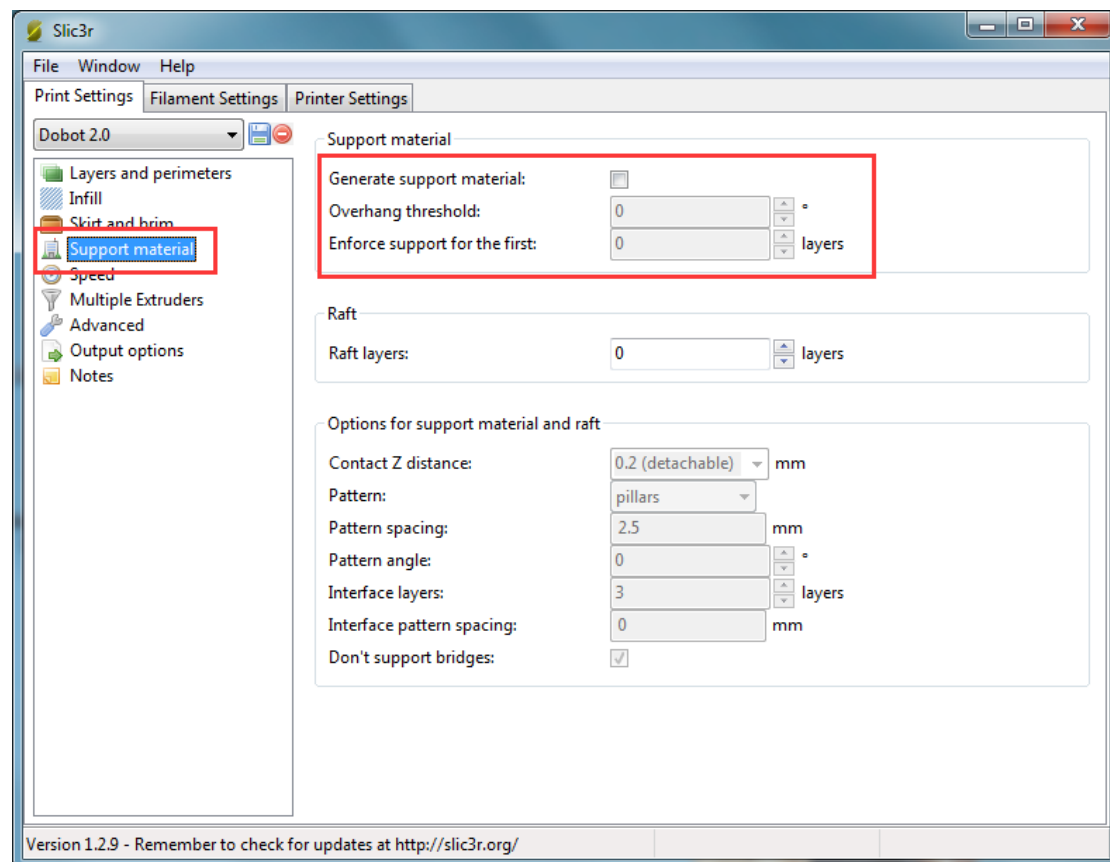
Spiral vase: Check this one and click **Yes**. Then we can print unfilled vase.



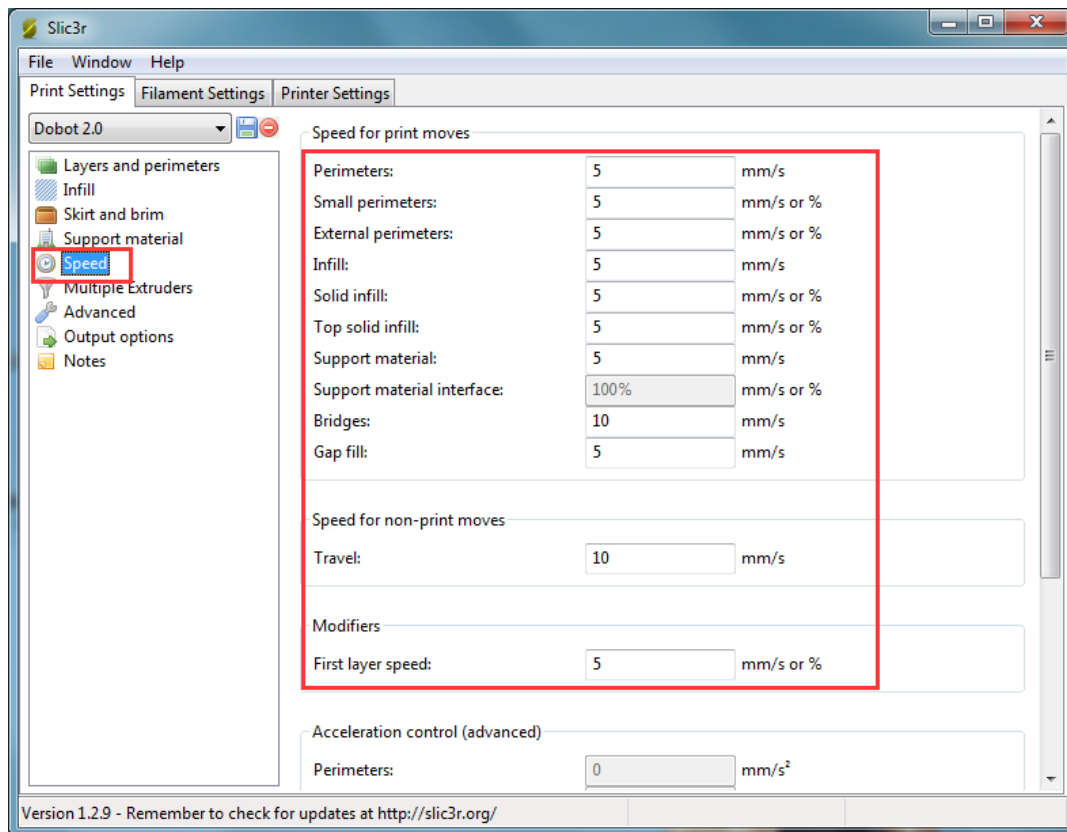
The fill rate settings:



If users need print support, please tick Generate support material:



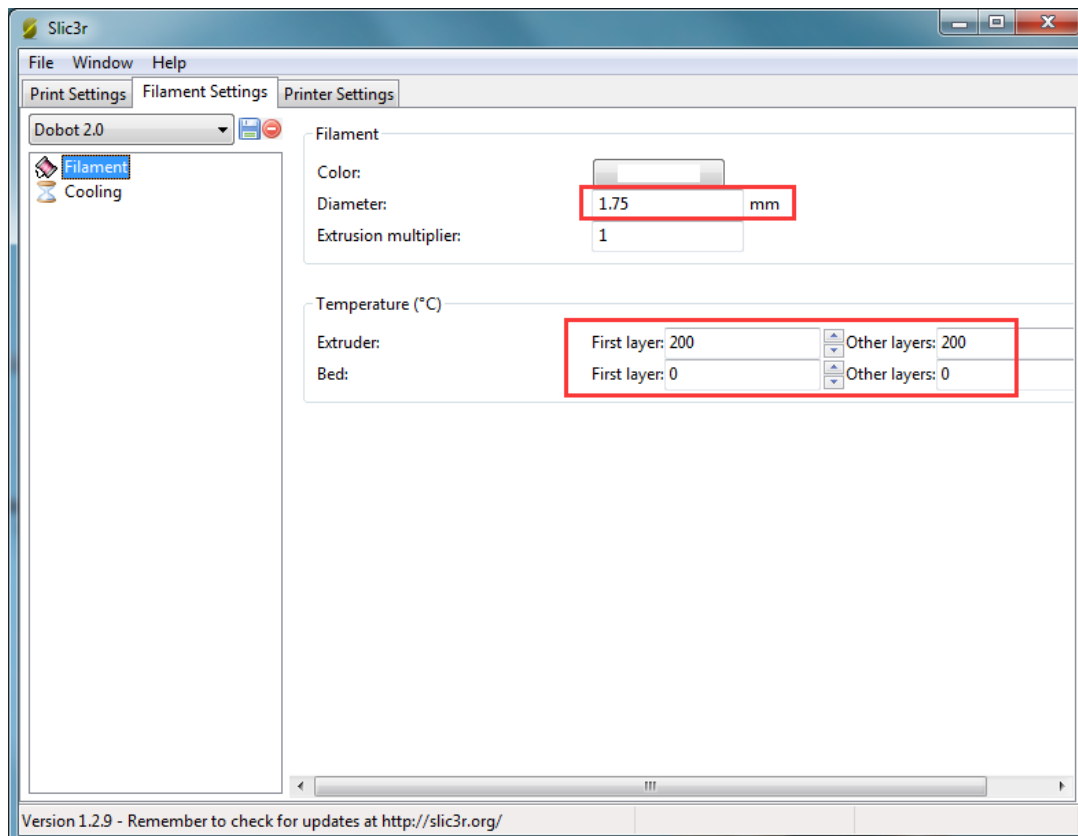
The speed settings:



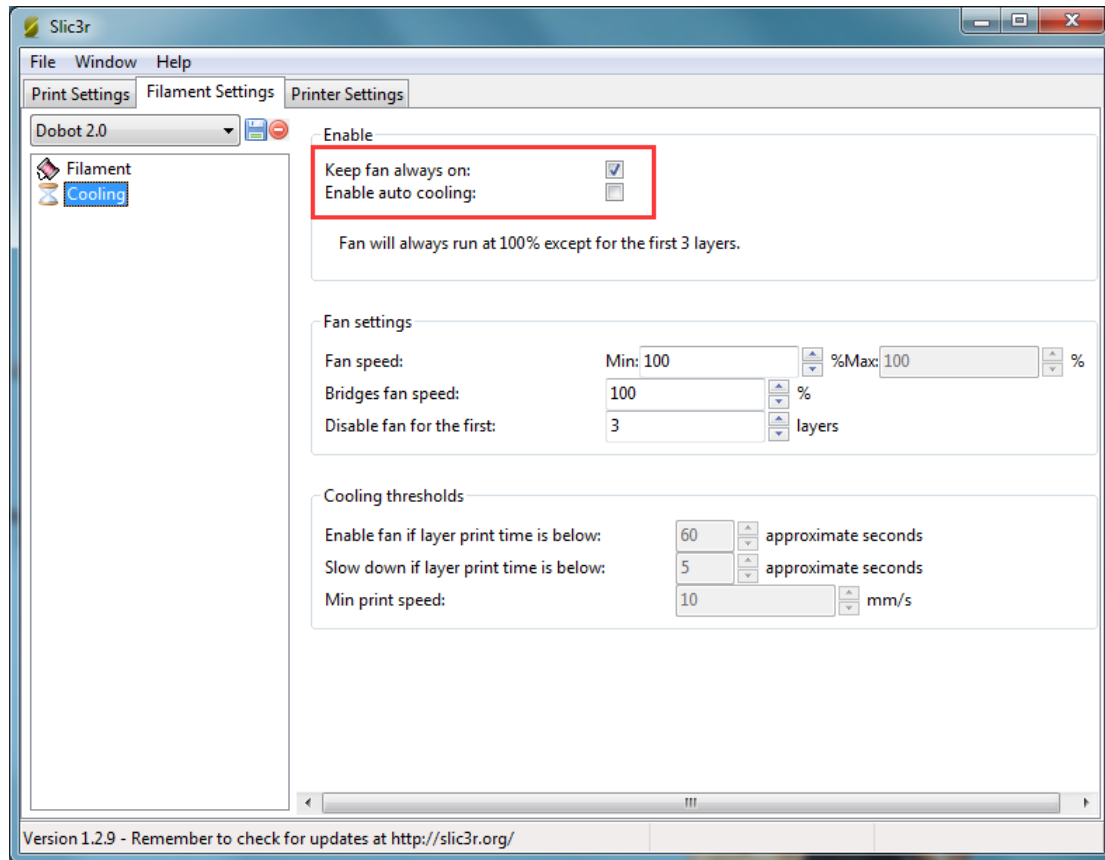
## (2) Filament settings

Consumable diameter: 1.75mm

The temperature: 200°C



Open the fan:

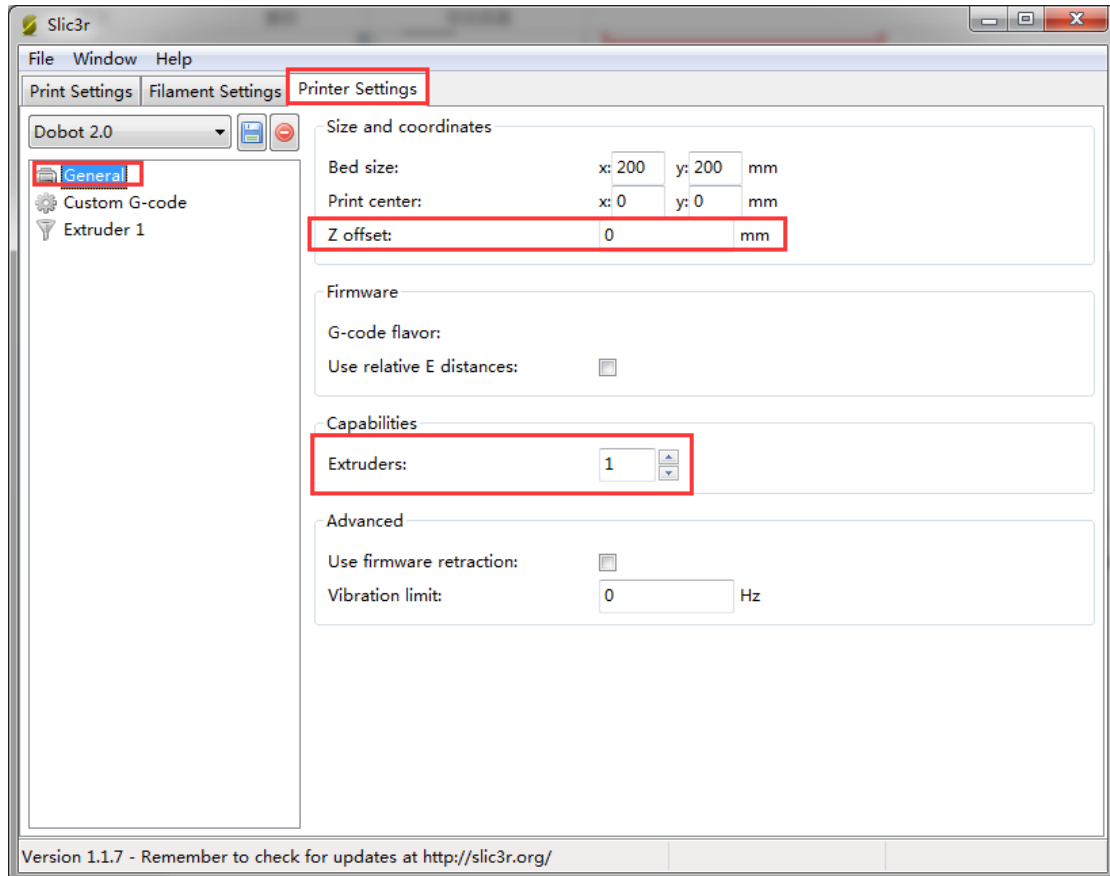


### (3) Printer settings

The number of Extruder: 1

The nozzle Z offset of extruder: 0mm

Notice: If the height of nozzle is so large that consumables cannot paste onto the print bed or so small that it cannot discharge when printing the first layer, users can amend the height from this interface, such as -0.01mm or +0.01mm, thus, one need not adjust the height again.



### G-code Settings:

Start G-code: **M106**

End G-code:

**M104 S0 ; turn off extruder**

**G91 ;relative positioning**

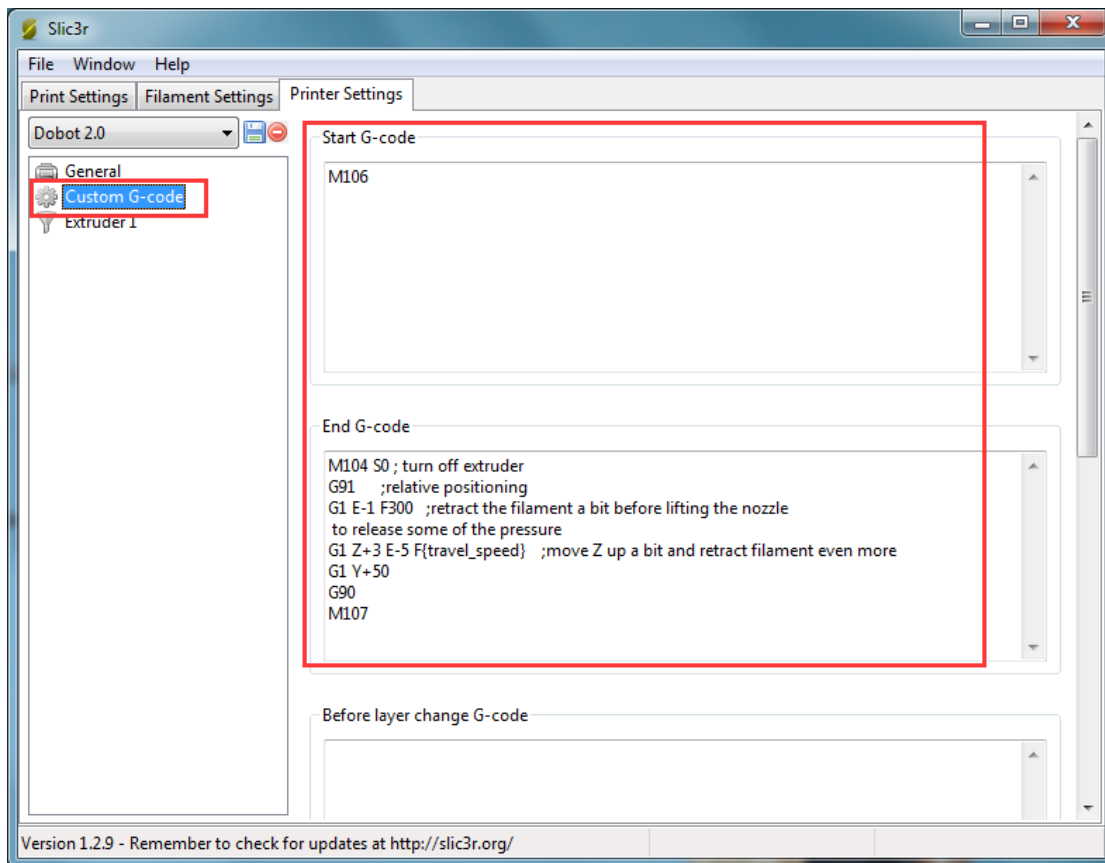
**G1 E-1 F300 ;retract the filament a bit before lifting the nozzle  
to release some of the pressure**

**G1 Z+3 E-5 F{travel\_speed} ;move Z up a bit and retract filament even more**

**G1 Y+50**

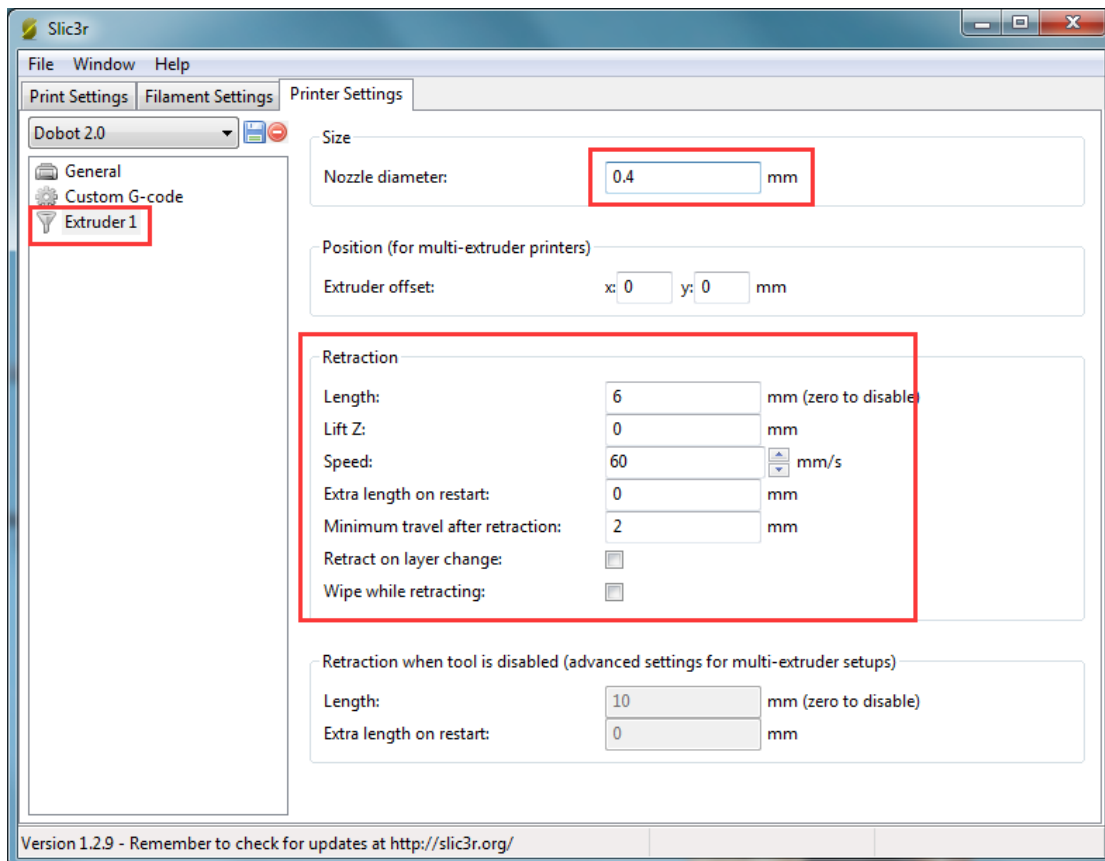
**G90**

**M107**



The nozzle diameter settings: 0.4mm;

The pump back speed settings: length=6 mm, speed=60 mm/s.





# Bibliografía

- [1] Dobot. URL: [www.dobot.cc](http://www.dobot.cc).
- [2] Jan Kietzmann, Leyland Pitt y Pierre Berthon. “Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing.” En: *Business Horizons* 58.2 (2015). Sobre la transformación que supone la introducción de técnicas aditivas en la industria de la fabricación y la investigación, págs. 209-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>.
- [3] A. Savini y G. G. Savini. “A short history of 3D printing, a technological revolution just started.” En: *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*. Sobre la historia de la impresión 3D y su impacto actual. Ago. de 2015, págs. 1-8. DOI: [10.1109/HISTELCON.2015.7307314](https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314).
- [4] Jinah Jang, Hee-Gyeong Yi y Dong-Woo Cho. “3D Printed Tissue Models: Present and Future.” En: *ACS Biomaterials Science & Engineering* 2.10 (2016). Fabricación Aditiva de tejidos orgánicos y sus aplicaciones, págs. 1722-1731. DOI: [10.1021/acsbiomaterials.6b00129](https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.6b00129).
- [5] Falguni Pati y col. “Ornamenting 3D printed scaffolds with cell-laid extracellular matrix for bone tissue regeneration.” En: *Biomaterials* 37 (2015). Empleo de estructuras impresas en 3D para el apoyo en la regeneración de tejido óseo, págs. 230-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.10.012>.
- [6] K A Lorenz y col. “A REVIEW OF HYBRID MANUFACTURING”. En: *Hybrid Manufacturing Technologies* (). Combinación de técnicas de Fabricación Aditiva basadas en haz láser con técnicas de fabricación CNC, págs. 96-108. URL: [http://www.hybridmanutech.com/uploads/2/3/6/9/23690678/2015\\_lorenz\\_et\\_al\\_a\\_review\\_of\\_hybrid\\_manufacturing.pdf](http://www.hybridmanutech.com/uploads/2/3/6/9/23690678/2015_lorenz_et_al_a_review_of_hybrid_manufacturing.pdf).
- [7] Hideo Kodama. “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer”. En: *Review of Scientific Instruments* 52.11 (1981). Investigación base para el nacimiento de la tecnología

- SLA y por tanto de la Fabricación Aditiva, págs. 1770-1773. DOI: 10.1063/1.1136492.
- [8] Tuan D. Ngo y col. “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges”. En: *Composites Part B: Engineering* 143 (2018). Estudio de la anisotropía en la impresión 3D y aplicaciones en diversos campos, págs. 172-196. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [9] Eckart Uhlmann y col. “Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM”. En: *Procedia CIRP* 68 (2018). Aplicación de campos eléctricos para mecanizado por descargas. Eliminación de sus limitaciones con apoyo de la fabricación SLM, págs. 86-90. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.027>.
- [10] H. Bikas, P. Stavropoulos y G. Chryssolouris. “Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review”. En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.1 (1 de mar. de 2016). Optimización de los distintos procesos de Fabricación Aditiva, partiendo desde el principio de funcionamiento asociado a cada uno, págs. 389-405. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2. (Visitado 13-04-2020).
- [11] IANCU Cătălin, IANCU Daniela y Alin Stancioiu. “From CAD model to 3D print via .STL file format”. En: *Revista Fiabilitate si Durabilitate* 1 (jun. de 2010). Conversión de ficheros CAD para impresión 3D en STL. URL: [https://www.researchgate.net/publication/44796917\\_From\\_cad\\_model\\_to\\_3d\\_print\\_via\\_stl\\_file\\_format](https://www.researchgate.net/publication/44796917_From_cad_model_to_3d_print_via_stl_file_format).
- [12] *2020 Most Common 3D Printer File Formats*. All3DP. Sobre los formatos más comunes para la impresión 3D. 13 de feb. de 2020. URL: <https://all3dp.com/1/3d-printer-file-format/> (visitado 29-05-2020).
- [13] *History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?* All3DP. Historia de la impresión 3D. Orígenes y tecnologías. URL: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> (visitado 11-04-2020).
- [14] RepRap. URL: <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
- [15] *TECHNIQUE AND KNOWLEDGE TRANSFER*. Manufacturing Guide ofrece información acerca de cualquier proceso de fabricación empleado en la industria e investigación. URL: [www.manufacturingguide.com](http://www.manufacturingguide.com) (visitado 26-04-2020).

- 
- [16] *2020 Types of 3D Printing Technology*. en. Sobre las tecnologías de Fabricación Aditiva: FDM, SLA, MSLA, DLP, SLS, DMLS, SLM, EBM, MJ, DOD y BD. Feb. de 2020. URL: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/> (visitado 11-04-2020).
- [17] Sara Garzón Hernández. “Connecting 3D printing parameters and mechanical properties of FDM polymers: Experiments and modelling”. En: (2019). Estudio de la relación entre los parámetros de impresión y las propiedades mecánicas de piezas poliméricas fabricadas por FDM, págs. 36-47. URL: <http://hdl.handle.net/10016/29477>.
- [18] JANNE HÄMÄLÄINEN. “SEMI-CRYSTALLINE POLYOLEFINS IN FUSED DEPOSITION MODELING”. En: Estudio del PP y PE como alternativas a los materiales convencionales de impresión 3D. 2017. URL: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201708241800>.
- [19] *Printing soluble interface supports with Prusa i3 MK2 Multi Material*. Prusa Printers. Library Catalog: [blog.prusaprinters.org](http://blog.prusaprinters.org) Section: Featured. 7 de ago. de 2017. URL: <https://blog.prusaprinters.org/printing-soluble-interface-supports-prusa-i3-mk2-multi-material/> (visitado 13-04-2020).
- [20] *Robot Arm Platform for Additive Manufacturing Using Multi-Plane Toolpaths*. Vol. Volume 5A: 40th Mechanisms and Robotics Conference. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Integración de plataformas robot industriales para impresión 3D FDM. Ago. de 2016. DOI: 10.1115/DETC2016-59438.
- [21] C. Wu y col. “General Support-Effective Decomposition for Multi-Directional 3-D Printing”. En: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2019). Descomposición multidireccional de geometría para fabricación multiplano, págs. 1-12. ISSN: 1558-3783. DOI: 10.1109/TASE.2019.2938219.
- [22] Formlabs. “Intro to Stereolithography 3D Printing”. En: (2019).
- [23] *SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers*. Formlabs. Library Catalog: [formlabs.com](http://formlabs.com). URL: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/> (visitado 26-04-2020).
- [24] *Plastic 3D Printing Materials — EOS GmbH*. Library Catalog: [www.eos.info](http://www.eos.info). URL: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials> (visitado 25-04-2020).
- [25] *Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained*. All3DP. Library Catalog: [all3dp.com](http://all3dp.com) Section: Basics. URL: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/> (visitado 25-04-2020).

- [26] *Sinterit LISA Set*. URL: <https://www.sinterit.com/shop/products/sinterit-lisa-set> (visitado 25-04-2020).
- [27] *Post-Processing for Metal 3D Printing — Design Tip*. Library Catalog: [www.protolabs.com](http://www.protolabs.com). URL: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/post-processing-for-metal-3d-printing/> (visitado 25-04-2020).
- [28] *Multi Jet Fusion*. Materialise. Library Catalog: [www.materialise.com](http://www.materialise.com). URL: <https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/multi-jet-fusion> (visitado 25-04-2020).
- [29] *Multi Jet Fusion (MJF) – 3D Printing Simply Explained*. All3DP. Library Catalog: [all3dp.com](http://all3dp.com) Section: Basics. URL: <https://all3dp.com/2/multi-jet-fusion-mjf-3d-printing-simply-explained/> (visitado 26-04-2020).
- [30] *HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison*. 3D Hubs. Library Catalog: [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com). URL: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/> (visitado 26-04-2020).
- [31] Lawrence Murr y col. “Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting”. En: *International journal of biomaterials* 2012 (ago. de 2012). Fabricación EBM de implantes ortopédicos, pág. 245727. DOI: 10.1155/2012/245727.
- [32] *GE Additive Powders — GE Additive*. URL: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/powders> (visitado 26-04-2020).
- [33] *Print Quality Guide*. Library Catalog: [www.simplify3d.com](http://www.simplify3d.com). URL: [/support/print-quality-troubleshooting/](http://support/print-quality-troubleshooting/) (visitado 01-06-2020).
- [34] *3D Print Warping: 10 Easy Fixes for PLA, PETG & ABS*. All3DP. Warping, causas principales y soluciones. 30 de ene. de 2020. URL: <https://all3dp.com/2/3d-print-warping-what-it-is-how-to-fix-it/> (visitado 05-07-2020).
- [35] *Warping*. Guía de Simplify3D para el warping y otros defectos. URL: [/support/print-quality-troubleshooting/warping/](http://support/print-quality-troubleshooting/warping/) (visitado 05-07-2020).
- [36] RAE- ASALE y RAE. *Robot — Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Library Catalog: [dle.rae.es](http://dle.rae.es). URL: <https://dle.rae.es/robot> (visitado 29-06-2020).
- [37] Karel Capek. *Robots Universales Rossum*. 1920.
- [38] Isaac Asimov. *Runaround*. 1942.

- 
- [39] *Unimate - The First Industrial Robot*. Robotics Online. Evolución de Unimate entre los años 1956 y 1969. URL: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm> (visitado 03-07-2020).
- [40] *The advance of the robots: helping manufacturers become more competitive*. Aumento de la competitividad de la actividad industrial gracias al proceso de automatización. URL: <http://processonline.com.au/content/factory-automation/article/the-advance-of-the-robots-helping-manufacturers-become-more-competitive-1079546649> (visitado 03-07-2020).
- [41] Mariane Davids. *A Brief History of Robots in Manufacturing*. Breve historia de la robótica en la industria de la fabricación. URL: <https://blog.robotiq.com/a-brief-history-of-robots-in-manufacturing> (visitado 03-07-2020).
- [42] *ASIMO by Honda — The World's Most Advanced Humanoid Robot*. Web de ASIMO, por Honda. URL: <https://asimo.honda.com/asimo-history/> (visitado 03-07-2020).
- [43] Chandramita Bora. *The Boston Dynamics Story*. TechStory. Historia de Boston Dynamics. 23 de jul. de 2018. URL: <https://techstory.in/the-boston-dynamics-story/> (visitado 05-07-2020).
- [44] *Los robots caninos de Boston Dynamics son más impresionantes y reales cada día*. Digital Trends Español. Library Catalog: es.digitaltrends.com Section: Tendencias. 23 de mayo de 2018. URL: <https://es.digitaltrends.com/tendencias/evolucion-robots-boston-dynamics/> (visitado 05-07-2020).
- [45] *Spot® — Boston Dynamics*. Web de Spot, por Boston Dynamics. URL: <https://www.bostondynamics.com/spot> (visitado 05-07-2020).
- [46] *Watch Boston Dynamics' Atlas robot evolve from a stagger to a sprint*. Digital Trends. Evolución del robot Atlas, por Boston Dynamics. 27 de mayo de 2018. URL: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/milestones-in-atlas-robot-history/> (visitado 05-07-2020).
- [47] Mike Beaupre. "Collaborative Robot Technology and Applications". En: (2016). Conferencia sobre la colaboración entre humanos y robots, aplicaciones y ventajas en la industria, pág. 41.
- [48] Ales Vysocky y Petr Novak. "HUMAN – ROBOT COLLABORATION IN INDUSTRY". En: *MM Science Journal* 2016.2 (8 de jun. de 2016). ISSN: 18031269, 18050476. URL: <http://www.mmscience.eu/june-2016.html#201611> (visitado 18-07-2020).

- [49] C. Liang y col. “Automated Robot Picking System for E-Commerce Fulfillment Warehouse Application”. En: *Proceedings of the 14th IFToMM World Congress* (1 de ene. de 2015). Desarrollo de un sistema automatizado para el almacenamiento de paquetería. DOI: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.077.
- [50] ICAI Departamento de Ingeniería Mecánica. “DISEÑO, INTEGRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE MÁQUINAS”. En: (2019). Diapositivas de la asignatura.
- [51] Peshkin Michael y Colgate J. Edward. “Cobots”. En: *Industrial Robot: An International Journal* 26.5 (1 de ene. de 1999). Desarrollo de los Cobots. ISSN: 0143-991X. URL: <https://doi.org/10.1108/01439919910283722> (visitado 18-07-2020).
- [52] Xu Zhang y col. “Large-scale 3D printing by a team of mobile robots”. En: *Automation in Construction* 95 (nov. de 2018). Empleo de robots colaborativos montados sobre AMRs para Fabricación Aditiva., págs. 98-106. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580518304011> (visitado 25-07-2020).
- [53] Michael Kutzer y Levi DeVries. “Testbed for Multilayer Conformal Additive Manufacturing”. En: *Technologies* 5.2 (24 de mayo de 2017). Sobre la determinación de capas en altura variable, pág. 25. ISSN: 2227-7080. URL: <http://www.mdpi.com/2227-7080/5/2/25> (visitado 20-07-2020).
- [54] Fubao Xie y col. “Path smoothing and feed rate planning for robotic curved layer additive manufacturing”. En: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 65 (oct. de 2020). Aplicación de estructuras de más de 3 G.D.L. para el suavizado y mejora de la calidad superficial final de la pieza. ISSN: 07365845. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584519303679> (visitado 20-07-2020).
- [55] *3D Printerling: Non-Planar Layer FDM*. Hackaday. Limitaciones de la fabricación no planar en sistemas de 3 G.D.L. 27 de jul. de 2016. URL: <https://hackaday.com/2016/07/27/3d-printerling-non-planar-layer-fdm/> (visitado 20-07-2020).
- [56] Ismayuzri Bin Ishak, Joseph Fisher y Pierre Larochelle. “Robot Arm Platform for Additive Manufacturing Using Multi-Plane Toolpaths”. En: *Volume 5A: 40th Mechanisms and Robotics Conference*. ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Proyecto para fabricación no planar empleando un robot de 4 G.D.L. Charlotte, North Carolina, USA: American Society of Mechanical Engineers, 21 de ago. de 2016, V05AT07A063. ISBN: 978-0-7918-5015-2. DOI: 10.1115/DETC2016-59438. (Visitado 20-07-2020).

- [57] *UNE 116005:2012 Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas.* (Visitado 11-07-2020).
- [58] *UNE-EN ISO 527-2:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.* (Visitado 11-07-2020).
- [59] *Desarrollo Sostenible – United Nations Sustainable Development Sites.* URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (visitado 25-07-2020).
- [60] Mirtha Moran. *Educación.* Desarrollo Sostenible. Library Catalog: [www.un.org](http://www.un.org). URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/> (visitado 25-07-2020).
- [61] Mirtha Moran. *Infraestructura.* Desarrollo Sostenible. Library Catalog: [www.un.org](http://www.un.org). URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/> (visitado 25-07-2020).
- [62] Mirtha Moran. *Consumo y producción sostenibles.* Desarrollo Sostenible. Library Catalog: [www.un.org](http://www.un.org). URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (visitado 25-07-2020).

## *BIBLIOGRAFÍA*

---