

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE IMPRESIÓN 3D NO PLANAR EN DOS TIPOS DE
IMPRESORAS 3D: CARTESIANA Y DELTA.**

**COMPONENTE: ESTUDIO DE IMPRESIÓN 3D NO PLANAR EN
IMPRESORA 3D CARTESIANA.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

JONATHAN EFRAIN MALLIQUINGA ROCHINA

jonathan.malliquinga@epn.edu.ec

Ing. VÍCTOR HUGO HIDALGO DIAZ, D.Sc.

victor.hidalgo@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, JONATHAN EFRAIN MALLIQUINGA ROCHINA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JONATHAN EFRAIN MALLIQUINGA ROCHINA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JONATHAN EFRAIN MALLIQUINGA ROCHINA, bajo mi supervisión.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JONATHAN EFRAIN MALLIQUINGA ROCHINA

VÍCTOR HUGO HIDALGO DIAZ

DEDICATORIA

A mis padres, por enseñarme a enfrentar el mundo, por demostrarme que la constancia y la perseverancia nos permite alcanzar el éxito. Gracias por su apoyo incondicional, por estar conmigo y por guiarme siempre en cada paso para ser mejor persona. Este trabajo es para ustedes; sin su respaldo, este logro habría sido muy difícil de alcanzar. Los amo mucho.

A mis hermanos, por ser mi fuente constante de apoyo y motivación. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus palabras de aliento y por creer en mí en todo momento. Su compañía y amor han sido fundamentales para alcanzar este logro. Este trabajo es también para ustedes.

A mi abuelita, por su amor incondicional, su sabiduría y sus enseñanzas. Gracias por ser un ejemplo de fortaleza y dedicación, y por siempre tener palabras de aliento y una sonrisa para mí. Este logro es también suyo, porque sin su apoyo y cariño, no habría sido posible.

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a mis padres, por su apoyo incondicional que hizo posible este logro. Gracias por ser mi guía y mi inspiración en cada paso de este proceso. A mis hermanos, por ser una fuente constante de motivación y apoyo. Mi mayor deseo es que cada uno de ustedes logre grandes cosas; prometo estar siempre a su lado para apoyarlos así como ustedes lo hicieron conmigo.

A mi familia en Quito, sin duda la peor parte de tener que estudiar en otra ciudad es alejarte de tu hogar, gracias por hacer mi estancia lejos de casa más llevadera. Gracias por su apoyo y sus consejos.

A mi pareja, Josselyn, por estar siempre a mi lado y ser mi compañera de aventuras. Gracias por apoyarme en todas mis ideas, por creer en mí y, sobre todo, gracias por tu amor y comprensión.

A mi gatito, Larry, por acompañarme en las largas noches de desvelo durante todos estos años.

A mis homies en mi ciudad, siempre los llevo conmigo.

A mis amigos Diego, Elian, David y a todos los que conocí durante mi trayectoria universitaria, gracias por su sincera amistad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por haberme acogido durante toda mi carrera universitaria. Gracias a la mejor facultad del mundo.

A la Escuela Politécnica Nacional, por ser mi hogar académico y por haberme formado profesionalmente.

Finalmente, un agradecimiento especial a mi director, Ing. Víctor Hidalgo D.Sc., por su paciencia y disposición para guiarme durante el proceso de desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	2
1.4. Marco teórico	2
1.4.1. Impresión 3D	2
1.4.2. Proceso de impresión 3D.....	3
1.4.3. Manufactura Aditiva	5
1.4.4. Modelado por deposición fundida (FDM)	5
1.4.5. Parámetros de Impresión 3D	6
1.4.6. Impresora 3D Cartesiana.....	7
1.4.7. Impresión 3D No planar.....	9
1.4.8. Limitaciones de la Impresión 3D No Planar	10
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1. Adaptación de hardware	14
2.2. Obtención de software	16
2.3. Obtención de geometrías.....	17
2.4. Laminado de geometrías	18
2.4.4. Errores en el laminado	22
2.5. Clasificación de geometrías	23
2.6. Impresión de geometrías	24
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
3.1. Resultados	24

3.1.1.	Calidad superficial	24
3.1.2.	Tiempo de impresión	30
3.1.3.	Material empleado	30
3.2.	Conclusiones	32
3.3.	Recomendaciones	33
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Proceso de impresión 3D.....	4
Figura 2	Esquema de los distintos tipos de fabricación de la tecnología AM.....	5
Figura 3	Funcionamiento tecnología FDM.	6
Figura 4	Clasificación de los parámetros de la máquina de impresión 3D.	7
Figura 5	Impresora 3D Cartesiana.	8
Figura 6	Robot Cartesiano.	9
Figura 7	Acabado Impresión 3D.	9
Figura 8	Boquillas tradicionales para impresión 3D Planar.	11
Figura 9	Boquilla de latón con punta de acero para impresión no planar.	11
Figura 10	Diagrama metodológico.	13
Figura 11	Impresora 3D Cartesiana Artillery Sidewinder X1.....	14
Figura 12	Boquilla de serie, Artillery Sidewinder X1.....	14
Figura 13	(a) Boquilla de latón tradicional. (b) Boquilla para impresión no planar.	15
Figura 14	Representación de la cavidad existente dentro del bloque calefactor vertical entre los finales de rosca de la boquilla y el disipador.....	15
Figura 15	Bloque de menor longitud con boquilla para impresión 3D no planar.	16
Figura 16	Representación del ángulo y altura máximos no planares.	16
Figura 17	Modelos seleccionados para las pruebas de impresión 3D no planar.	18
Figura 18	Configuración de impresora, extrusor.	18
Figura 19	Configuración de impresora, general.	19
Figura 20	Configuración del filamento, filamento.	19
Figura 21	Configuración de la impresión, capas y perímetros.....	20
Figura 22	Configuración de la impresión, apartado no planar.	20
Figura 23	Configuración de la impresión, relleno.	20
Figura 24	Configuración de la impresión, falda y balsa.	21
Figura 25	Configuración de la impresión, velocidad.....	21
Figura 26	Errores de impresión con altura de capa 0.1 mm.	22
Figura 27	Errores en el laminado en configuración no planar.	22
Figura 28	Líneas de trayectoria en las geometrías.	23
Figura 29	Piel difusa en la geometría.....	23
Figura 30	Piel difusa en impresión 3D planar.....	23
Figura 31	Modelo T1 impreso a diferentes alturas de capa.	25
Figura 32	Vista lateral del Modelo T1 impreso a diferentes alturas de capa.	25
Figura 33	Modelo T2 impreso a diferentes alturas de capa.....	25
Figura 34	Vista lateral del Modelo T2 impreso a diferentes alturas de capa.....	26
Figura 35	Modelo T3 impreso a diferentes alturas de capa.....	26
Figura 36	Vista lateral del Modelo T3 impreso a diferentes alturas de capa.....	26
Figura 37	Comparación del modelo T1, impresa de manera planar y no planar.....	28
Figura 38	Comparación del modelo T2, impresa de manera planar y no planar.....	28
Figura 39	Comparación del modelo T3, impresa de manera planar y no planar.....	29
Figura 40	Propela de avión.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y Desventajas de una Impresora 3D de tipo Cartesiana.	8
Tabla 2 Comparación de tiempo de impresión entre los métodos planar y no planar.	30
Tabla 3 Comparación de material empleado para impresión planar y no planar.	31
Tabla 4 Comparación entre Impresión 3D Planar y No Planar	31

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo estudiar la impresión 3D no planar en una impresora 3D de tipo cartesiana. El estudio aborda la impresión 3D, presentando dos enfoques importantes: la impresión planar y no planar. Para una impresión no planar es necesario realizar modificaciones tanto en el Hardware como en el Software a emplearse. Mediante la metodología experimental se obtuvieron modelos impresos de forma planar y no planar y se evaluaron aspectos como la calidad superficial, la complejidad geométrica y la eficiencia de producción.

El estudio de impresión 3D no planar tiene potencial y ya se está aplicado en diferentes industrias. La profundización en este tema es necesaria para superar las limitaciones actuales y maximizar sus beneficios. Los resultados proporcionarán un mejor entendimiento acerca de este tema para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE: Impresión, 3D, FDM, No Planar, Calidad, Superficial.

ABSTRACT

The objective of this curricular integration work is to study non-planar 3D printing on a Cartesian type 3D printer. The study addresses 3D printing, presenting two important approaches: planar and non-planar printing. For non-planar printing, it is necessary to make modifications to both the Hardware and the Software to be used. Using the experimental methodology, planar and non-planar printed models were obtained and aspects such as surface quality, geometric complexity and production efficiency were evaluated.

The study of non-planar 3D printing has potential and is already being applied in different industries. Deepening this topic is necessary to overcome current limitations and maximize its benefits. The results will provide a better understanding about this topic for future research.

KEYWORDS: 3D, Printing, FDM, Non-Planar, Quality, Surface.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El estudio de la impresión 3D no planar en la impresora 3D de tipo cartesiana se centra en explorar las capacidades y desafíos de la fabricación aditiva cuando se imprimen capas no planas en una de las configuraciones más comunes en tecnología de impresión 3D.

Las impresoras cartesianas funcionan mediante el movimiento lineal del cabezal de impresión a lo largo de los ejes X, Y y Z, lo que permite hasta ahora una alta precisión y control en la deposición del material. La impresión 3D no planar va más allá de los movimientos tradicionales a lo largo de estos ejes. En lugar de seguir una ruta tradicional, la impresión no planar posee una mayor libertad de movimiento, lo que se traduce en una mayor precisión al momento de la impresión y además, una mejora significativa en la calidad superficial.

Este componente aborda varios aspectos de este proceso de impresión, se examinan las modificaciones y errores presentes en el Software de Diseño (Slicer) que permiten realizar la trayectoria no planar, así mismo el control del movimiento del cabezal mediante parámetros como son el ángulo y la altura máximos no planares, lo cual presenta un desafío debido a la naturaleza misma del cabezal de impresión. Otro aspecto importante es la adhesión entre capas, en donde se ven involucradas variables como la velocidad de impresión, temperatura de la cama y la del extrusor, con el objetivo de asegurar una unión sólida y uniforme entre las capas.

El abordar el estudio de impresión 3D no planar en la impresora cartesiana no solo proporciona una comprensión más profunda de las capacidades y limitaciones de esta tecnología, sino que también abre nuevas posibilidades para la fabricación aditiva avanzada, ofreciendo soluciones que pueden ser aplicadas en una variedad de industrias.

1.1. Objetivo general

Estudiar la impresión 3D no planar en una impresora 3D de tipo cartesiana.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis e identificar posibles fallos en el software empleado para el estudio de la impresión 3D no planar.
- Realizar pruebas de impresión 3D no planar.
- Evaluar el impacto de la variación a diferentes alturas de capas de impresión en la calidad superficial de las geometrías impresas.
- Comparar la calidad superficial de las piezas impresas de manera no planar con las impresas de manera planar.

1.3. Alcance

El presente trabajo de titulación tiene como enfoque el estudio de la impresión 3D no planar en una impresora 3D cartesiana. El objetivo es determinar experimentalmente cómo la modificación de parámetros influye en la calidad superficial de los objetos impresos.

Para el estudio se realizarán las modificaciones necesarias en la impresora, se probarán diferentes parámetros clave como la altura de capa, capas superiores e inferiores, el ángulo y la distancia máxima de impresión no planar, entre otros. Se identificarán los fallos en el software utilizado y sus posibles soluciones. Los resultados obtenidos permitirán identificar las condiciones óptimas que maximizan la calidad superficial de las piezas impresas utilizando técnicas no planares.

Posterior, se realizará un análisis comparativo entre la impresión 3D planar y la impresión 3D no planar, comparando en el acabado superficial entre estas tecnologías.

Este estudio aportará conocimientos importantes para la optimización en los procesos de fabricación aditiva, ofreciendo directrices prácticas para la implementación de la impresión 3D no planar en la industria.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Impresión 3D

La impresión 3D comúnmente conocida como fabricación aditiva (AM) es una tecnología que permite imprimir objetos tridimensionales siguiendo una trayectoria bidimensional definida mediante la adición de material capa por capa [1]. Este proceso es computarizado y controlado por el usuario mediante un software que interpreta un diseño digital,

generalmente creado mediante un software de modelado 3D. Esta tecnología hace posible imprimir objetos con geometrías complejas imposibles de producir por métodos tradicionales [2], [3].

El origen de esta tecnología se remonta a la década de los 80 donde Charles Hull desarrolló la estereolitografía (SLA), proceso que utilizaba láseres para solidificar resina líquida en capas finas. Además de esto, también creó el formato de archivo STL, que todavía se utiliza ampliamente en la impresión 3D, sembrando así las bases de lo que sería la evolución tecnológica de los próximos años [2].

Con la aparición del proyecto RepRap (Replicating Rapid Prototyper) y la expiración de patentes sobre algunas técnicas de impresión 3D el sector de impresión 3D se encontraba en auge, esta iniciativa produciría una impresora FDM capaz de autorreplicarse, contribuyendo de esa manera a la difusión de impresoras de bajo coste en el mercado. Esta iniciativa *open source* es la razón por la cual las impresoras FDM son las más comunes y económicas hoy en día. Además, impulsó el avance y la colaboración tecnológica de uso libre y fácil producción. Como resultado de esto, surgieron múltiples empresas de impresión 3D, como Ultimaker, Prusa, Creality, entre otras [2], [3].

1.4.2. Proceso de impresión 3D

Para comprender mejor el proceso de impresión 3D debemos conocer previamente dos conceptos claves:

STL (Stereolithography)

Es un formato estándar empleado en impresión 3D, se encarga de almacenar información acerca de la geometría de un objeto tridimensional sin datos como color ni textura mediante una representación de su superficie en forma de una colección de triángulos. Cada triángulo está definido por sus tres vértices y una normal que indica su orientación. En pocas palabras, el archivo STL representa la geometría de un modelo tridimensional mediante una malla de triángulos interconectados.

Código G

Es el lenguaje de programación empleado para controlar las máquinas, consiste en una serie de comandos en los ejes X, Y y Z que instruyen a la máquina sobre cómo moverse, ajustar la velocidad de movimiento, controlar la temperatura de la boquilla y la cama, y manejar otras funciones específicas de la máquina. Cada línea de código representa una instrucción que la máquina ejecuta secuencialmente, permitiendo la creación precisa del modelo tridimensional.

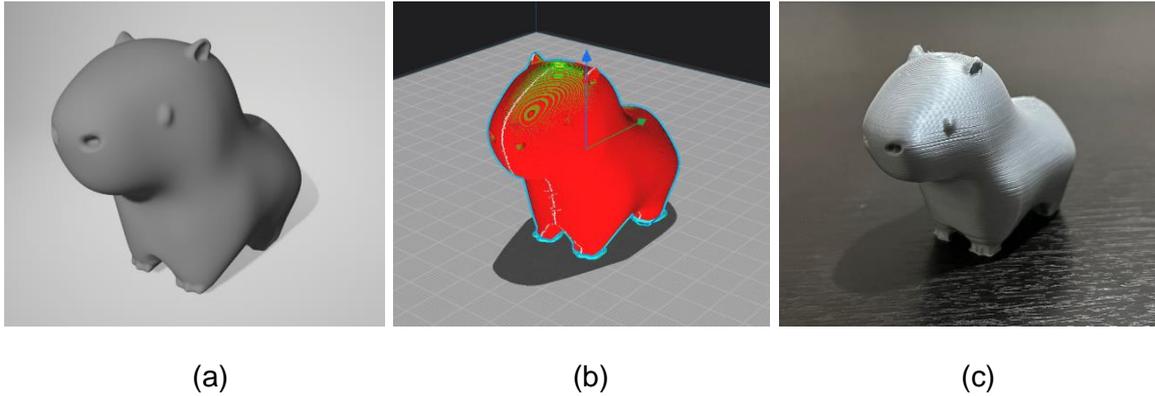


Figura 1 Proceso de impresión 3D. (a) Modelo generado. (b) Modelo laminado. (c) Modelo impreso. [Propia]

A grandes rasgos podemos decir que el proceso de impresión 3D se puede dividir en tres pasos: generación de modelo 3D, laminado e impresión.

Generación de modelo 3D

El primer paso es definir que es lo que se va a modelar, el modelo puede diseñarse mediante software CAD (Compute Aided Design), descargarse de plataformas donde se comparten modelos 3D o escanearse de un objeto 3D existente. Posterior a esto, se exporta el modelo en formato STL, OBJ o cualquier otro formato que pueda procesar el Slicer.

Laminado

El segundo paso es importar el modelo en formato STL dentro del software de laminado (Slicer), entre estos tenemos Cura, PrusaSlicer, Bambu Studio, entre otros. El proceso de laminado se refiere a que el Slicer genere las instrucciones de impresión de tal manera que la impresora pueda imprimir el modelo sin inconvenientes. El software nos arroja un documento de texto con instrucciones y estas instrucciones se llaman Código G.

Impresión

Por último, debemos ejecutar el Código G en la impresora, para enviarlo podemos hacerlo mediante USB, microSD o mediante red si está disponible. La impresora ejecuta los comandos automáticamente y después de un determinado tiempo, dependiendo la complejidad del modelo, tenemos el modelo 3D impreso.

Dado que siempre pueden ocurrir errores es importante monitorear la máquina mientras imprime, algunos de estos errores pueden ser visibles durante las primeras capas de impresión.

[3]

1.4.3. Manufactura Aditiva

Aunque generalmente se emplee el término ‘impresión 3D’ para referirse a la fabricación aditiva (AM), la realidad es que existen diversos procesos individuales que varían en su método de adición de capas según el material y la tecnología de la máquina utilizada. En 2010, la ASTM “ASTM F42 – Additive Manufacturing” formularía un conjunto de normas que clasificarían estos procesos en siete categorías: Fusión por lecho de polvo (*Powder Bed Fusion*), Inyección de aglutinante (*Binder Jetting*) Extrusión de materiales (*Material Extrusion*), Inyección de material (*Material Jetting*), Deposition de energía dirigida (*Directed Energy Deposition*), Laminación por capas (*Sheet Lamination*), Fotopolimerización en tanque (*VAT Photopolymerisation*) [4], [5], [6].

Cada una de estas técnicas de AM presentan varias ventajas e inconvenientes lo que hace que cada una de ellas sea ideal para un determinado material. Actualmente, los sectores más relevantes para la aplicación AM son el aeroespacial, la defensa, la automoción, la electrónica, la construcción, la energía y el sector biomédico [5].

1.4.4. Modelado por deposición fundida (FDM)

El avance en AM ha traído consigo la aparición de varias tecnologías de impresión 3D, entre ellas, la estereolitografía (SLA), la sinterización selectiva por láser (SLS), el trazado 3D, el modelado por deposición fundida (FDM), entre otras [7].

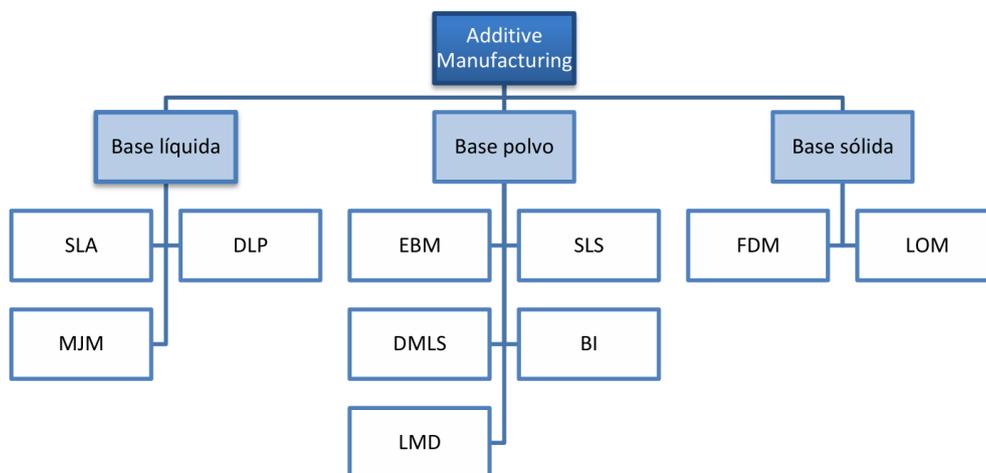


Figura 2 Esquema de los distintos tipos de fabricación de la tecnología AM. [8]

Debido a su simplicidad, la tecnología de impresión 3D más común y la que emplearemos en este trabajo es el modelado por deposición fundida (FDM), introducida hace más de tres décadas por Stratasys Corporation [1], [7].

La impresión FDM cuenta con tres elementos principales: una cama de impresión, una bobina de filamento y un extrusor, su funcionamiento es sencillo, la impresora funde un filamento de plástico y extruye material a través de una boquilla, esta boquilla sigue un camino definido, y el plástico depositado construye los objetos tridimensionales apilando capas planas unas sobre otras [7], [8].

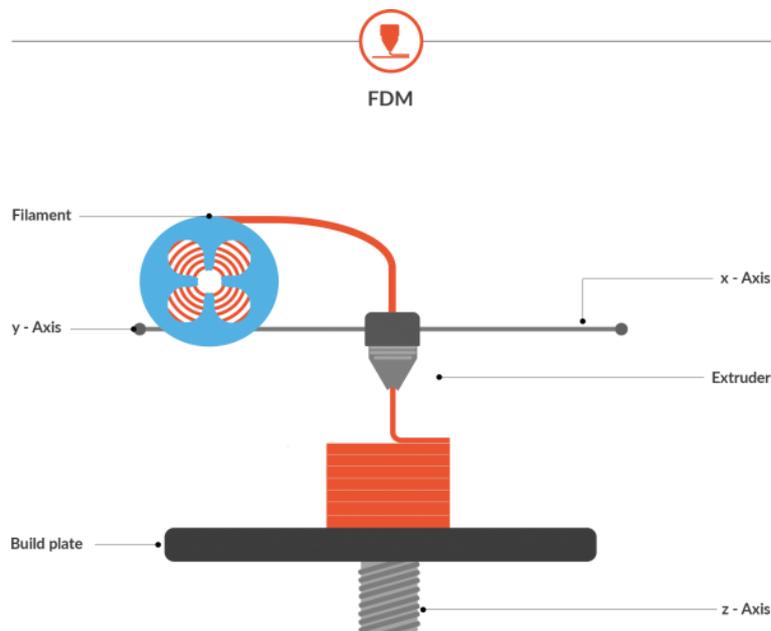


Figura 3 Funcionamiento tecnología FDM. [9]

Los materiales comúnmente empleados para la impresión FDM se encuentran el PLA (ácido poliláctico), el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), el PP (Polipropileno) y PE (Polietileno), sin embargo, suelen ser compatibles con otros policarbonatos como PET, PS, ASA, PVA, entre otros. En nuestro caso utilizaremos PLA de 1.75 mm de diámetro debido a su bajo costo y peso, su flexibilidad de procesamiento y su bajo punto de fusión, que oscila entre 190°C y 220°C. Su facilidad de uso, con menor probabilidad de deformaciones, ofrece una buena calidad superficial y buenos detalles, volviéndolo ideal para el estudio y los modelos que serán impresos más adelante [8], [10].

1.4.5. Parámetros de Impresión 3D

Los parámetros dentro de la impresión 3D forman parte del proceso de laminado, un buen laminado puede ser la diferencia entre una impresión buena o mala.

Los diferentes ajustes de parámetros en el software definen la forma en que se imprime una pieza, algunos de los ajustes que poseen mayor influencia en la precisión y calidad de la impresión son: la altura de capa, el ancho de extrusión, número de perímetros, el número de capas sólidas inferiores y superiores, y el patrón de relleno interno [11].

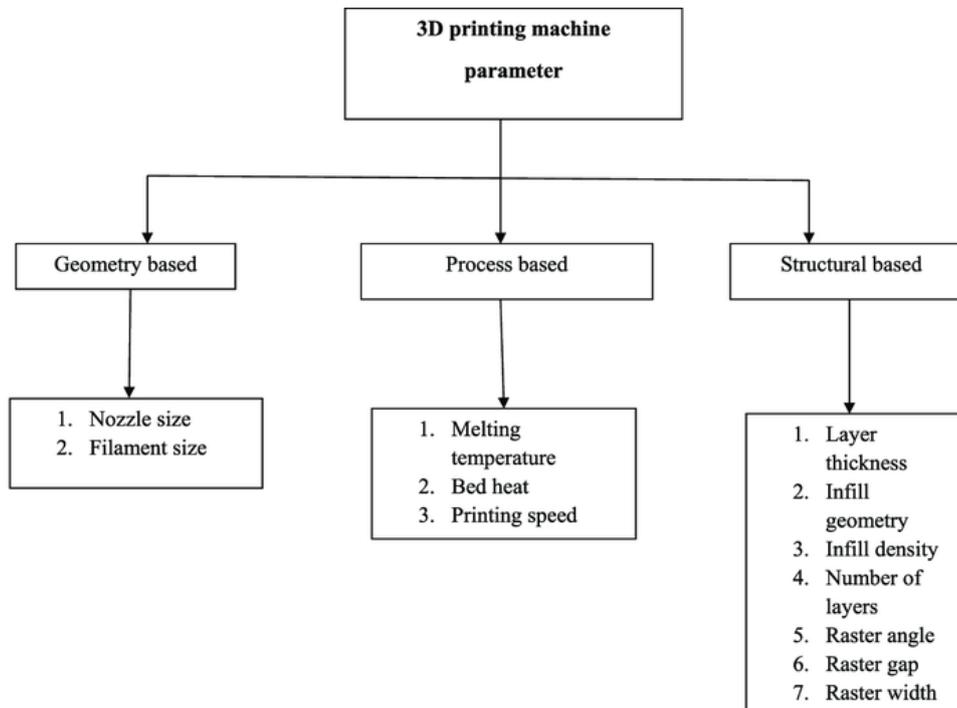


Figura 4 Clasificación de los parámetros de la máquina de impresión 3D. [11]

1.4.6. Impresora 3D Cartesiana

Las impresoras 3D de configuración cartesiana son de las más comunes en el mercado, su diseño modular facilita la calibración y el mantenimiento, lo que las convierte en una excelente opción para una amplia variedad de aplicaciones. Este tipo de impresoras basa sus movimientos en un sistema de coordenadas cartesiano utilizando los ejes X, Y y Z, para determinar posición y dirección del cabezal de impresión[12].

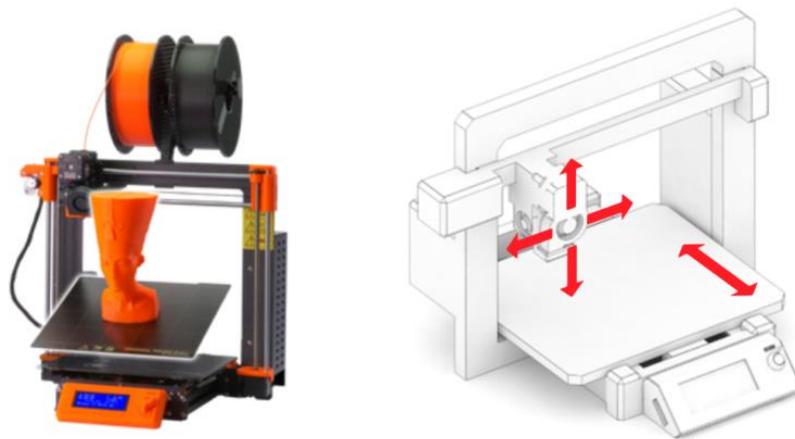


Figura 5 Impresora 3D Cartesiana. [13]

Este tipo de impresora presenta ventajas y desventajas, entre las cuales tenemos:

Tabla 1 Ventajas y Desventajas de una Impresora 3D de tipo Cartesiana. [Propia]

Ventajas	Desventajas
Diseño sencillo	Ocupa mucho espacio
Alta precisión de impresión	Velocidad de impresión baja
Fácil de calibrar y mantener	Componentes se desgastan con el tiempo
Ideal para todo tipo de prototipos y piezas finales	En algunas impresoras, el tamaño de la cama puede limitar el tamaño de las piezas que se desea imprimir
Repuestos amplios	Susceptible a vibraciones

Robot Cartesiano

El funcionamiento de una impresora 3D cartesiana se basa en un robot cartesiano, un tipo de robot industrial que se distingue por tener tres ejes de control principales que son completamente lineales. Este sistema utiliza motores lineales para permitir que el cabezal o herramienta se desplace de manera independiente a lo largo de cada eje, logrando así una gran precisión en los movimientos.

Entre los usos de un robot cartesiano se incluyen el ensamblaje, la manipulación de materiales, la soldadura, la pintura y recubrimiento, la inspección de productos, y la carga y descarga de máquinas. Además, las aplicaciones industriales de un robot cartesiano abarcan desde el uso en CNC, la impresión 3D, el corte de plasma o láser, el enrutamiento de madera, el ensamblaje de PCB, hasta la selección y colocación [14].



Figura 6 Robot Cartesiano. [14]

1.4.7. Impresión 3D No planar

La impresión 3D no planar o también conocida como modelado de deposición fundida de capa curva (CLFDM), es una técnica que permite depositar material sobre superficies curvas o en ángulos variables. La extrusión de material sigue con precisión el contorno de la superficie real de un objeto con movimientos en los ejes x,y y z simultáneamente, en lugar de dividirlo en capas planas, con este tipo de impresión se pueden lograr superficies casi perfectas, sobre todo en superficies con curvaturas suaves [3], [15].

El término CLFDM fue introducido por primera vez por Chakraborty et al. y presentó grandes ventajas para la impresión 3D como son la eliminación del efecto escalera y la mejora en la calidad superficial, además del aumento de la velocidad de impresión, reducción de residuos al disminuir la necesidad de soportes y mejora de adhesión de capaz al existir mayor área de contacto [16].

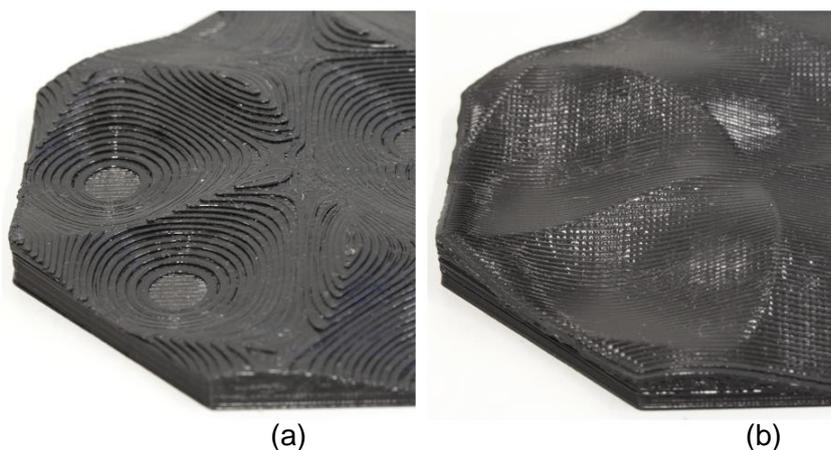


Figura 7 Acabado Impresión 3D. (a) Impresión 3D Planar, muestra el efecto escalera. (b) Impresión 3D No planar, suavizado de la superficie, se elimina el efecto escalera. [16]

Otro de las ventajas del CLFDM es la fabricación de modelos tridimensionales complejos mejorando sus propiedades mecánicas. Khurana et al. Llevo a cabo experimentos donde al comparar modelos impresos de manera planar y no planar probó que los modelos

impresos de forma no planar obtuvieron mejores propiedades mecánicas. Esto ocurre dado que al unir capas planares y no planares las tensiones se redistribuyen a lo largo de la geometría volviéndola más resistentes a esfuerzos mecánicos [17].

Sin embargo, aunque esta técnica continua en estudio, las aplicaciones que nos brinda son prometedoras, incluyendo la creación de prótesis anatómicamente precisas, componentes aerodinámicos en la industria automotriz y aeroespacial, y objetos de diseño industrial con formas orgánicas y estéticas innovadoras.

1.4.8. Limitaciones de la Impresión 3D No Planar

Este método de impresión requiere de un software especializado y adaptaciones en la impresora para evitar las colisiones entre el cabezal de impresión y la impresión, logrando de ese modo trayectorias de impresión más complejas y precisas.

Cuando se trata de imprimir de manera planar estas colisiones son inexistentes dado que este proceso imprime capas de abajo hacia arriba sin regresar a una capa impresa previamente.

Por otro lado, cuando se trata de impresión no planar, el cabezal realiza movimientos simultáneos en los tres ejes (X, Y y Z) al mismo tiempo, haciendo que este descienda hasta regiones con estructuras ya impresas, pudiendo provocar colisiones con cualquiera de las partes del cabezal de impresión.

Para evitar estas colisiones, se necesita más información acerca de la forma del cabezal de impresión, aquí entran dos variables importantes como son: el ángulo máximo de impresión que es el ángulo máximo en el que una impresora puede imprimir sin colisiones y la altura máxima de impresión que es la altura máxima que se puede imprimir con una capa no planar.

Software para Impresión No Planar

Al igual que un software para impresión 3D planar, los slicers no planares generan un código G que la impresora 3D interpreta para construir el objeto mediante movimientos simultáneos en los ejes X, Y y Z.

Aunque los softwares populares de momento no incluyen una opción para impresión no planar, gracias a la colaboración de la comunidad y la investigación continua, hoy en día existen softwares experimentales que generan código G con trayectorias no planares a través de su función "Nonplanar Layers".

Adaptación de Hardware

La geometría de la boquilla juega un papel importante en la impresión no planar, las boquillas tradicionales presentan una superficie plana en sus extremos, que en impresión planar resulta útil, estas aplastan el camino impreso para hacerlo más plano y obtener una mejor calidad superficial.

En impresión no planar esta geometría de boquilla no es conveniente dado que derretirá las áreas impresas previamente mientras atraviesa con la boquilla caliente, dando un mal acabado superficial sobre todo con superficies con ángulos pronunciados.



Figura 8 Boquillas tradicionales para impresión 3D Planar. (a) E3D. (b) Olsson Block. [3]

Afortunadamente hoy en día contamos con boquillas en el mercado que son ideales para impresión no planar, estas pueden ser adquiridas fácilmente como la que se muestra a continuación.



Figura 9 Boquilla de latón con punta de acero para impresión no planar.

Para nuestro estudio emplearemos este tipo de boquilla ya cuenta con aristas pronunciadas y un ángulo de impresión máximo bastante amplio, lo que la hace ideal para la impresión 3D no planar. [3]

2. METODOLOGÍA

El presente estudio parte de la necesidad de mejorar el acabado superficial de los modelos impresos en 3D. La impresión convencional de manera planar suele producir un efecto escalonado, que afecta la calidad estética y funcional de las piezas. Con la aplicación de la impresión no planar logramos disminuir estos escalonados imprimiendo capas curvas siguiendo la superficie del objeto, mejorando su calidad superficial.

Este capítulo tiene como finalidad presentar el proceso aplicado para cumplir los objetivos del estudio planteados anteriormente, abarcando desde la adaptación de hardware y la obtención de un software hasta la impresión y evaluación detallada de la calidad superficial de los modelos. La investigación fue desarrollada en base al diagrama metodológico presentado a continuación.

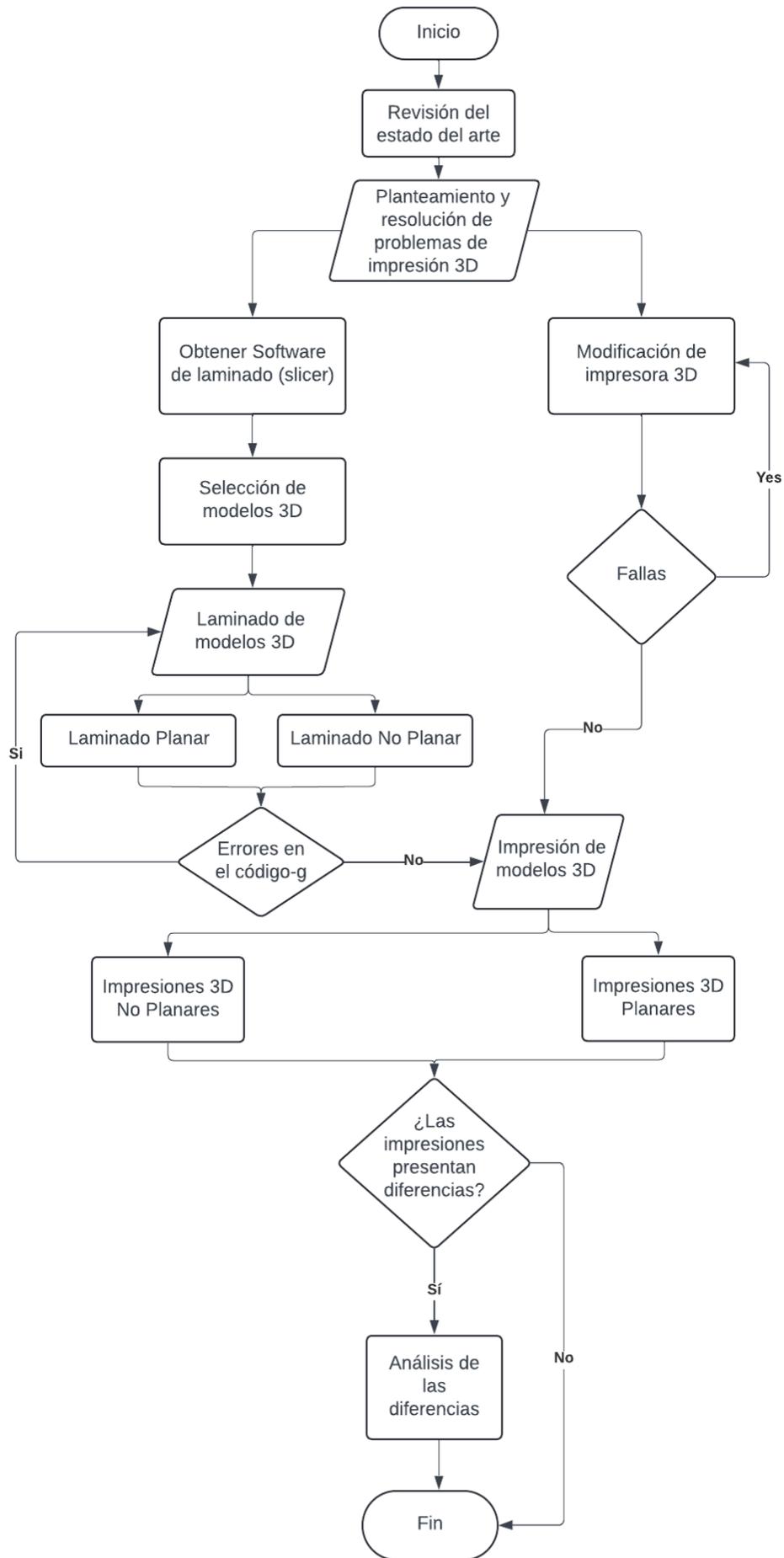


Figura 10 Diagrama metodológico. [Propia]

2.1. Adaptación de hardware

2.1.1. Impresora empleada.

La impresora 3D empleada para el estudio es una ARTILLERY SIDEWINDER X1. Esta impresora cuenta con un sistema de extrusión directa, funciona de manera silenciosa y puede imprimir a una velocidad de hasta 150 mm/s. Tiene un volumen de impresión considerable, con dimensiones de 300x300x400 mm. Todo esto la convierte en una impresora versátil y perfecta para fines del estudio.



Figura 11 Impresora 3D Cartesiana Artillery Sidewinder X1.

2.1.2. Modificaciones en la impresora.

Para implementar la impresión 3D no planar y realizar impresiones de geometrías con pendientes pronunciadas, asegurando que no haya colisiones del cabezal con la impresión, es necesario hacer las adaptaciones necesarias a la impresora 3D.

Inicialmente la impresora contaba con una boquilla de latón de serie de 0.4 mm, la cual presentaba aristas planas en sus extremos y como vimos anteriormente estas boquillas no son aptas para impresión 3D no planar.



Figura 12 Boquilla de serie, Artillery Sidewinder X1. [Propia]

Por esto motivo, se optó por adquirir una boquilla de 0.4 mm de latón con punta de acero para impresión no planar, como la que se observa en la Figura 9. Estas boquillas a comparación de las convencionales poseen un mayor ángulo de impresión lo que previene las colisiones del cabezal con la impresión.

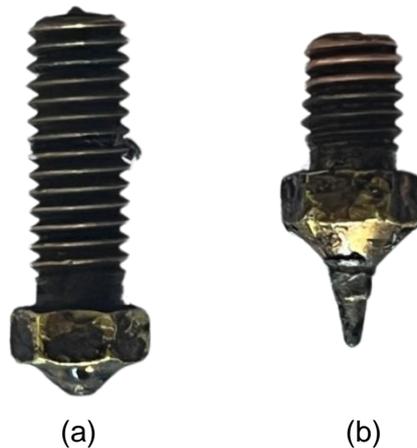


Figura 13 (a) Boquilla de latón tradicional. (b) Boquilla para impresión no planar. [Propia]

Una vez instalada la nueva boquilla en la impresora 3D, se inició el proceso de impresión. Sin embargo, se presentaron problemas de bloqueo de material durante la impresión, impidiendo que el filamento se extruyera correctamente. Se procedió a desensamblar el bloque calefactor junto con la boquilla del cabezal de impresión y, al hacerlo, se observó una acumulación de material en el interior. Esta acumulación estaba obstruyendo el flujo normal del filamento durante la impresión. La acumulación se produjo debido a una cavidad creada dentro del bloque calefactor entre los finales de rosca de la boquilla y el dissipador, ya que la longitud de rosca de la nueva boquilla es menor que la de la boquilla anterior.



Figura 14 Representación de la cavidad existente dentro del bloque calefactor vertical entre los finales de rosca de la boquilla y el dissipador. [Propia]

Para resolver este problema, se optó también por cambiar el bloque calefactor con un bloque calefactor horizontal, este nuevo bloque tiene una menor longitud de rosca interna, donde se conectan la boquilla y el disipador. Este cambio elimina la cavidad donde se acumulaba el material, ya que los finales de rosca de ambos elementos ahora se tocan dentro del bloque.



Figura 15 Bloque de menor longitud con boquilla para impresión 3D no planar.

Una vez vuelta a instalar la boquilla en la impresora con el bloque calefactor adecuado, determinamos los valores de ángulo y altura máximos de impresión no planar los cuales serán necesarios para el momento de laminado en el Software. Para la boquilla seleccionada se midió con ayuda de un Software CAD y se obtuvo los siguientes valores aproximados: ángulo máximo de impresión no planar 70° , altura máxima de impresión no planar 8 mm.

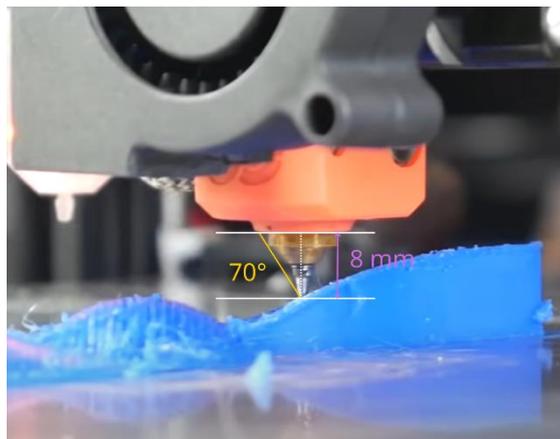


Figura 16 Representación del ángulo y altura máximos no planares. [Propia]

2.2. Obtención de software

Con el propósito de continuar el estudio, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda de un software que permitiese laminar modelos 3D con configuración no planar, la búsqueda se

realizó mediante recursos como artículos académicos y blogs especializados en impresión 3D.

Este proceso permitió identificar dos opciones viables. Sin embargo, al intentar instalar el primer software, se encontró que algunos archivos esenciales estaban desactualizados o no disponibles, lo que impidió su correcta instalación. Afortunadamente, el segundo software pudo ejecutarse con éxito, proporcionando las herramientas necesarias para continuar con el estudio de impresión 3D no planar.

Estos softwares se pueden encontrar en los siguientes enlaces:

- <https://github.com/Zip-o-mat/Slic3r/tree/nonplanar-thesis> [3]
- <https://github.com/teachingtechYT/PrusaSlicer/releases/tag/windows> [18]

El primer software (Slic3r) requería el sistema operativo Linux y varios programas adicionales que no estaban actualizados, lo que impidió completar su instalación. Por otro lado, el segundo software (PrusaSlicer) fue muy fácil de obtener, ya que solo fue necesario descargar un archivo comprimido que contenía un ejecutable. Este programa laminador incluye una extensión para impresión no planar y es visible si se activa la configuración en modo experto. Es importante mencionar que el programa aún se encuentra en fase experimental por lo que presenta errores de los cuales hablaremos más adelante.

2.3. Obtención de geometrías

La impresión 3D no planar aún está en fase de estudio, por lo que no todas las geometrías son adecuadas para esta configuración. La selección de geometrías se basó principalmente en modelos que, aunque sencillos, tienen superficies con curvas marcadas. Esto asegura que, durante la impresión, no existan colisiones ni errores de código G, y que además el acabado superficial no planar sea fácilmente perceptible.

La obtención de geometrías se puede dar de tres formas diferentes, diseñando con la ayuda de un software CAD, descargando de plataformas dedicadas a la impresión 3D o escaneando un modelo existente. En nuestro caso lo obtuvimos de la segunda forma. Si se realiza una búsqueda rápida en internet se puede llegar a encontrar varios modelos para poner a prueba la impresión 3D con capas no planares, estos modelos fueron desarrollados por la comunidad y puestos a uso libre para que cualquiera pueda probarlos.

De todos los modelos encontrados se escogieron los que se presentan más adelante en la Figura 17. El modelo "T1" se seleccionó debido a que posee en su superficie con una curva circular muy suave lo que permitirá estudiar cómo se comportan las capas no planares en

dicha curva. El modelo "T2" fue seleccionado por las pendientes pronunciadas que posee, esto permitirá evaluar la selección de la boquilla y a la capacidad de su geometría de evitar colisiones. Por último el modelo "T3" se seleccionó dado que presenta una similitud entre los dos modelos anteriores y permitirá una mejor observación de la presencia de dos tipos de pendientes al mismo tiempo.

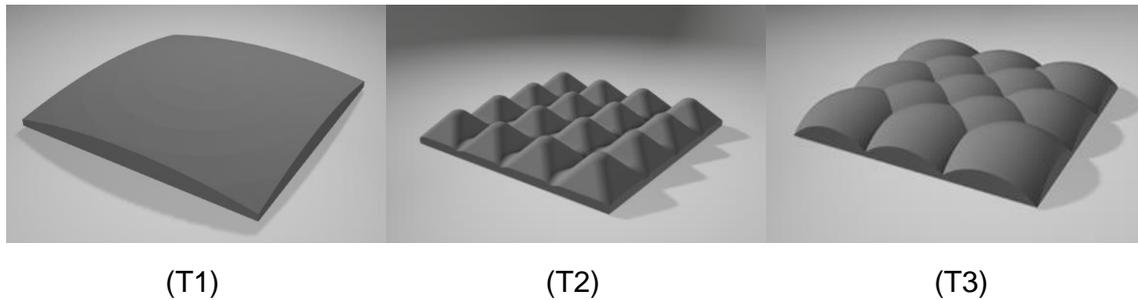


Figura 17 Modelos seleccionados para las pruebas de impresión 3D no planar. [Propia]

2.4. Laminado de geometrías

Para el laminado de las geometrías en el Software seleccionado "Prusa Slicer", iniciamos estableciendo las dimensiones de la impresora mediante el asistente de configuración. Posteriormente definimos los parámetros para cada apartado de configuración dentro del software: configuración de la impresora, configuración del filamento y configuración de impresión. Es importante destacar que algunos de los parámetros se definieron en base a estudios previos y a experiencia previa con estas impresoras, lo cual ayudó a determinar los parámetros ideales para impresión.

2.4.1. Configuración de la impresora

En este apartado de manera general nos encontramos con las dimensiones de la impresora, el número de extrusores y el firmware empleado. De este apartado se modifican el diámetro de la boquilla y las dimensiones, que serían en base a la impresora que se vaya a emplear, para nuestro caso la Artillery Sidewinder X1.



Figura 18 Configuración de impresora, extrusor. [Propia]

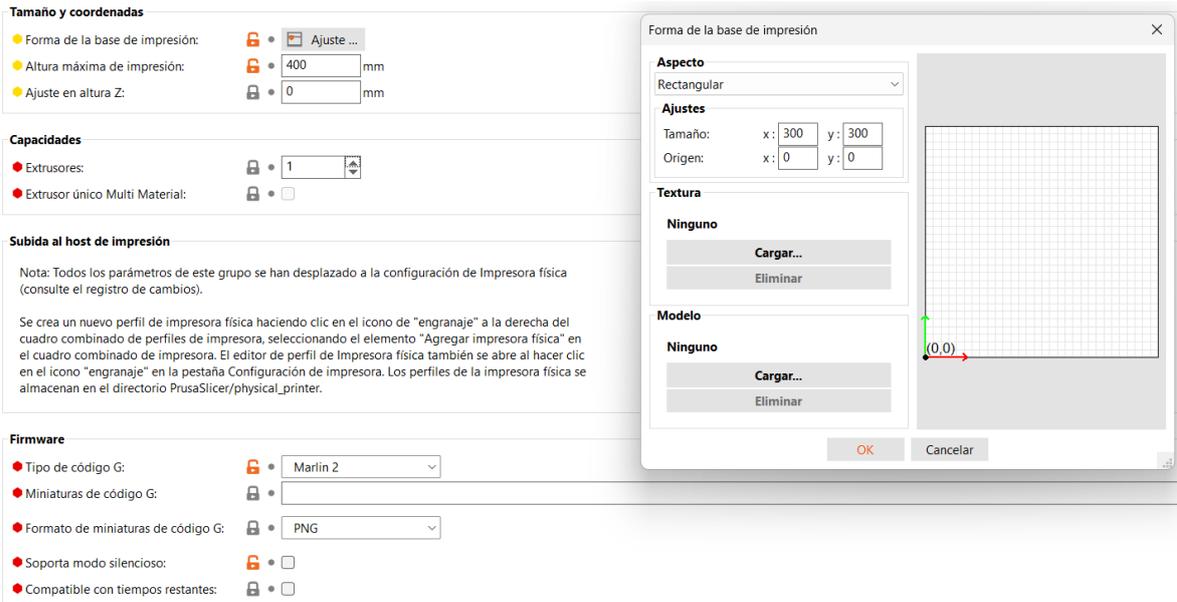


Figura 19 Configuración de impresora, general. [Propia]

2.4.2. Configuración del filamento

Para la configuración del filamento, se tuvo que seleccionar el material a utilizar, en este caso se seleccionó un filamento PLA de color gris, con un diámetro de 1.75 mm, una temperatura de boquilla entre 190-220 °C y una temperatura de cama entre 40-60 °C.



Figura 20 Configuración del filamento, filamento. [Propia]

2.4.3. Configuración de impresión

Para la configuración de impresión se mantuvieron constantes los parámetros de velocidad de impresión, número de capas superiores e inferiores, perímetros, relleno, falda, ángulo y altura máxima no planar.

Altura de la capa

- Altura de la capa: mm
- Altura de la primera capa: mm

Carcasas verticales

- Perímetros: (mínimo)
- Modo vaso:

Espesor de pared delgada del objeto recomendado para una altura de capa 0.18 y 2 líneas: 0.80 mm , 3 líneas: 1.18 mm , 4 líneas: 1.56 mm

Carcasas horizontales

- Capas sólidas: Arriba: Abajo:
- Espesor mínimo de pared: Arriba: mm Abajo: mm

La carcasa superior es de 0.36 mm de espesor con una altura de capa de 0.18 mm. El espesor mínimo de la carcasa superior es 0.14 mm.
 La carcasa inferior es 0.36 mm más grueso para la altura de capa de 0.18 mm. El espesor mínimo de la carcasa inferior es 0.14 mm.

Figura 21 Configuración de la impresión, capas y perímetros. [Propia]

Estos valores dependen del cabezal de impresora que se desea emplear, son importantes ya que el software generara una trayectoria en base a estos valores evitando colisiones del cabezal con la impresión, para el caso de estudio estos valores se determinaron previamente en el apartado 2.1.2.

Nonplanar layers (experimental)

- Use nonplanar layers:
- Maximum nonplanar angle: °
- Maximum nonplanar height: mm

Figura 22 Configuración de la impresión, apartado no planar. [Propia]

Relleno

- Densidad de relleno: %
- Patrón de relleno:
- Longitud del relleno del anclaje: mm o %
- Máxima longitud del relleno del anclaje: mm o %
- Patrón de relleno superior:
- Patrón de relleno inferior:

Figura 23 Configuración de la impresión, relleno. [Propia]

Falda

- Bucles (mínimo): 2
- Distancia del borde/objeto: 4 mm
- Altura de la falda: 1 capas
- Escudo de protección: Desactivado
- Longitud mínima de filamento extruido: 0 mm

Figura 24 Configuración de la impresión, falda y balsa. [Propia]

Velocidad para movimientos de impresión

- Perímetros: 60 mm/s
- Perímetros pequeños: 60 mm/s o %
- Perímetros externos: 60 mm/s o %
- Relleno: 60 mm/s
- Relleno sólido: 40 mm/s o %
- Relleno sólido superior: 40 mm/s o %
- Material de soporte: 60 mm/s
- Interfaz del material de soporte: 100% mm/s o %
- Puentes: 40 mm/s
- Relleno del hueco: 40 mm/s
- Alisado: 15 mm/s

Figura 25 Configuración de la impresión, velocidad. [Propia]

Se planteó imprimir seis veces en total cada geometría, tres veces en configuración planar y tres en configuración no planar variando únicamente la altura de capa, con los valores de 0.18, 0.28 y 0.38 mm. Se escogieron los valores a partir de 0,18 mm debido a que al imprimir con una altura de capa inferior se presentaron errores de impresión dado que la boquilla pasaba muy cerca de la capa anterior e iba arrastrando material causando levantamientos de material, hundimientos y agujeros.



Figura 26 Errores de impresión con altura de capa 0.1 mm. [Propia]

2.4.4. Errores en el laminado

Al aplicar la configuración no planar, al ser experimental, presentó errores de código-g a la hora de laminar los modelos 3D, el error principal que presentó el laminador al activar la configuración no planar, consistía en que si se realizaba cambios en algún parámetro con el modelo previamente importado las capas no planares aparecían en voladizo como capas planas encima del modelo como se muestra a la izquierda, la manera de evitar este error es volviendo a importar la pieza cada que se realice cambios en algún parámetro y así las capas no planares se cargan correctamente de acuerdo a la superficie curva que presente el modelo 3D.

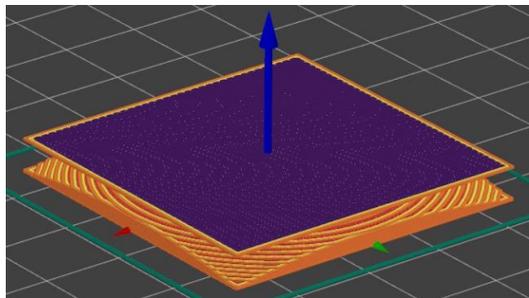


Figura 27 Errores en el laminado en configuración no planar. [Propia]

Otro error recurrente al laminar el modelo era la aparición de pequeñas líneas de trayectoria que se daban siempre en las aristas del modelo, dicho error parecía solucionarse al laminar repetidas veces el modelo hasta que dejaban de ser visibles. Sin embargo, aunque las dejen de ser visibles en el laminado, aparecerán en las aristas de la geometría.

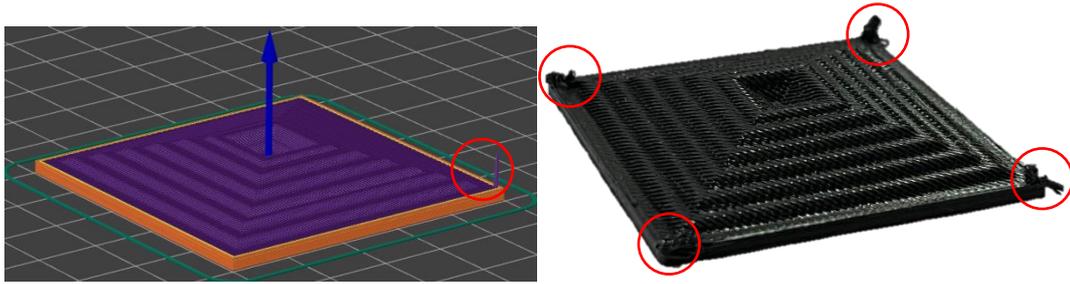


Figura 28 Líneas de trayectoria en las geometrías. [Propia]

El siguiente error aparece cuando se activan el apartado de piel difusa en la configuración de capas y perímetros. Este apartado, al igual que las capas no planares es experimental, por lo que es preferible mantenerla desactivada ya sea para configuración planar o no planar, ya que el acabado superficial después de la impresión no es bueno.

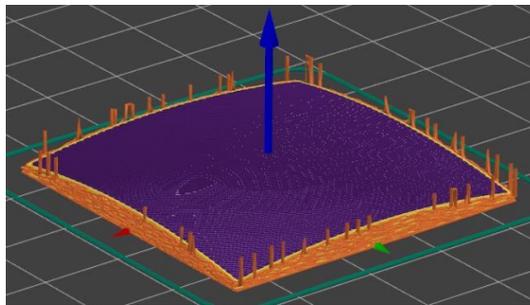


Figura 29 Piel difusa en la geometría. [Propia]

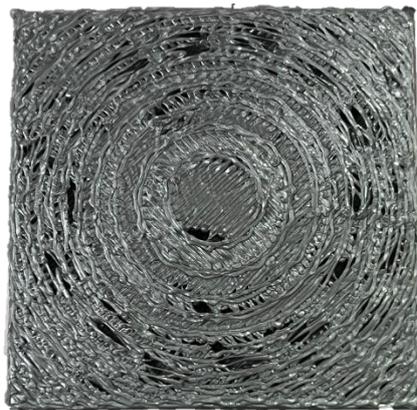


Figura 30 Piel difusa en impresión 3D planar. [Propia]

Por último, el laminado con configuración planar no presentó errores de código-g, por lo que no hubo complicaciones a la hora de laminar los modelos e imprimirlos.

2.5. Clasificación de geometrías

Cada geometría fue impresa 6 veces, 3 en configuración planar y 3 en configuración no planar, esto con el fin de poner a compararlas y evaluarlas más adelante.

Las geometrías se clasificaron de acuerdo con el número de test (T1, T2, T3), configuración de impresión (planar o no planar), capas superiores y altura de capa (0.18, 0.28 y 0.38 mm). Para facilitar la identificación de cada código-g y de cada modelo impreso se empleó la siguiente nomenclatura.

CNPT1_2_0.18, de donde:

- C, hace referencia a que fue impresa en impresora 3D de tipo cartesiana.
- NP, quiere decir que fue impresa en configuración No Planar.
- T1, nos indica el número del modelo.
- 2, nos indica el número de capas superiores.
- 0.18 nos indica la altura de capa con la que fue impresa.

2.6. Impresión de geometrías

Al tener los códigos-g listos, la impresora y la cama calibrada, se procede a imprimir cada pieza llevando un control del tiempo total de impresión para ambas configuraciones, la impresora ya cuenta con un temporizador que determina el tiempo total de impresión, pero también considera el tiempo que le toma en calentar la boquilla y la cama de impresión, por lo que es recomendable precalentar ambos complementos antes de imprimir la pieza, para de ese modo obtener un tiempo de impresión más preciso.

Una vez que cada pieza termine de imprimirse se procede a realizar una evaluación del peso y una clasificación con la nomenclatura presentada en el apartado anterior, para así proceder a realizar un análisis de cada modelo con ambas configuraciones de impresión.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Resultados

3.1.1. Calidad superficial

Para evaluar el impacto de la altura de capa en la calidad superficial, comparamos los modelos impresos mediante una evaluación cualitativa basada en la inspección visual. Además, identificamos y señalamos cualquier error presente en la impresión. Evaluaremos primero las impresiones no planares y después las compararemos con las planares.

Tomamos los modelos impresos de manera no planar de un mismo test para evaluar la influencia de la altura de capa en una misma geometría.

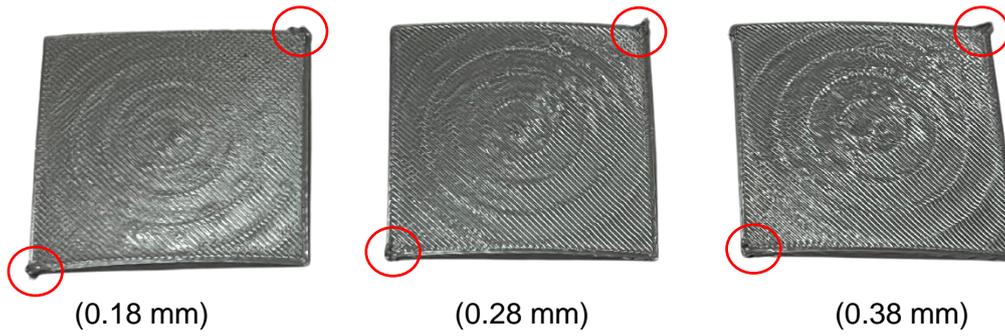


Figura 31 Modelo T1 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]



Figura 32 Vista lateral del Modelo T1 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]

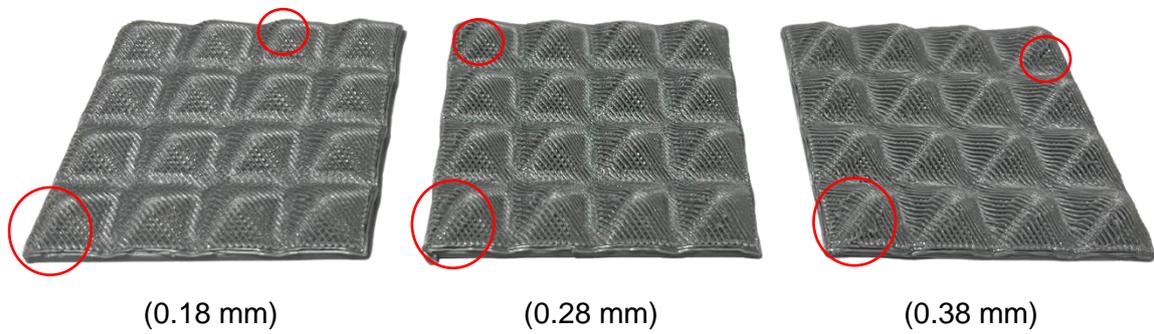


Figura 33 Modelo T2 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]



Figura 34 Vista lateral del Modelo T2 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]

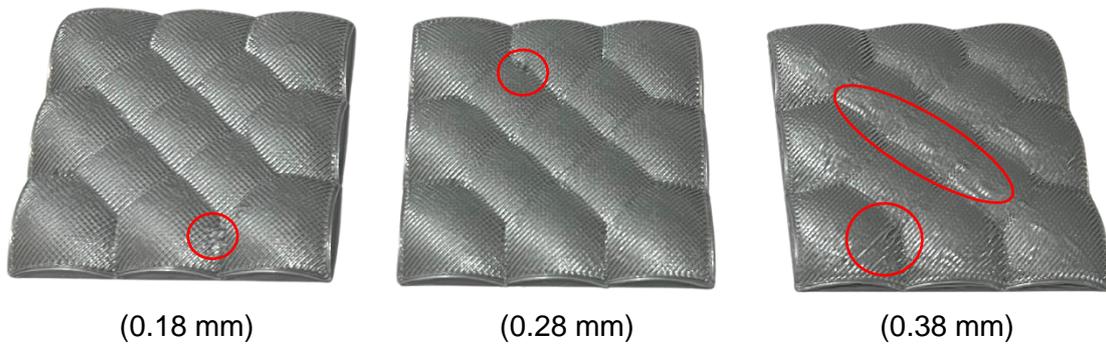


Figura 35 Modelo T3 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]

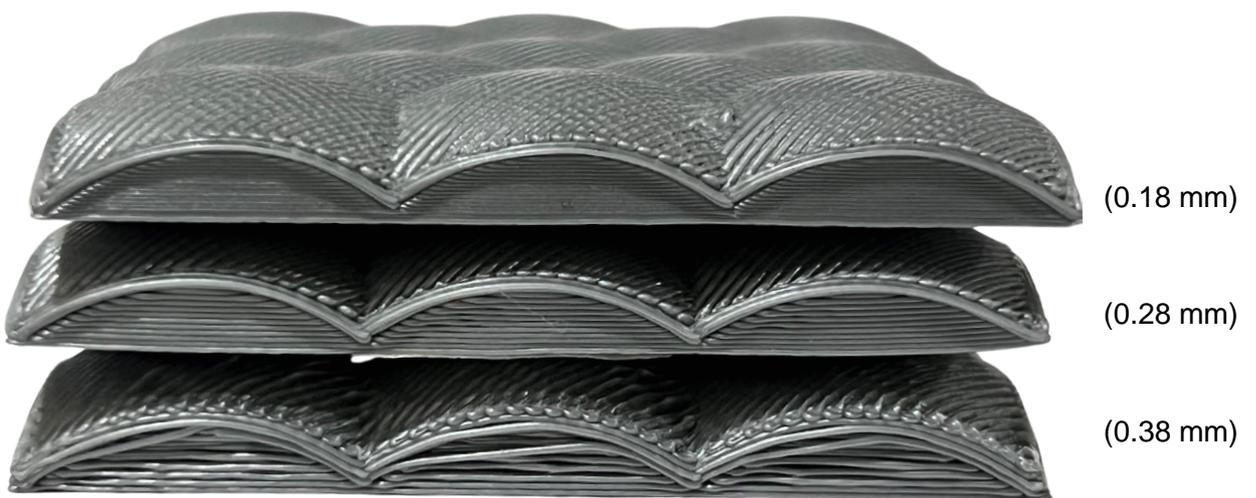


Figura 36 Vista lateral del Modelo T3 impreso a diferentes alturas de capa. [Propia]

De manera general podemos se puede observar que la calidad superficial disminuye conforme aumenta la altura de capa, esto porque las capas más delgadas pueden capturar con más precisión los detalles finos y las características de la geometría del modelo. Por

otro lado, una altura de capa mayor resulta en una pérdida de detalles y una apariencia más rugosa.

Las capas más finas tienden a producir una superficie más suave y menos escalonada, ya que las transiciones entre capas son menos evidentes.

La altura de capa también afecta la resistencia de la pieza. Una altura de capa más fina puede proporcionar una mejor adhesión entre las capas, resultando en una mayor resistencia mecánica.

En la Figura 31 se pueden observar de manera clara las fallas mencionadas anteriormente, resultado del Slicer. Durante el proceso de laminado, se generan trayectorias en el eje Z que, al imprimir, provocan picos en las esquinas de la geometría. También se aprecia una línea en el centro que se vuelve más evidente a medida que aumenta la altura de capa. Esta línea está relacionada con la adhesión entre capas, ya que al incrementarse la altura, se pierde adherencia, lo que resulta en la calidad superficial mostrada en las imágenes.

En la Figura 33 podemos apreciar la presencia de rebabas, estas siguen la dirección de la trayectoria de la boquilla, lo que indica que existieron colisiones al tratarse una geometría con pendientes más pronunciadas. Este error es más visible en el modelo con 0.38 mm de capa dado que se tiene un mayor margen de error en la deposición del material.

En la Figura 35 se puede observar el comportamiento combinado de las dos geometrías anteriores. Este modelo presenta curvas suaves con pendientes pronunciadas. El primer error notable es la presencia de rebabas en las pendientes. Sin embargo, en la parte superior de la geometría, donde las curvas son suaves, no se presentan errores. Los problemas en la geometría se encuentran principalmente en las pendientes lo que indica presencia de colisiones con entre la boquilla y la geometría.

Por otro lado, las vistas laterales de todas las geometrías nos permiten observar la adhesión entre capas, mostrando que con una mayor altura de capa se pierde adherencia. Esto ocurre porque, al aumentar la altura de capa, el grosor de cada capa es mayor, lo que puede dificultar la fusión adecuada del material depositado con la capa anterior. Además, las capas más gruesas tienden a enfriarse más lentamente y pueden experimentar una mayor contracción durante el enfriamiento. También, al incrementar la altura de capa, se amplía el margen de error en la deposición del material. Estos factores explican a la calidad observada en las figuras.

A continuación se presenta una comparación entre las geometrías impresas de manera planar y no planar para evaluar la calidad superficial.

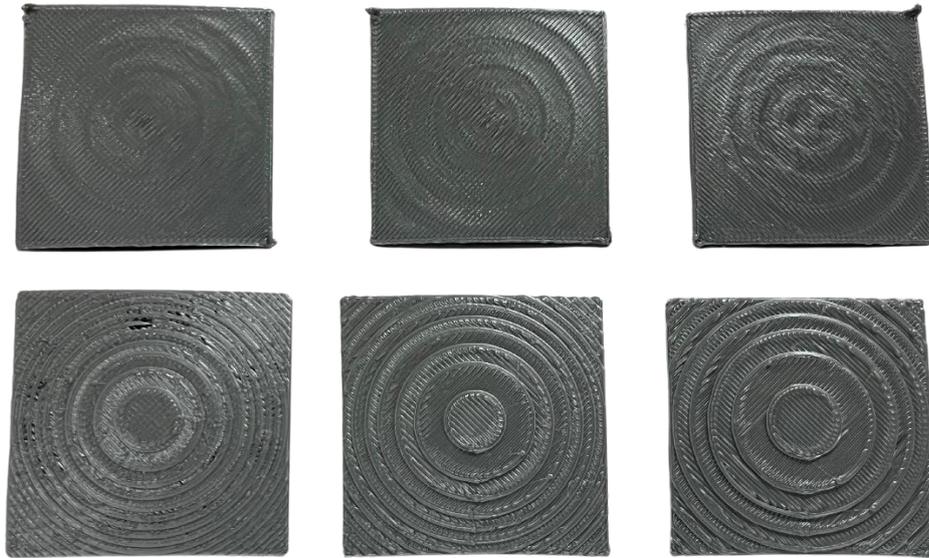


Figura 37 Comparación del modelo T1, impresa de manera planar y no planar. [Propia]

Al observar el modelo T1 impreso en ambas configuraciones planar y no planar, se puede apreciar una clara mejora en el acabado superficial. Por otra parte, el modelo T1 planar a 0.18 mm presenta agujeros en su estructura, esto puede ser debido a la falta de relleno.

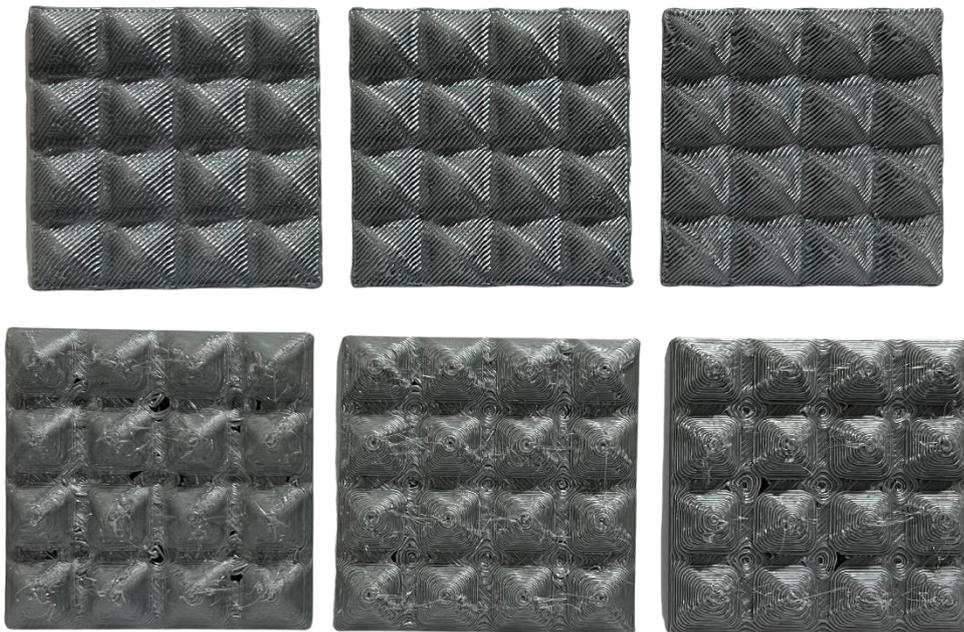


Figura 38 Comparación del modelo T2, impresa de manera planar y no planar. [Propia]

En el modelo T2 impreso en ambas configuraciones, también se puede apreciar una diferencia significativa en cuanto al acabado superficial. Por otra parte, las impresiones cartesianas presentan una serie de hilos de punto a punto, esto es principalmente por falta de reacción.



Figura 39 Comparación del modelo T3, impresa de manera planar y no planar. [Propia]

Para el modelo T3, de igual modo la calidad no planar es mucho mejor que la planar, en este modelo no se observan errores considerables para la forma planar.

A grandes rasgos las piezas más estéticas fueron las de menor altura de capa, mientras que las que peor acabado tienen son más de mayor altura de capa. Asimismo, las que presentan mejor acabado superficial son los modelos no planares.

Como parte de la aplicación no planar se presenta el siguiente modelo, este corresponde a la propela de un avión.



Figura 40 Propela de avión. [Propia]

La impresión no planar para este tipo de geometrías permite una mayor precisión en la creación de superficies curvas, lo que puede mejorar la eficiencia aerodinámica de la hélice. Con una adecuada parametrización la impresión no planar puede producir hélices más resistentes y duraderas. Otro aspecto importante es la distribución del material lo que podría reducir el peso sin comprometer la resistencia.

3.1.2. Tiempo de impresión

La determinación en el tiempo de impresión nos es de utilidad para comparar entre las dos formas de impresión y determinar cuál es más eficiente en cuanto a tiempo.

Tabla 2 Comparación de tiempo de impresión entre los métodos planar y no planar.

Tiempo de Impresión Cartesiana No planar			
Espesor capa	0.18mm	0.28mm	0.38mm
Test 1	18min	17min	16min
Test2	1h7min	1h	57min
Test3	45min	41min	41min
Tiempo de Impresión Cartesiana Planar			
Test 1	14min	13min	11min
Test2	40min	31min	26min
Test3	28min	23min	22min

Utilizar una altura de capa más fina aumenta el número total de capas y, por lo tanto, el tiempo total de impresión. Esto puede ser un factor para considerar si se requiere una alta calidad superficial pero el tiempo es limitado. Las capas más gruesas permiten imprimir más rápido, pero a costa de la calidad superficial.

Para el método planar, la impresión se realiza capa por capa en un solo plano horizontal antes de pasar a la siguiente capa. Este proceso es más sencillo y rápido porque los movimientos de la impresora son menos complejos.

A diferencia del método no planar, la boquilla de impresión sigue trayectorias más complejas moviendo sus ejes X, Y y Z simultáneamente, lo que puede aumentar el tiempo de impresión. La impresora de modo planar necesita realizar movimientos más precisos para suavizar la superficie, lo que ralentiza el tiempo de impresión.

3.1.3. Material empleado

Por último comparamos la cantidad de material aproximado que emplea cada modelo impreso de manera planar y no planar.

Tabla 3 Comparación de material empleado para impresión planar y no planar.

Cantidad de material de Impresión Cartesiana No planar Real			
Espesor capa	0.18mm	0.28mm	0.38mm
Test 1	3.65g	4.49g	4.93g
Test2	8.74g	9.78g	10.54g
Test3	7.49g	8.35g	9.34g
Cantidad de material de Impresión Cartesiana Planar Real			
Test 1	3.12g	3.67g	3.91g
Test2	7.74g	8.21g	8.42g
Test3	6.6g	6.97g	7.46g

Aunque la diferencia no es representativa tenemos que las impresiones no planares emplean más material que las planares. Esto tiene una explicación, y es que en la impresión planar, el material se deposita capa por capa en planos horizontales, lo cual puede resultar en una distribución de material ineficiente dejando espacios vacíos dentro del objeto. Mientras que la impresión no planar permite una mayor variabilidad en la trayectoria de la boquilla, lo que puede resultar en una mayor densidad de material depositado en ciertas áreas para mejorar la adhesión entre capas y la integridad estructural.

A continuación se presenta una tabla resumen con los parámetros estudiados.

Tabla 4 Comparación entre Impresión 3D Planar y No Planar

Características	Impresión 3D Planar	Impresión 3D No Planar
Movimiento	Extrusión de material en capas horizontales planas.	Extrusión de material en trayectorias tridimensionales sobre superficies curvas.
Adhesión entre Capas	Menos eficiente debido a la disposición en capas horizontales.	Mejor adhesión debido a la impresión en superficies curvas.
Calidad de Superficie	Superficies con escalonamientos visibles.	Superficies suaves, más estéticas sin escalonamientos visibles.
Software Requerido	Software estándar de slicing.	Software especializado para generar trayectorias de impresión no planar.
Hardware Requerido	Compatible con la mayoría de impresoras 3D.	Requiere modificaciones en la impresora.
Tiempo de impresión	Más rápida debido a la simplicidad de movimientos.	Puede ser más lenta debido a la complejidad de los movimientos y trayectorias.
Material empleado	Empieza menos material.	Empieza más material debido a su trayectoria permite mayor densidad del material.

3.2. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio y basándonos en las comparaciones realizadas, se puede afirmar que la impresión 3D no planar mejora significativamente el acabado superficial en comparación con la impresión 3D planar. Sin embargo, hay limitaciones, especialmente en el software empleado para generar las trayectorias no planares. Al ser experimental, este software presenta errores que afectan directamente la calidad de las piezas. No todos los modelos son adecuados para la impresión no planar; los que más se benefician son aquellos con pendientes suaves. De momento el proceso de laminación es lento e ineficiente lo cual nos limita a imprimir geometrías más complejas de manera no planar como un cangilón el cual tiene una aplicación más direccionada a la industria.

En cuanto a la calidad superficial, observamos que una mayor altura de capa empeora la adhesión entre capas, evidenciado en modelos con capas sueltas. Esto se debe a que las capas gruesas se enfrían lentamente, impidiendo una adecuada adhesión de la capa siguiente. Por el contrario, una altura de capa más fina mejora la adhesión.

Otro problema identificado es la aparición de rebabas, causadas por un fenómeno con la boquilla que ocurre cuando el diámetro externo bordea la impresión, levantando material. Los agujeros presentes también se deben al fenómeno de la boquilla; al generar el relleno, el diámetro externo bordea las paredes afectando el relleno, lo que provoca hundimientos en capas superiores por falta de soporte.

En cuanto al tiempo de impresión, no se observa una diferencia significativa entre imprimir en 3D planar y no planar, sin embargo, si lo comparamos con la impresión 3D de una impresora tipo delta, esta diferencia se empieza a notar más. Esto se debe a la configuración del robot delta, donde la posición de sus ejes permite un recorrido más corto del cabezal de impresión en comparación con una impresora cartesiana.

Finalmente, en términos de material empleado, las diferencias no son significativas. No obstante, la impresión 3D no planar utiliza más material que la planar debido a las trayectorias de impresión. En la impresión planar, el material se deposita capa por capa en planos horizontales, dejando espacios vacíos. En cambio, la impresión no planar permite una mayor variabilidad en la trayectoria de la boquilla, resultando en una mayor densidad de material depositado.

3.3. Recomendaciones

El software experimental presenta varios defectos en el proceso de laminado, no es apto para todas las piezas, especialmente con geometrías muy complejas, pero en general funciona bien con curvas suaves. Por otra parte, el proceso de laminado es muy lento, por lo que habrá que tener mucha paciencia, el laminar una figura compleja puede tardar desde varias horas a un día entero en generar el código G por lo cual no es factible trabajar con geometrías complejas.

El proceso de laminado no planar es automático y mixto, esto quiere decir que se imprimen tanto capas planares como no planares, el inconveniente de esto es que en ciertas figuras las capas no planares se imprimen una vez que ya hay paredes bastante altas, lo que causa colisiones al no tener una boquilla bastante delgada y larga. En otros casos las capas no planares se encuentran dentro de la geometría y, al ser las son las últimas en imprimirse, la boquilla puede dañar el modelo mientras sigue su trayectoria no planar. Se debe tomar en cuenta esto antes de imprimir un modelo y para evitar esto podemos realizar una revisión de trayectorias en el Slicer para identificar posibles colisiones antes de iniciar la impresión. Para obtener un acabado excelente se necesitan muchas capas superiores, de lo contrario las capas no planares no serán lo suficientemente gruesas como para cubrir el escalonado que deja la impresión planar.

En cuanto al tiempo de impresión, para un control más preciso, es preferible precalentar la boquilla y la cama de impresión antes de comenzar a imprimir. Aunque cada impresora incluye un temporizador que determina el tiempo total de impresión, realizar esto antes de imprimir evitará contabilizar el tiempo necesario que le toma a la impresora calentar estos componentes, de esa manera proporcionará una medición más exacta del tiempo de impresión real.

El software permanece en estudio y en actualizaciones constantes, sin duda podría mejorarse con control y condiciones de como aplicar las capas no planares, lo ideal además de corregir los errores de laminado mencionados anteriormente, sería añadir una función que permita seleccionar las superficies a las que se deseen aplicar las capas no planares.

El estudio de impresión 3D no planar tiene potencial y ya se está aplicado en diferentes industrias. Sin embargo, es fundamental seguir investigando y perfeccionando esta tecnología para superar las limitaciones actuales y maximizar sus beneficios. Continuar con estos estudios permitirá mejorar la calidad de las impresiones, optimizar los procesos de laminado y abrir nuevas oportunidades para aplicaciones innovadoras en el futuro.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Wüthrich, M. Gubser, W. J. Elspass, and C. Jaeger, "A novel slicing strategy to print overhangs without support material," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/app11188760.
- [2] A. Ochoa Guevara, "ORIGEN Y AVANCE DE LA IMPRESIÓN 3D," *MC*, vol. 33, pp. 24–28, Aug. 2023.
- [3] D. Ahlers, M.- Fakultät, J. Zhang, and N. Hendrich, "3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation," 2018.
- [4] Loughborough University, "The 7 Categories of Additive Manufacturing," About Additive Manufacturing. Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [5] ICAMCYL, "División de Manufactura Aditiva y Componentes," Centro Internacional de Materiales Avanzados y Materias Primas. Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.icamcyl.com/es/division-de-manufactura-aditiva-y-componentes>
- [6] D. Bourell *et al.*, "Materials for additive manufacturing," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- [7] T. N. A. T. Rahim, A. M. Abdullah, and H. Md Akil, "Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites," Oct. 02, 2019, *Taylor and Francis Inc.* doi: 10.1080/15583724.2019.1597883.
- [8] Younext Healthcare, "Impresión/modelado por deposición fundida (FDM)," Younext . Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.younext.es/tecnologia-ferulas-3d-personalizadas/>
- [9] B. M. Rodríguez, "ESTUDIO SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN UNA IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA FDM," Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [10] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1286–1296. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [11] M. Prabhakar, A. K. Saravanan, A. Lenin, I. Ieno, K. Mayandi, and S. R. Piramanayagam, "A short review on 3D printing methods, process parameters and materials," *Mater Today Proc*, vol. 45, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.225.
- [12] A. Martel, "The Types Of FDM 3D Printer," 3Dnatives. Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>
- [13] J. Prusa, "Tipos de impresoras y sus diferencias.," Prusa Research. Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: https://help.prusa3d.com/es/article/tipos-de-impresoras-y-sus-diferencias-_112464
- [14] P. Castellanos, "Robots cartesianos: Definición, tipos y funcionamiento en la Industria," *Manufactura Latam*. Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available:

<https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/robots-cartesianos-definicion-tipos-y-funcionamiento-en-la-industria>

- [15] D. Chakraborty, B. Aneesh Reddy, and A. Roy Choudhury, "Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling," *CAD Computer Aided Design*, vol. 40, no. 2, pp. 235–243, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.cad.2007.10.014.
- [16] D. Ahlers, F. Wasserfall, N. Hendrich, J. Zhang, and N. Hendrich, "3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation", doi: 10.13140/RG.2.2.34888.26881.
- [17] J. B. Khurana, S. Dinda, and T. W. Simpson, "ACTIVE - Z PRINTING: A NEW APPROACH TO INCREASING 3D PRINTED PART STRENGTH."
- [18] D. Ahlers and F. Chagon, "Windows portable 2.6," Github.