

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 DELTA.**

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

DAVID ALEJANDRO SUÁREZ GARCIA

david.suarez@epn.edu.ec

Ing. VÍCTOR HUGO HIDALGO DIAZ, D.Sc.

victor.hidalgo@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, DAVID ALEJANDRO SUÁREZ GARCIA 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.

DAVID ALEJANDRO SUÁREZ GARCIA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID ALEJANDRO SUÁREZ GARCIA 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.

DAVID ALEJANDRO SUÁREZ GARCIA

VÍCTOR HUGO HIDALGO DIAZ

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo y confianza en mi desarrollo como persona, por estar presente en lo posible. Gracias por darme el enfoque del camino que debía tomar y por las comodidades que me brindaron. Este trabajo se terminó solo por ustedes.

A mi tías y tío por parte de Madre, por sus palabras y presencia. Gracias a ellos por siempre confiar en mis capacidades y estar pendiente de mí. Este trabajo también es para ustedes.

AGRADECIMIENTO

Primero agradecerles a mis Padres, los cuales facilitaron este logro. A mi Madre, mi motivación principal, ya que lo único que me importa es que se sienta orgullosa y poder ayudarla en todo lo que pueda para el futuro. A mi Padre, que me sirvió como guía con sus consejos, ya que con su carácter y manera de ver las cosas me ayudaron a siempre tomar la decisión correcta de las cosas. Gracias.

A mi tía Ruth, a su conyugue Diego Ortiz y sus hijas Arianna y Camila, por ser mi segunda familia, gracias por su apoyo, cariño y estar siempre presente cuando los demás no podían.

A mis amigos, Anthony Macas, Diego Rivera, Santiago Cisneros, Jonathan Malliquinga y Paul Peñaherrera, pocos son los nombres que se llega a recordar fácilmente después de tantos años, gracias por su paciencia, sincera amistad y momentos que ayudaron a no sentirme en soledad.

A mi hermana, Tiffany Suárez, por haber empezado esta travesía juntos y haberme ayudado en todo lo que podía, gracias por ser un ejemplo de una buena y justa persona.

A mi colega tatuador y amigo, Patricio Criollo, por ser un ejemplo de esfuerzo y motivación, gracias por siempre brindarme sus palabras de apoyo y de confianza hacia todo lo que hago.

Finalmente, un agradecimiento especial al director encargado, Ing. Victor Hidalgo D. Sc, por su paciencia y apoyo en el 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. Manufactura Aditiva.....	4
1.4.3. Manufactura por extrusión de filamento polimérico.....	5
1.4.3.1 Parámetros del proceso en FDM.....	6
1.4.4. Impresora 3D tipo Delta.....	6
1.4.5. Impresión 3D No planar: Descripción y Software.....	7
2. METODOLOGÍA.....	9
2.1. Modificaciones de impresora 3D.....	11
2.2. Obtención de software laminador (slicer).....	13
2.3. Obtención de modelos 3D.....	14
2.4. Laminado de modelos 3D.....	14
2.5. Impresión de modelos 3D.....	18
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	18
3.3 Resultados.....	18
3.3.1 Calidad superficial.....	18
3.3.2 Masa y tiempo de impresión.....	23
3.3.3 Error de aproximación.....	24
3.4 Conclusiones.....	25

3.5	Recomendaciones	26
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Acabado final impreso en 3D FDM. Izquierda: Impresión 3D planar. Derecha: Impresión 3D no planar. [4].....	1
Figura 2 Proceso general de impresión 3D	3
Figura 3 Principio de modelado por deposición fundida [5]	5
Figura 4 Parámetros que influyen en el proceso de FDM [5].....	6
Figura 5 Robot delta a la izquierda, Impresora cartesiana a la derecha	7
Figura 6 Capa laminada con (A) capas planas y (B) capas no planas [10].....	8
Figura 7 Parámetros principales para la configuración no planar	8
Figura 8 Flujograma de la metodología empleada	10
Figura 9 Ángulo y altura máxima no planar de boquilla original de la impresora 3D Delta	11
Figura 10 Ángulo y altura máxima no planar de boquilla nueva instalada en la impresora 3D delta	12
Figura 11 Distancia de longitud de rosca de boquilla nueva (a la izquierda) y boquilla antigua (derecha).....	12
Figura 12 Espacio entre roscas con bloque antiguo (a la izquierda) y bloque nuevo (a la derecha)	13
Figura 13 Modelos 3D seleccionados, T1 (a la izquierda), T2 (centro), T3 (derecha).....	14
Figura 14 Ajustes de configuración de impresora dentro del PrusaSlicer	15
Figura 15 Ajustes de configuración de filamento dentro del PrusaSlicer	15
Figura 16 Errores presentados al imprimir con una altura de capa de 0.2 mm.....	16
Figura 17 Ajustes que se mantuvieron constantes dentro del PrusaSlicer	16
Figura 18. Errores de laminación con configuración no planar	17
Figura 19 Impresora 3D Delta durante impresión.....	18
Figura 20 Modelo "T1" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)	19
Figura 21 Modelo "T2" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)	19
Figura 22 Modelo "T3" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)	19
Figura 23 Efecto del diámetro de boquilla exterior al imprimir curvas muy inclinadas[4] .	20
Figura 24 Muestra de error en la mayor inclinación que presenta el modelo "T3"	21
Figura 25 Modelo "T1" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha).....	21

Figura 26 Modelo "T2" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha).....	22
Figura 27 Modelo "T3" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha).....	23
Figura 28 Error de acumulación de material en aristas del modelo "T1"	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del robot delta	7
Tabla 2 Tiempo de impresión de cada modelo en base a la altura de capa y configuración	23
Tabla 3 Masa de cada modelo en base a la altura de capa y configuración.....	24

RESUMEN

La impresión 3D, una tecnología en constante evolución presenta dos enfoques importantes: la impresión planar y la no planar. Esta tesis tiene como objetivo comparar y analizar ambos métodos, explorando sus ventajas, desventajas y diferencias. Mediante un análisis detallado en base a un protocolo de pruebas, se evaluaron aspectos como la calidad superficial, la complejidad geométrica y la eficiencia de producción. Los resultados indican que la impresión 3D no planar ofrece mejoras significativas en términos de calidad superficial, aunque presenta desafíos técnicos que aún están en fase de investigación. Estas conclusiones aportan nuevos análisis comparativos para futuras investigaciones en la tecnología de fabricación aditiva.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, manufactura aditiva, impresión planar, impresión no planar, tecnología de fabricación.

ABSTRACT

3D printing, a constantly evolving technology presents two major approaches: planar and non-planar printing. This thesis aims to compare and analyze both methods, exploring their advantages, disadvantages and differences. Through a detailed analysis based on a test protocol, aspects such as surface quality, geometric complexity and production efficiency were evaluated. The results indicate that non-planar 3D printing offers significant improvements in terms of surface quality, although it presents technical challenges that are still under investigation. These findings provide new comparative analyses for future research in additive manufacturing technology.

KEYWORDS: 3D print, additive manufacturing, planar printing, non-planar printing, manufacturing technology.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Partiendo de que con la tecnología de impresión 3D “si puedes dibujarlo, puedes imprimirlo”[1], el proceso genérico de la tecnología de impresión 3D comprende las fases de diseño, impresión y postproducción. Concretamente, en la fase de impresión, la norma ISO/ ASTM 52900:2015[2], establece que se pueden usar una amplia variedad de materiales en la Manufactura Aditiva (AM), específicamente en la impresión capa por capa.

La Manufactura Aditiva convencional capa por capa, mediante un software CAM corta un objeto 3D en varios planos bidimensionales, los cuales indican a la impresora donde depositar el material, las piezas impresas por este método presentan varias propiedades desfavorables como capas visibles, superficies rugosas, anisotropía, principalmente la necesidad del uso de soportes [3][4]. Algunas de estos defectos pueden ser resueltos aumentando el número de capas, volviendo menos evidente la distancia entre capas y por ende mejorando el acabado de la pieza, pero aumentando significativamente el tiempo de impresión requerido[4], además de que el aumento de capas en la impresión tiene un efecto perjudicial en la resistencia a la tracción[3].

El objetivo de este trabajo es poner en práctica el uso de impresión 3D no planar para estudiar y comparar la variabilidad de los defectos descritos anteriormente en la impresión 3D convencional (Fig. 1), este método de impresión se aplica mediante el uso de un algoritmo que en términos generales usa como parámetros principales la altura máxima no planar y el ángulo máximo no planar, para así generar trayectorias curvas sin la presencia de colisiones con capas ya impresas [4].

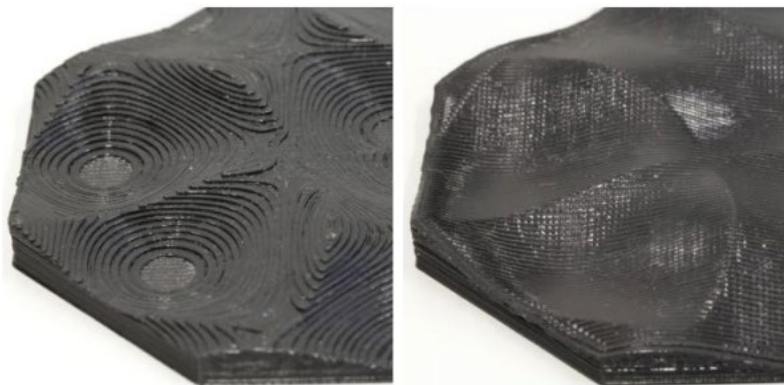


Figura 1 Acabado final impreso en 3D FDM. Izquierda: Impresión 3D planar. Derecha: Impresión 3D no planar. [4]

1.1. Objetivo general

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

1.2. Objetivos específicos

- Realizar un protocolo de pruebas para impresión 3D no planar en una impresora con configuración Delta.
- Identificar fallos al emplear la configuración no planar tanto en software como en impresión.
- Evaluar como el cambio de parámetros específicos afecta la calidad de las geometrías impresas.
- Comparar los resultados obtenidos entre impresión planar y no planar.

1.3. Alcance

El presente trabajo de integración curricular tiene como enfoque el estudio de la impresión 3D no planar en una impresora 3D cartesiana. El objetivo de determinar cómo la modificación de parámetros influye en la calidad superficial de los objetos impresos. Se realizó un análisis comparativo entre la impresión 3D convencional (planar) y la impresión 3D no planar, evaluando las mejoras en el acabado superficial al adoptar esta última tecnología. Para ello, se llevaron a cabo pruebas controladas en los que se variaron parámetros clave como la velocidad de impresión y la altura de capa. Los resultados obtenidos permitieron identificar las condiciones óptimas que maximizan la calidad superficial de las piezas impresas utilizando técnicas no planas. Este estudio aporta conocimientos importantes para la optimización de los procesos de fabricación aditiva, ofreciendo directrices prácticas para la implementación de la impresión 3D no planar en diversas aplicaciones industriales y de investigación

1.4. Marco teórico

1.4.1. Impresión 3D

La impresión 3D, es una tecnología revolucionaria que permite la creación de objetos tridimensionales a partir de modelos 3D digitales, comenzó a tomar forma en 1989 cuando la empresa Stratasys patentó el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés), este método sentó las bases para el desarrollo de la impresión 3D. Sin embargo, no fue hasta el 2009 que caduca la patente de Stratasys, en donde múltiples empresas ingresaron al mercado desencadenando una proliferación de impresoras 3D accesibles y asequibles, además, de una expansión significativa de las aplicaciones de esta tecnología. [5]

Un factor crucial en la evolución de la impresión 3D fue el movimiento RepRap (Replicating Rapid Prototyper), iniciado en el año 2004 por un profesor inglés de ingeniería mecánica llamado Adrian Bowyer. Su objetivo era el de desarrollar una impresora 3D capaz de replicarse a sí misma. La filosofía de código abierto detrás de RepRap promovió la colaboración y el intercambio de conocimientos entre entusiastas y desarrolladores de todo el mundo, resultando en el surgimiento de numerosas innovaciones y mejorar en el diseño y funcionalidad de las impresoras 3D. Este movimiento democratizó el acceso a esta tecnología, volviéndola más asequible y disponible, además de acelerar su avance y fomentando una comunidad global dedicada a la creación y el uso de impresoras 3D. [5]

En términos generales se puede decir que la impresión 3D se basa en tres pasos: Generación del modelo 3D (Fig. 2 (a la izquierda)), laminado de archivo de impresión (slicing) (Fig. 2 (centro)) e impresión (Fig. 2 (derecha)). La generación del modelo 3D puede culminarse ya sea diseñando el objeto 3D en algún software CAD, descargándose de internet o escaneando objetos existentes. Para preparar el archivo de impresión se requiere de un software slicer para poder obtener las trayectorias del objeto 3D y generar instrucciones para que la impresora pueda leer e imprimir el modelo. Finalmente se procede a la impresión del modelo real en una impresora 3D. [4]

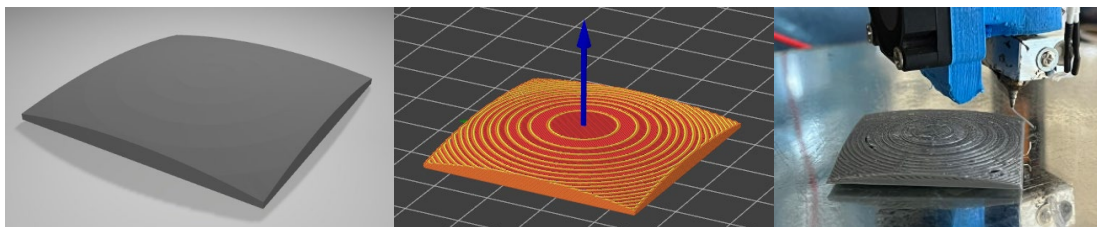


Figura 2 Proceso general de impresión 3D

Generación del modelo 3D

El inicio del proceso en la generación del modelo 3D es tener claro que se va a modelar, con esto en mente se puede buscar en internet el objeto deseado a imprimir para solamente descargarlo o sí se tiene a disponibilidad el objeto llegar a escanearlo y así obtener el modelo en 3D. En el caso de no optar por las opciones anteriores se puede generar el modelo 3D por un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), en el cual se utilizan computadoras con una herramienta CAD para elaborar un modelo 3D con mayor rapidez y precisión [5].

Sin importar la manera en la que se consiga o genere el modelo 3D, este debe estar en un formato que el software de laminado (slicer) pueda procesar, los formatos más comunes son STereoLithography (STL), OBJ y formato de archivo de fabricación aditiva (AMF).

Laminado (Slicing)

Las impresoras 3D como toda máquina necesitan de órdenes para poder materializar el modelo 3D, estas órdenes se obtienen al procesar el archivo del modelo 3D teseleado en un software de laminado (slicer) en donde se guardan como un archivo de texto que contiene comandos de control numérico por computadora, en el caso de las impresoras 3D este archivo es llamado código-g [6].

Impresión 3D

Una vez obtenido el código-g del software de laminado (slicer) se debe ejecutar en la impresora para poder materializar el modelo 3D, el archivo puede transferirse de varias maneras según los métodos disponibles por la máquina, ya sea vía USB, SD o cable LAN. Una vez la impresora 3D lea el código-g esta procederá a ejecutar los comandos de forma automática para finalmente materializar el modelo 3D.

1.4.2. Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva (AM) es un término que hace referencia a aquellas tecnologías que unen material sucesivamente para llegar a crear objetos físicos según un modelo 3D de referencia [2]. Este método ha demostrado ser idóneo para la creación de prototipos rápidos en la industria y para la producción de componentes funcionales complejos. Sin embargo, existen dos limitaciones principales, la mala calidad de la superficie y la limitada variedad de materiales [7].

Para que un proceso de fabricación clasifique como manufactura aditiva debe involucrar tres aspectos importantes:

- El uso del diseño asistido por computadora (CAD), usado para crear modelos tridimensionales.
- Corte y generación de trayectorias para herramientas, los modelos tridimensionales creados anteriormente se preparan en un formato que pueda ser interpretado por la máquina de fabricación aditiva.
- Conversión del modelo 3D en un producto tangible, con el uso de materiales de ingeniería como plásticos, polvos metálicos, compuestos, etc. [7]

1.4.3. Manufactura por extrusión de filamento polimérico

La manufactura aditiva por extrusión de filamento o modelado por deposición fundida (FDM), utiliza principalmente como materia prima polímeros. El proceso comienza calentando el filamento hasta su punto de fusión, el cual después es extruido a través de la boquilla de la máquina (impresora 3D) Fig.2 para ser depositado en la placa de construcción.

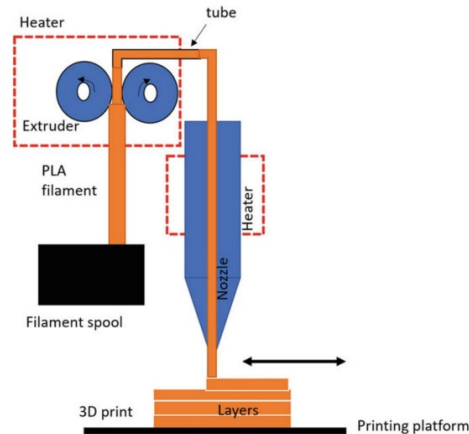


Figura 3 Principio de modelado por deposición fundida [5]

Adicionalmente, los polímeros más usados para FDM son PLA (Ácido poliláctico), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), HDPE (Polietileno de alta densidad), PPSU (Polifenilsulfona) e HIPS (Poliestireno de alto impacto) [6], de los cuales el usado en el estudio es el PLA, su temperatura de punto de fusión oscila entre 180 y 220 °C, con la ventaja de que la mayoría de impresoras 3D rentables y de bajo consumo energético pueden extruirlo, además, en su forma semicristalina este material ha demostrado tener un buen módulo de flexión, mejor tensión y resistencia a la flexión, además, el PLA está disponible comercialmente en el mercado en una variedad de colores y texturas a precios muy accesibles.[7]

1.4.3.1 Parámetros del proceso en FDM

El FDM está influenciado por varios parámetros como se resume en la Fig. 3, los parámetros se dividen en máquina y materiales. Los parámetros de la máquina son todos los especificados en el software slicer que se llegue a usar, en cambio, los parámetros de los materiales son los descritos por el fabricante del filamento a usar, las cuales influyen directamente en la extrusión y rendimiento de la impresión. [7]

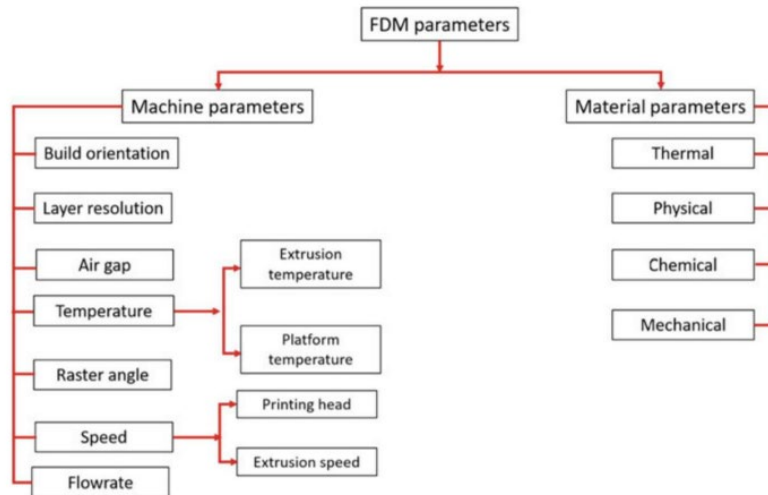


Figura 4 Parámetros que influyen en el proceso de FDM [5]

1.4.4. Impresora 3D tipo Delta

Las impresoras 3D Delta funcionan de manera diferente a las tradicionales, el principio fundamental en el que se basa este tipo de impresora es el de un robot Delta (Fig. 5)[8]

Un robot Delta es un robot paralelo que tiene una plataforma fija y otra móvil conectadas entre sí por tres cadenas cinemáticas, cada cadena cinemática se encuentra formada por dos eslabones junto con tres articulaciones esféricas pasivas, a diferencia de las impresoras con estructura delta, en donde se cuenta con 3 brazos que unen la plataforma móvil con 3 ejes paralelos que se mueven en el eje vertical. [5]



Figura 5 Robot delta a la izquierda, Impresora cartesiana a la derecha

La configuración Delta presenta varias ventajas sobre las configuraciones tradicionales, pero también presenta desventajas, entre las principales están:

Tabla 1. Ventajas y desventajas del robot delta [9]

Ventajas	Desventajas
Arquitectura más rígida	Cinemática compleja
Relación carga/peso muy superior	Espacio de trabajo reducido
Robot ligero	Calibración compleja
Alta precisión	Posiciones singulares complejas
Altas velocidades y aceleraciones	Tecnologías no desarrolladas

1.4.5. Impresión 3D No planar: Descripción y Software

La impresión 3D no planar es una novedosa técnica de fabricación aditiva que tiene como objetivo superar algunas de las limitaciones de la impresión 3D tradicional. Básicamente, consiste en que la extrusión va contornando la superficie real del modelo 3D en lugar de segmentarlo en varias capas planas [4]. Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y el principal problema que presenta es la generación de trayectorias (código-g).

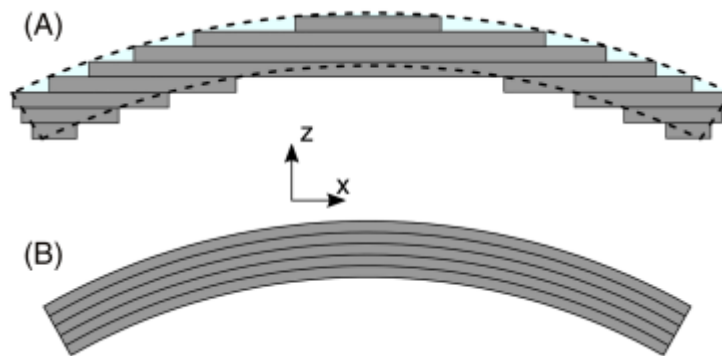


Figura 6 Capa laminada con (A) capas planas y (B) capas no planas [10]

Dentro de la generación de trayectorias, surge el problema de las posibles colisiones, el cual tendrá más relevancia en este estudio. Si se desea profundizar más de la generación de capas revisar el documento [11].

Las colisiones se pueden llegar a dar cuando el cabezal de impresión aplica material en superficies inclinadas debajo de capas ya impresas, por lo que se introducen dos parámetros para evitar colisiones: ángulo máximo no planar y la altura máxima no planar, los cuales son proporcionados por el usuario en base a su plataforma de impresión Fig. 7. Estos parámetros se proporcionan dentro del software laminador, el cual en base a estos creará una geometría 2D que simulará el cabezal de impresión y así generar las trayectorias sin colisiones.

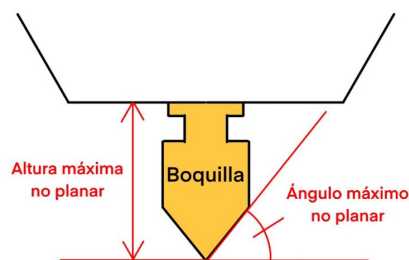


Figura 7 Parámetros principales para la configuración no planar

2. METODOLOGÍA

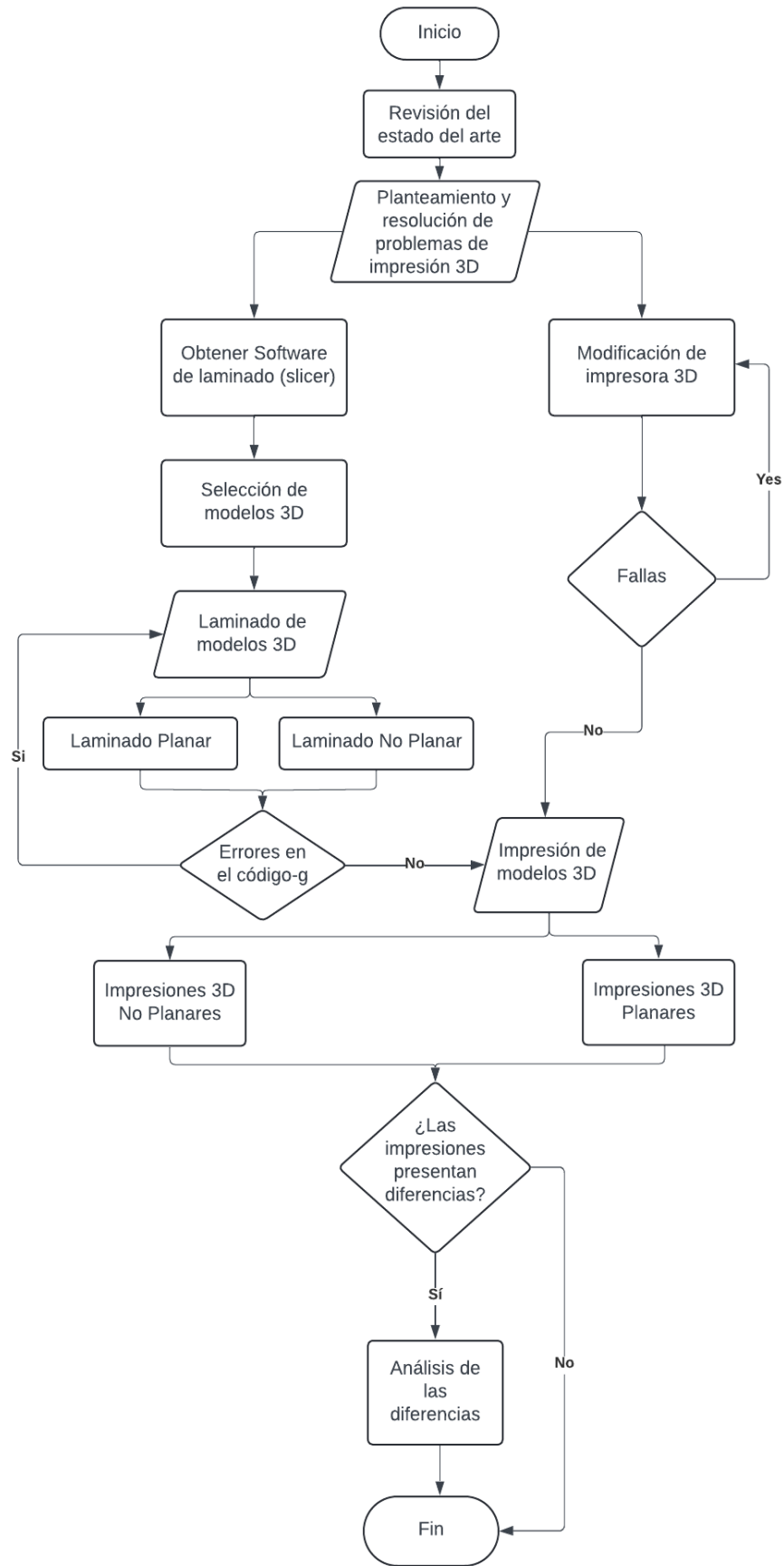


Figura 8 Flujograma de la metodología empleada

La metodología empleada abarca un marco experimental, en donde a partir del planteamiento de los problemas presentados para la impresión 3D en configuración planar y no planar, se procede a la modificación del hardware de la impresora 3D Delta implementada para el estudio y la obtención del software de laminado (slicer), para después seleccionar los modelos 3D a implementarse en un protocolo de pruebas seguido del respectivo proceso de laminación con configuración planar y no planar, finalizando en la etiqueta y clasificación de cada modelo impreso en base a sus parámetros de impresión y tipo de configuración.

2.1. Modificaciones de impresora 3D

La impresora 3D implementada para el estudio es de tipo delta con coordenadas cartesianas, la cual se desconoce su marca y modelo, dicha impresora tiene como características una cama de impresión circular con un diámetro de 200mm y una altura máxima de impresión de 300 mm.

Para la implementación de impresión 3D con configuración no planar se requiere tomar en cuenta los factores de ángulo y altura máximas de impresión no planar mencionadas en el apartado 1.4.5, por lo que para poder imprimir geometrías con altas pendientes de curva y asegurar que no existan colisiones del cabezal de impresión durante el protocolo de pruebas se tuvo que realizar modificaciones al hardware de la impresora 3D.

Inicialmente la impresora 3D Delta contaba con una boquilla de latón convencional de 0.4 mm, la cual no era apta para la impresión 3D no planar debido a reducido ángulo y altura de impresión no planar Fig. 9. Por lo que, se optó por la compra de una boquilla de latón la cual cuenta con una extensión en su punta de acero inoxidable Fig. 10, la cual cuenta con una mejora de los parámetros mencionados.

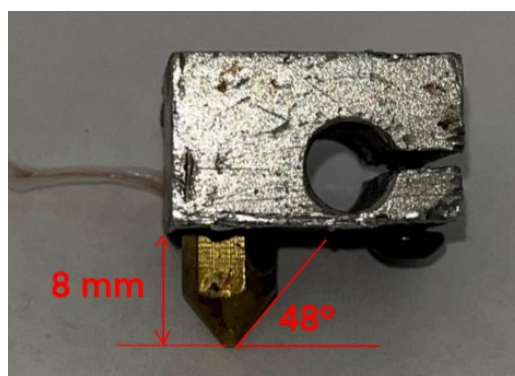


Figura 9 Ángulo y altura máxima no planar de boquilla original de la impresora 3D Delta

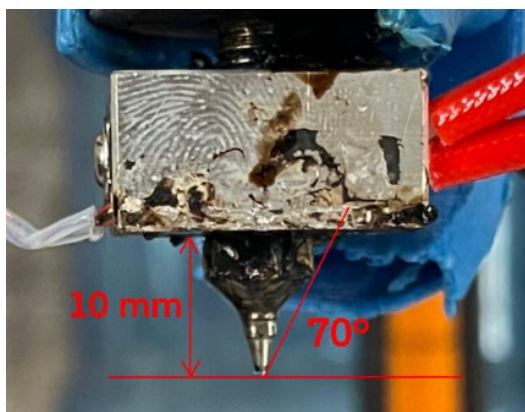


Figura 10 Ángulo y altura máxima no planar de boquilla nueva instalada en la impresora 3D delta

Una vez instalada la boquilla nueva en la impresora 3D, posteriormente, se inició el proceso de impresión. Sin embargo, durante la impresión, se presentaron problemas de bloqueo de material, lo que impidió que el filamento se extruyera correctamente. Por lo que, se procedió a desensamblar el bloque calefactor junto a la boquilla del cabezal de impresión y, al hacerlo, se observó que había material acumulado en el interior. Esta acumulación estaba obstruyendo el flujo normal de filamento durante el proceso de impresión, la acumulación se produjo por una cavidad creada dentro del bloque calefactor entre los finales de rosca de la boquilla y el disipador, dado que, la longitud de rosca de la nueva boquilla es menor a la longitud de rosca de la boquilla cambiada Fig. 11.

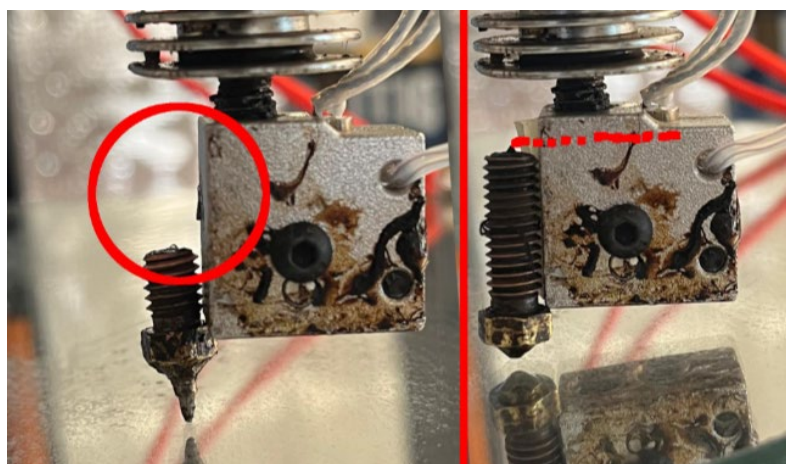


Figura 11 Distancia de longitud de rosca de boquilla nueva (a la izquierda) y boquilla antigua (derecha)

Para resolver el problema de acumulación de material, se optó por cambiar el bloque calefactor por uno que tenga una menor longitud de rosca interna en la que se conecta la boquilla y el disipador, con este cambio se evita la cavidad donde se acumula el material ya que los finales de rosca de ambos elementos se tocan dentro del bloque Fig. 12.

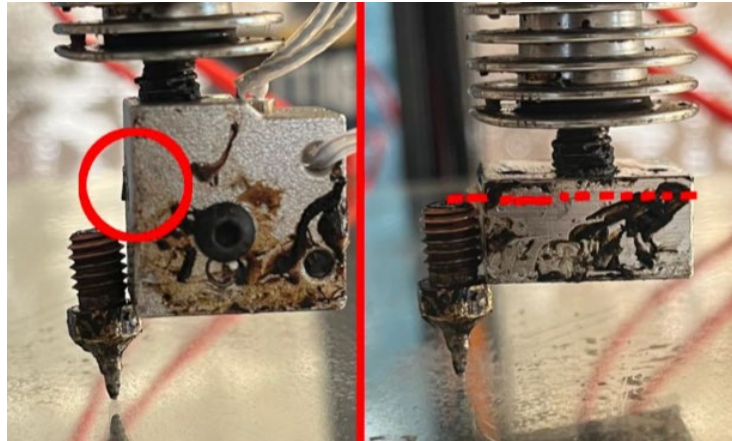


Figura 12 Espacio entre roscas con bloque antiguo (a la izquierda) y bloque nuevo (a la derecha)

Después de cambiar la boquilla y el bloque calefactor, fue necesario calibrar la cama de impresión para asegurar una correcta adhesión del filamento y obtener una calidad de impresión óptima.

2.2. Obtención de software laminador (slicer)

Durante el estudio, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda de un software laminador para modelos 3D que cuente con configuración no planar, utilizando 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 con la dificultad de que algunos archivos esenciales ya no estaban disponibles o estaban desactualizados, lo que impidió su correcta instalación. Afortunadamente, el segundo software que ese encontró se instaló con éxito, proporcionando las herramientas necesarias para continuar con el estudio de impresión 3D no planar. Esta elección fue crucial para asegurar la precisión y calidad en la preparación de los modelos impresos, permitiéndonos avanzar con confianza el estudio.

Los softwares mencionados anteriormente se pueden encontrar en los siguientes enlaces:

1. <https://github.com/Zip-o-mat/Slic3r/tree/nonplanar-thesis> [4]
2. <https://github.com/teachingtechYT/PrusaSlicer/releases/tag/windows> [12]

El primer software requiere del sistema operativo Linux y de varios programas requisitos que no están actualizados, por lo que no se pudo culminar su instalación. Por otro lado, el segundo software “PrusaSlicer” fue muy fácil de obtener ya que solo se tuvo que descargar

un archivo comprimido en el cual ya estaba un ejecutable, el programa laminador cuenta con la extensión para impresión de capas no planares la cual sigue siendo experimental.

2.3. Obtención de modelos 3D

La impresión 3D con capas no planares sigue en estudio por lo que no todas las geometrías son adecuadas para imprimir con esta configuración. La selección se centró en la identificación de modelos que destaquen en su sencillo diseño y su superficie, al hablar de la superficie de los modelos se hace referencia a la presencia de una o varias pendientes que a la hora de laminar el modelo 3D con configuración no planar no existan errores de código-g y además en las que se pueda percibir fácilmente la impresión con configuración no planar.

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, de todos los modelos encontrados se escogieron los que se presentan en la Fig. FFF con su respectiva denominación. El modelo "T1" se seleccionó debido a que posee en su superficie con una pendiente 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 lo que permitirá evaluar la selección de la boquilla y a la capacidad de su geometría de evitar colisiones y 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.

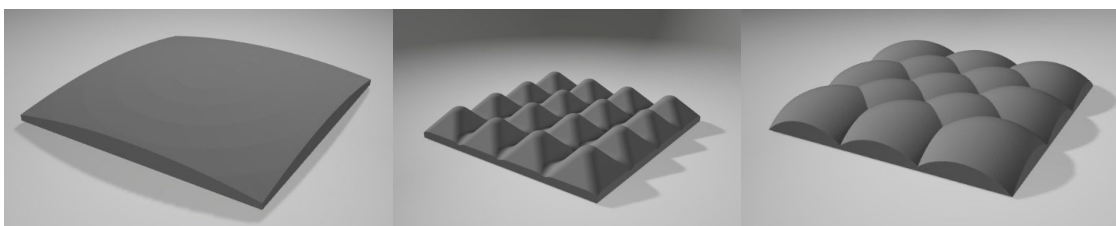


Figura 13 Modelos 3D seleccionados, T1 (a la izquierda), T2 (centro), T3 (derecha)

2.4. Laminado de modelos 3D

Para el laminado de cada modelo 3D en el software "Prusa Slicer", se inició estableciendo parámetros tanto para impresión planar como no planar en tres tipos de configuraciones dentro del laminador: configuración de la impresora, configuración del filamento y configuración de impresión. Además, es importante destacar que algunos de estos parámetros se definieron basándose en múltiples impresiones previas realizadas con la

impresora Delta, lo que ayudó a determinar los ajustes más adecuados para el funcionamiento eficiente de dicha impresora.

Dentro de la configuración de impresora se debe definir las dimensiones de la impresora que se va a utilizar en este caso la impresora tipo Delta cuenta con una cama circular de diámetro 200 mm y una altura máxima de impresión de 300 mm, el tipo de firmware que utiliza la impresora es “Marlin 2” y hay que tomar en cuenta que el origen de la cama de impresión se encuentra en el centro.

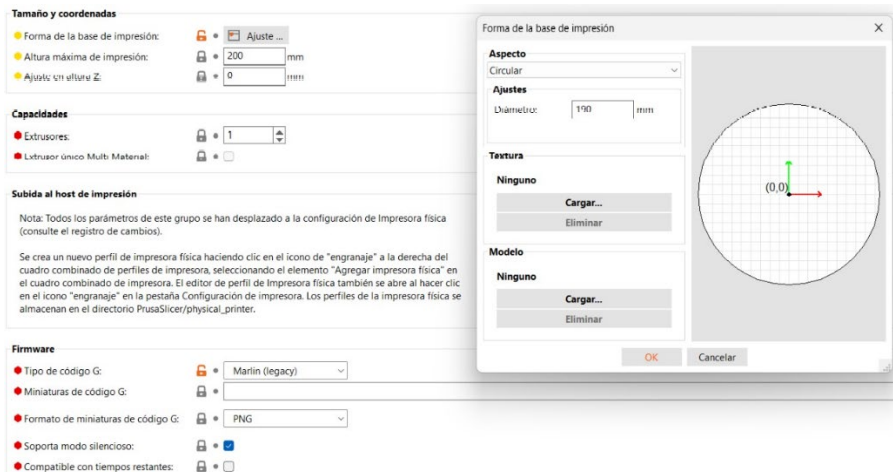


Figura 14 Ajustes de configuración de impresora dentro del PrusaSlicer

Para la configuración del filamento, antes 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 15 Ajustes de configuración de filamento dentro del PrusaSlicer

Finalmente, para la configuración de impresión, se planteó imprimir seis veces en total cada geometría, tres veces en configuración planar y tres en no planar variando la altura de capa con los valores de 0.18, 0.28 y 0.38 mm, se tomaron 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 y agujeros Fig. 16.

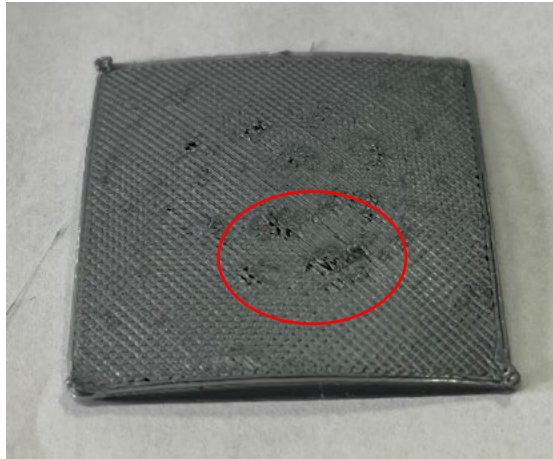


Figura 16 Errores presentados al imprimir con una altura de capa de 0.2 mm

Para complementar los valores de todos los parámetros adicionales como velocidad de impresión, capas superiores, relleno, ángulo y altura máxima no planar se mantuvieron constantes Fig. 17.

<p>Altura de la capa</p> <ul style="list-style-type: none"> Altura de la capa: <input type="text" value="0.18"/> mm Altura de la primera capa: <input type="text" value="0.34"/> mm <p>Carcasas verticales</p> <ul style="list-style-type: none"> Perímetros: <input type="text" value="2"/> (mínimo) Modo vaso: <input type="checkbox"/> <p><small>Espesor de pared delgada del objeto recomendado para una altura de capa 0.18 y 2 líneas: 0.86 mm, 3 líneas: 1.27 mm, 4 líneas: 1.68 mm</small></p> <p>Carcasas horizontales</p> <ul style="list-style-type: none"> Capas sólidas: Arriba: <input type="text" value="2"/> Abajo: <input type="text" value="2"/> Espesor mínimo de pared: Arriba: <input type="text" value="0"/> mm Abajo: <input type="text" value="0"/> mm <p><small>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.</small></p>	<p>Velocidad para movimientos de impresión</p> <ul style="list-style-type: none"> Perímetros: <input type="text" value="60"/> mm/s Perímetros pequeños: <input type="text" value="60"/> mm/s o % Perímetros externos: <input type="text" value="60"/> mm/s o % Relleno: <input type="text" value="60"/> mm/s Relleno sólido: <input type="text" value="40"/> mm/s o % Relleno sólido superior: <input type="text" value="40"/> mm/s o % Material de soporte: <input type="text" value="60"/> mm/s Interfaz del material de soporte: <input type="text" value="100%"/> mm/s o % Puentes: <input type="text" value="40"/> mm/s Relleno del hueco: <input type="text" value="40"/> mm/s Alisado: <input type="text" value="15"/> mm/s
<p>Nonplanar layers (experimental)</p> <ul style="list-style-type: none"> Use nonplanar layers: <input type="checkbox"/> Maximum nonplanar angle: <input type="text" value="70"/> ° Maximum nonplanar height: <input type="text" value="12"/> mm 	<p>Relleno</p> <ul style="list-style-type: none"> Densidad de relleno: <input type="text" value="20"/> % Patrón de relleno: <input type="text" value="Estrellas"/> Longitud del relleno del anclaje: <input type="text" value="600%"/> mm o % Máxima longitud del relleno del anclaje: <input type="text" value="50"/> mm o % Patrón de relleno superior: <input type="text" value="Monotónico"/> Patrón de relleno inferior: <input type="text" value="Monotónico"/>

Figura 17 Ajustes que se mantuvieron constantes dentro del PrusaSlicer

Por otro lado, cuando se aplicó la configuración no planar, al ser experimental, presentó errores de código-g a la hora de laminar los modelos 3D Fig. 18, 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 (Fig. 18 (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.

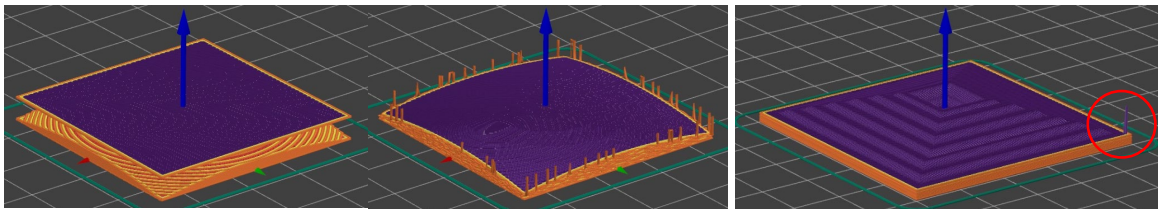


Figura 18. Errores de laminación con configuración no planar

Otro error recurrente al laminar el modelo era la aparición de pequeñas líneas verticales de trayectoria que se daban siempre en las aristas del modelo (Fig. 18 (derecha)), dicho error parecía solucionarse al laminar repetidas veces el modelo hasta que dejaban de ser visibles.

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

Finalmente, para facilitar la identificación de cada código-g se empleó la siguiente nomenclatura, XYZ_F_G, en donde:

X, es el tipo de impresora que se usó en este caso la impresora 3D Delta denominada por la letra "D".

Y, es el tipo de configuración de impresión usada en la probeta ya sea planar "P" o no planar "NP".

Z, es la denominación del modelo usado en el estudio, especificada en la Fig. 13.

F, corresponde al número de capas superiores impresas.

G, corresponde a la altura de capa de impresión.

Por ejemplo, tenemos la probeta DPT1_3_028, la que se refiere a una probeta T1 impresa en una impresora 3D tipo Delta con impresión planar, con 3 capas superiores y una altura de capa de 0,28 mm.

2.5. Impresión de modelos 3D

Al tener los códigos-g listos y la impresora calibrada, se procede a imprimir cada pieza con 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 se debe precalentar ambos complementos antes de imprimir la pieza y así obtener un tiempo de impresión más preciso.

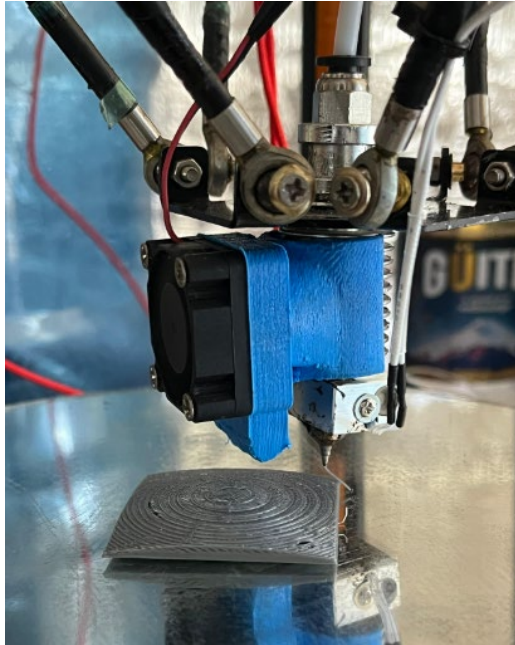


Figura 19 Impresora 3D Delta durante impresión

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

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.3 Resultados

3.3.1 Calidad superficial

Para ilustrar la calidad superficial de impresión de manera cualitativa, cada modelo se evaluó en grupos primero en no planares y luego en planares con todas las alturas de capa que se realizaron, y así evaluar cómo afecta la altura de capa para cada configuración.

Después se procede a realizar la comparación entre configuraciones y así percibir el cambio en la calidad superficial.

Primero se evalúa la transición entre el cambio de altura de capa para todos los modelos en configuración no planar.



Figura 20 Modelo "T1" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)



Figura 21 Modelo "T2" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)



Figura 22 Modelo "T3" con alturas de capa de 0.18 (izquierda), 0.28 (centro) y 0.38 (derecha)

Para la configuración planar, se observa como la calidad superficial disminuye a medida que se aumenta la altura de capa, ya que empiezan a aparecer errores de impresión muy claros como rebabas (Fig. 21 (derecha)), zonas sin material (Fig. 20 (centro)) y material levantado (Fig. 22 (derecha)).

Además, también se puede evaluar como se comporta la impresión con configuración planar en distintas inclinaciones de curva presentes en cada pieza, empezando por el modelo "T1" Fig. 20, al tener una curvatura suave con poca inclinación no se observan grandes diferencias con respecto a capas no planas.

En el modelo "T2" Fig. 21, al contar con una superficie con varias inclinaciones pronunciadas, se observa la aparición de rebabas que siguen la dirección de la trayectoria por la que paso la boquilla, también el recorrido de la boquilla se ve muy marcado debido a que la inclinación es muy pronunciada el diámetro externo de la boquilla va tocando el material depositado Fig. 23.

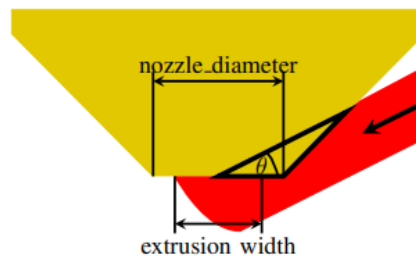


Figura 23 Efecto del diámetro de boquilla exterior al imprimir curvas muy inclinadas[4]

En el modelo "T3" Fig. 22, al contar con una curva suave e inclinaciones pronunciadas a la vez se puede llegar a observar de mejor manera como se comporta la configuración no planar, ya que en la base de las curvas se observan los errores presentes en el modelo "T2" y a medida que aumenta la altura este error va desapareciendo hasta ser una superficie lisa como en el modelo "T1".



Figura 24 Muestra de error en la mayor inclinación que presenta el modelo "T3"

Ahora se hará la comparación de la calidad superficial entre impresión 3D con configuración planar y no planar, para esto se colocan juntas las 6 piezas impresas de cada modelo para mayor facilidad de comparación.

Para el modelo "T1", se llega a observar una mejora en la calidad superficial para cada altura de capa al imprimir en configuración no planar, la observación más clara es que al aumentar la altura de capa son más notorias las capas planas debajo de las capas no planares, aun así, la calidad superficial con configuración no planar es muy superior a la otra.

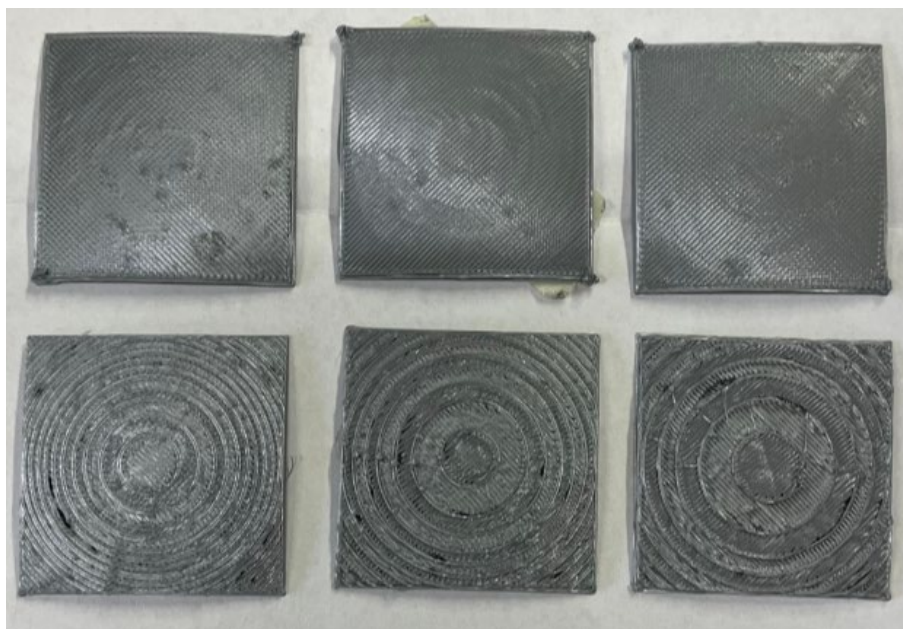


Figura 25 Modelo "T1" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha)

Para el modelo "T2", al tener superficies bastante inclinadas en forma de picos, se presentaron hilos de filamento que unen los picos y capas inconsistentes en donde se da la presencia de falta de material depositado, estos errores no se ven presentes en la impresión con configuración no planar debido a que mientras se realizan las capas no planas no es necesaria la retracción de material para pasar de un punto a otro, lo cual es la razón principal de los hilos presentes en la configuración planar.



Figura 26 Modelo "T2" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha)

Para el modelo "T3", la calidad superficial con configuración planar es muy inferior a la no planar visualmente, incluso no se llegan a percibir las intersecciones entre las curvas debido a las capas inconsistentes, con agujeros y residuos de material.



Figura 27 Modelo "T3" impreso en no planar (parte superior) y planar (parte inferior) con alturas de capa de 0.18 mm (izquierda), 0.28 mm (centro) y 0.38 mm (derecha)

Cualitativamente cada modelo presentó una mejor calidad superficial en configuración no planar, tomando en cuenta que al aumentar la altura de capa y la inclinación de la superficie se llegan a presentar más errores que afectan a la calidad superficial.

3.3.2 Masa y tiempo de impresión

Después de cada impresión se cuantificó el tiempo que cada pieza tardó en imprimirse dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 2 Tiempo de impresión de cada modelo en base a la altura de capa y configuración

Tiempo de impresión [min]				
Modelo	Configuración	Altura de capa [mm]		
		0.18	0.28	0.38
T1	No Planar	15	14	13
	Planar	12	11	10
T2	No Planar	64	56	52
	Planar	38	29	24
T3	No Planar	41	37	36
	Planar	27	21	20

Al observar la Tabla 2, se evidencia que la impresión con configuración no planar toma más tiempo que la convencional, el modelo que más presentó diferencia de tiempo entre

configuraciones es el “T2”, coincidentemente es el modelo con mayor inclinación por lo que se puede establecer que a mayor inclinación es mayor tiempo de impresión en configuración no planar, ya que el extrusor debe desplazarse más.

Por otro lado, a pesar de que si haya diferencia entre tiempos, esta diferencia es despreciable, pero se plantea que al aumentar considerablemente las inclinaciones la diferencia del tiempo entre configuraciones será mayor.

Tabla 3 Masa de cada modelo en base a la altura de capa y configuración

Masa de pieza impresa [g]				
Modelo	Configuración	Altura de capa [mm]		
		0.18	0.28	0.38
T1	No Planar	3.67	4.51	5.01
	Planar	3.15	3.69	3.98
T2	No Planar	9.07	9.80	10.60
	Planar	8.08	8.24	8.49
T3	No Planar	7.55	8.51	9.27
	Planar	6.67	7.14	7.40

En cuanto a la masa de la pieza impresa, en promedio hay una diferencia de 2 gramos más al imprimir con configuración no planar, debido a la proporción de las piezas esta se vuelve una diferencia considerable. Ya que si se llega a aumentar el volumen del modelo se incrementará el peso de manera significativa, tentativamente esto se puede explicar a que, igual que con el tiempo de impresión hay mayor desplazamiento del extrusor al seguir las curvas superficiales del modelo, por lo que a mayor desplazamiento mayor necesidad de depositar material.

3.3.3 Error de aproximación

Se pueden definir los errores de aproximación como la diferencia entre el objeto modelado y el objeto impreso. Se dice que el error aproximado es positivo cuando el objeto impreso presenta mayores dimensiones que el objeto diseñado y negativo cuando es al revés. Cualitativamente, el error más presente es la rugosidad producida por la boquilla penetrando la superficie, lo cual va aumentando a medida que aumenta el ángulo de superficie. [11]

Otro error de aproximación que tiene que ver desde la creación del código-g es el de la Fig. 18 a la derecha, en donde se ve una línea de trayectoria vertical en la arista del modelo, lo cual no debería estar ya que el modelo no cuenta con eso. Después de la impresión del modelo estos errores se ven físicamente como acumulación de material ya que se sigue extruyendo material Fig. 28.

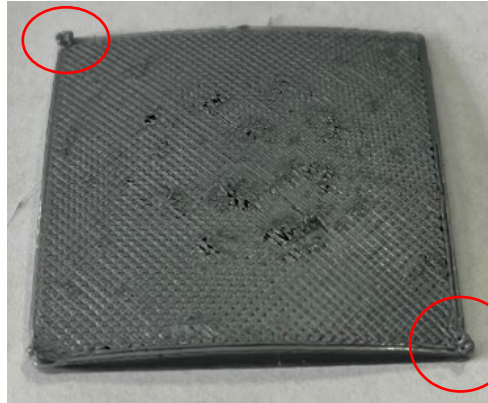


Figura 28 Error de acumulación de material en aristas del modelo "T1"

3.4 Conclusiones

Con base a las comparaciones realizadas, se puede afirmar que imprimir con la configuración no planar aumenta significativamente el acabado superficial, en cuanto al tiempo de impresión no se presentó una diferencia considerable entre configuraciones por lo que se puede despreciar. En cuanto a la variación de masa, existieron diferencias considerables tomando en cuenta la proporción del volumen de los modelos impresos, tanto la variación del peso como la masa se pueden explicar debido al mayor desplazamiento del extrusor.

Por otro lado, existen varios errores presentes en cada configuración, con la diferencia de que los errores presentes en la configuración planar son de malos ajustes de parámetros como distancia de retracción, relleno, etc. En cambio, los errores presentes en la configuración no planar se originan desde el código-g, con la creación de líneas de trayectorias inexistentes, un cambio brusco entre capas planas y no planas y rugosidad excesiva en superficies bastante inclinadas.

En conclusión, el resultado de impresión con configuración no planar da mejores resultados en calidad superficial a la configuración planar con respecto a los parámetros modificados, de igual forma, se obtiene que la calidad final también depende de que tan adecuados sean los parámetros del proceso. En adición, los errores presentes en configuración no planar

son debido a que esta configuración sigue en desarrollo, por lo que se plantea como una desventaja frente a la otra configuración.

3.5 Recomendaciones

Se recomienda abordar los problemas actuales del software experimental utilizado en el proceso de laminado, que presenta limitaciones significativas para piezas con geometrías complejas y un tiempo de procesamiento prolongado, que puede variar desde varias horas hasta un día completo para modelos intrincados.

El laminado no planar, que combina capas planas y no planas, puede generar colisiones al imprimir sobre paredes altas o dañar el modelo si la boquilla no es adecuada. Para evitar estos inconvenientes, es esencial revisar las trayectorias en el Slicer antes de comenzar la impresión.

Para obtener un acabado óptimo, es crucial aplicar suficientes capas superiores para cubrir las irregularidades de la impresión planar y precalentar la boquilla y la cama de impresión para obtener mediciones precisas del tiempo real de impresión.

Realizar otro tipo de ensayos, en donde se pueda cuantificar el cambio de propiedades mecánicas al aplicar la configuración no planar.

A pesar de que la impresión 3D no planar está ganando terreno en diversas industrias, se requiere seguir investigando para superar sus limitaciones y maximizar sus beneficios, mejorando la calidad de las impresiones y explorando nuevas aplicaciones innovadoras.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Kietzmann, L. Pitt, and P. Berthon, "Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing," Mar. 01, 2015, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.bushor.2014.11.005.
- [2] "Standard Terminology for." [Online]. Available: <http://www.ansi.org>.
- [3] M. T. Birosz and M. Andó, "Effect of infill pattern scaling on mechanical properties of FDM-printed PLA specimens," *Progress in Additive Manufacturing*, Aug. 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00487-8.
- [4] 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.
- [5] D. DE Miguel Parra Martínez Fecha UNIVERSIDAD ALMERIA and D. Miguel Parra Martínez Manuel Ángel Aguilar Torres Fernando José Aguilar Torres, "Diseño y fabricación de impresora 3D basada en robot paralelo tipo Delta – RoPar3D," 2019.

- [6] T. Swetham, K. Madhana, M. Reddy, A. Huggi, and M. N. Kumar, "A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM," vol. 2, no. 3, pp. 353–361, 2017.
- [7] F. Madaraka, M. Esther, and T. Akinlabi, "SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY 2 MANUFACTURING AND SURFACE ENGINEERING Fused Deposition Modeling Strategies for Quality Enhancement." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/10623>
- [8] B. M. Schmitt, C. F. Zirbes, C. Bonin, D. Lohmann, D. C. Lencina, and A. Da Costa Sabino Netto, "A comparative study of cartesian and delta 3d printers on producing PLA parts," in *Materials Research*, Universidade Federal de Sao Carlos, 2017, pp. 883–886. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2016-1039.
- [9] D. Édison, F. Vergara, F. Camilo, C. Riveros, R. Andrés, and C. Estepa, "PLANNING AND IMPLEMENTATION OF PATHS IN A ROBOT DELTA," *Scientia et Technica Año XXII*, vol. 22, no. 2, 2017.
- [10] G. A. Nisja, A. Cao, and C. Gao, "Short review of nonplanar fused deposition modeling printing," *Material Design and Processing Communications*, vol. 3, no. 4, Aug. 2021, doi: 10.1002/mdp2.221.
- [11] D. Ahlers, M.- Fakultät, J. Zhang, and N. Hendrich, "3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation."
- [12] "Release Windows portable 2.6 · teachingtechYT/PrusaSlicer · GitHub." Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/teachingtechYT/PrusaSlicer/releases/tag/windows>