



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y FUNCIONALIDAD DE PIEZAS
CONSTRUIDAS MEDIANTE UN PROCESO DE MANUFACTURA
ADITIVA**

TESINA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA
DULCE MARÍA BÁRCENAS LUGO



Ciudad Universitaria, CD. MX.

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: MARCO ANTONIO URESTI MALDONADO

VOCAL: JUAN PABLO AGUAYO VALLEJO

SECRETARIO: ALBERTO CABALLERO RUIZ

1er. SUPLENTE: ALBERTO ROSAS ABURTO

2° SUPLENTE: YARA CECILIA ALMANZA ARJONA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA INDUSTRIAL DE BARCELONA (ETSEIB) DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (UPC).

ASESOR DEL TEMA:

Juan Pablo Aguayo Vallejo

SUSTENTANTE:

Dulce María Bárcenas Lugo

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y muy especialmente a la Facultad de Química, que me formaron y me han dado los conocimientos que crean una parte importante de mi vida profesional.

Al Dr. Juan Pablo Aguayo Vallejo por ser mi asesor, por su ayuda, tiempo, paciencia, retroalimentación y confianza para el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Joaquim Minguella Canela por abrirme las puertas de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), por toda su enseñanza, apoyo y confianza.

A todo el equipo de la planta piloto de la fundación CIM de la UPC, en especial a Daniel Gómez responsable de la planta piloto.

Al Dr. Leopoldo Ruiz Huerta por su ayuda y confianza.

A la DGECI por el apoyo con el “Programa de titulación para egresados de la UNAM a través de estancia académica en el extranjero (TEE)”, sin esto no hubiera sido posible vivir la experiencia y el desarrollo del proyecto.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Descripción del caso de estudio	3
1.1. Fundación CIM (<i>Computer Integrated Manufacturing</i>)	3
1.2. Espacio de Fabricación Digital	3
Capítulo 2. Impresión 3D	5
2.1. Máquina 3D+	6
2.2. Máquina 3D Sigma	8
2.3. Máquina 3D Sigma R19	10
2.4. Máquina 3D Sigmax	11
Capítulo 3 Proceso de fabricación	12
3.1. Descripción del proceso	12
3.1.1. Cura BCN 3D versión 0.1.5 y 2.1.5	16
Capítulo 4 Materiales	20
4.1. Características de los materiales	20
4.1.1. Ácido Poliláctico (PLA)	20
4.1.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	21
4.1.3. Poliestireno de alto impacto (HIPS)	22
4.1.4. Nylon	24
4.1.5. Filaflex/TPU	24
4.1.6. Acetato de polivinilo (PVA)	25
4.1.7 Tereftalato de glicol de polietileno (PET-G)	25
4.2. Clasificación	26
4.3. Parámetros de operación recomendados por el proveedor	26
4.4 Criterios de elección de filamento	28
Capítulo 5 Parámetros de construcción	31
5.1. Parámetros de operación	31
Capítulo 6. Mejora del proceso	42
6.1. Pautas de iniciación	42
6.2 Valoración y selección de parámetros	43
6.3. Reducción del tiempo de fabricación	45
6.4. Dirección y solución de fallos durante el proceso	46

6.4.1 El material no se pega correctamente a la cama o las líneas no se pegan entre sí.....	46
6.4.2 El equipo deja de extruir	48
6.4.3 La pieza se deforma durante o después de su fabricación	50
6.4.4 Aspecto o acabado superficial malo.....	52
6.4.5 Piezas débiles o quebradizas.....	53
Capítulo 7 Posprocesado.....	55
7.1. Detección y solución de daños	55
7.1.1. Eliminación de soporte.....	55
7.1.2. Lijado	56
7.1.3. Pulido	57
7.1.4. Pegado	57
7.1.5 Recubrimiento.....	58
7.1.6 Relleno de huecos.....	58
7.1.7 Pintado	59
7.1.8. Alisado con vapor	60
Capítulo 8 Análisis	61
8.1. Diferencias y similitudes del proceso de extrusión en inyección respecto al proceso de extrusión aditiva.....	61
8.2. Elección de un proceso	62
Conclusión	64
Anexo 1 Lista de cotejo	66
Anexo 2 Otros Materiales.....	68
Bibliografía.....	72

Introducción

La manufactura aditiva consiste en fabricar objetos en tercera dimensión, es un proceso que lleva a cabo la unión de cualquier material a partir de información digital que obtiene de un modelo 3D desde una computadora y lo hace capa tras capa de manera automática.

De acuerdo a la “*Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*”, se llama impresión 3D a la fabricación de objetos mediante la deposición de material utilizando un cabezal de impresión, una boquilla u otra tecnología semejante. La extrusión de material se define como un proceso de fabricación aditiva, donde el material se dispersa selectivamente a través de una boquilla u orificio. La máquina utilizada para este proceso de fabricación lleva por nombre “Impresora 3D” [1].

Existen diferentes procesos de manufactura aditiva que se han agrupado en categorías, sin embargo, en este trabajo únicamente se hace referencia a uno de ellos, que consiste en la extrusión aditiva de material.

El proceso de manufactura por extrusión, a diferencia de los procesos de extrusión tradicionales, permite hacerlo sin la necesidad de grandes líneas de producción, moldes o mano de obra.

El presente trabajo muestra el procedimiento y el análisis a partir del cual se forman criterios de selección tanto de materiales, como de parámetros al personalizar el proceso. Para llevarlo a cabo es necesario conocer previamente información técnica acerca de la maquinaria y la materia prima.

El proceso aditivo de extrusión de material como todos los procesos industriales puede tener fallas, solucionar los problemas que surjan es un reto constante con cada pieza fabricada, aun siendo la reproducción de un mismo diseño, cada caso es diferente.

Existen problemas comunes dentro del proceso, factores y formas de dar solución durante la fabricación. Sin embargo, aunque es posible la solución de estos problemas durante el proceso, también existe la posibilidad de que se obtengan

piezas fuera de las especificaciones que exige el cliente, es por eso que existen procesos posteriores que permiten lograrlo.

La observación y análisis del proceso se desarrolla en la Universitat Politècnica de Catalunya dentro de un espacio a cargo de la Fundación CIM; dedicados a la fabricación aditiva de extrusión, se basan en el resultado de la fabricación de piezas de diferente índole, con distintos objetivos, materiales, colores y proveedores. La mayoría de los materiales y la maquinaria que utilizan en el lugar provienen de uno de los principales fabricantes de impresoras 3D del mundo, BCN3D [2].

En esta fundación, el proceso de manufactura aditiva por extrusión es conocido coloquialmente como Impresión 3D; puesto que el presente trabajo fue desarrollado de manera colaborativa con la Fundación CIM, en el resto del documento se emplea el término Impresión 3D para referirse al proceso de manufactura aditiva por extrusión.

Capítulo 1. Descripción del caso de estudio

Existe un espacio en la ETSEIB (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona) encargado de la fabricación de objetos por el proceso de extrusión aditiva. Este espacio se desarrolla por la Fundación CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), para alumnos de la universidad.

1.1. Fundación CIM (*Computer Integrated Manufacturing*)

La Fundación CIM es un centro de investigación que forma parte de la Universitat Politècnica de Catalunya, busca nuevos procesos de producción con el objetivo de ayudar a las empresas a innovar y aumentar sus tecnologías. Actualmente lleva a cabo algunos procesos de manufactura aditiva, entre ellos, la extrusión de material. El espacio dedicado a la fabricación aditiva por extrusión cuenta con tres diferentes modelos de máquinas de escritorio trabajando, que llevan por nombre Sigma¹, Sigma R19² y Sigmax³, mismas que permiten proporcionar servicios de diferente índole a muchas industrias.

1.2. Espacio de Fabricación Digital

El espacio de fabricación lo dirige la Fundación CIM y cuenta con ocho máquinas en funcionamiento para extrusión, en únicamente dos diferentes modelos: uno de ellos se llama “Sigma” y el modelo más antiguo, que surge en el año 2012 con el nombre de “3D+”; ese mismo año surge el espacio de fabricación dentro de la ETSEIB.

El espacio de fabricación digital se dedica especialmente a personas que necesitan ayuda con la fabricación de piezas simples. Al lugar llegan piezas para uso mecánico, modelos arquitectónicos o con fines educativos, donde basta que la pieza sea fabricada solo una vez.

1 BCN3D Technologies © 2015

2 BCN3D Technologies © 2019

3 BCN3D Technologies © 2017

Los diseños se elaboran en su mayoría por los propios alumnos en programas de diseño 3D como Solidworks⁴, Inventor⁵, Rhinoceros⁶ y AutoCAD⁵, por ejemplo. En este lugar se lleva a cabo la fabricación de gran variedad de diseños, piezas con paredes gruesas, paredes delgadas, rellenos, colores, materiales y tamaños. El archivo debe llegar al espacio de fabricación en formato STL, se trata del formato de archivos para datos de modelos 3D; STL se originó del termino estereolitografía[1].

En el lugar, una persona se encarga de visualizar el diseño, filtrar el archivo STL en el programa “CURA BCN 3D” y crear un nuevo archivo compatible con la máquina para la puesta en marcha.

El Ácido Poliláctico (PLA) es el material que más se emplea en el espacio de fabricación por su dureza, resistencia, flexibilidad, durabilidad, variedad de colores, además de que pocas veces tiene problemas durante el proceso de fabricación. Las piezas en PLA se pueden cortar, pintar y pegar. Desafortunadamente no soportan temperaturas elevadas una vez obtenidas, pero para el usuario sus propiedades son suficientes. Existen materiales con características similares o mejores al PLA, pero que tienen mayor probabilidad de tener problemas en el proceso, así que solo se fabrican en casos especiales o solicitan ayuda a la fundación.

4 ©2002-2019 Dassault Systèmes SolidWorks Corporation

5 © 2019 Autodesk Inc.

6 © 2019 Robert McNeel & Associates

Capítulo 2. Impresión 3D

Una impresora 3D toma información codificada y la transforma en movimientos a partir de coordenadas (X, Y, Z), movimientos lineales de un punto a otro donde deposita material plástico fundido hasta formar una geometría.

“Impresión 3D” es solo el termino con el que se le conoce coloquialmente a la extrusión de material, realiza réplicas con materiales poliméricos de modelos en tercera dimensión diseñados con programas 3D desde una computadora. Los modelos pueden ser de carácter arquitectónico (ver Figura 1), con fines mecánicos o de ocio, pero siempre será necesario tener claro el fin para el que están destinados antes de diseñarlos; el diseño es fundamental para el proceso de manufactura.



Figura 1. Maqueta arquitectónica en PLA color blanco, fabricada en el espacio de fabricación digital por el proceso de extrusión de material.

Este proceso es relativamente lento y costoso si se compara con otros procesos de fabricación de piezas plásticas como el proceso de inyección, sin embargo, existen razones que lo han hecho útil. El proceso permite obtener acabados superficiales complejos, prototipos para futuras producciones en masa, piezas con medidas específicas o unitarias.

Algunas piezas cuentan con acabados superficiales que necesitan ser construidos a detalle; generar estos detalles con una máquina de este tipo permite depositar las

líneas de material una a la vez, a una velocidad tal que dé como resultado un buen acabado.

En algunos casos, nuevos modelos necesitan ser fabricados en grandes cantidades por otros métodos de extrusión más eficientes. Para asegurar que el modelo reúne las características que el usuario necesita, es posible visualizar estas características en una pieza fabricada por este método y generar las pruebas pertinentes antes de comenzar la producción masiva.

Además, existen piezas que son únicas en su especie, mayormente se debe a que son piezas muy antiguas; con este método es posible generar un modelo semejante que cumpla con las medidas y ser fabricado.

Generalmente, el espacio de fabricación produce solo una pieza por diseño y no necesita una escala específica; incluso algunas veces el tipo de material es irrelevante para el usuario.

2.1. Máquina 3D+

La máquina 3D+ o impresora 3D+ cuenta solo con un cabezal, compuesto por un sistema de engranaje, un motor, una boquilla y una plataforma de deposición, que en conjunto se encargan de la extrusión y transporte del material (ver Figura 2).

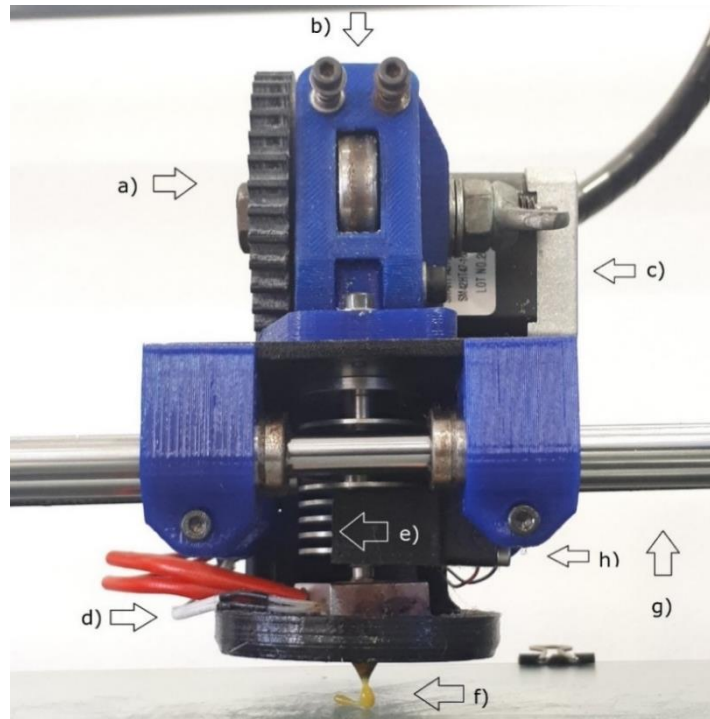


Figura 2. Partes que componen el cabezal de una máquina 3D+ a) engranes b) entrada de filamento c) motor d) bloque calentador e) dissipador de calor f) boquilla g) barras de movimiento h) ventilador de refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

El material se alimenta desde la base de la bobina del filamento que se encuentra en la parte superior de la máquina, un conjunto de engranes permite el desplazamiento del filamento, barras metálicas ligadas a dos motores permiten a su vez el desplazamiento del cabezal y la plataforma metálica donde se depositara el material extruido, que lleva por nombre “cama”.

La plataforma metálica y el cabezal en conjunto realizan una serie de movimientos para formar el objeto, la plataforma de una máquina 3D+ únicamente se desplaza en los planos X y Y, el cabezal se encarga de desplazarse en el eje Z por medio de las barras de desplazamiento, cada vez que está por iniciar la nueva capa (ver Figura 3).

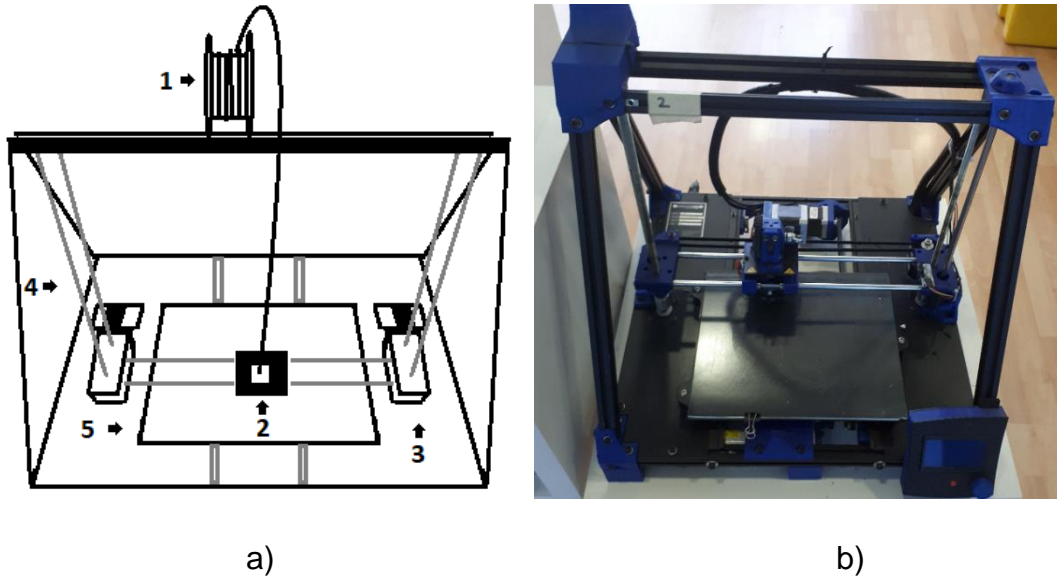


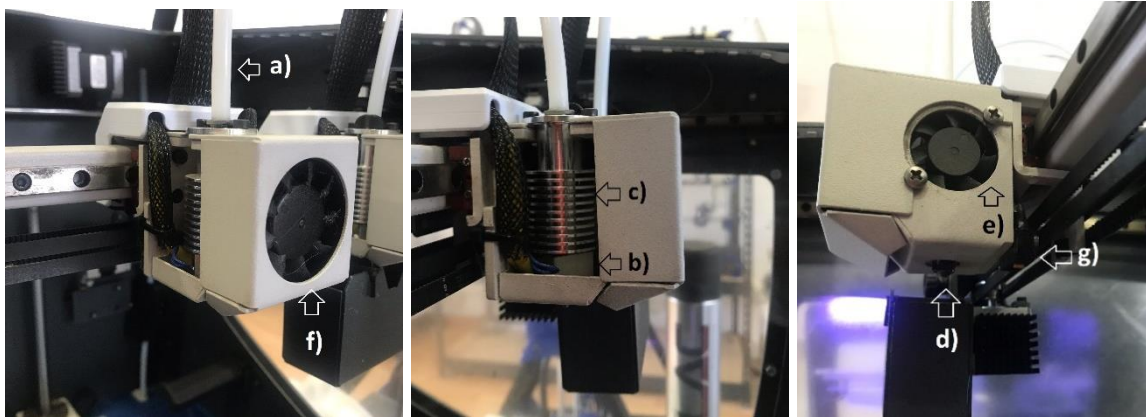
Figura 3. Máquina 3D+. a) Diagrama: 1. Base de bobina del filamento 2. Cabezal 3. Barras metálicas con motor de desplazamiento 4. Barras de desplazamiento 5. Cama. b) Fotografía del equipo. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Máquina 3D Sigma

Una máquina 3D Sigma se compone de dos cabezales independientes, uno a cada extremo, que permiten depositar dos materiales o dos colores diferentes en una misma cama.

En algunos casos, mientras uno de ellos se encuentra trabajando, el otro cabezal se mantiene en reposo en un contenedor metálico fuera de la placa, para evitar el goteo de material fundido sobre la pieza que está fabricando y no estorbar al cabezal en movimiento. Pero existe la opción de poner a trabajar ambos cabezales y hacer el proceso más corto, fabricando dos piezas iguales en la misma cama, al mismo tiempo, pero cada una a un extremo respetando el área de trabajo para que ambos cabezales no choquen durante el proceso.

Un cabezal del equipo Sigma cambia en diseño con respecto a la 3D+, pero ambos realizan las mismas funciones. Este equipo permite la calibración automática del cabezal con la cama, haciendo uso de un interruptor mecánico que dará mayor precisión en la deposición del filamento a la hora de construir cada capa. Además, cuenta con un sistema cerrado que le permite tener un mejor control de la extrusión, fundición y enfriamiento del material fundido (ver Figura 4).



A.

B.

C.

Figura 4. Partes que componen el cabezal de una máquina Sigma: A. a) Entrada de filamento, f) ventilador de capa. B. b) bloque calentador, c) disipador de calor. C. d) boquilla, e) ventilador del disipador de calor, g) interruptor del fin de carrera. Fuente: Elaboración propia.

La máquina cuenta con diferentes elementos que permiten el funcionamiento de ambos cabezales, cuyo movimiento se lleva a cabo a partir de bandas de desplazamiento ligadas a un motor. Cada cabezal cuenta con una base de bobina de filamento, un sensor de fin de filamento y un contenedor metálico propio. Sin embargo, el lector de tarjeta y la pantalla táctil la comparten, esto quiere decir que también comparten el mismo archivo CURA, esto es posible a partir del software “CURA BCN3”, que permite establecer parámetros independientes para cada cabezal (ver Figura 5).

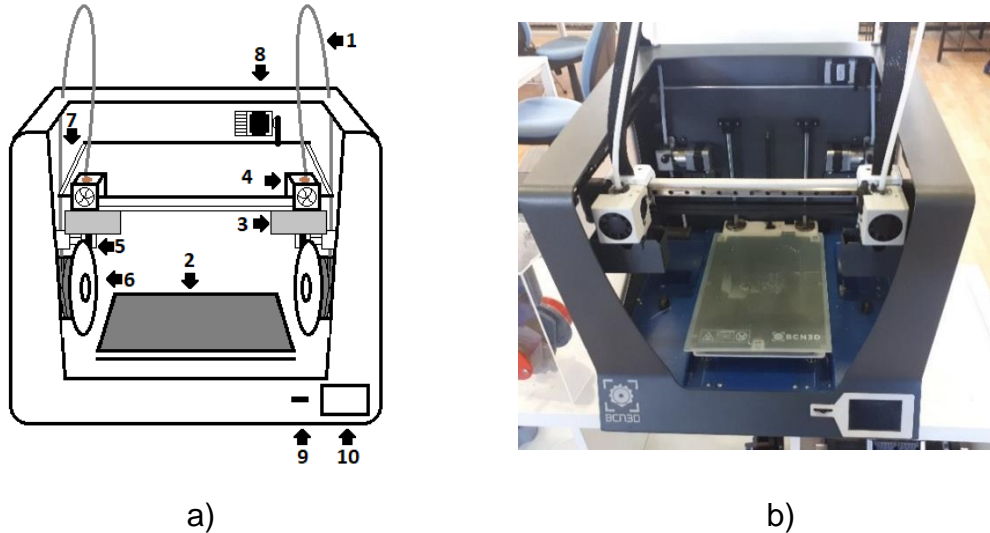


Figura 5. Máquina 3D Sigma con doble cabezal a) Diagrama: 1. Filamento 2. Cama 3. Contenedor metálico 4. Cabezal 5. Sensor de fin de filamento 6. Base de bobina del filamento 7. Bandas de desplazamiento 8. Motor para desplazamiento 9. Lector de tarjeta 10. Pantalla táctil. b) Fotografía del equipo. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente es importante señalar que, la cama y el cabezal también realizan una serie de movimientos durante la deposición, pero en una máquina 3D Sigma ambos se mueven en los planos X, Y y únicamente la cama se desplaza en Z hacia abajo después de cada capa.

2.3. Máquina 3D Sigma R19

La máquina Sigma R19 funciona del mismo modo que lo hace el modelo Sigma, lo que las hace diferentes es el sistema de motores para la alimentación del filamento, el resto de las características y la puesta en marcha son las mismas (ver Figura 6).

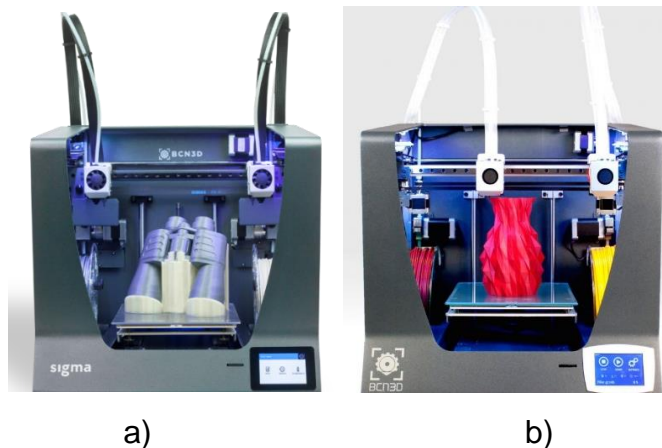


Figura 6. a) Modelo Sigma. b) Modelo Sigma R19. [2] [3]

2.4. Máquina 3D Sigmax

Funciona de la misma forma en que lo hacen Sigma y Sigma R19, lo que la hace diferente al resto es el tamaño de la cama. Sirve para construir piezas de mayor tamaño (ver Figura 7).

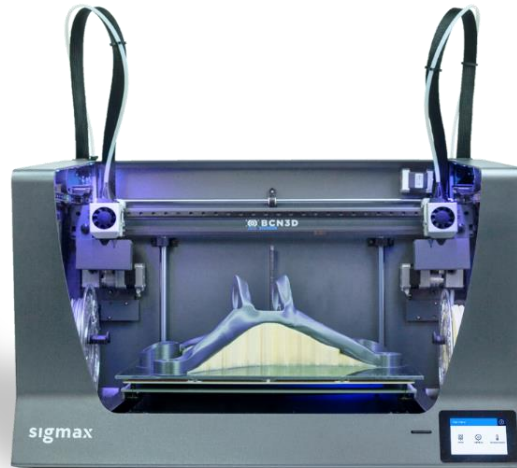


Figura 7. Máquina Sigmax. [2].

La siguiente tabla muestra información proporcionada por el fabricante acerca de las tres diferentes máquinas y de este modo sean visibles las similitudes que existen.

Tabla 1. Especificaciones de las diferentes máquinas BCN3D. Fuente: [2].

Máquina	Sigma	Sigma R19	Sigmax
Especificación			
Dimensiones (mm)	465 x 440 x 680	465 x 440 x 680	675 x 440 x 680
Peso (kg)	15	15	18
Volumen de construcción (mm)	210 x 297 x 210	210 x 297 x 210	420 x 297 x 210
Diámetro de boquilla (mm)	0.4 *	0.4*	0.4*
Pantalla	táctil a color	táctil a color	táctil a color
Numero de extrusores	2	2	2
Diámetro de filamento(mm)	2.85 ± 0.05	2.85 ± 0.05	2.85 ± 0.05
Modos de fabricación	Simple	Simple	Simple
	Dual	Dual	Dual
	Duplicación	Duplicación	Duplicación
	Espejo	Espejo	Espejo

*compatibilidad con 0.3,0.5,0.6,0.8 y 1mm

Capítulo 3 Proceso de fabricación

Para la puesta en marcha de un equipo de manufactura aditiva del tipo extrusión de material es necesario llevar a cabo una serie de pasos en un orden determinado, además de conocer los materiales, el diseño de la pieza y uso o tratamiento que tendrá después de ser fabricada.

3.1. Descripción del proceso

El proceso de fabricación comienza con un archivo digital creado en cualquier software CAD. El acrónimo CAD (*Computer-Aided Design*) diseño asistido por computadora, hace uso de computadoras para el diseño de objetos reales o virtuales [2].

En el software CAD solamente se dibuja y/o diseña una pieza o conjunto de piezas. Los softwares CAD más comerciales son: Autocad, Autodesk Inventor, Pro/Engineer, SolidWorks, Solid Edge, Catia, turbo CAD [4].

Pero para que un objeto pueda ser fabricado, es necesario guardar el archivo, desde el software CAD, en formato STL. El formato STL se originó del término estereolitografía, en manufactura aditiva es el formato de archivos para datos de modelos 3D y es utilizado por las máquinas para construir piezas físicas. El formato STL utiliza facetas triangulares para aproximar la forma de un objeto, enumera los vértices y excluye los atributos del modelo CAD [1].

Una vez que el archivo del objeto se encuentra en formato STL, se establecen los parámetros con los que operará la máquina durante la fabricación. Se arrastra el archivo en formato STL hasta otro software en el que es posible insertar valores a los diferentes parámetros y de este modo preparar el modelo para la fabricación; este segundo software lleva por nombre "CURA BCN 3D".

La manufactura aditiva realiza la unión de material capa tras capa, por lo tanto, si se tiene una pieza con voladizos, que son partes de la geometría que no inician desde la base con ángulos de inclinación menores a 40°, se sugiere generar un soporte desde el inicio de la construcción para poder sostener esta parte de la geometría y no depositar el material en el aire.

La Figura 8 es la simulación de una hélice desde la cama del software, además se muestra la fotografía de la pieza con soportes en cada una de las aletas de la hélice. Es por esto que antes de poner en marcha la máquina se coloca la figura digital en la cama simulada, se analiza evitando ángulos de inclinación y se gira por la cama hasta encontrar la mejor posición.

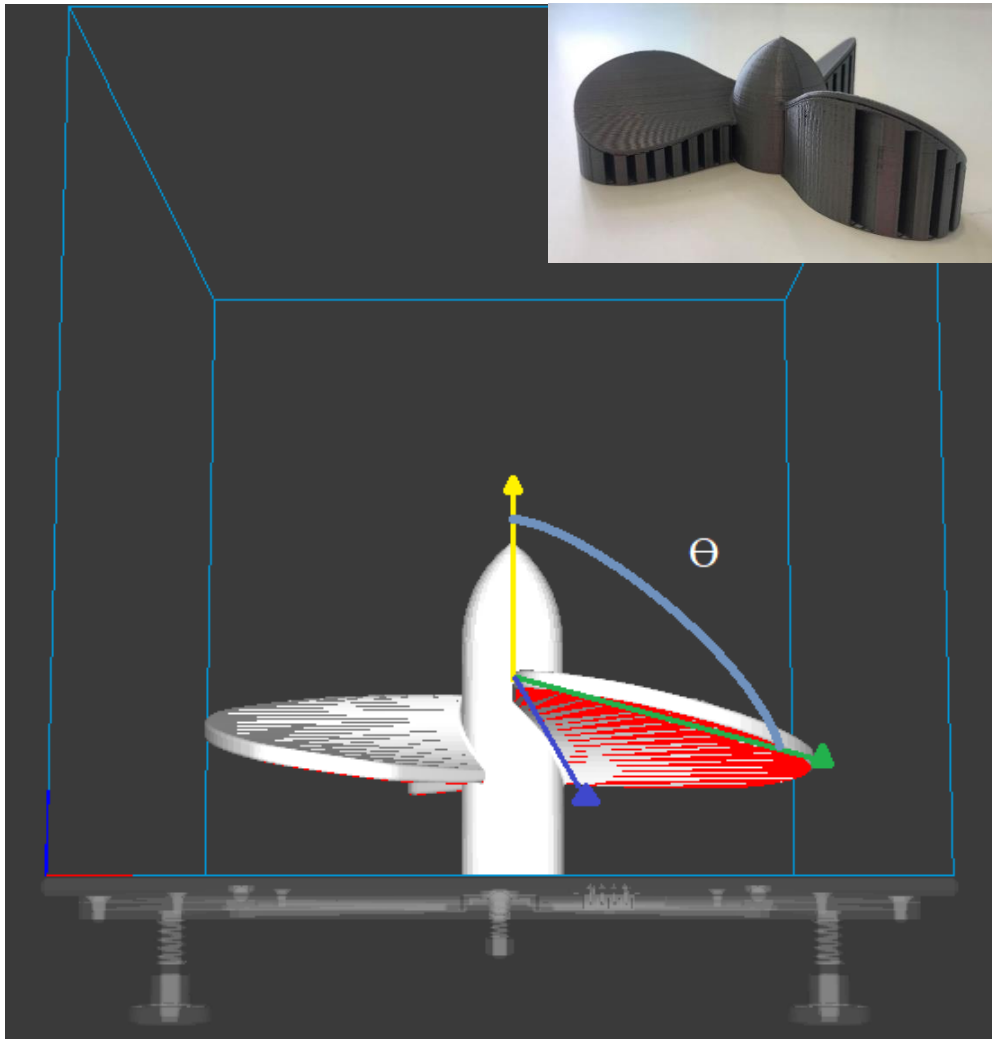


Figura 8. Hélice, figura con ángulos de inclinación, construida con PLA color plata por extrusión de material.

Al relacionar esta condición con la eficiencia, tener voladizos hace que aumente la cantidad de material y el tiempo de fabricación, además de que al terminar el proceso será necesario desprender los soportes y esto podría dañar la superficie de la pieza donde se tiene contacto con el soporte. Es por esto que, durante la creación

tanto del archivo CURA como el documento CAD, conviene evitar voladizos o que sean colocados en la parte menos visible de la pieza.

Lo que sigue es capturar las características de la máquina y el tipo de material en el software, de este modo sugiere parámetros predeterminados para el proceso y expulsa una simulación. Además de los parámetros recomendados por el programa, existe la opción de personalizarlos, es decir, el equipo permite configurar los parámetros de operación y tener un control más específico del proceso. De este modo, se genera el archivo CURA para introducirlo por el lector de la máquina.

Antes de comenzar la construcción es necesario extruir un poco de material y desecharlo, con el objetivo de limpiar el camino que recorrerá el material que ira a la pieza final. Para purgar se utiliza Nylon, el cual arrastra las impurezas que pudiesen haber quedado por la degradación, carbonización o color de procesos anteriores.

El siguiente paso es introducir el filamento, que necesita la pieza que se va construir, por el canal de alimentación hasta ser extruido y salir fundido por la boquilla. Si el material fluye libremente se comienza con la calibración automática de la cama. La máquina acciona una serie de movimientos de los cabezales y de este modo se generan un equilibrio de movimiento entre los cabezales y la cama, de modo que en conjunto depositen líneas de material bien definidas.

Se coloca un poco de laca en la superficie de la cama; la laca es una sustancia en aerosol que favorece la adhesión del material y permite retirar la pieza con facilidad una vez terminada la construcción.

Finalmente, el archivo se introduce en el lector por medio de una tarjeta de memoria, se selecciona el archivo desde la pantalla táctil, el equipo lo identifica y después de un par de minutos comienzan los movimientos del cabezal (ver Figura 9).

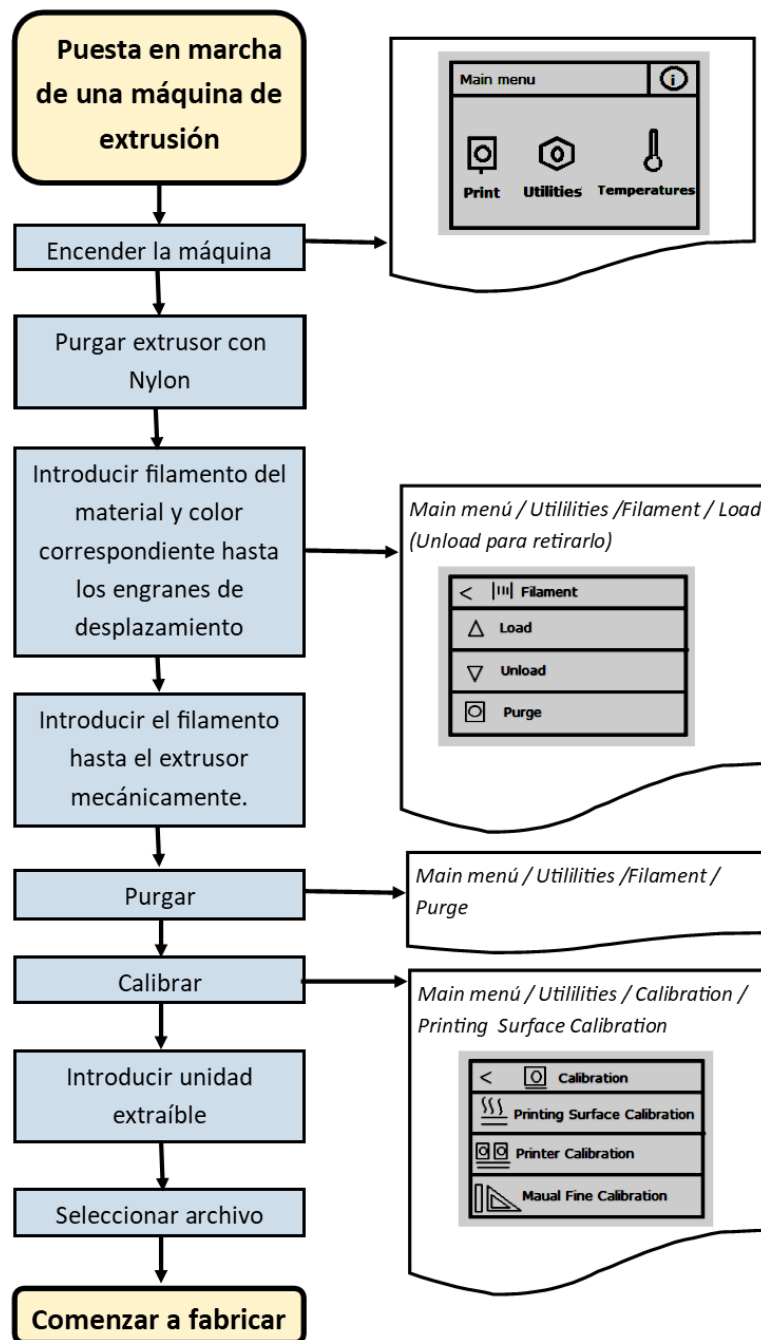


Figura 9. Proceso de la puesta en marcha de un equipo de extrusión. Fuente: Elaboración propia.

El equipo indica los puntos de desplazamiento que tendrá que hacer el cabezal, el desplazamiento siempre lo hará en línea recta entre dos puntos en el eje x-y, durante el desplazamiento se irá depositando el material fundido formando líneas horizontales. Los parámetros determinan la cantidad de material que se ocupará, el acabado superficial y el tiempo de fabricación.

El filamento es alimentado hasta llegar al bloque calentador, que es calentado por resistencias eléctricas y así se logra fundir el filamento que entra por empuje de los engranes. Finalmente, el material fundido se obtiene por la boquilla y se comienza a depositar hasta formar la primera capa de material. Una vez formada, el cabezal realiza un movimiento vertical de manera que se comienza a depositar la siguiente capa sobre la primera, de este modo se va depositando capa por capa hasta formar una figura sólida.

En el caso de los equipos de los modelos Sigma, Sigma R19 y Sigmax, el movimiento vertical para la formación de una siguiente capa lo realiza la cama sobre el eje z. El proceso de extrusión nunca cambia, solo si se trata de un aumento en el número de cabezales el proceso se vuelve independiente para cada cabezal.

Para no olvidar ninguno de los elementos de la puesta en marcha es conveniente crear una lista de cotejo y visualizar todo lo que involucra la manufactura por procesos aditivos de este tipo (ver Anexo 1), esto podría evitar retrasos o reprocesos.

3.1.1. Cura BCN 3D versión 0.1.5 y 2.1.5

Cura BCN 3D es un programa que se utiliza en el proceso de manufactura aditiva para cualquier máquina de extrusión de material. Permite establecer las condiciones del proceso, de este modo se visualiza y prepara un archivo de un modelo determinado para que sea depositado (ver Figura 10). El fabricante BCN 3D además se encarga de la elaboración de diferentes filamentos y equipos de este tipo.

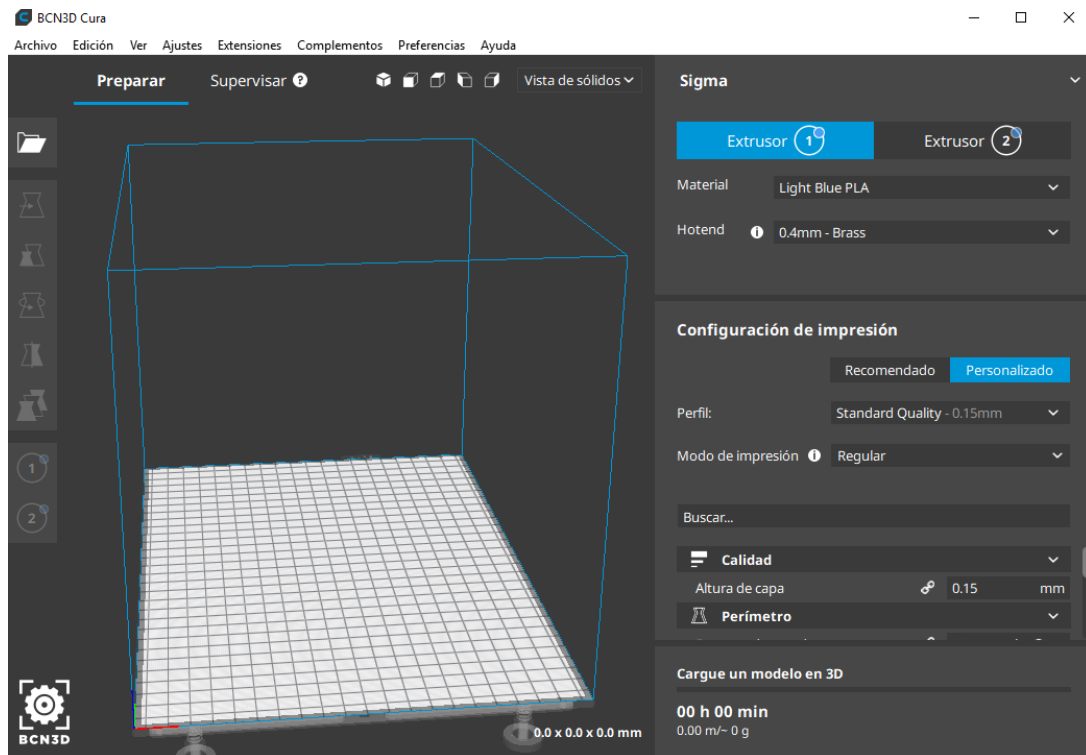


Figura 10. Captura de pantalla del software CURA del fabricante BCN3D, simulación de un equipo Sigma. Fuente: CURA BCN3D v 2.1.5.

Para que el programa defina los parámetros basta con:

- Seleccionar el tipo de máquina que se va utilizar, se cuenta con los modelos anteriormente mencionado: Sigma, Sigma R19 y Sigmax, con diferentes dimensiones en la cama de construcción (ver Tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones de cama para los diferentes equipos. Fuente: Elaboración propia con información de CURA v 2.1.5.

Modelo	Dimensiones (mm)		
	X (anchura)	Y (profundidad)	Z (altura)
Sigma	210	297	210
Sigma R19			
Sigmax	420	297	210

La modelo 3D+, por ser la primera que se crea, trabaja con la versión 0.1.5 de CURA, que es una versión antigua con un tamaño de cama determinada para ese modelo, pero se trabaja de la misma forma que la nueva versión.

- Importar el archivo del diseño en formato STL.
- Colocar el tipo de material que será extruido en el cabezal seleccionado (PLA, ABS, Nylon, FilaFlex/TPU, HIPS, PVA).
- Insertar el diámetro de la boquilla (los tamaños con los que se cuenta son de 0.3,0.4, 0.5, 0.6, 0.8 y 1 mm).

Seguir estos primeros pasos es suficiente para que el programa genere de manera automática una serie de parámetros recomendados para el grupo de materiales BCN3D, sin embargo, si se utiliza un material de un proveedor diferente, el programa da la libertad de modificar los parámetros recomendados o de personalizar el proceso en función de los resultados físicos que arroje en la pieza. Como se mencionó anteriormente los resultados también dependerán del diseño de la pieza, del material, e incluso del color. A continuación, en la Figura 11 se muestra el proceso para la generación del archivo CURA:

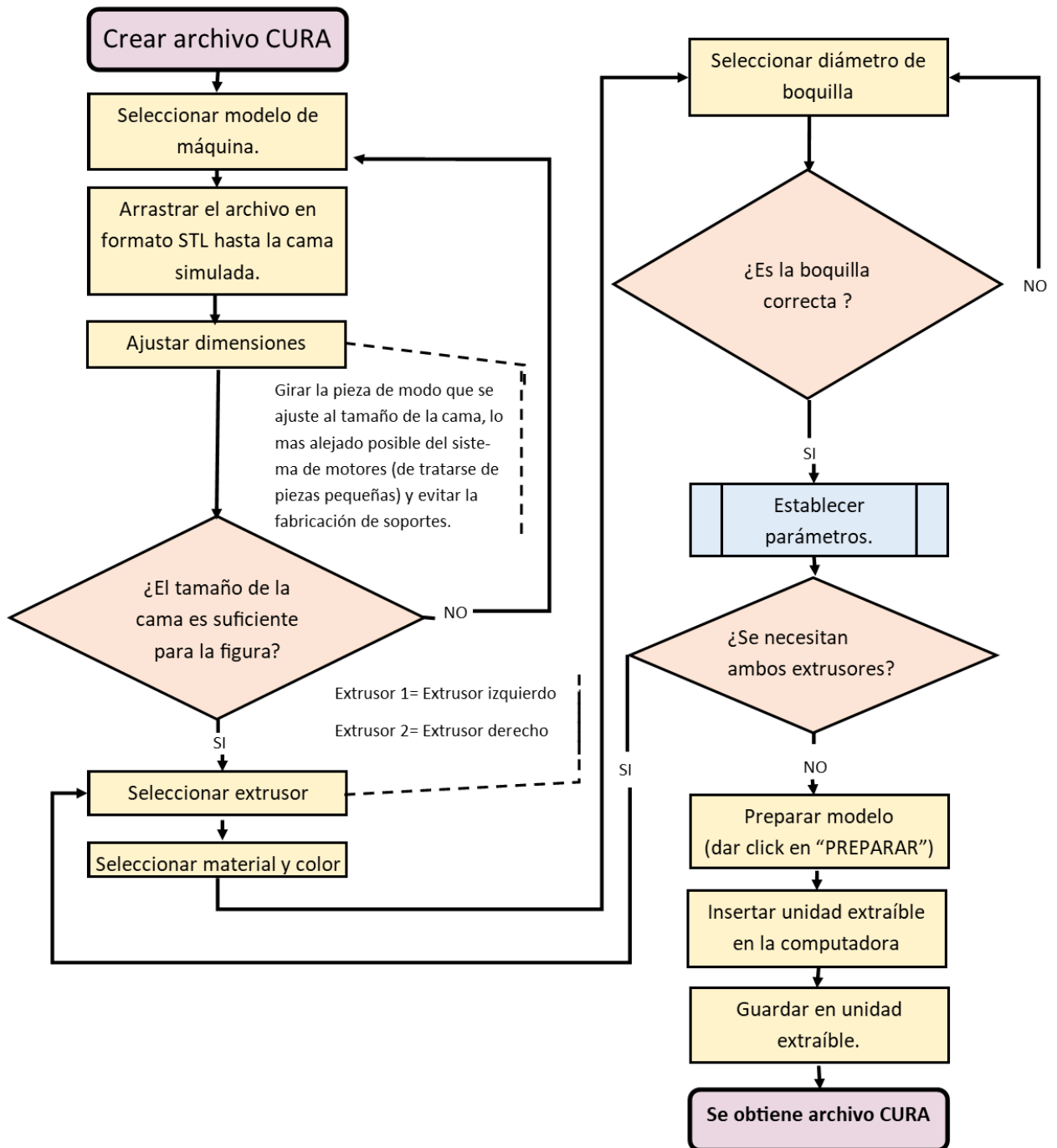


Figura 11. Metodología para la creación del archivo "CURA". Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4 Materiales

Se utilizan diferentes materiales para la construcción y cada uno cuenta con características propias, sin embargo, todos deben contar con una característica física en común y se trata de su aspecto en forma de filamento que les proporciona el proveedor para poder ser introducido a la máquina. A los materiales utilizados en el proceso se les llama filamentos por su forma de hilo muy fino, los filamentos se adquieren con diámetros específicos, esto dependerá del diámetro que tengan los elementos que se encargaran de la extrusión. El comportamiento ya dependerá de la naturaleza de cada material, algo tan simple como la porosidad en los filamentos (FilaFlex/TPU) o filamentos muy lisos (PLA, Nylon, PET-G, PVA, HIPS, ABS). Un filamento poroso ayudará a que los engranes del extrusor lo desplacen con mayor facilidad y lo hagan llegar hasta el extrusor, sin embargo, un material liso tiene mayor probabilidad de tener desgaste.

4.1. Características de los materiales

Cada uno de los materiales utilizados en equipos de manufactura aditiva por extrusión cuentan con características diferentes, conocer su comportamiento permite hacer una buena elección del material y evita problemas durante el proceso.

4.1.1. Ácido Poliláctico (PLA)

Formula: $(C_3H_4O_2)_n$

Estructura química:

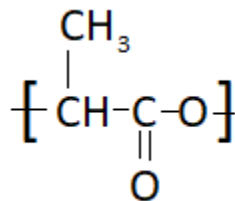


Figura 12. Estructura PLA Fuente: [5].

Es un poliéster alifático termoplástico derivado de recursos renovables, de productos tales como almidón de maíz (en los Estados Unidos), tapioca (raíces o almidón, principalmente en Asia) o caña de azúcar (en el resto de mundo). Se

pueden biodegradar bajo ciertas condiciones, como la presencia de oxígeno, aunque es difícil de reciclar [6].

Al ser un polímero termoplástico, significa que se vuelve maleable al aplicar calor sin modificar su estructura química, por lo que es posible extruirlo, lo que implica un proceso poco complicado. Los objetos construidos con este material cuentan con resistencia, flexibilidad y durabilidad. No se deforma al enfriarse. El filamento se expande fácilmente y fundido se vuelve pegajoso. Es poco sensible a los cambios de temperatura, no afecta la temperatura de la cama. La pieza construida se puede cortar, pintar y pegar. El filamento está disponible en diferentes colores. Su exposición al agua lo degrada con el tiempo. Es higroscópico, es decir, tiene la capacidad de absorber humedad del medio en que se encuentra.

4.1.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Formula: $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$

Estructura química:

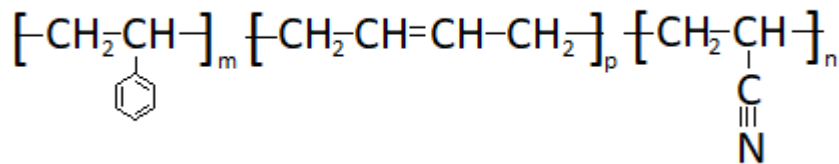


Figura 13. Estructura ABS Fuente: [7].

ABS, son las siglas con que se conoce a una familia de termoplásticos. Se le llama plástico de ingeniería debido a que su elaboración y procesamiento son más complejos que los plásticos comunes, como las poliolefinas (polietileno, polipropileno). Las siglas indican los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se le denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques). El bloque de acrilonitrilo proporciona rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura, así como dureza. El bloque de butadieno, que es un elastómero, proporciona tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente

interesante para aplicaciones en ambientes fríos, en los cuales otros plásticos se vuelven quebradizos. El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez. Es conveniente aplicar este material sólo en casos que se necesite de una rigidez excepcional del objeto fabricado, ya que es un material no biodegradable y su uso desmesurado representa graves riesgos para el medio ambiente [6].

Los objetos construidos cuentan con resistencia, flexibilidad y durabilidad elevada. Fluye bastante bien por la boquilla. Sensible a los cambios bruscos de temperatura durante el proceso, si se enfría muy rápido se pueden producir grietas y deformarse, por lo que también afecta la temperatura de la cama, así notamos que el proceso resulta complicado. Dureza, alta resistencia a los golpes y al desgaste. Alta resistencia al calor, material ideal para objetos que estarán expuestos a radiación solar. La pieza fabricada se puede cortar, lijar, pintar y pegar. El filamento está disponible en diferentes colores. Es higroscópico.

4.1.3. Poliestireno de alto impacto (HIPS)

Formula: $(C_8H_8 \cdot C_4H_6)_n$

Estructura química:

El poliestireno de alto impacto surge a partir de polimerizar los dobles enlaces del polibutadieno con el monómero estireno, creando un copolímero (ver Figura 14).

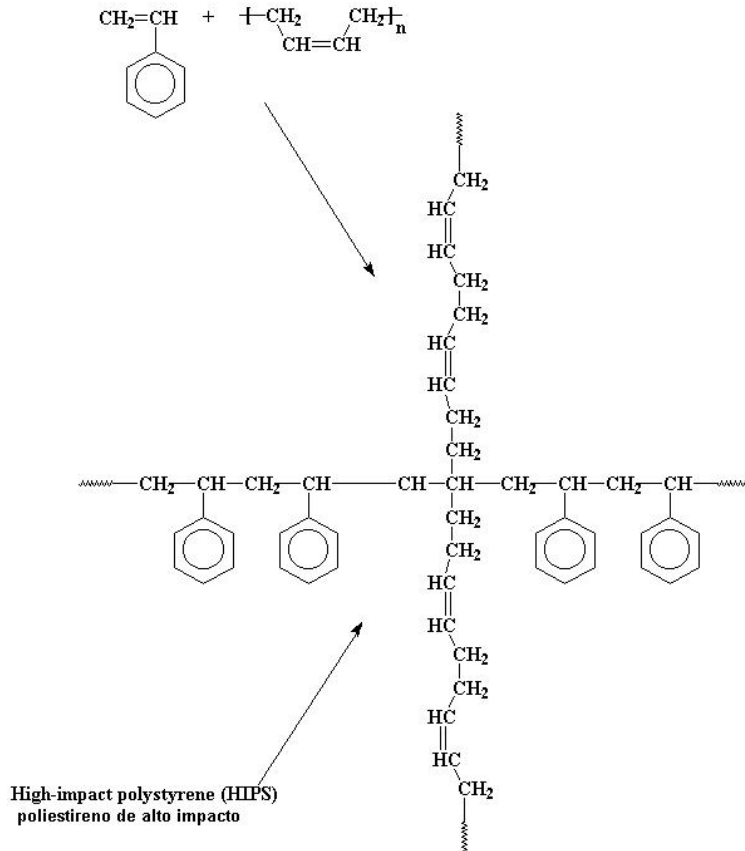


Figura 14. Estructura HIPS Fuente: [8].

Se usa como material de soporte en voladizos para crear piezas complejas. Se obtienen buenos resultados soportando ABS, por las altas temperaturas de fabricación que ambos necesitan, si se intenta utilizar PVA como soporte de ABS, el PVA tendera a degradarse por su baja temperatura de fabricación. Es fácil de extruir. Tiene alta estabilidad térmica. Los objetos formados con este material cuentan con alta resistencia al impacto, flexibilidad y durabilidad. Se disuelve en D-Limoneno en un plazo de 12 a 24 horas al ser sumergido sin necesidad de actividad mecánica, esto lo ha convertido en un material de soporte. El filamento está disponible en diferentes colores. Es altamente higroscópico.

Se trata de un material de poliestireno que usualmente se utiliza en combinación con el material ABS para la realización de piezas con espacios (huecos), se usa el HIP como material de apoyo, ya que posteriormente se eliminará con D-Limoneno, con el cual es soluble [9].

4.1.4. Nylon

Formula: $(\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{CO})_n$

Estructura química:

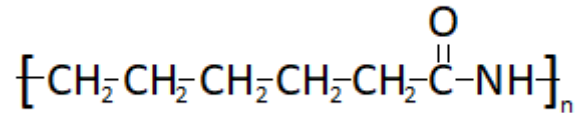


Figura 15. Estructura HIPS Fuente: [10].

Es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas. Por naturaleza cuenta con alta resistencia al impacto, flexibilidad y resistencia al desgaste. Una vez fundido fluye bastante bien por la boquilla. El filamento está disponible en diferentes colores, aunque comúnmente se usa como purga.

Material muy pegajoso que absorbe mucha humedad, por lo que previamente debe ser secado en un horno, además tiende a encogerse y no se adhiere firmemente a otros materiales como el aluminio y el cristal. Sin embargo, es un material que presenta buen acabado, de muy poca viscosidad y muy resistente a temperaturas altas [9].

4.1.5. Filaflex/TPU

Formula: $(\text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_2)_{10}\text{C}_2\text{O}_4)_n$

Estructura química:

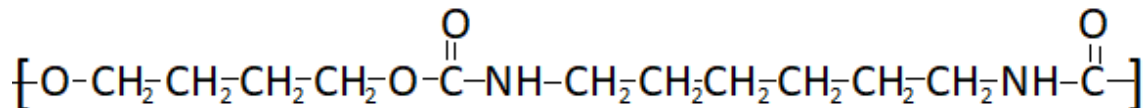


Figura 16. Estructura TPU (poliuretano termoplástico) Fuente: [10]

Es un elastómero y copolímero. No es fácil de extruir. Cuenta con resistencia, alta flexibilidad y durabilidad. El filamento está disponible en diferentes colores.

4.1.6. Acetato de polivinilo (PVA)

Formula: $(C_4H_6O_2)_n$

Estructura química:

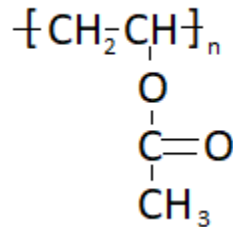


Figura 17. Estructura PVA Fuente: [10].

Se usa como material de soporte para piezas con soportes complejos o inaccesibles. Se recomienda utilizarlo en piezas fabricadas en PLA. Se retira disolviendo la pieza en agua por al menos 24 horas, sin necesidad de actividad mecánica. Es fácil de extruir.

Es un plástico biodegradable que se utiliza en cabezales de máquinas de múltiples cabezas, su desventaja está en la absorción de agua y humedad [9].

4.1.7 Tereftalato de glicol de polietileno (PET-G)

Formula: $(C_{14}H_{20}O_5S)_n$

Estructura química:

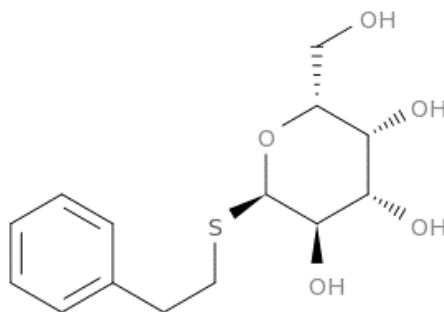


Figura 18. Estructura PET-G Fuente: [11].

Es un termoplástico fácil de extruir. Es muy resistente casi como el ABS, por lo que es utilizado para piezas que van a sufrir estrés mecánico. Soporta altas

temperaturas, resistencia a químicos y disolventes. Resiste la exposición a rayo UV. Tiene poca tendencia a deformarse cuando se enfría durante la fabricación. Biodegradable. Poco higroscópico. Resistencia al contacto con ácidos.

Todos los materiales utilizados durante la fabricación no se reciclan, si se ha fabricado mal alguna pieza esta solo se desecha y se repite el procedimiento.

4.2. Clasificación

Uso en extrusión	Geometría: material modelo Estos filamentos forman la figura objetivo.	PLA
		ABS
		FilaFlex/TPU
		PET-G
Soporte Se coloca en las areas de soporte de la figura.		PLA
		ABS
		FilaFlex/TPU
		PET-G
		HIPS
Purga Al inicio del proceso para eliminar residuos de filamento en la boquilla.		PVA
		NYLON

4.3. Parámetros de operación recomendados por el proveedor

Cada uno de los materiales cuenta con propiedades físicas, mecánicas y químicas propias que hacen que tenga un comportamiento único, la formulación del material varia de proveedor a proveedor y es conveniente conocer las características de los materiales antes de iniciar el proceso.

Conocer las condiciones de operación recomendadas y propiedades de cada material, ayuda a su tratamiento y transformación; estas cambian según el fabricante (ver tabla 3).

Tabla 3. Condiciones técnicas recomendadas por cada proveedor. Elaboración propia. Fuentes: [2], [13].

	Nylon	PLA	ABS	HIPS	FilaFlex/TPU	PVA	PET-G
Proveedor	BCN3D	BCN3D	BCN3D	Innofil3D	BCN3D	BCN3D	BCN3D
Diámetro de filamento(mm)	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85
Densidad relativa (g/cm³)	1.12-1.14	1.1-1.3	1.05	1.04	0.96-1.05	1.19-1.31	1.27
Temperatura de fabricación (°C)	240-260	190-220	240-260	240-270	195-215	190-210	245-260
Temperatura de fusión (°C)	190-200	115±35	190-240	-	220-240	150-230	-
Temperatura de transición vítrea (°C) ISO 11357	-	57	-	97	-	-	-
Temperatura de cama (°C)	65	65	90	90-110	>18	25-60	70-85
Temperatura de autoignición (°C)	-	388	-	-	-	520	454
Temperatura de descomposición (°C)	300	>250	-	-	-	≥200	>250
Velocidad de fabricación(mm/s)	30-60	10-70	20-60	40-80	25-60	30-45	40-55
Velocidad de retracción(mm/s)	40	40	40	-	-	40	-
Distancia de retracción(mm)	4	4	4	-	-	4	-
Temperatura de deflexión térmica(°C)	110	65	99	-	100	-	70
Altura mínima de la capa(mm)	0.2	0.05	0.1	-	-	0.05	0.2
Ventilador	NO	SI	NO	50%	-	SI	SI

4.4 Criterios de elección de filamento

Cada material utilizado en el proceso de extrusión cuenta con características diferentes que obligan a utilizarlos de acuerdo al tipo de vida que van a llevar, si lo que se quiere es obtener resultados eficientes. Ya se han clasificado por su uso durante el proceso, pero para poder elegir un material específico es necesario conocer las características y el fin para el cual se fabricará la pieza.

Es ideal utilizar ABS para piezas que necesitan dureza, alta resistencia a los golpes, que estarán expuestas al desgaste, al calor o a la radiación, es difícil que bajo estas condiciones el material se rompa.

Las piezas fabricadas con PLA cuentan con resistencia, flexibilidad y durabilidad, sin embargo, tienden a romperse al aplicar grandes y constantes esfuerzos. Este material, por el contrario, no soporta temperaturas elevadas después de ser construido, tiende a fundirse.

El PET-G reúne características del ABS y el PLA, tiene alta resistencia al estrés, a los golpes, a la radiación, es biodegradable y fácil de manipular en el proceso como el PLA, su uso recae en el alto costo del filamento.

El FilaFlex cuenta con características muy diferentes, cuenta con resistencia, durabilidad y tiene una flexibilidad muy alta que no puede compararse con el ABS y el PLA que son rígidos. Sin embargo, su flexibilidad no permite hacer grandes modificaciones a la pieza una vez que se fabricó como cortar, pintar y pegar como lo hacen el ABS y el PLA.

Es posible utilizar como soporte el mismo material con el que se está fabricando, es decir el soporte y la pieza serán del mismo material. Al final del proceso, solo se identifican los soportes y se retiran mecánicamente haciendo uso de herramientas. Debe considerarse que este trabajo se hace manual y es probable lastimar la pieza o que quede marcada en la posición del soporte, es importante durante el diseño tomar esto en cuenta y que los soportes se coloquen en las partes menos visibles de la pieza para cuidar su apariencia.

Si la intención es que el soporte no deje huella, es posible utilizar HIPS como soporte, su solubilidad en limoneno lo hace de gran utilidad para estos casos. Una vez que la pieza está completa se coloca en limoneno y sin movimientos mecánicos el HIPS se ira retirando de la pieza en un lapso de 12 a 24 horas. El HIPS tiene una gran compatibilidad con el ABS, por sus temperaturas de fabricación muy parecidas, de ahí que se utilice el HIPS como soporte en la mayoría de las piezas de ABS. Del mismo modo el PVA es compatible como soporte con el PLA y FilaFlex/TPU.

Finalmente, el Nylon es utilizado como purga, como se sabe el extrusor trabaja con la mayor temperatura y tiene contacto directo con el material fundido, al enfriarse y hacer cambio de material o color el extrusor queda contaminado por el material anterior o existe la posibilidad de que se atasque, esto impediría el paso del plástico y su salida en forma de hilo. Es por esto que es necesario pasar un poco de Nylon antes de comenzar una pieza, este material cuenta con altas temperaturas de proceso, entre 240 y 260 °C, que arrastra en lo posible los residuos de material que allá en el extrusor.

Aunado a todo lo anterior existen criterios de compatibilidad creados por los proveedores que se usan al depositar dos materiales diferentes en una misma pieza (ver Figura 19).

BCN3D Filaments	PLA	NYLON	PET-G	ABS	TPU	PVA	COMPOSITES
PLA	👍	👎	👎	👎	👎	👍	👍
NYLON		👎	👎	👎	👎	👍	👎
PET-G			👎	👎	👎	👍	👎
ABS				👍	👎	👎	👎
TPU					👍	👍	👎
PVA						👎	👍
COMPOSITES							👍

👍 Compatible

👎 Not compatible

👎 Experimental

Figura 19. Matriz de compatibilidad de las combinaciones de materiales de soporte cuando se fabrica una pieza con extrusión doble en las máquinas 3D BCN3D Sigma y Sigmax cuando se utilizan filamentos BCN3D. Fuente: [2]

Hay observaciones a la matriz de compatibilidad con respecto al símbolo “experimental”, esto es porque el resultado de la extrusión doble de los materiales con este símbolo se basa en la experiencia con posibles perfeccionamientos y aplicaciones. De acuerdo a lo experimentado, ignorando la obvia compatibilidad NYLON-NYLON y PET-G-PET-G, se ha observado que la combinación PLA-TPU resulta compatible, sin embargo, la extrusión ABS-PVA no ha dado buenos resultados, por las altas temperaturas con las que se debe mantener el ambiente de fabricación del ABS, al realizar el cambio de extrusor y comenzar a depositar el PVA este se degrada, volviéndose blanquizco y frágil.

Por otro lado, acerca de los materiales “*composites*” no se tiene ningún resultado experimental en el presente informe con el que se pueda sustentar su compatibilidad, pero existe una recolección de información de diferentes materiales que puede servir de referencia (ver Anexo 2).

Capítulo 5 Parámetros de construcción

Para conocer a fondo el proceso de extrusión de material es necesario saber los parámetros entorno a los que gira el proceso, las unidades de medida y como repercuten en la calidad de la pieza.

5.1. Parámetros de operación

Los parámetros de operación permiten mejorar la calidad, la eficiencia y el costo de las piezas, hacen referencia en general a las condiciones físicas y mecánicas con las que se obtendrá una línea de material fundido, finalmente la pieza se construye de un número muy grande de líneas con características similares. A continuación, se describen los parámetros de operación de las tecnologías empleadas [12]:

Altura de la capa (mm): Es la altura que tendrá la línea de material que sale por la boquilla (ver Figura 20). El valor es importante para la calidad de las líneas, valores altos producen piezas con líneas poco definidas, una altura de capa de 0,2mm; con valores más bajos las líneas se expanden mejor en la cama y quedan mejor definidas, un valor de 0,1mm (ver Figura. 21). Si este valor no es elegido correctamente, afecta la expansión de las líneas, el grosor y adherencia de las capas.

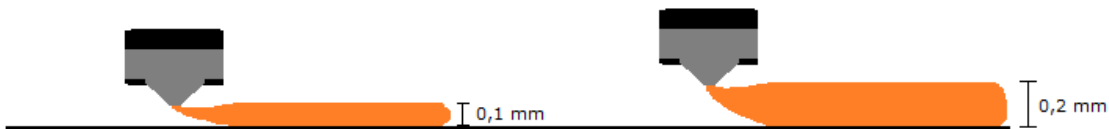


Figura 20. Altura de capa. Fuente: Elaboración propia.

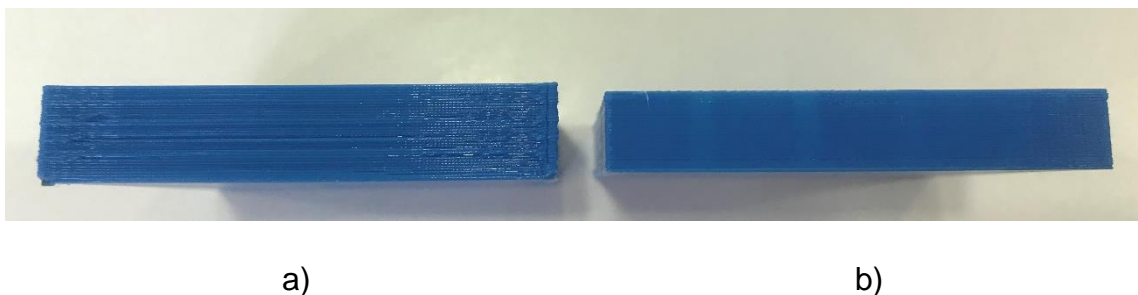


Figura 21. Altura de capa. a) 0.3 mm, b) 0.2 mm.

Por otro lado, si disminuye la altura de la capa disminuye la cantidad de material, que a la vez aumentará el número de capas para llegar a las medidas que se requieren, y con esto la eficiencia por el aumento en el tiempo que tardará en fabricarse una pieza. Así que, si la altura de capa sólo afecta el aspecto de la pieza y esta es de tipo funcional, es conveniente usar un valor alto.

Habilitar la retracción: Habilitar esta opción permite que los engranes retraigan el filamento un momento cuando la boquilla se está moviendo sobre un área donde el diseño no necesita material, esto evita que el material se deposite en el aire o sobre un lugar no deseado.

Velocidad de retracción (mm/s): Es la velocidad con la que se retrae el filamento, una velocidad de retracción alta funciona mejor porque evita el derrame de material. Pero una velocidad de retracción muy alta puede conducir a la molienda de los filamentos, atascar los engranes con el material molido, hacer el filamento más delgado y no dejar que después de la retracción siga avanzando por el extrusor.

Distancia de retracción (mm): Es la distancia que se retrae el filamento, va ligado a la velocidad de retracción.

Diámetro de filamento (mm): Hace referencia al diámetro del filamento con el que se fabricará la figura.

Temperatura de fabricación (°C): Temperatura utilizada por el bloque calentador para fundir el filamento. Esta temperatura se establece de acuerdo a la temperatura recomendada por el proveedor del material que se utilice.

Temperatura de la cama (°C): temperatura utilizada para la cama. Este valor depende del material que se utilizara, se coloca de acuerdo a los parámetros recomendados por el proveedor. Esto afecta directamente la capa inicial y su adherencia.

Grosor de la pared (mm): Aquí es posible definir el grosor de pared en milímetros que deberá tener la pieza, mayor grosor también puede dar resistencia a algunas piezas (ver Figura 22).

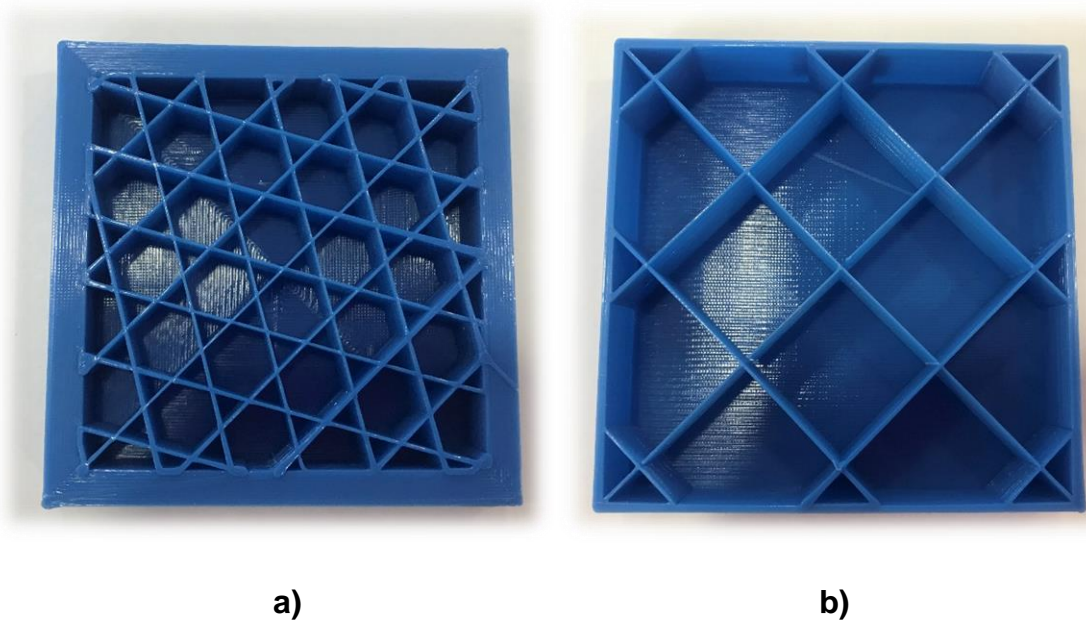


Figura 22. Características de un cubo. a) Grosor de pared= 4mm y relleno trihexagonal del 15%. b) Grosor de pared= 1mm y relleno de rejilla del 5%.

Densidad de relleno (%): Este valor controla la cantidad de material que la figura tendrá en el interior. Si el objetivo es obtener una figura sólida por completo, la densidad de relleno corresponde al 100%. Un valor recomendado es usar 20%, este valor es suficiente si no se pretende aplicar fuerza sobre la superficie. Esta configuración no afectará aspectos visuales, sin embargo, afecta la resistencia de la pieza (ver Figura 23).

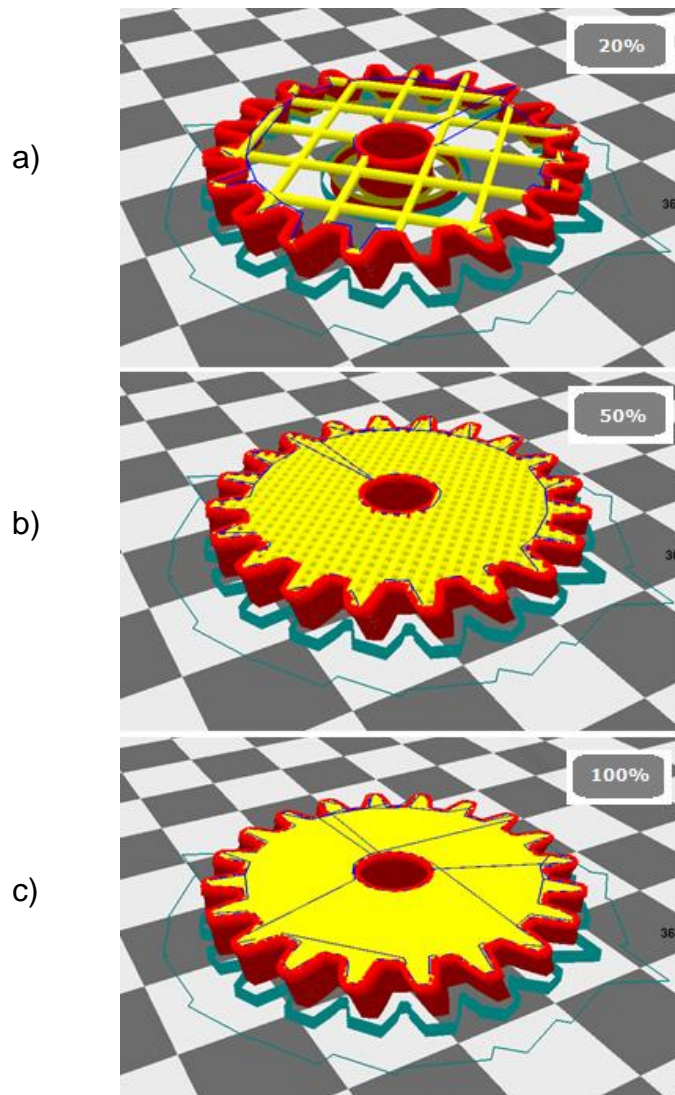


Figura 23. Diseño de un engranaje, simulación de la variación del interior de la pieza de acuerdo al porcentaje de densidad de relleno. a) 20%, b) 50%, c) 100%. Fuente: CURA BCN3D versión 0.1.5.

Este valor tiene impacto en la eficiencia del proceso, un relleno del 100% necesitará más tiempo para terminar de formar la pieza, por la cantidad de material que se necesita depositar en el interior y por lo tanto la pieza tendrá un peso mayor. La variación del tiempo y del peso con respecto a la densidad de relleno va de forma creciente, es decir a mayor % de densidad de relleno, mayor peso de la pieza y mayor tiempo de fabricación (ver Figura 24). Si hay un cambio de porcentaje de relleno en una pieza con contorno amorfo, existe una tendencia no lineal respecto al número de horas y al peso de la pieza. Al tratarse de un contorno amorfo la

localización de las líneas de relleno en la figura cambia en cada porcentaje y de este modo no cambiará proporcionalmente de una pieza a otra la cantidad de material que se depositará dentro de la figura.

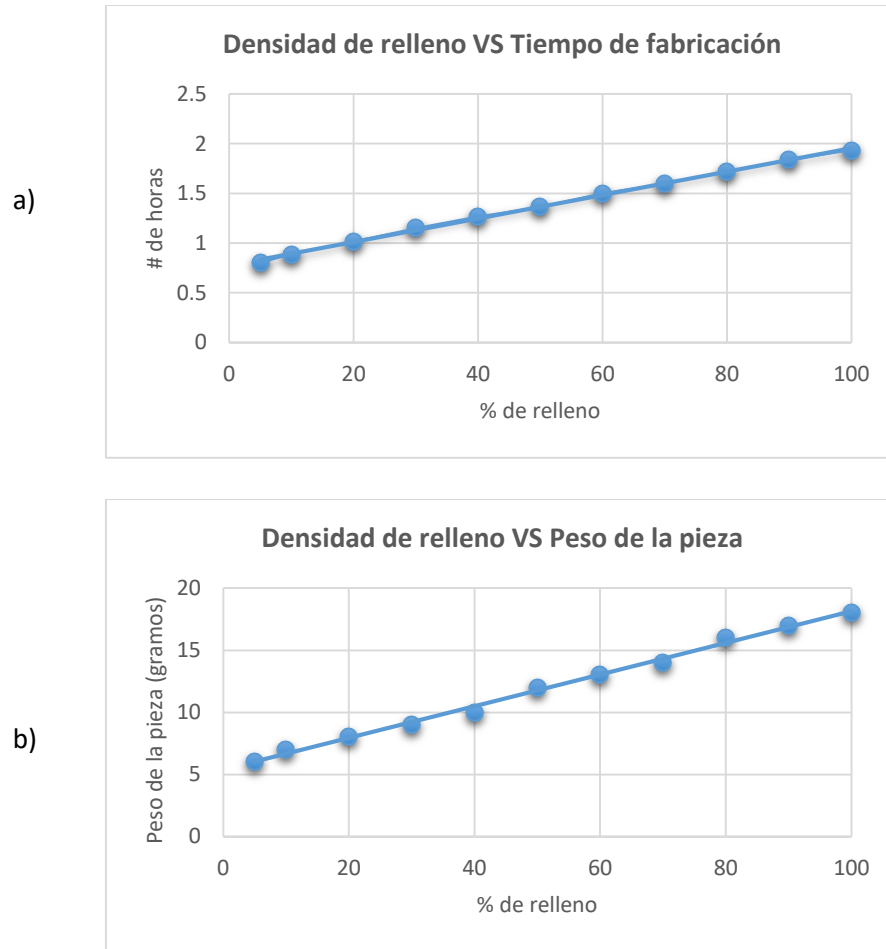


Figura 24. Representaciones gráficas de: a) aumento de la densidad de relleno vs tiempo de fabricación b) aumento de la densidad de relleno vs el peso de la pieza de la Figura 9. Diseño de un engranaje. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de CURA BCN 3D versión 0.1.5.

Patrón de relleno: Se trata del diseño del relleno que tendrá la figura en su interior, existen diferentes formas como relleno, elegir una de las opciones puede resultar una pieza maciza o frágil (ver Figura 25). El patrón de relleno también influye en el tiempo de fabricación.

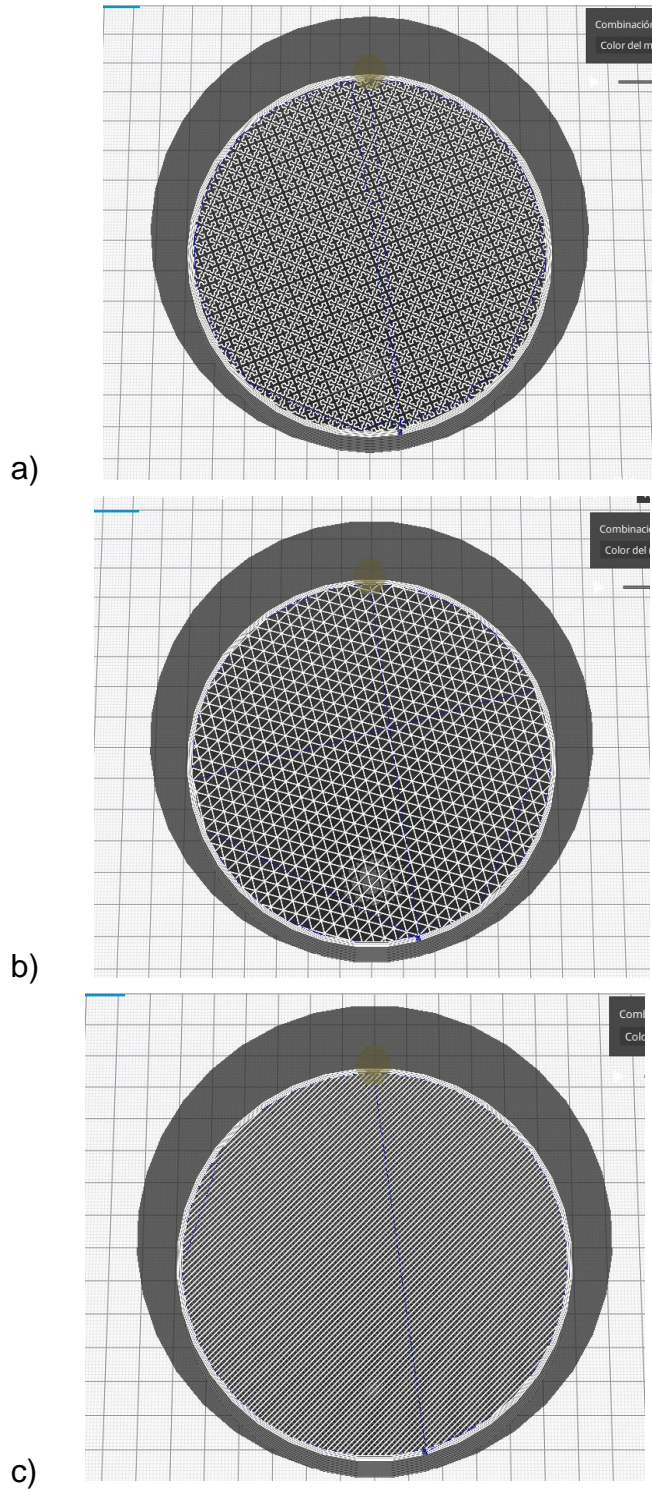


Figura 25. Cilindro. Diferentes patrones de relleno y el tiempo de fabricación. a) Cruz, 2 días 18 horas 24 minutos, b) triángulos, 1 día 12 horas 16 minutos, c) líneas, 1 día 12 horas 3 minutos. Fuente: CURA BCN3D versión 2.1.5.

Patrón del soporte: Al igual que el patrón de relleno, se trata del diseño del soporte que tendrán los voladizos, existen diferentes formas como soporte, elegir una de las opciones puede resultar un soporte macizo o uno fácil de extraer. Esta configuración permite generar estructuras para soportar piezas que tengan voladizos, sin estas estructuras el material se escurriría durante la construcción. Usualmente el material escurre con ángulos de inclinación menores a 40° , si son ángulos mayores posiblemente no sea necesario, esto dependerá de cada caso en particular (ver Figura 26).

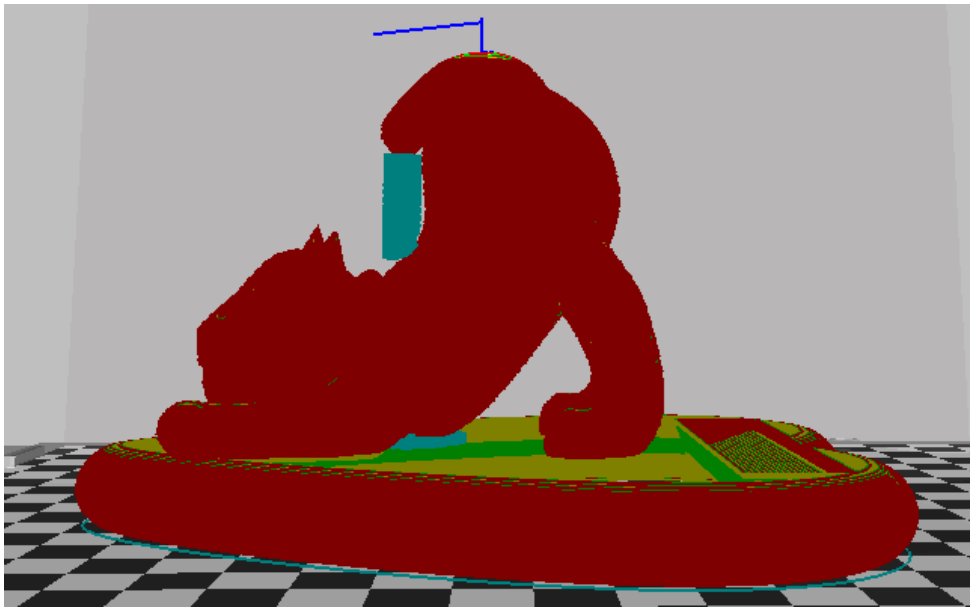


Figura 26. Diseño de un gato. Donde únicamente los ángulos menores a 40° presentaran soporte, el soporte se visualiza en la simulación en color azul. Fuente: CURA BCN3D versión 0.1.5.

Patrón superior/inferior: es el patrón que se reflejara en las paredes superior e inferior, existen 3 diseños diferentes: zigzag, líneas y concéntrico. Zigzag- es la mejor opción por tener buen aspecto y resistencia. Líneas- es similar al diseño en zigzag, sin embargo, la forma en que se depositan las líneas cambia, de este modo no es resistente y se desprenden las líneas fácilmente. Concéntrico- da mal aspecto al no ser simétrico (ver Figura 27).

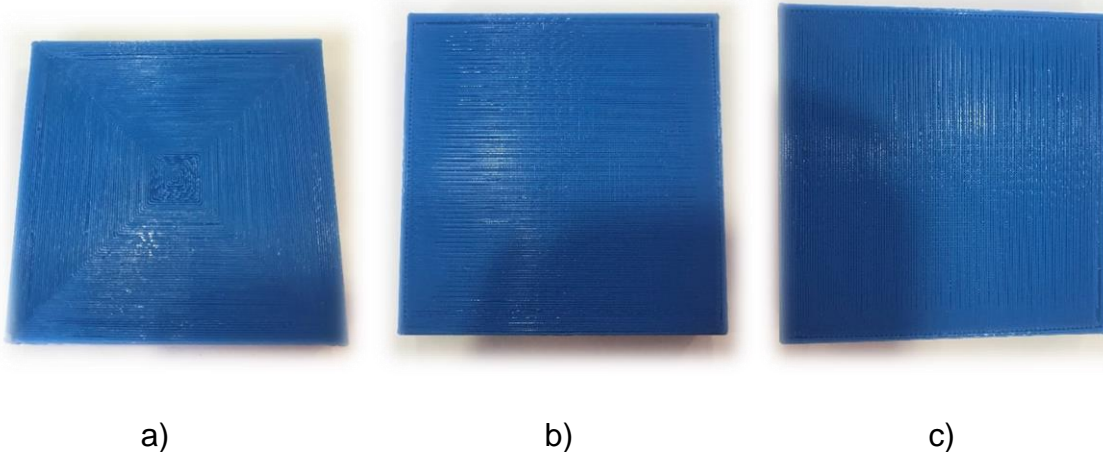


Figura 27. Patrón inferior de un cubo. a) Concéntrico, b) líneas, c) zigzag.

Flujo (%): Es el porcentaje de material que fluye por la boquilla con respecto al material extruido. A mayor flujo menor tiempo de fabricación.

Tamaño de la boquilla (mm): El tamaño de la boquilla es utilizada por el software para calcular el ancho de línea del relleno, la cantidad de líneas y el grosor de las paredes.

Grosor de la capa inicial (mm): Es posible modificar el grosor de la capa inferior (primera capa). Una capa inferior más gruesa hace que se pegue mejor a la cama. Si se establece cero el grosor de la capa inferior será el mismo que las otras capas.

Altura de la capa inicial (mm): Aquí se modifica el ancho de la línea al inicio para la extrusión en la primera capa, en algunas piezas es bueno tener líneas más amplias en la primera capa para obtener una mejor adherencia en la cama.

Velocidad de fabricación (mm/s): Es la velocidad promedio a la que ocurre el proceso, de esta velocidad dependen las velocidades específicas, o viceversa, una máquina BCN3D puede alcanzar velocidades de 100 mm/s, pero para figuras que requieren un buen acabado es necesario un proceso lento, así cada capa será depositada con delicadeza.

Una velocidad alta: Puede llegar a fallar en algunos pasos durante el proceso, los detalles en la pieza pueden perder definición, además puede provocar hilos de material alrededor de la pieza.

Una velocidad baja: Detalles muy finos que tenga la pieza quedan mejor definidos, aunque el tiempo de fabricación incrementara y se vuelve un proceso poco eficiente (ver Figura 28).

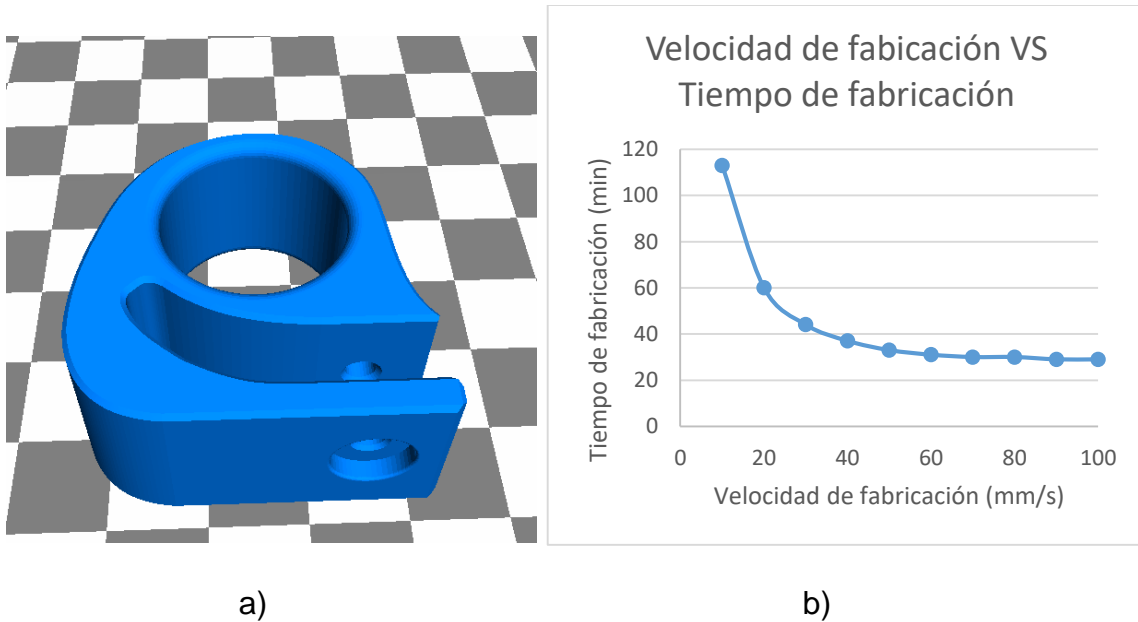


Figura 28. Diseño de un gancho. a) Simulación b) tiempo de fabricación en función de la velocidad de fabricación. Fuente: CURA BCN3D versión 0.1.5.

Velocidad de relleno (mm/s): Es la velocidad con la que se depositará el relleno. Una velocidad de relleno alta puede ayudar a reducir el tiempo de fabricación.

Velocidad de pared exterior (mm/s): Es la velocidad con la que se depositarán las líneas de la pared exterior, se recomienda que este valor sea más pequeño que la velocidad de relleno si se pretende tener un buen acabado en la superficie de la pieza.

Velocidad de pared interior (mm/s): Es la velocidad con la que se depositarán las líneas de la pared interior, se recomienda que sea mayor que la velocidad de pared exterior para que sea eficiente el tiempo total de fabricación, pero no mayor que la velocidad de relleno porque esto podría afectar el acabado de la pieza (ver Figura 29).

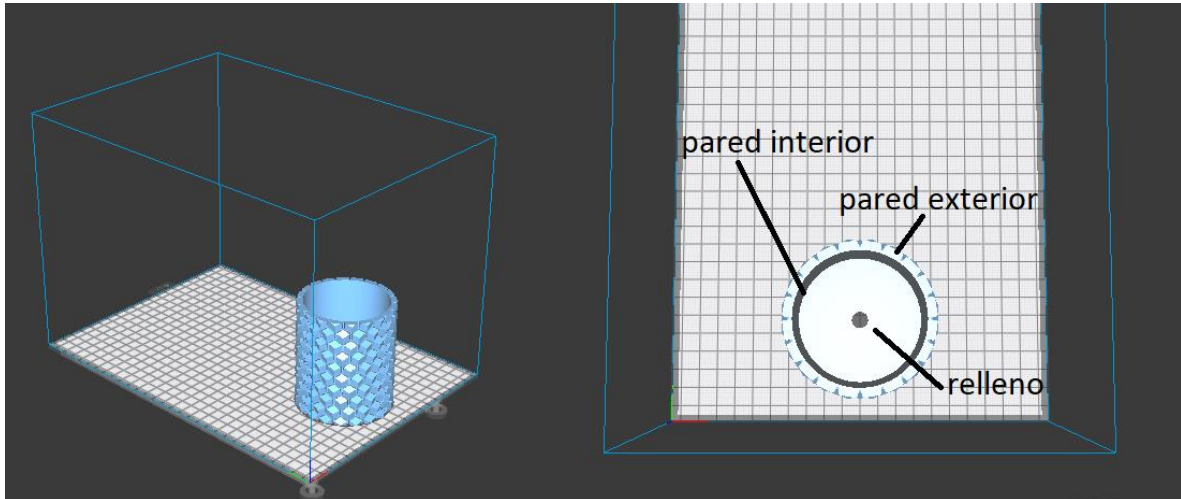


Figura 29. Diseño de un florero, pared interior, exterior y relleno si lo tuviera. Fuente: Elaboración propia, CURA BCN3D v 2.1.5.

Velocidad de la capa inferior (mm/s): Para la velocidad de fabricación de la capa inferior, es conveniente que se depositen las líneas de la primera capa más lento y así se adhieran mejor a la cama.

Velocidad de desplazamiento (mm/s): Es la velocidad a la que los extrusores se desplazan.

Activar refrigeración: esta opción permite activar el ventilador de capa, lo que hace es ir enfriando las capas formadas por las líneas de material fundido. Se recomienda no activarla para materiales como el ABS que puedan deformarse.

Modo de fabricación: Es la forma en que se fabricarán las piezas. Simple- se fabrican tal y como se colocaron en la cama con el extrusor seleccionado. Espejo- duplica la pieza generando un espejo en la cama y se fabrican ambas piezas al mismo tiempo con el mismo extrusor. Duplicación- genera la mitad de la cama idéntica a la segunda mitad y se fabrica cada una con su extrusor (ver Figura 30).

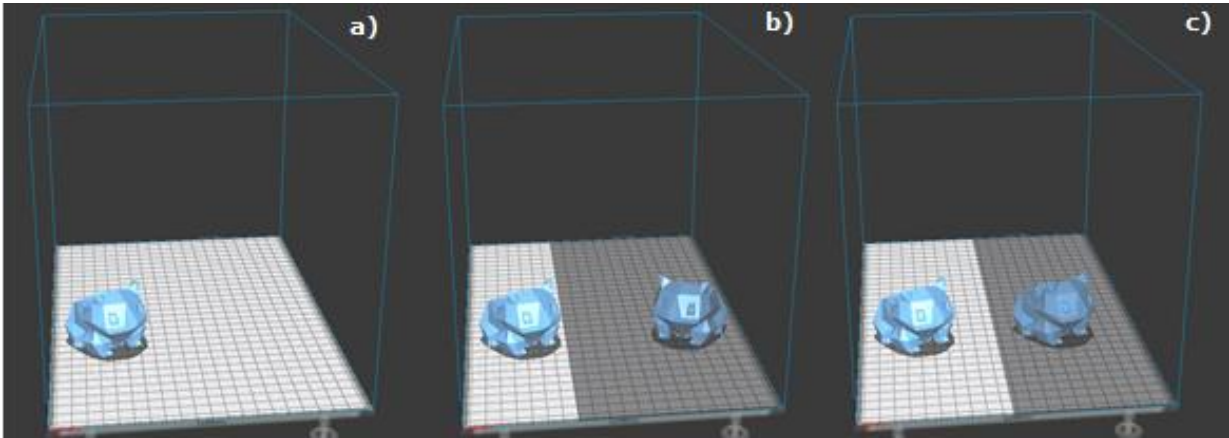


Figura 30. Modo de fabricación: a) simple; b) espejo; c) duplicación. Fuente: CURA BCN3D v 2.1.5.

Extrusión dual de soporte: Permite, si existen dos extrusores, elegir un extrusor en especial para el material de soporte. Es conveniente elegir un material más barato como soporte, los soportes al final del proceso se desprenden de la pieza ya fabricada y se desechan, o bien utilizar la segunda extrusora para materiales de soporte solubles y eliminar los soportes solubilizando el material. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que trabajar con dos extrusores causa interrupciones en el proceso al hacer cambio de extrusor.

Capítulo 6. Mejora del proceso

Con la experimentación surgen parámetros habituales con los que el proceso pocas veces falla, estos nacen a partir del método prueba y error, para cada material y tipo de pieza.

6.1. Pautas de iniciación

La mejora del proceso gira entorno a la calidad de la pieza objetivo, según será su uso, existen valores clave a partir de los cuales se puede poner en marcha una máquina 3D (ver tablas 4, 5 y 6).

Tabla 4. Temperaturas de inicio recomendadas para diferentes materiales. Fuente: Elaboración propia.

Material	T _{fabricación} (°C)	T _{camara} (°C)
PLA	215	65
ABS	260	95-105
PVA	240	65
PET-G	240	85
FilaFlex/TPU	240	65
HIPS	260	95-105

Tabla 5. Velocidades de inicio recomendadas para diferentes grupos de piezas Fuente: Elaboración propia.

Grupo de piezas	Velocidades (mm/s)			
	Fabricación	Pared exterior	Pared interior	Relleno
Técnicas	25-30	5 unidades menos que la velocidad de fabricación.	5 unidades más que la velocidad de fabricación.	5 unidades más que la velocidad de pared interior.
Médicas	30-50			
Juguetes	30			
Recipientes	30-50			
Embalajes	30-50			
Modelos arquitectónicos	10-25			

Tabla 6. Parámetros generales de inicio recomendados para diferentes grupos de piezas. Fuente: Elaboración propia.

Grupo de piezas	Altura de capa (mm)	Diámetro de boquilla (mm)*	Grosor Superior /Inferior (#de capas)	Patrón Superior /Inferior	Densidad de relleno (%)
Técnicas	0.15-0.2	0.5, 0.6, 0.8,1	4	zigzag, concéntrico	30-50
Médicas	0.1-0.2	0.3, 0.4,0.5	5	zigzag	80-100
Juguetes	0.2	0.3, 0.4,0.5	3-4	zigzag	10-20
Recipientes	0.2	0.3, 0.4,0.5, 0.6, 0.8,1	3-4	zigzag, concéntrico	10-20
Embalajes	0.2	0.3, 0.4,0.5, 0.6, 0.8,1	3-4	zigzag	10-20
Modelos arquitectónicos	0.2	0.3, 0.4	3	zigzag	10-20
*Esto aplica para PLA, ABS, PVA, HIPS y PET-G. Para utilizar FilaFlex/TPU, se recomienda el uso de diámetros de 0.8 y 1mm, si se trabaja con diámetros más pequeños, el material no fluye y es probable que el extrusor se atasque.					

6.2 Valoración y selección de parámetros

Piezas con un tiempo de fabricación corto, con buen acabado superficial, con resistencia y durabilidad para un tiempo de vida largo, asegurando la calidad de la pieza y reduciendo el desperdicio de filamento, condicionan el proceso. Con el fin de cumplir con estos requisitos, la persona encargada del proceso tiene que saber en qué medida influyen los distintos parámetros en la calidad de la pieza. La importancia de estos parámetros cambia de acuerdo a su aplicación, va ligado y lo determina el diseño de la pieza.

La siguiente tabla es el resultado de una evaluación crítica de diferentes casos individuales que pueden ocurrir, pretende aportar diferentes soluciones a la hora de

seleccionar y determinar los parámetros a modificar. Es importante no olvidar que existen otras características, pero los criterios aquí seleccionados corresponden únicamente a casos que se pueden controlar de forma inmediata, sin pruebas destructivas (ver Tabla 7).

Tabla 7. Porcentaje de exigencia de calidad, según la importancia en las distintas gamas de piezas. Fuente: Elaboración propia.

Exigencia	Buen acabado superficial	Precisión dimensional	Escasa contracción	Resistencia a esfuerzos
Piezas				
Técnicas (Engranajes, conexiones, bridas)	20%	100%	100%	80%
Médicas (prótesis, huesos, órganos)	60%	80%	60%	60%
Juguetes (personajes, figuras con movimiento)	100%	40%	20%	20%
Recipientes (contenedores)	40%	40%	20%	40%
Embalajes (carcasas, tapas)	60%	60%	60%	80%
Modelos arquitectónicos (construcciones, edificios)	100%	60%	20%	40%

La mayoría de los casos diferentes parámetros repercuten en un solo criterio de calidad, por lo que deben vigilarse todos a la vez. En la siguiente tabla se muestran todos los parámetros importantes, que cada exigencia involucra, de acuerdo a lo experimentado (ver Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de fabricación importantes y su relación con los criterios de calidad. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro del proceso	Altura de capa	Diámetro de boquilla	Temperatura de fabricación	Temperatura de cama	Retracción	Espesor de la pared	Relleno	Velocidad de fabricación	Modo de fabricación
Exigencia									
Buen acabado superficial									
Precisión dimensional									
Escasa contracción									
Resistencia a esfuerzos									

6.3. Reducción del tiempo de fabricación

Lo ideal sería comenzar el proceso con los parámetros iniciales recomendados y de acuerdo a los resultados hacer cambios. Aunque, si una vez que se establecen los parámetros iniciales de la pieza el tiempo que resulta no es satisfactorio, se puede pasar a cambios más estrictos. Los parámetros iniciales hacen que varíe en función de su valor. El objetivo es modificar los parámetros iniciales reduciendo el tiempo de fabricación intentando no afectar la pieza, sin embargo, no hay que descartar que con cada modificación se irá perdiendo, aunque escasamente, la calidad de la pieza.

En la Figura 31 se sugiere el orden de modificación de parámetros, para llegar al tiempo de fabricación más corto, que evita grandes desviaciones, entre menos modificaciones se hagan la calidad de la pieza poco se verá afectada. Una vez optimizado el tiempo, nuevamente se prepara el archivo y se pone en marcha.

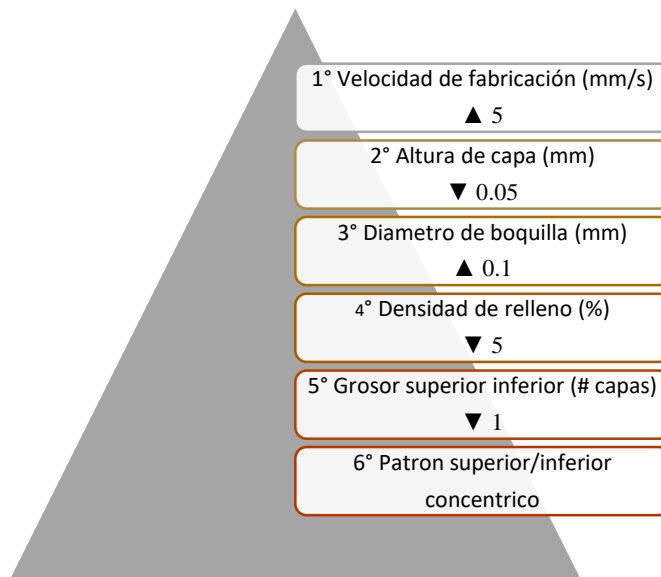


Figura 31. Secuencia de reducción del tiempo de fabricación (▲ aumentar parámetro, ▼ reducir parámetro). Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de fabricación gira en torno al diseño, piezas con diseños complicados, piezas que necesitan soporte, el tamaño de boquilla y los parámetros de operación. Pero muchas veces el material también juega un papel importante que puede afectar este tiempo, el tipo de material, el almacenamiento y contar con el filamento

suficiente para la pieza son fundamentales. Los materiales cuentan con características químicas diferentes, por lo que su comportamiento al fluir también cambia de un material a otro.

La extrusión de material es un proceso continuo, es por eso que una vez iniciado el proceso ya no se puede parar para colocar más filamento, si esto pasara el material ya depositado se enfría y la próxima capa no podría adherirse a la anterior de la misma forma que las primeras capas, el material debe de ser el suficiente desde la puesta en marcha. Una vez que hay una pieza fallida, esta se desecha, la cama se limpia y es necesario volver a iniciar el proceso.

6.4. Dirección y solución de fallos durante el proceso

Llegan a surgir problemas durante el proceso y lo ideal al hacer una mejora es modificar sólo un factor a la vez, de manera que se aprecie cómo repercute el cambio en la calidad de la pieza. Para poder hacer alguna modificación en el sistema es conveniente analizar todos los factores que pueden provocar ese problema. En seguida se esquematiza, en diagramas causa-efecto, el análisis de diferentes problemas que comúnmente surgen durante la construcción y las posibles causas para la toma de decisiones.

6.4.1 El material no se pega correctamente a la cama o las líneas no se pegan entre sí.

Cuando las líneas de material no se adhieren entre sí, se hace notar desde el inicio del proceso porque se observa una separación entre cada línea. Es un problema que debe solucionarse de inmediato, si se trabaja en estas condiciones la pieza tendera a ser frágil.

Se sabe que la primera capa no se adhiere a la cama cuando durante el depósito de material las líneas no se van manteniendo fijas a la cama, además en algún punto el movimiento del extrusor puede arrastrar lo que ya esté construido.

Esto pasa por diferentes situaciones (ver Figura 32), si la distancia que hay entre la cama y la boquilla durante el deposito del material es muy grande, el material se enfría antes de expandirse en la cama, y esto no solo provocar separación entre las

líneas, si no también poca o nula adherencia a la cama, además de que la línea no se podrá expandir y no se unirá a la siguiente línea, de la misma manera no lo podrá hacer con la siguiente cama; se debe a una mala calibración y muchas veces basta con ajustar la altura entre la cama y la boquilla.

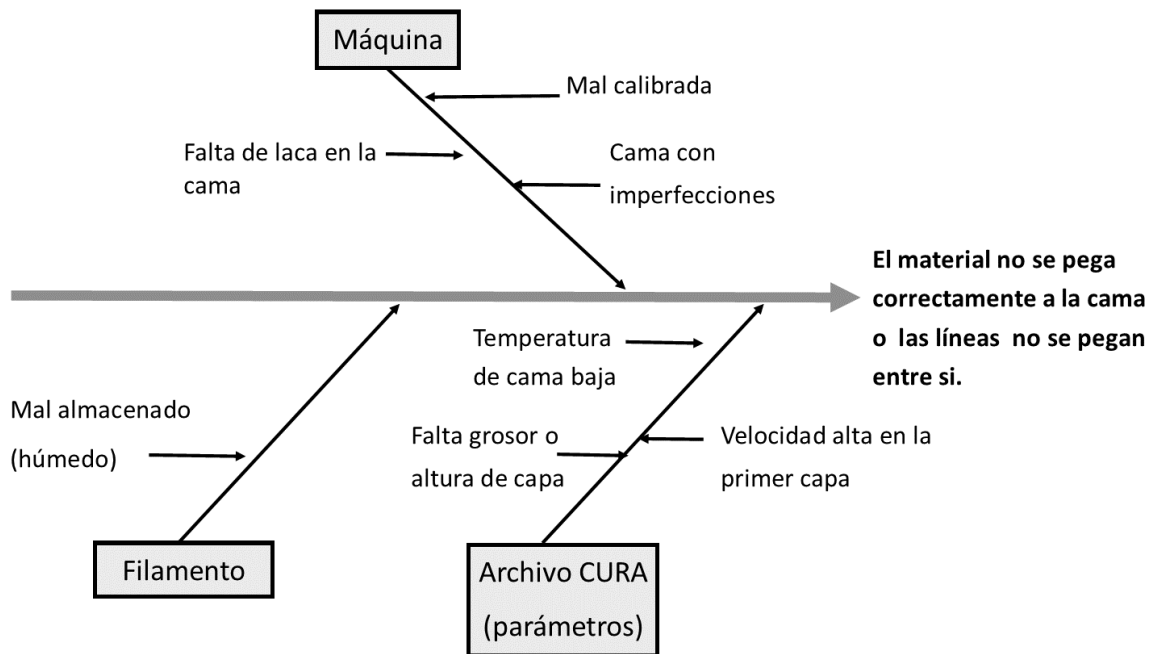


Figura 32. Diagrama causa-efecto “El material no se pega correctamente a la cama o las líneas no se pegan entre si”. Elaboración propia.

Sucede además si la cantidad de laca en la cama no es suficiente, incluso si la cama llegara a tener imperfecciones en su superficie, estos canales pueden afectar la adherencia del material.

Si la temperatura de cama es incorrecta se tiene problema con la adherencia, una temperatura más alta podría ayudar a la adherencia, solo si la temperatura no logra degradar el material. Sin embargo, una temperatura más baja lo enfría tan rápido que no permite la adherencia.

La velocidad con la que se construye la primera capa repercute en la adherencia, una velocidad alta no permite que la capa se sostenga a la cama, es posible indicar desde la parametrización únicamente la velocidad de la primera capa, el resto se

puede hacer a una velocidad considerable y de este modo no tener un proceso poco eficiente.

Una solución más a este problema es el aumento del grosor de la línea que se deposita, de este modo las líneas se tocan y podrán adherirse una con otra. Una solución similar es aumentando la altura de capa, esto aumenta el flujo de material, el material se expande en la cama y permite el contacto entre las líneas.

Finalmente trabajar con un material mal almacenado puede ser causa de este tipo de problemas y muchos más, pues el material pierde sus propiedades originales.

6.4.2 El equipo deja de extruir

La máquina ha dejado de extruir cuando durante el proceso el material deja de fluir por la boquilla, el extrusor continua con su desplazamiento, pero el material ya no es depositado (ver Figura 33).

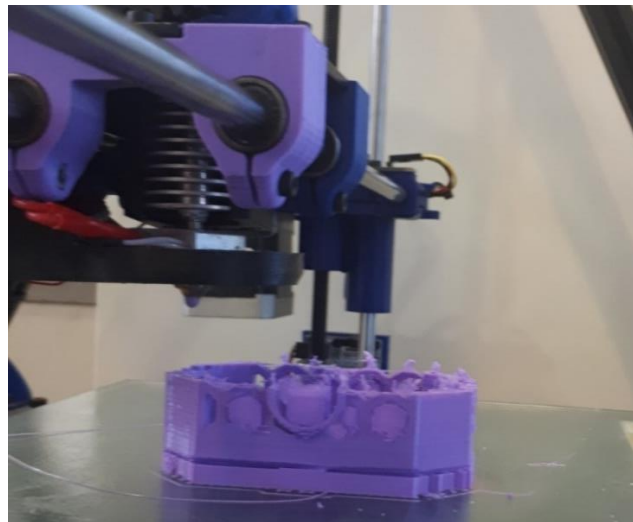


Figura 33. *Cabezal en movimiento sin extrusión. Pieza en PLA color morado. Máquina 3D+.*

Puede pasar por diferentes motivos (ver Figura 34), como la falta de alimentación del material, si el rollo de filamento ya se ha terminado o si el filamento ha sido mordido. También puede ser que el extrusor este dañado, no funcione correctamente y sea necesario cambiarlo.

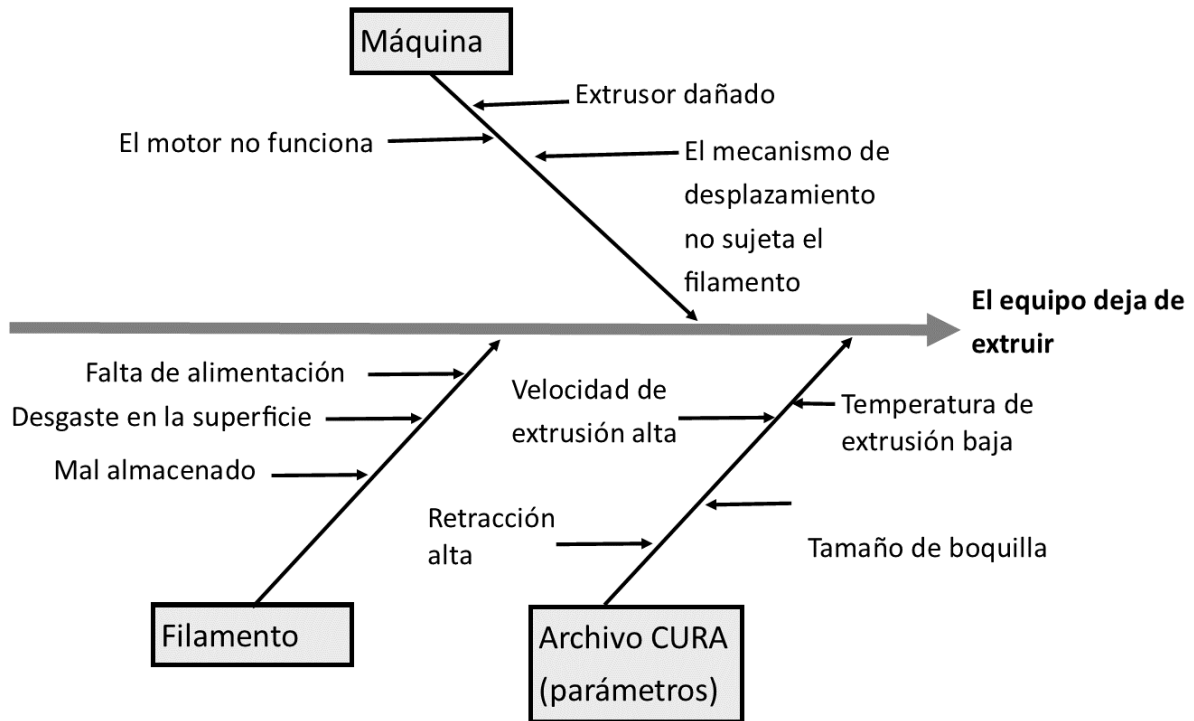


Figura 34. Diagrama causa-efecto “El equipo deja de extruir”. Fuente: Elaboración propia.

Es indispensable colocar la temperatura óptima de extrusión, tomando en cuenta los parámetros recomendados por el proveedor del material que se trabaja, no tener la temperatura óptima del filamento no extruye adecuadamente y el filamento se desgasta cuando los engranes intentan seguir desplazándolo; o incluso si el material no ha estado bien almacenado, la humedad puede provocar desgaste. Lo más común es que exista desgaste en la superficie de este, que no permita su movimiento dentro del extrusor, eliminando el flujo de material (ver Figura 35).



Figura 35. Filamento PLA en color morado con desgaste.

Por otro lado, es importante recordar que el filamento es desplazado por engranes, si el mecanismo de desplazamiento no sujeta bien el filamento no puede ser

alimentado. Puede pasar cuando hay problemas en el extrusor, si el sistema de rotación no gira con fluidez y no empuja correctamente el filamento a través del extrusor o si los tornillos que sujetan la entrada del filamento no están bien ajustados. Incluso puede haber problemas con el motor, si no ejerce la suficiente fuerza.

También, no configurar correctamente en el programa "CURA" el tamaño de la boquilla puede provocar desgaste, pues colocar un valor más pequeño que el real no permite fluir libremente el filamento.

Si la velocidad con la que se extruye es muy alta y el extrusor no tiene la suficiente capacidad de extrusión, se crea un problema con el flujo del material provocando desgaste en el filamento o si la velocidad de extrusión es muy alta, podría retraer tanto el material hasta llegar a tapan la boquilla y detener igualmente el flujo.

6.4.3 La pieza se deforma durante o después de su fabricación

Si la pieza tiene un diseño complejo, es necesario llevar a cabo el proceso a una velocidad baja y con esto evitar que piezas con partes o paredes muy delgadas se deformen (ver Figura 36).

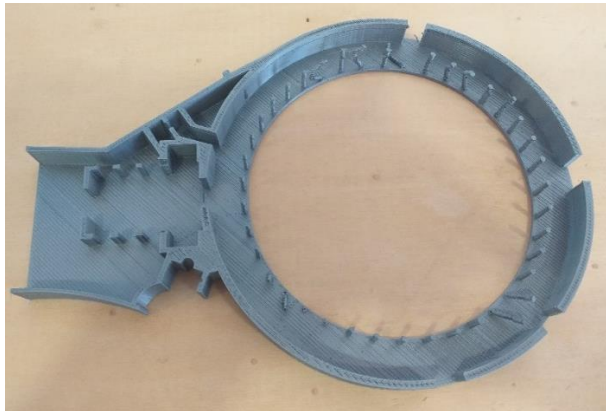


Figura 36. Pieza en PLA color plata con cilindros delgados.

Por otro lado, el ABS es un material higroscópico que tiende a deformarse si durante la construcción se ve expuesto a corrientes de aire, este defecto es conocido en extrusión como warping (ver Figura 37). Para trabajar con este material es necesario el control de la temperatura de cama, la temperatura de fabricación y la temperatura

ambiente, aislando con placas de acrílico el área de proceso, precalentando la cama, además de un buen almacenamiento del filamento.

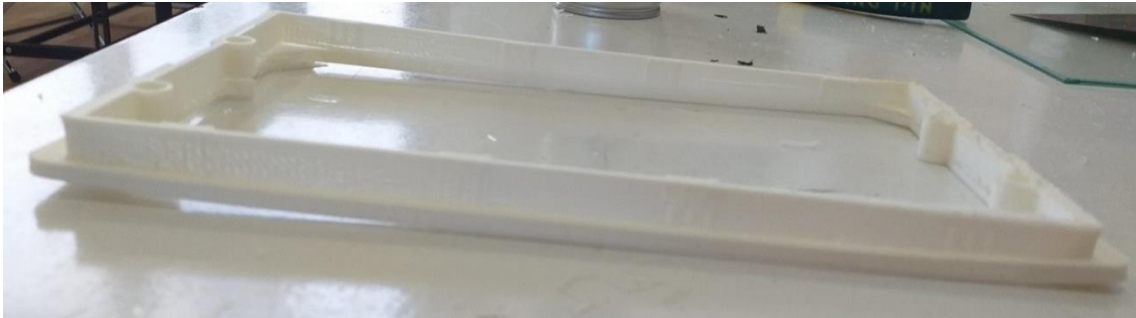


Figura 37. Warping. Pieza en ABC arqueada en uno de los extremos, fabricada con material mal almacenado y en una máquina no aislada.

Cuando se trata de piezas muy pequeñas es necesario colocar más de una pieza separadas en la cama o construirla a una velocidad de desplazamiento alta, si la pieza es pequeña y la boquilla caliente se mantiene por mucho tiempo en un mismo lugar o uno muy cercano, comienza a fundir las partes ya construidas y deforma la pieza (ver Figura 38).

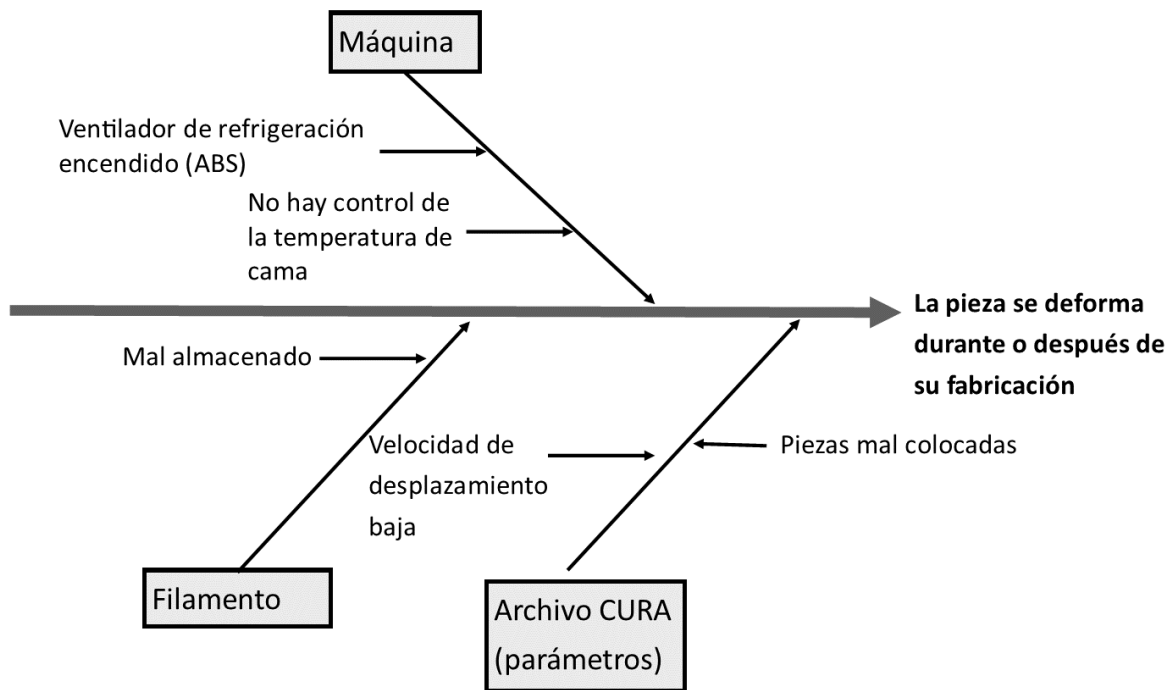


Figura 38. Diagrama causa-efecto “La pieza se deforma durante o después de su fabricación”.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.4 Aspecto o acabado superficial malo

Existen piezas que necesitan acabados especiales por tratarse de piezas estéticas, esto se puede lograr al personalizar los parámetros, colocar un patrón superior/inferior en zigzag es la mejor opción, una altura de capa y velocidades pequeñas es lo ideal.

Con las pautas de iniciación pueden surgir problemas y para solucionarlos será necesario modificar estos parámetros importantes, es conveniente saber que se irá perdiendo la calidad de la pieza. Antes de hacerlo, se analiza el proceso, a veces el problema puede venir del equipo, tener un extrusor que no deja fluir el material correctamente podría producir grietas, por otro lado, una cama mal calibrada hace notar la separación de capas o colocar soporte en las partes más visibles del diseño hace que pierda calidad (ver Figura 39).

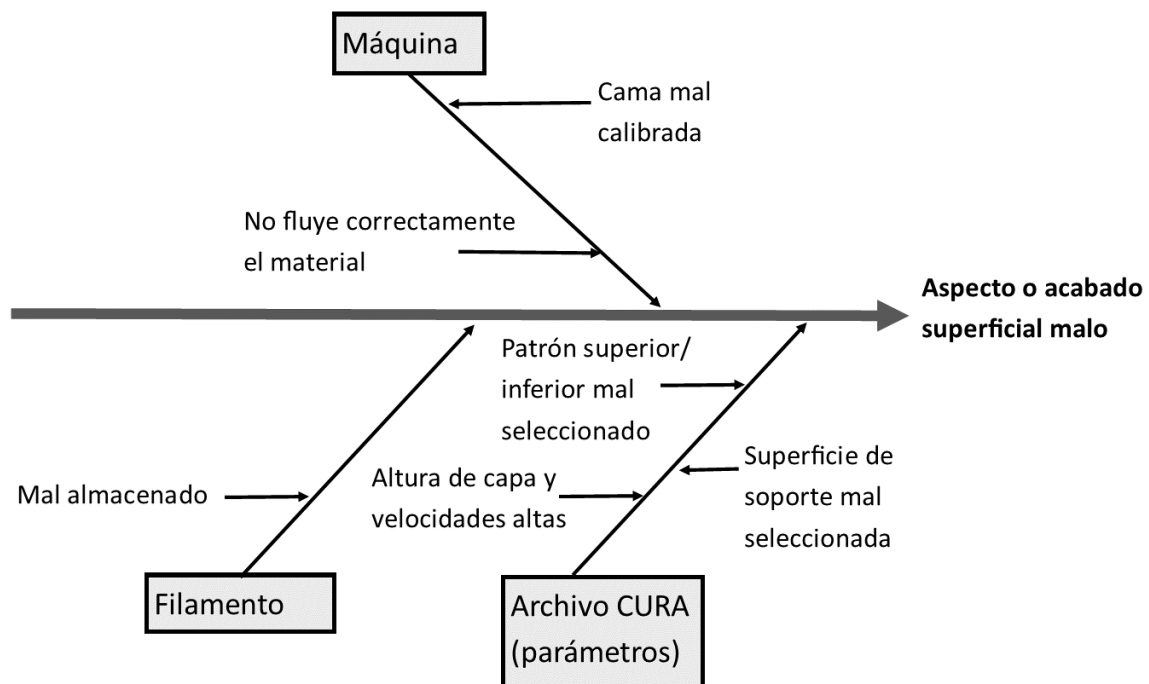


Figura 39. Diagrama causa-efecto "Aspecto o acabado superficial malo". Fuente: Elaboración propia.

6.4.5 Piezas débiles o quebradizas

Todos los materiales que se tienen son higroscópicos, unos más que otros, que es la capacidad que tiene el material de absorber la humedad del medio que lo rodea provocando oxidación y degradación del material. Es por esto que debe cuidarse el almacenamiento del material. Trabajar con un material que ha absorbido humedad da retrasos, el material se comporta de forma extraña (ver Figura 40), las piezas fabricadas son frágiles, además de que el filamento puede romperse en el proceso o atascar el extrusor, pues al absorber agua el filamento aumenta su diámetro.

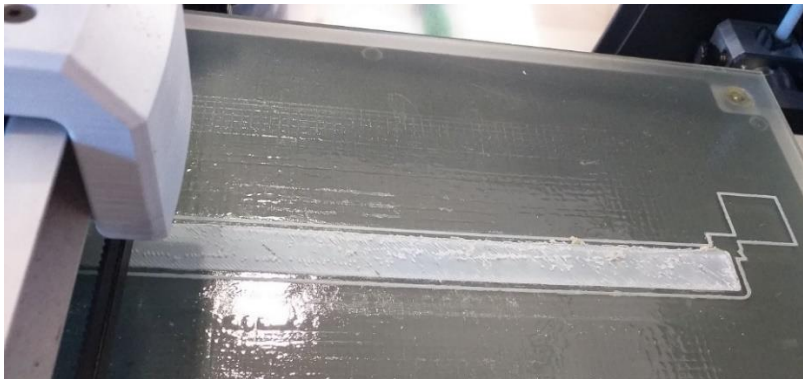


Figura 40. HIPS húmedo. Formación de grumos.

El ventilador de refrigeración puede generar piezas con defecto si se activa al utilizar ABS, para obtener buenos resultados con este material se necesita un ambiente aislado y mantener la temperatura de proceso que corresponde a este material.

Es posible que el bloque calentador deje de funcionar y no se cumpla la temperatura, de este modo el material no podrá adherirse correctamente entre capas y líneas fundidas, obteniendo material quebradizo. También parámetros de retracción incorrectos no dejan fluir libremente el material, enfriando el material antes de adherirse. Finalmente, no es conveniente aplicar porcentajes de relleno muy bajos para piezas que necesitaran tener resistencia a esfuerzos, estas no podrán soportarlo (ver Figura 41).

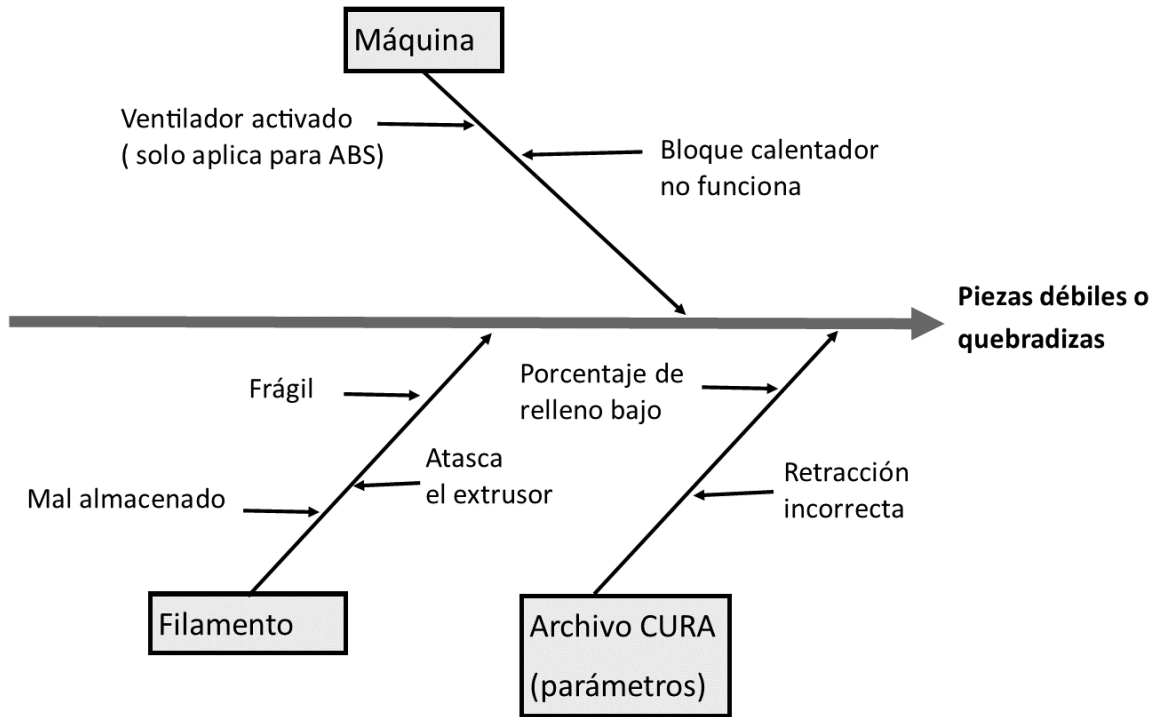


Figura 41. Diagrama causa-efecto "Piezas débiles o quebradizas". Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 7 Posprocesado

Durante el proceso y la mejora de parámetros se cuida la calidad de la pieza, pero algunas piezas llegan a necesitar un segundo proceso después de ser construidas, este puede ser para reforzar o dar una apariencia superficial diferente.

7.1. Detección y solución de daños

El posprocesado es el tratamiento que se hace a la pieza después de ser construida, esta necesidad surge de la detección de daños que tienen solución, fortalecimiento o un acabado especial en la pieza.

A veces se detectan daños que tienen solución y evita volver a iniciar el proceso, pero algunas otras piezas necesitan un buen acabado estético o resistencia extra.

7.1.1. Eliminación de soporte

En la mayoría de los casos se cuenta con material de soporte pegado a las piezas en los ángulos que lo necesitan, estos soportes únicamente son útiles durante el proceso de fabricación, ya que arruinan el diseño, además de que dan un mal aspecto a la pieza o no permiten su funcionalidad, así que son retirados. Existen dos formas de eliminarlos, el método dependerá del diseño, el material y la calidad que se desea obtener.

7.1.1.1. Mecánico

Este método consiste en retirar el soporte mecánicamente, tirando con ayuda de herramientas el plástico excedente en el diseño original de la pieza. Es muy fácil retirar los soportes de este modo, sin embargo, muchas veces la manera en que se utilizan los instrumentos al retirarlo llega a dañar la pieza, afectando o dejando marca en el lugar que soportaron (ver Figura 42).

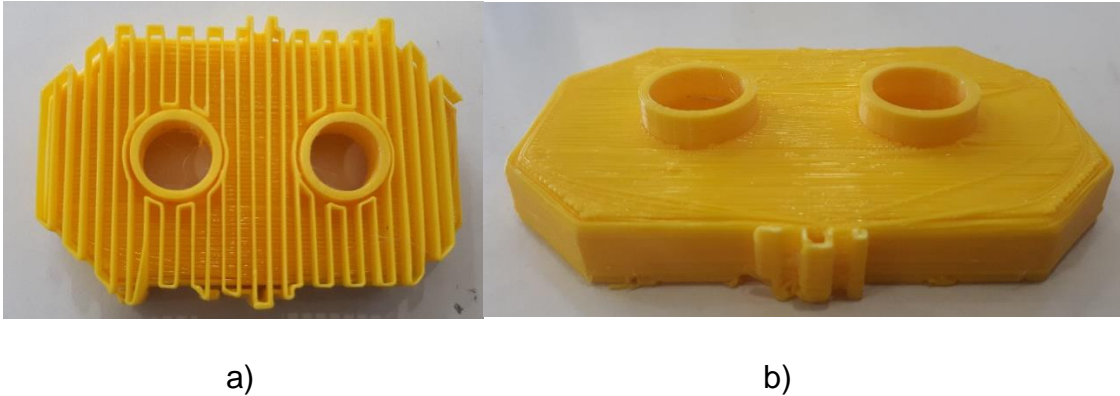


Figura 42. Pieza fabricada con PLA color amarillo por extrusión de material con desprendimiento mecánico. a) Pieza con soporte. b) Pieza sin soporte.

7.1.1.2. Soluble

Esta es otra forma de eliminar el soporte, tiene la ventaja de no dejar marca la mayoría de las veces, consiste en sumergir la pieza que se obtiene de la máquina en un líquido capaz de disolver el material que se ha utilizado como soporte, sin afectar el material seleccionado para la figura objetivo (ver Figura 43). La elección del material de soporte soluble es importante, tomando en cuenta que ambos materiales compartirán el proceso.

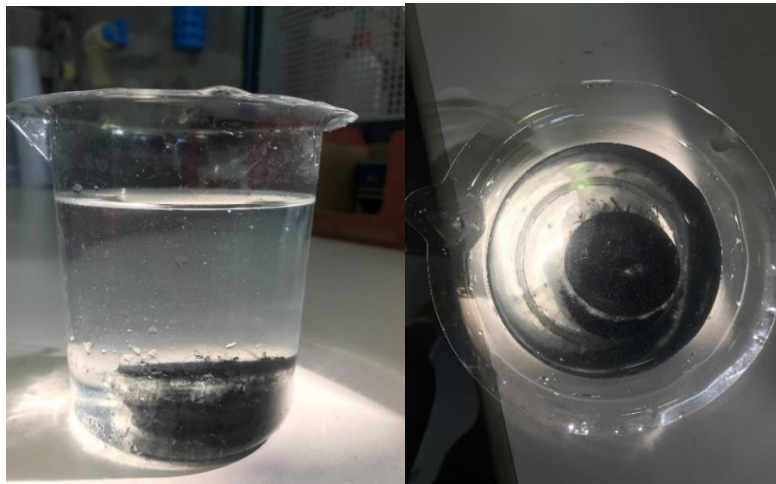


Figura 43. Pieza fabricada en PLA con PVA como soporte, sumergida en agua.

7.1.2. Lijado

Después de retirar los soportes es posible lijar con papel lija la superficie de la pieza con imperfecciones, manchas o marcas de soporte para lograr un mejor acabado.

El lijado se realiza manualmente con diferentes gramajes de lija, comenzando con gramajes grandes hasta llegar a las lijas con gramaje más pequeño, donde incluso se necesita un poco de agua. Es recomendable no lijar en paralelo o perpendicular, es mejor hacerlo en círculos y de este modo es menos probable hacer daño a la pieza por la forma en que fueron depositadas las capas de material. Existen materiales especiales para este posprocesado que permiten lijar mejor la superficie, sin embargo, el ABS es un material fácil de lijar. Cabe aclarar que el lijado es solo una parte del posprocesado completo de una pieza y que cualquier material que se lija queda blanquizco en la superficie (ver Figura 44).



Figura 44. Pieza con lijado, fabricada en ABS color blanco y negro. Fuente: Fundación CIM.

7.1.3. Pulido

El pulido permite lograr un acabado liso y brillante, se puede lograr con una rueda pulidora o con el uso de esmaltes, teniendo cuidado que las sustancias químicas que contienen no afecten las propiedades del material que se quiere pulir. El pulido no es común en piezas pequeñas, se vuelve difícil pulir pequeñas superficies por el tamaño de la maquinaria de este posprocesado.

7.1.4. Pegado

En algunas ocasiones el tamaño de la pieza excede el volumen de la máquina y es necesario segmentar la pieza en piezas más pequeñas, esto genera un proceso diferente e independiente para cada pieza. Las piezas más pequeñas se ensamblan después de su fabricación utilizando algún pegamento. Se intenta segmentar en las

partes menos visibles y en algunos casos se hace más de un posprocesado que permite ocultar la unión entre las diferentes piezas (ver Figura 45).



Figura 45. Diseño de cúpula. Pieza segmentada en 4 piezas independientes, en procesos separados, en PLA color plata. Fuente: Espacio de fabricación ETSEIB.

7.1.5 Recubrimiento

Se trata de un recubrimiento que se aplica sobre la pieza con una brocha o pincel, se deja que el recubrimiento haga su trabajo y finalmente este recubrimiento da un aspecto brillante y liso a la pieza, dejando una capa resistente a los impactos, además de que permite un segundo posprocesado como lijado o pintura. Solo es posible aplicar en materiales rígidos como PLA y ABS, para obtener buenos resultados.

7.1.6 Relleno de huecos

Si una vez finalizada la pieza quedan huecos o separaciones entre las líneas depositadas es posible rellenarlos con diferentes macillas en el mercado. Lo que hacen estas macillas es acomodarse y llenar esos huecos que se provocaron dejando una superficie lisa. Después de rellenarlos será necesario ocultar las marcas que dejará la macilla en la superficie con algún procedimiento extra, como el pintado.

7.1.7 Pintado

Antes de iniciar el proceso de pintado es necesario lijar la pieza, lo siguiente es llevar a cabo el proceso de imprimación, que prepara la superficie para su pintado. El proceso de imprimación consiste en colocar una capa de un recubrimiento líquido transparente por toda la superficie de la pieza con ayuda de una pistola de pintura conectada a un compresor. Posterior a esto se coloca un segundo recubrimiento viscoso de base disolvente mezclado con un catalizador que aumenta la velocidad de secado.

La imprimación protege y sirve como soporte para una mejor adhesión de la pintura y el proceso se repite colocando unas cuantas capas que ayudaran con una mejor adhesión de la pintura y así lograr un buen acabado.

Finalmente, la pintura se coloca con ayuda de un compresor o en algunos casos existen pinturas en aerosol que facilitan el proceso, sin embargo, se necesita tener cuidado que sea compatible la pintura con el material que se quiere pintar. Por otro lado, comúnmente los colores se definen haciendo uso de la carta RAL y solo en casos especiales se utilizan colores patentados.

Antes de colocar la pintura hay que saber que existen dos tipos de pintura:

- 1.- Monocapa: se trata de pintura de una sola capa, se coloca directamente a la pieza y se deja secar.
- 2.- Bicapa: esta se forma por dos capas, la primera contiene la pigmentación y la segunda capa da un acabado brillante o mate (ver Figura 46), según como se prefiera. Para un acabado brillante se utiliza una especie de barniz que también se coloca con ayuda de pistola de aire.



Figura 46. Modelo de un dinosaurio formado por extrusión de PLA, son 7 piezas independientes, aplicando pegado, lijado y pintado bicapa mate. Fuente: Fundación CIM.

La pintura es un estudio muy amplio y actualmente se logra el metalizado de piezas por esta técnica utilizando pinturas especiales mezcladas con brillantina o algunos metales.

7.1.8. Alisado con vapor

Se realiza en ABS utilizando acetona, la forma de alisar la superficie por este método se puede lograr de diferentes maneras. La primera y la más fácil es sumergir la pieza en un recipiente con acetona menos de diez segundos, pasado el tiempo se retira del recipiente, de este modo se suaviza la superficie de la pieza y la acetona que queda en la superficie se evapora hasta endurecer la superficie. La otra consiste en calentar lentamente acetona y colocar la pieza dentro de un recipiente suspendido en el líquido, dejando que el disolvente se evapore por cinco o diez minutos. Otra más consiste en generar una mezcla de acetona-ABS y aplicar con pincel o brocha sobre la superficie. Hay que considerar que esta técnica, de cualquier manera que se lleve a cabo, elimina vértices y aristas.

Capítulo 8 Análisis

Existen diferentes formas de extruir los polímeros, cada una con características particulares, en este caso ya hay la información suficiente acerca de la extrusión de material en manufactura aditiva para poder compararla con otros procesos.

8.1. Diferencias y similitudes del proceso de extrusión en inyección respecto al proceso de extrusión aditiva.

La extrusión de material en manufactura aditiva es un proceso que permite crear, diseñar y preparar un modelo de una forma casi inmediata, obtener un número pequeño de piezas por este proceso lleva un periodo de tiempo largo y es necesario monitorearlo, si este no va bien será necesario volver a iniciarlo.

Por otro lado, el proceso de moldeo por inyección necesita trabajar con un modelo creado y diseñado previamente, donde ya se hicieron pruebas previas que aseguran que el objetivo de la pieza se cumple, ya que, la maquinaria que se utiliza se verá adaptada a sus características, además, se obtienen decenas de piezas en un periodo de tiempo muy corto y el proceso necesita ser monitoreado todo el tiempo por los problemas que puedan surgir, además del equipo de control de calidad que se necesita por la cantidad de piezas producidas. El haber hecho pruebas previas a la inyección no descarta que se hagan pruebas después de ella para evitar alguna falla en el proceso que pueda generar problemas en el uso de las piezas.

Ambos se basan en la extrusión de la materia prima, aunque la inyección a mayor escala por el tamaño de extrusor, la maquinaria, la materia prima, los recursos y la producción. El proceso de inyección se basa en el diseño de un molde determinado, a partir del cual debemos adaptar los parámetros con los que fluirá el material para llegar hasta él y expulsar las piezas con la mejor calidad. En manufactura aditiva se basa en el diseño del archivo STL y el tipo de vida que llevara la pieza para establecer parámetros. Sin embargo, en cualquiera de los dos procesos se cuenta con especificaciones previas al arranque de la extrusión, que sirven como base para la parametrización y mejora del proceso.

Ambos procesos se basan en el método de prueba y error, pero en ambos será necesario corregirlos tan pronto como sea posible evitando la generación de merma, en manufactura aditiva por su nula capacidad de reprocesar una pieza mermada y en la inyección que, aunque se pueden meter a molienda y reprocesar las piezas mermadas, el material pierde propiedades que no dejan que se comporte de la misma manera que en un inicio.

La estabilidad dimensional no depende completamente del proceso, aunque se intenta controlar, pero el acabado superficial si, la manufactura aditiva permite definir detalles en una pieza, aumentando la calidad, es por esto que suele usarse para la fabricación de modelos arquitectónicos. La inyección en cambio genera superficies más sencillas. Además de que el proceso de inyección únicamente permite piezas completamente sólidas sin huecos y en el otro proceso es posible generar piezas huecas o elegir el porcentaje de material que la pieza tendrá dentro.

Actualmente en ambos procesos se pueden obtener piezas con 2 colores o dos materiales en una sola pieza. En el caso en que las piezas se componen por capas de material unidas, resultan piezas más frágiles hablando del mismo material que con el moldeo por inyección.

8.2. Elección de un proceso

Ambos procesos resultan eficientes, la clave está en analizar la situación, preguntando: ¿Qué se va a producir?, ¿Qué cantidad? y ¿Por cuánto tiempo?

El proceso de inyección es ideal cuando ya se tiene un diseño definido, con pruebas que garantizan la calidad de su uso, también cuando se trata de producciones en gran cantidad y por un periodo de tiempo largo, esto es por lo difícil y costoso que se vuelve hacer la planeación y la inyección de solo una pieza.

Sin embargo, en la extrusión de manufactura aditiva es posible diseñar minutos antes de poner en marcha la máquina, hacer la fabricación de solo una pieza y si esta cumple con las especificaciones simplemente repetir el proceso. También resulta ser la mejor opción cuando la cantidad de piezas que se van a producir es pequeña.

Al final ambos procesos giran alrededor de los parámetros de operación y de los cambios que se hagan con el fin de mejorar el proceso, solo es necesario saber para qué se aplicará cada cambio. Si se requiere producción en masa de piezas sencillas, optar por el proceso de inyección y el proceso de manufactura aditiva dejarlo para la producción de piezas únicas, con diseños complicados o pruebas previas para una posible producción en masa por el proceso de inyección.

Conclusión

De este modo la extrusión de material por manufactura aditiva es un proceso que está ganando importancia dentro de la industria que se involucra con la extrusión de polímeros, siendo un proceso que se puede hacer a pequeña y actualmente a mediana escala, que despierta el interés por mejorarlo.

Cada vez se genera mayor cantidad de materiales en forma de filamento, con características peculiares en las piezas y lo vuelven un proceso interesante. Todo lo que se puede llegar a hacer con las máquinas, y los materiales han hecho revolucionar este proceso, con un impacto muy grande en las diferentes ramas de la ciencia.

Por otro lado, y no menos importante está el proceso de inyección que, aunque a veces llega a olvidar un poco los parámetros de calidad, enfocándose a la cantidad producida, es eficiente para la producción en grandes cantidades si se sabe optimizar, además de la necesidad de una buena inversión para la puesta en marcha, si se compara con el proceso en manufactura aditiva.

La manufactura aditiva en extrusión de material, es un proceso flexible que da la libertad de fabricar piezas con características específicas y es posible hacer modificaciones o reforzar las piezas después del proceso a través de técnicas de posprocesado.

El material a utilizar y los parámetros de operación en ambos casos dependerá del diseño de la pieza y el uso para el que está destinado, los tiempos de producción en manufactura aditiva serán más largos en comparación al moldeo por inyección y esto no permite la producción en masa como lo hace la inyección, pero si permite llevar acabo copias perfectas de una pieza determinada, sin tener tantas irregularidades como pasa en el moldeo por inyección.

Así es que el proceso de moldeo por inyección tendrá prioridad para la producción en grandes cantidades sin darle tanto peso a la calidad del acabado y dimensiones de la pieza, mientras que la manufactura aditiva permite crear piezas con excelente diseño, dimensiones y acabados superficiales, pero con largos periodos de tiempo.

Finalmente, cada proceso cuenta con características que los hacen diferentes, elegir uno dependerá de las necesidades de producción. El proceso es eficiente dependiendo de lo que se necesite producir y de la cantidad. Por eso es fundamental conocer las especificaciones de un producto y que la decisión gire en torno al diseño y la vida que llevará la pieza.

Es importante saber que hoy en día la manufactura aditiva está marcando el ritmo con el que se obtienen bienes materiales y en un futuro cercano las máquinas de este tipo serán lo suficiente avanzadas para construir producciones grandes en menor tiempo.

Anexo 1 Lista de cotejo

La pieza

- ¿El diseño se encuentra en formato STL?
- ¿Se ha filtrado el archivo en el software CURA BCN3D?
- ¿El diseño y la posición en que se fabricará la pieza son correctos?
- ¿Cuál es el material o los materiales, las dimensiones y el peso de la pieza o piezas a fabricar?
- ¿Cuál es el uso de la pieza?

La máquina

- ¿Se dispone de la máquina prevista?
- ¿Cuál es el tamaño de la boquilla?
- ¿Se han hecho los trabajos de mantenimiento necesarios?

El material

- ¿Se tiene el o los materiales en el color solicitado?
- ¿El diámetro del filamento corresponde al diámetro que la extrusora es capaz de extruir?
- ¿Se tiene la cantidad suficiente de material?
- ¿El material ha estado almacenado correctamente?

Los parámetros

- ¿Se han capturado correctamente las características de la máquina (modelo, tamaño de boquilla, número de extrusores) y el material?
- ¿Se preparó y se guardó el archivo en la tarjeta de memoria?
- ¿El extrusor está ajustado con respecto a la cama?
- ¿Están listas las temperaturas de operación de la boquilla y de la cama?

El proceso

- ¿El extrusor ha sido purgado con Nylon?
- ¿Se colocó laca en la cama?
- ¿Se introdujo y se seleccionó el archivo correcto?
- ¿El material fluye por la boquilla?
- ¿Las líneas de se adhieren a la cama y entre sí?

Anexo 2 Otros Materiales

Materiales Composites

Son materiales que tienen una base polimérica y se encuentran mezclados con otras partículas o fibras que modifican su comportamiento y al mismo tiempo sus resultados en las piezas fabricadas según las proporciones de la mezcla [2]. Algunos ejemplos:

- ✚ Plástico con partículas de madera (Woodfill y corkfill)



Figura A1. Busto fabricado en filamento plástico con partículas de madera. Fuente: [2]

Propiedades:

- Acabado con efecto madera
- Su base polimérica en el PLA
- Baja flexibilidad y resistencia
- Se puede pos procesar para un acabado más realista

Parámetros recomendados:

- Temperatura de extrusión 210-220 °C
- Temperatura de la cama 50°C
- Velocidad: 20-50 mm/s
- Velocidad de retracción: 40mm/s
- Distancia de retracción: 3mm
- Ventilador de capa: Si
- Mínima altura de capa 0.15mm

- ✚ Plástico con partículas de metal (bronzefill, copperfill y steelfill): piezas con apariencia metálica.



Figura A2. Busto fabricado en filamento plástico con partículas de metal. Fuente: [2]

Propiedades:

- Su base polimérica es el PLA
- Acabado estético
- Baja flexibilidad y resistencia
- Material pesado
- Abrasivo
- Se puede posprocesar para un acabado más realista

Parámetros recomendados:

- Temperatura de extrusión 215-230 °C
- Temperatura de la cama 60°C
- Velocidad: 20-50 mm/s
- Velocidad de retracción: 40mm/s
- Distancia de retracción: 3mm
- Ventilador de capa: Si
- Mínima altura de capa 0.15mm

- ✚ Plástico con partículas de fibra de carbono (XT-CF20): piezas con resistencia mecánica.



Figura A3. Pieza fabricada en XT-CF20. Fuente: [2]

Propiedades:

- Su base polimérica es un copoliéster
- Extrema rigidez
- Ligero
- Abrasivo

Parámetros recomendados:

- Temperatura de extrusión 285-290 °C
- Temperatura de la cama 80°C
- Velocidad: 10-20 mm/s
- Velocidad de retracción: 20mm/s
- Distancia de retracción: 3mm
- Ventilador de capa: Si
- Mínima altura de capa 0.15mm

- ✚ Plástico con partículas de fibra de vidrio (PEEK, PEKK y ULTEM™ 9085): resistencia química, eléctrica y a altas temperaturas.



Figura A4. Piezas fabricadas en PEEK, PEKK y ULTEM™ 9085, orden de izquierda a derecha. Fuente: [14]

Propiedades PEEK:

- Temperatura
Tg (temperatura de transición vítrea): 143 ° C
Tm (temperatura de fusión): 343 ° C
- Fuerza mecánica
- Resistencias térmicas
- Degradación acuosa

Propiedades PEKK:

- Temperatura
Tg (temperatura de transición vítrea): 160 ° C
Tm (temperatura de fusión): 332 ° C
- Propiedades mecánicas similares a las de PEEK.
- Fácil de construir
- Resiste la degradación térmica y acuosa

Propiedades ULTEM™ 9085:

- Temperatura
Tg (temperatura de transición vítrea): 185 ° C
Tm (temperatura de fusión): N/A ° C
- Resistencia química
- Fácil de procesar
- Buena estabilidad dimensional
- Resistencia al impacto

Bibliografía

- [1] **Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**, ASTM International, designation: F2792-12a, last previous edition approved in 2012 as F2792-12.
- [2] BCN3D Technologies. (2019), **BCN3D Technologies**, Inc. Todos los derechos reservados. Página web: <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/> [ultimo acceso 04/11/19].
- [3] Imprimalia 3D, (2018), **Imprimalia 3D**. Página web: www.imprimalia3d.com [ultimo acceso 13/07/19]
- [4] Carrasco Garcia, J. C. **Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computadora- CAD/CAM**, PROSPECTIVA, vol. 4, núm. 1, enero-junio, 2006, pp. 75-81, Universidad Autónoma del Caribe.
- [5] Chavez, W. M. (2016), **Estudio de las propiedades termomecánicas del nanocompósito PLA/C30B con distintos pesos moleculares después de ser sometido a condiciones de intemperismo acelerado**. Página web: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/775/1/Wendy%20Ch%20C3%A1vez%20Montes%20DCM.pdf> [ultimo acceso 04/11/19].
- [6] Rainer Christoph, Romeo Muños, Ángel Hernández, **Manufactura Aditiva**, Año 16, N° 43, San Salvador, El Salvador, centroamericana. Revista semestral “Realidad y reflexión”, enero-junio 2016.
- [7] Universitat de Barcelona. **Materials**. Página web: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs> [ultimo acceso 04/11/19].
- [8] Universidad del Sur de Mississipp, **Departamento de Ciencia de Polímeros**.(1995,1996) Pagina web: <https://pslc.ws/spanish/styrene.htm> [ultimo acceso 20/07/19].
- [9] Mejía Flores, H. J, **Ventajas Y Desventajas De Las Impresoras 3d**, año 2014 Vol.12, N° 18. Revista Tecnológica.

[10] Rodríguez, F, (1982), **Principios de Sistemas de Polímeros**, México, D.F., Editorial El Manual Moderno, S.A. de C.V.

[11] ChemEssen, **Mol-Instincts**, (2019) Pagina web: <https://www.molinstincts.com/formula/PETG-cfml-CT1103556678.html> [ultimo acceso 04/11/19].

[12] **BCN3D CURA**, versión: 2.1.5. Recuperado de: <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/bcn3d-cura/>[ultimo acceso 17/10/19].

[13] **Innofil 3D**. Información técnica HIPS. Página web: <https://www.innofil3d.com/product-category/innopro/hips/> [ultimo acceso 13/07/19].

[14] **3D Printing PEEK, PEKK & ULTEM™**. Webinar whit Viv Campbell, Abraham Avalos, and Leif Tiltins. Miércoles 26 de junio del 2019.