

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS METROLÓGICO DE PRECISIÓN DE COMPONENTES IMPRESOS POR
FABRICACIÓN DE FILAMENTO FUNDIDO QUE REQUIEREN EL USO DE SOPORTES
PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER
EL GRADO DE**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

PRESENTA

JOSÉ ALAN MARTÍNEZ CERVANTES

DIRECTOR

DR. JULIÁN ISRAEL AGUILAR DUQUE

CO-DIRECTOR

M.C. JOSÉ LUIS JAVIER SÁNCHEZ GONZÁLEZ

Ensenada, Baja California. Junio del 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

ANÁLISIS METROLÓGICO DE PRECISIÓN DE COMPONENTES IMPRESOS POR FABRICACIÓN DE FILAMENTO FUNDIDO QUE REQUIEREN EL USO DE SOPORTES

TESIS

Que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería presenta:

José Alan Martínez Cervantes

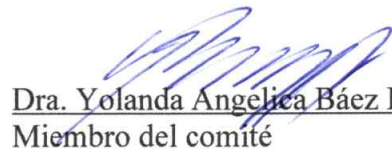
Aprobada por:



Dr. Julián Israel Aguilar Duque
Director de tesis



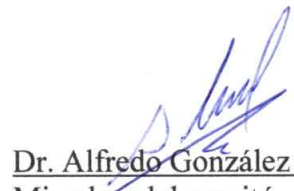
M.C. José Luis Javier Sánchez González
Miembro del comité



Dra. Yolanda Angelica Báez López
Miembro del comité



Dr. Guillermo Amaya Parra
Miembro del comité



Dr. Alfredo González Carrasco
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. 16 de Junio del 2025

Resumen

La Fabricación de Filamento Fundido (FFF) es una técnica de manufactura aditiva que permite la creación de diseños tridimensionales con geometrías complejas. No obstante, esta tecnología presenta limitaciones cuando se trata de imprimir zonas en voladizo, ya que el filamento tiende a caer por efecto de la gravedad, afectando la precisión dimensional y la calidad superficial de los componentes. Para solucionar este problema, es necesario emplear estructuras de soporte. La presente investigación tiene como objetivo analizar el efecto de distintos materiales termoplásticos utilizados como soporte —PETG-CF (polietileno tereftalato glicol con fibra de carbono), PLA (ácido poliláctico) y PVA (alcohol polivinílico)— en las desviaciones dimensionales generadas en componentes impresos con material modelo PETG-CF. El caso de estudio es una ortesis de pie-tobillo (AFO), cuyos datos geométricos fueron obtenidos mediante escaneo 3D con tecnología de luz estructurada infrarroja y posteriormente modelados en SolidWorks™ utilizando técnicas de mesh modeling. Se realizaron simulaciones de esfuerzos mecánicos y pruebas de tracción conforme a la norma ASTM D638, optimizando los parámetros de impresión mediante el método Taguchi. Los resultados muestran cómo los materiales de soporte afectan de manera significativa la precisión dimensional del modelo. Las mediciones se realizaron con una máquina de medición por coordenadas (CMM), permitiendo cuantificar las desviaciones con alta precisión. Finalmente, se concluye que la selección adecuada del material de soporte y la optimización de parámetros de impresión pueden mejorar la calidad de componentes impresos con geometrías complejas. por coordenadas (CMM) para obtener mediciones precisas de los componentes impresos.

Palabras clave: Impresión 3D, Fabricación por Filamento Fundido (FFF), Ortesis, Análisis dimensional, Calidad superficial, Modelado 3D, Alcohol Polivinílico (PVA), ANOVA, PETG-CF, Máquina de medición por coordenadas (CMM)

Dr. Julián Israel Aguilar Duque
Director

M.C. José Luis Javier Sánchez González
Co-Director

Abstract

Fused Filament Fabrication (FFF) is an additive manufacturing technique that enables the creation of three-dimensional designs with complex geometries. However, this technology faces limitations when printing overhanging features, as the filament tends to sag due to gravity, affecting both dimensional accuracy and surface quality. To overcome this issue, support structures are required during the printing process. This research aims to analyze the effect of different thermoplastic materials used as support —PETG-CF (polyethylene terephthalate glycol with carbon fiber), PLA (polylactic acid), and PVA (polyvinyl alcohol)— on the dimensional deviations generated in components printed with PETG-CF as the model material. The case study focuses on a foot-ankle orthosis (AFO), whose geometric data were obtained through 3D scanning using infrared structured light technology and subsequently modeled in SolidWorks™ using mesh modeling techniques. Mechanical stress simulations and tensile tests were carried out according to the ASTM D638 standard, optimizing printing parameters using the Taguchi method. The results demonstrate that support materials significantly affect the dimensional accuracy of the model. Measurements were performed using a Coordinate Measuring Machine (CMM), allowing for high-precision quantification of dimensional deviations. The study concludes that proper selection of support materials and optimization of printing parameters can significantly improve the quality of printed components with complex geometries.

Keywords: 3D Printing, Fused Filament Fabrication (FFF), Orthosis, Dimensional Analysis, Surface Quality, 3D Modeling, Polyvinyl Alcohol (PVA), ANOVA, PETG-CF, Coordinate Machine Measurement (CMM)

Dedicatoria

Con cariño para mi familia, mi padre José Martínez, mi madre Lidia Cervantes, mi hermana Valeria Martínez, mis sobrinos, abuela María Cervantes, mi pareja y mis amigos.

Agradecimiento

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de tesis, por el apoyo y orientación del mismo. En especial agradecer de la manera más pura a mi familia (Padres, hermana, sobrinos, mi pareja) y amigos (Raziel Heredia, Luis Regland, Esteban Ibarra, Karla Denisse, Zeuz Tellez, Oliver Hans) por el apoyo en todo momento de este proceso, siendo la fuerza necesaria para superar los retos y mantenerme enfocado en mi objetivo, y no solo en el de la tesis, sino en cualquier objetivo que me proponga.

También quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mis asesores de tesis Julián Israel Aguilar Duque y José Luis Javier Sánchez González, y todo mi comité por brindarme el apoyo continuo y valiosas sugerencias a lo largo de este proceso, por sus conocimientos y dedicación siendo indispensables para lograr los resultados obtenidos en esta tesis. Además, también quisiera agradecer a mis compañeros de clase y profesores quienes me apoyaron con sus conocimientos muy valioso conmigo durante la formación académica.

Aprovechando la oportunidad para agradecer a la Universidad Autónoma de Baja California, especialmente a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, por brindarme la posibilidad de seguir desarrollando mi formación profesional. Al igual agradecer a CONAHCYT por el valioso respaldo económico, el cual fue necesario para la realización de este proyecto y contribuyó de manera determinante.

ÍNDICE

Resumen	2
Abstract	3
Dedicatoria	4
Agradecimiento	5
Índice de tablas	8
Índice de figuras	9
Listado de abreviaturas	11
Capítulo 1. Introducción	12
1.1 Antecedentes	14
1.2 Estrategia de búsqueda	15
1.3 Planteamiento del problema	17
1.4 Preguntas de investigación	17
1.5 Hipótesis de estudio.....	18
1.6 Objetivo general	18
1.7 Objetivos específicos.....	18
1.8 Justificación	19
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1 Manufactura aditiva.....	20
2.2 Tecnologías de manufactura aditiva.....	20
2.2.1 Extrusión de material o fabricación de deposición fundida.....	20
2.2.2 Proyección de material (deposición de energía directa)	20
2.2.3 Fusión de cama de polvos	21
2.2.4 Fotopolimerización en tina (estereolitografía).....	21
2.2.5 Fusión por haz de electrones.....	21
2.2.6 Chorro de material	22
2.2.7 Inyección aglutinante	22
2.4 Ingeniería de calidad.....	23
2.4.1 Método Taguchi	23
2.5 Maquina de medición por coordenadas	24
2.6 Escaneado de tercera dimensión 3D.....	25

2.7	Análisis de parámetros de la fabricación por filamento fundido.....	25
2.8	Efectos en los parámetros de control en materiales.....	25
2.9	Control de parámetros para la generación de soportes en impresión 3D.	27
2.10	Marco conceptual	27
	Capítulo 3. Metodología.....	30
3.1	Optimización de parámetros para esfuerzos de tensión.....	30
3.2	Diseño de componentes en CAD para impresión y análisis.....	35
3.2.1	Adquisición de datos geométricos mediante escaneado 3D	35
3.2.2	Diseño CAD de componentes y simulación	35
3.3	Desarrollo de procedimiento para impresión de componentes.....	37
3.4	Desarrollo de análisis metrológico de componentes	38
	Capítulo 4: Resultados y discusión	41
4.1	Optimización de parámetros para la resistencia mecánica del PETG-CF.....	41
4.1.1	Modelado e impresión de las probetas de la norma ASTM D638-22.....	41
4.1.2	Pruebas de ensayo de tensión.....	42
4.1.3	Mecanismos de daño en probetas	44
4.1.4	Optimización de los parámetros de impresión para las resistencias de esfuerzos de tensión.....	45
4.1.5	Validación de resultado.....	47
4.1.6	Parámetros de impresión.....	48
4.2	Diseño de componentes para impresión y análisis	48
4.2.1	Escaneado 3D obtención geométrica de pie-tobillo.....	48
4.2.2	Importación de datos en el modelador CAD.....	52
4.2.3	Modelado de la AFO.....	53
4.2.4	Simulación de esfuerzos de la AFO.....	57
4.2.5	Preparación para la impresión de componentes.....	61
4.2.6	Desarrollo de medición a componentes impresos (CMM)	71
	Capítulo 5: Discusión y conclusiones	88
5.1	Conclusión.....	90
	Referencias	91

Índice de tablas

Tabla 1: Rangos de temperatura recomendadas de la boquilla, de la cama y cámara para polímeros convencionales y de alto rendimiento

Tabla 2: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PVA

Tabla 3: Antecedentes de trabajos realizados de ortesis aplicando la manufactura Aditiva.

Tabla 4: Antecedentes de trabajos realizados de ortesis aplicando la manufactura aditiva

Tabla 5: Parámetros de control de impresión FFF con 4 niveles

Tabla 6: Parámetros de impresión seleccionados según especificaciones del fabricante

Tabla 7: Diseño experimental de los parámetros de impresión matriz ortogonal L16

Tabla 8: Resultados de tensión de probetas

Tabla 9: Respuesta para relaciones de señal y ruido (S/N)

Tabla 10: Resultados de ANOVA

Tabla 11: Parámetros óptimos para impresión a mayor resistencia

Tabla 12: Parámetros de renderizado,

Tabla 13: Detalles de nube de puntos

Tabla 14: Características elásticas isotrópicas del material utilizado para la simulación FEM.

Tabla 15: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PETG-CF

Tabla 16: Temperaturas registradas al momento de impresión PETG-CF

Tabla 17: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PLA

Tabla 18: Temperaturas registradas al momento de impresión PLA.

Tabla 19: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PVA

Tabla 20: Temperaturas registradas al momento de impresión PVA.

Tabla 21: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PVA

Tabla 22: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PLA

Tabla 23: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PETG-CF.

Índice de figuras

Figura 1: Mecanismo de impresión FFF.

Figura 2: Gráfica de dispersión de publicaciones del análisis de la búsqueda del año 2015 al 2023.

Figura 3: Gráfica de dispersión de publicaciones por revistas del análisis de la búsqueda del año 2015 al 2023.

Figura 4: Diagrama de causa y efecto en el proceso FFF para mejorar la PD y CS.

Figura 5: Diagrama de flujo de metodología para el desarrollo de la investigación.

Figura 6: Diagrama de flujo de metodología para la optimización de parámetros para resistencia a la tensión.

Figura 7: Modelo CAD de ASTM D638 tipo 1.

Figura 8: Máquina de tensión Shimadzu AGS-X 100 K.

Figura 9: Diagrama de flujo de metodología para el desarrollo del diseño.

Figura 10: Diagrama de flujo del desarrollo metrológico

Figura 11: Máquina de medición por coordenadas Mitutoyo Crysta Plus 504

Figura 12: Modelos de la ASTM D638 en el cortador ideaMaker 4.1.1 Raise3D.

Figura 13: Modelos de la ASTM D638 impresos en FFF con PETG-CF según el DOE de la matriz ortogonal L16.

Figura 14: Máquina de tensión realizando el trabajo de tracción en probeta.

Figura 15: Probetas con ruptura

Figura 16: Gráfica de efectos principales para relaciones (S/N)

Figura 17: Gráfica de probabilidad normal.

Figura 18: Fotos del pie y el modelo 3D resultante

Figura 19: Malla resultante de los datos geométricos del pie-tobillo

Figura 20: Generación de cuerpo sólido de un mallado

Figura 21: Generación de la superficie interior mediante la herramienta Offset on-surface.

Figura 22: Generación de equidistancia de superficie.

Figura 23: Generación de croquis con referencia.

Figura 24: Recorte de superficies. A) Dibujo de la AFO. B) Selección de recorte de superficie. C) Ortesis en superficie.

Figura 25: AFO diseño completo.

Figura 26: Definición de cargas y restricciones para la simulación.

Figura 27: Simulación límite elástico de modelo von Mises.

Figura 28: Simulación de desplazamiento URES.

Figura 29: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso.

Figura 30: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF caída trasera de soporte.

Figura 31: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF removiendo soportes.

Figura 32: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PLA. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso

Figura 33: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PLA

Figura 34: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PVA. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso.

Figura 35: Remoción en agua de soportes PVA.

Figura 36: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PVA, caída trasera de soporte.

Figura 37: Modelo de molde para la ortesis de pie tobillo

Figura 38: Alineación de ortesis con molde

Figura 39: Desfase en diseño de la ortesis

Figura 40: Alineación del modelo

Figura 41: Configuración de área para mediciones de la maquina CMM.

Figura 42: Paleado a configuración de base.

Figura 43: Palpado a los planos laterales para su configuración

Figura 44: Cambio de configuración de herramienta de 0 grados a 90 grados.

Figura 45: Puntos de palpeo en el voladizo superior de la ortesis

Figura 46: Simulación de trayectoria de herramienta en el software CMM Manager

Figura 47: Desviación de medición en ejes con PVA

Figura 48: Desviación de medición de los ejes en material PLA.

Figura 49: Desviación de medición de los ejes en material PETG-CF.

Listado de abreviaturas

FFF - Fabricación por Filamento Fundido

CMM – Coordinate Measurement Machine (Máquina de medición por coordenadas)

CAD – Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)

AFO – Ankle Foot Orthosis (Ortesis de pie tobillo)

ASTM – American Society for Testing and Materials

MA – Manufactura Aditiva

PETG-CF Polyethylene Tetra Glycol reinforced with Carbon Fiber. (Polietileno Tetraglicol reforzado con Fibra de Carbono)

PLA- Acido Poliláctico.

PVA – Alcohol Polivinílico.

SLM – Selective Laser Melting (Fusión selectiva por láser)

ISO – International Organization for Standardization

ASTM – American Society for Testing and Materials

FDM – Fused Deposition Modeling (Modelado por deposición fundida)

SDL – Selective Deposition Lamination (Laminación por deposición selectiva)

DED – Deposición de energía directa

SLS – Selective Laser Sintering (Sinterización selectiva por láser)

SLA – Estereolitografía

Capítulo 1. Introducción

De acuerdo con la ISO/ASTM 52900:2021, la Manufactura Aditiva (MA) es un proceso de unión de materiales para fabricar partes desde los datos de un modelo tridimensional, usualmente capa por capa opuesto a las metodologías de manufacturas sustractivas y formativas.

En la actualidad la MA es una estrategia de manufactura que está evolucionando día con día, puesto que está cambiando paradigmas de la manufactura sustractiva. El objetivo de este tipo de la MA es ahorrar tiempo, reducir costos de material y contar con diseños complejos que den libertad de diseño a ingenieros y diseñadores [1].

Una reciente estandarización de actividades de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la International Organization for Standardization (ISO) reúne estos procesos en siete categorías, los cuales incluyen técnicas basadas como el modelado por deposición fundida (FDM), la fusión selectiva por láser (SLM), sinterizado selectivo por láser (SLS), la inyección por aglutinante (3DP), la laminación por disposición selectiva (SDL), impresión de curvatura suave (SCP) y la deposición directa de energía (DED). El conjunto de estos procesos se denomina como Manufactura Aditiva (MA) [2].

La técnica de AM es ampliamente implementada en la industria médica, el impacto se ve reflejado en el desarrollo de implantes ortopédicos, prótesis, ortesis adaptadas a las necesidades y dimensiones del paciente, impresión de medicamentos, entre otros. Por otro lado, en el sector Aeroespacial, se hace patente la presencia de la MA con la creación de partes con geometrías complejas, que no son realizables con métodos de manufactura convencionales.

Las impresoras 3D de Fabricación de Filamento Fundido (FFF) o mejor conocida como Modelado por Deposición Fundida (FDM), producen piezas extruyendo una capa de material termoplástico sobre otra. Por lo tanto, cada una de las capas se sostiene sobre la capa anterior. Cuando no hay una capa por debajo es probable que la pieza necesite estructura de soporte tal como es el caso de volados, cavidades y vaciados.

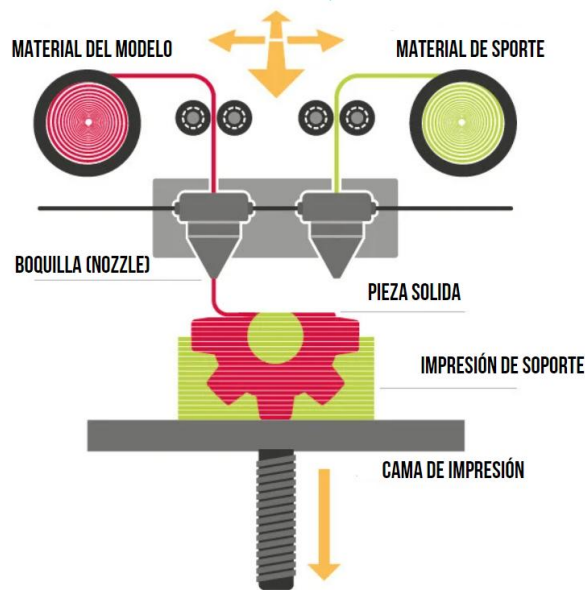


Figura 1: Mecanismo de impresión FFF.

Una impresora que utilice la tecnología FFF puede ser fácilmente modificada en una impresora multi-material integrado dos o más extrusores. El proceso más común de la tecnología (FFF) multi-material hace uso de dos extrusores trabajando en conjunto para depositar material de soporte y de modelo.

En la actualidad existen filamentos solubles en agua que facilitan el post-procesado de piezas. Los materiales solubles son de tipo termo polímeros de acrilato (ATP) que son compatibles con Ácido Poliláctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), filamentos que son empleados en más del 50% de los componentes impresos por FFF [3].

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los materiales más usado en la impresión 3D. es un termoplástico biodegradable que se obtiene a partir de almidón de maíz, papas, trigo o cañas de azúcar, lo cual lo hace una alternativa interesante a otros plásticos derivados de hidrocarburos [4].

Para la realización de esta investigación se utilizarán distintos materiales de soporte como lo es el PVA (alcohol polivinilo) que es un polímero sintético blanco e inodoro, es un material soluble en agua y 100% biodegradable. Se emplea en la impresión 3D como material de soporte cuando la geometría requiere de soportes como voladizos con grados de inclinación mayor de 45 grados. Es compatible con una amplia gama de materiales, entre los que podemos destacar PLA, PET-G, Nylon y CPĚ.

El siguiente filamento que se desea probar es el HIPS Poliestireno de alto impacto es un material muy parecido al ABS, y que requiere los mismos perfiles de temperaturas. Suele usarse en combinación con el ABS para hacer piezas con espacios huecos, usando el HIPS como soporte que luego se eliminará con D-Limoneno, con el que es soluble mientras que a él la acetona no le afecta [4].

1.1 Antecedentes

Desde la creación de la primera impresora en 1984 por la empresa 3D Systems Corporation, en los Estados Unidos, la propagación de esta tecnología ha sido considerable. El importante crecimiento de la manufactura aditiva se debe principalmente al descubrimiento continuo de nuevos e importantes beneficios específicos que aporta esta tecnología a un creciente número de sectores industriales. Los sectores industriales que obtienen mayor beneficio son; Automotriz y manufactura industrial, Electrónica, Aeroespacial, Medica, Arquitectura, y Deportes [5].

Durante la década de los noventa, se desarrollaron nuevos procesos de fabricación aditiva orientados a la fabricación de piezas funcionales, tanto en materiales poliméricos como metálicos, y se comenzaron a comercializar sistemas capaces de fabricar piezas funcionales en materiales como Nylon, ABS o aleaciones metálicas como acero inoxidable, aleaciones base níquel y titanio.

La técnica de manufactura comenzó con la tecnología de estereolitografía (SLA) el cual crea productos utilizando luces ultravioletas para endurecer polímeros, mediante el proceso de diseño asistido por computadora (CAD) [6]. El curso de esta tecnología ha sido bastante considerable debido a que se abrió el campo de aplicación e investigación de la manufactura a diversas tecnologías de fabricación.

A continuación, se muestran varias revisiones de investigaciones que detallan sus metodologías para llegar a un punto específico basado en alguna tecnología de la MA:

J. Kechagias *et al.* [7] Realizaron una revisión crítica de los parámetros clave que controlan la calidad superficial del proceso (FFF) manteniendo todos los demás parámetros constantes en el proceso PLA para obtener modelos físicos con calidad fina. Para el presente trabajo se pretende realizar la aplicación de parámetros que controlaran la precisión dimensional, que a su vez mejora la precisión dimensional, mejorando las variables (FFF) que

afectan seriamente la precisión dimensional de los objetos impresos, así mismo analizando los defectos y problemas de adhesión por distintas temperaturas en el material.

Antecedente con mayor relevancia fue una realización de un método de diseño de una ortesis de tobillo-pie (AFO) por sus siglas en ingles donde Alberto D. Maso *et al.*[8] realizo un diseño de una AFO personalizada utilizando modelado CAD utilizando varias etapas de procesamiento de datos para obtener una nube de puntos y un modelo 3D preciso del pie garantizando geometrías exactas en el diseño.

Christiyan, Jaya *et al.* [9] estudiaron efectos en las propiedades del material ABS impresión, como la unión entre capas, la porosidad y la deformación. La importancia del control de la temperatura durante el proceso de impresión y la influencia de la velocidad de impresión y el grosor de capa en las propiedades ténsales del material compuesto.

Como cuarto antecedente Yong Ho Cha *et al.* [10] dando como resultado la ventaja de utilizar la impresión 3D y el software de diseño automatizado en la creación de ortesis de tobillo y pie es que satisface considerablemente al paciente en términos de dimensiones, peso, ajuste, facilidad de uso y comodidad. La ortesis de tobillo y pie impresa en 3D exhibió una funcionalidad similar a la ortesis convencional, pero el paciente estaba más satisfecho con la ortesis impresa en 3D que con la ortesis convencional en términos de peso y facilidad de uso.

M. Walbran *et al.* [11] dijo que el uso de la tecnología de impresión 3D mejora la personalización y efectividad de los AFO al ofrecer casi completa libertad de complejidad, personalización masiva, menor uso de materiales y tiempos de procesamiento más cortos en comparación con las técnicas tradicionales de fabricación sustractiva. Esto permite la rápida personalización del ajuste y la función de los AFO según los requisitos individuales. Los recientes desarrollos en la tecnología de escaneo digital y de impresión 3D han abierto nuevas posibilidades para crear AFO baratos y altamente personalizables.

1.2 Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos: Scopus y Taylor and francis utilizando las siguientes palabras clave combinadas con operadores booleanos: (TITLE-ABS-KEY ("fused filament fabrication") OR ("fused deposition modeling") AND ("additive manufacturing") OR ("3D printing") AND ("Dimensional Accuracy") OR ("dimensional analysis"))).

Esta estructura de filtrado específica se aplicó para garantizar la coherencia de la

búsqueda en las tres fuentes de referencia. La elección de las palabras clave debía ser sencilla y puesto que “fused filament fabrication” o “fused deposition modeling” son sinónimos, y la mayoría de veces se utilizan en su lugar, debido a la falta de concordancia terminológica, también se incluyeron en la búsqueda, utilizando el operador booleano AND junto con las palabras “3D printing” y “dimensional analysis”. Implico realizar una limitación solo para artículos, artículos tipo revisión y libros. Por último, se realizó una eliminación de documentos que no aportan a la investigación la búsqueda bibliográfica en las bases de datos Scopus y Taylor and Francis, dio como resultado la identificación de 3887 y 304 artículos, respectivamente, un total de 4191 artículos. La figura 2 muestra el número de publicaciones del tópico que se han realizado del 2015 al 2024. El resultado de tendencia del tema es relevante, se recopiló de la base de datos Scopus.

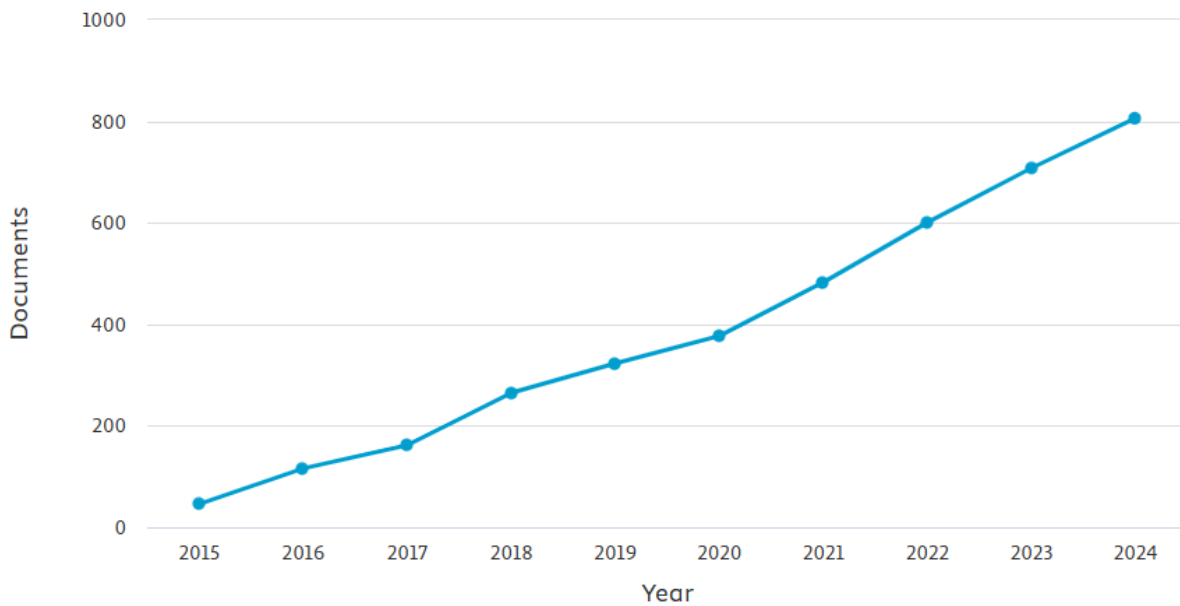


Figura 2: Gráfica de dispersión de publicaciones del análisis de la búsqueda del año 2015 al 2024. Recopilada de www.scopus.com

La Figura 3, de la base de datos Scopus, revela que el Rapid Prototyping Journal y el International Journal of Advanced Manufacturing Technology son las revistas más destacadas en temas de manufactura aditiva FFF, superando las 404 publicaciones. El análisis también muestra que algunas revistas son especializadas en esta tecnología, mientras que otras cubren la manufactura aditiva en general.

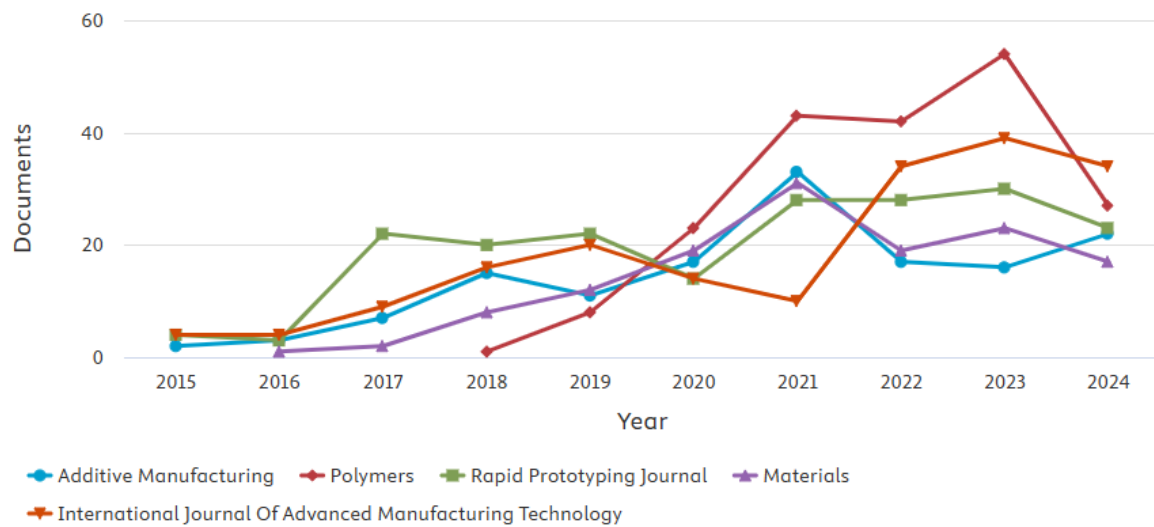


Figura 3: Gráfica de dispersión de publicaciones por revistas del análisis de la búsqueda del año 2015 al 2023. Recopilada de www.scopus.com

1.3 Planteamiento del problema

En la impresión por tecnología de FFF no es posible imprimir al aire determinados atributos de los componentes, por lo tanto, las zonas que no tienen donde apoyar la siguiente capa requiere de soporte para su impresión, de lo contrario los puntos que son voladizos no alcanzan a solidificarse y el filamento impreso por efecto de gravedad, tiende a caer afectando la precisión dimensional y calidad superficial del componente impreso.

La presente propuesta se enfocará en determinar el efecto del uso de diversos materiales con características solubles que serán empleados como soporte para la impresión de componentes impresos por FFF esto permitirá obtener un mayor resultado de precisión dimensional al momento de imprimir piezas con geometrías voladizas con mayor de 45° de inclinación tomando en cuenta los parámetros clave de impresión con referencia a los materiales por utilizar.

1.4 Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es el efecto de mejorar las estructuras de soporte en el acabado dimensional de una pieza impresa por FFF?

2. ¿Cuál de los termoplásticos utilizados para realizar las estructuras de soporte afecta significativamente los defectos dimensionales en los modelos impresos?
3. ¿La incorporación de parámetros orientados a mejorar la resistencia mecánica influye en la precisión dimensional de los modelos impresos?

1.5 Hipótesis de estudio

H1. La optimización de las estructuras utilizadas como soporte en la impresión de componentes influye significativamente en el acabado dimensional de una pieza impresa mediante FFF.

H2. Existen diferencias significativas en el acabado dimensional de componentes impresos por FFF, al utilizar PETG-CF, PLA y PVA como soporte.

H3. La incorporación de parámetros orientados a mejorar la resistencia mecánica tiene un efecto positivo en la precisión dimensional de los componentes impresos.

1.6 Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto es Obtener un prototipo de ortesis pie-tobillo con geometrías complejas, evaluando los efectos en la precisión dimensional y la calidad superficial generados por el uso de distintos materiales de soporte PVA (alcohol polivinílico), PLA (ácido poliláctico) y PETG-CF (polietileno tereftalato glicol con fibra de carbono) durante la fabricación mediante tecnología FFF.

1.7 Objetivos específicos

1. Determinar de componentes que requieren del uso de soportes para lograr el proceso de fabricación.
2. Impresión de componentes con geometrías que requieran uso de soporte utilizando ambos filamentos de soporte PVA, PLA y material de modelo PETG-CF.
3. Optimizar de soportes de voladizos mayores a 45°.
4. Desarrollar de comparativa, determinar el efecto dimensional generado por uso de soporte solubles.

1.8 Justificación

La tecnología (FFF) no es posible imprimir en el aire determinados atributos de los componentes, por lo tanto, las zonas que no tienen donde apoyar la siguiente capa requiere de soporte para su impresión, de lo contrario los puntos que son voladizos no alcanzan a solidificarse y el filamento impreso por efecto de gravedad, tiende a caer afectando las dimensiones y calidad del componente.

Por lo que se busca crear piezas con geometrías complejas con baja tolerancia de dimensiones para que la calidad de esta sea mayor, creando modelos optimizados, implementando distintos métodos metrológicos para conocer la dimensión exacta que se realizan en los modelos CAD, básicamente que sean lo más similar a las se encuentran en los sólidos y/o ensambles 3D diseñados en el software Solidworks TM.

La presente investigación es viable por que se disponen de los recursos necesarios y fuentes de información necesarios para desarrollar este proyecto acabo.

El trabajo tiene una utilidad metodológica, ya que pueden realizarse futuras investigación que usaran metodologías compatibles, de manera que los resultados experimentales se determinen en las configuraciones optimas de los parámetros de los procesos que logren a altas precisiones dimensionales en las piezas impresas en 3D mediante la tecnología (FFF).

Este estudio busca sumar valor a las investigaciones que se están llevando a cabo, tanto a nivel nacional como mundial, sobre la manufactura aditiva. La meta es demostrar cómo las empresas que implementan este proceso de fabricación pueden utilizarlo como un elemento clave para mejorar su productividad y la calidad de sus productos.

En última instancia, la implementación de estas mejoras metrológicas resultará en optimizaciones significativas en los procesos generales de manufactura aditiva. Además, se logrará una mayor calidad superficial en las piezas producidas, un aspecto crucial para la funcionalidad y estética de los productos finales. Esto se traducirá en beneficios tangibles para las empresas, como una reducción de costos, una mayor precisión en la producción y la capacidad de entregar productos con estándares de calidad superiores.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Manufactura aditiva

La manufactura no solo consta en la creación de productos físicos sino en la elaboración tradicional de un producto comienza por una idea que debe tener cierta condición para realizar un diseño y, por último, la fabricación del producto. Conforme las tecnologías avanzan las competencias en el mercado aumentan con la aparición de nuevos contendientes además con nuevas herramientas que facilitan la producción de productos al igual que mayor calidad de construcción, y esto exige una búsqueda de diferentes técnicas que permitan la continuidad en el mercado. La manufactura aditiva (MA), comúnmente conocida como impresión 3D, es el proceso de unir materiales para fabricar piezas a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa tras capa [12]. La (MA) se utiliza comúnmente como creación rápida de prototipos (CRP) y fabricación de forma libre, se rige por la impresión 3D. Construir piezas o productos; normalmente con un tamaño pequeño, en pequeñas cantidades y con un diseño complejo y a medida específica que se le indica en el modelo (CAD) [13] [14].

2.2 Tecnologías de manufactura aditiva

Las actuales tecnologías de la fabricación aditiva están divididas en 7 diferentes procesos específicos. A continuación, se muestra un resumen de cada una de las tecnologías abarcadas de la MA hasta el momento [15].

2.2.1 Extrusión de material o fabricación de deposición fundida

Proceso de fabricación aditiva en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio. Esta técnica es ampliamente utilizada ya que tiene la capacidad de fabricar piezas con geometrías complejas e integradas, además con un muy bajo coste de utilización de materiales [16]. Su aplicabilidad se puede encontrar en diversos campos de las industrias como la medicina, agricultura, automotriz, entre otras [17].

2.2.2 Proyección de material (deposición de energía directa)

Este proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan. Es conocido como deposición de energía directa (DED) y se trata de un complejo proceso de impresión 3D que se emplea generalmente para reparar o agregar material adicional a piezas ya existentes.

2.2.3 Fusión de cama de polvos

Proceso de fabricación aditiva en el cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo (PBF) “Power Bed Fusión” por sus siglas en ingles. Dentro de esta categoría destaca como tecnología principal el sinterizado selectivo por láser (SLS), que se trata de un proceso basado en el uso de un láser o un haz de electrones para fundir y unir materiales en polvo [18]. Las máquinas de sinterización láser constan de tres componentes: una fuente de calor para fundir el material, un método para controlar la fuente de calor y un mecanismo para añadir nuevas capas de material a las anteriores [19]. El proceso SLS tiene la gran ventaja de no requerir ninguna estructura de soporte adicional, ya que el polvo proporciona un soporte adecuado al objeto durante el proceso de fabricación constructivo. Los diferentes materiales que se utilizan para la impresión de componentes en SLS incluyen plástico, cerámica, metales, vidrio [20].

2.2.4 Fotopolimerización en tina (estereolitografía)

La estereolitografía en tina se define como “un proceso de fabricación aditiva en el que el fotopolímero líquido en una tina se cura selectivamente mediante polimerización activada por luz”. El proceso de fotopolimerización en tina más común es la estereolitografía (SLA). SLA fue el primer sistema AM comercial, desarrollado en 1884 por Charles Hull, quien luego fundó 3D System Corporation en 1986 [21]. El proceso del SLA comienza cuando la plataforma de construcción desciende desde la parte superior de la tina para convertir el líquido fotopolimerizable en una capa de polímero con el espesor especificado, para endurecer el material líquido se utiliza un láser ultravioleta para curar la resina, convirtiéndola en un material sólido, y a si se repite el proceso con las demás capas de material hasta completar la pieza que se indicó imprimir [22].

2.2.5 Fusión por haz de electrones

En el proceso de haz de electrones (EBM), se utiliza un haz de electrones de alta potencia y utiliza un haz de electrones de alta potencia como fuente de energía en lugar de un láser, que solo se puede utilizar en metales conductores. El proceso también puede denominarse fusión selectiva por haz de electrones (SEBM) o fabricación aditiva por haz de electrones (EBAM). La primera patente, que describe un proceso en el que un polvo conductor se funde mediante un haz eléctrico capa por capa para producir un componente 3D, se registró en 1992 [23].

2.2.6 Chorro de material

El proceso de inyección de material (MJ) por sus siglas en ingles “Material Jetting”, desarrollado en 1984, los modelos 3D se crean mediante el uso de cabezales de impresión de inyección de tinta móviles que inyectan fotopolímero sobre una plataforma de construcción. Las gotas de resina se expulsan selectivamente en capas deseadas mientras se produce el curado simultáneamente, con luz UV antes de imprimir la siguiente capa [24].

2.2.7 Inyección aglutinante

La impresión por Inyección Aglutinante (BJ) por sus siglas en ingles Binder Jetting permite la creación de estructuras con alta porosidad destinadas a la fabricación de formas de dosificación de liberación rápida [25], en la fabricación de este proceso en el cual un agente liquido de pegado es depositado selectivamente para unir materiales en polvo [26]. En el proceso de inyección de aglutinante, las propiedades del material en polvo y el área de aglutinante son criticas para la fabricación exitosa de piezas, el aglutinante debe tener viscosidad, tensión superficial, densidad de tinta y propiedades adecuadas para evitar el taponando de las boquillas de la impresora [27].

2.3 ¿Que es una Ortesis?

Las ortesis son dispositivos de uso externo que realizan funciones de corrección y soporte de los sistemas neuromuscular y esqueléticos. Estos dispositivos pueden ser de gran apoyo para el tratamiento de lesiones de diversa gravedad.

Estos dispositivos pueden ser clasificados como:

- Ortesis de mano
- Ortesis de dedo
- Ortesis de muñeca
- Ortesis de codo
- Ortesis de pie tobillo
- Ortesis de cadera (Abducción, abducción y descarga)
- Collarines
- Postural
- Ortesis de codo a hombro
- Ortesis de codo a hombro y muñeca

También se mencionan que las ortesis se pueden clasificar más ampliamente en: Funcionales o dinámicas cuyo objetivo es mejorar la forma de como caminar de los usuarios, hay otras que son correctoras y usan un mecanismo de soporte de tres puntos que alivianan la carga uno del otro simultáneamente.

2.4 Ingeniería de calidad

La ingeniería de calidad es un término genérico. De Yuin Wu *et al.* [28] dice que puede ser percibido de manera diferente por profesionales, pero el termino definido por el doctor Genchi Taguchi; la ingeniería de calidad es una serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades o problemas que podrían ocurrir en el mercado después de que un producto se vende y es usado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales durante el periodo de vida diseñado.

2.4.1 Método Taguchi

El método Taguchi se expone como una herramienta eficiente para el diseño y optimización de procesos y productos, debido a que se centra en la identificación y evaluación de las variables con mayor influencia en la salida del proceso, en la reducción de los efectos de los factores no controlables y en la reducción de la variación del desempeño del proceso [29].

La filosofía de Taguchi se basa en tres conceptos fundamentales. En primer lugar, considerar el diseño de un producto en sus etapas iniciales es fundamental para lograr la calidad del resultado final. Por otro lado, sostiene que la calidad del producto mejora cuando se minimiza la variabilidad en los valores nominales o objetivo. Finalmente, entiende los costos de no calidad como resultado de las acciones generales de toda la organización, específicamente en función de la variabilidad de los procesos. La visión de Taguchi refleja en sus contribuciones más reconocidas a la mejora de la calidad, entre las que destacan: la función de pérdida de calidad, la incorporación de matrices ortogonales implementar diseño experimental, índice de señal/ruido e índice de capacidad de proceso [30]. la optimización del proceso o producto debe realizarse en un enfoque de tres pasos que comprende el diseño del sistema, los parámetros y la tolerancia. El diseño del sistema implica el uso de conocimientos científicos y de ingeniería para producir un diseño de prototipo funcional. Comprende la etapa de diseño del producto y del proceso. Por el contrario, el diseño de parámetros tiene como objetivo optimizar las variables del proceso para mejorar el rendimiento del proceso e identificar la combinación de

variables del proceso que puede producir un resultado óptimo [31]. El diseño de Taguchi recomienda el uso de una función de pérdida, que se transforma posteriormente en una relación señal/ruido (S/N) para medir la desviación entre los valores experimentales y los deseados. La relación S/N se define como la relación entre el valor medio de las características de calidad de la respuesta y la desviación estándar correspondiente. Se puede utilizar para determinar el nivel de cada factor que podría optimizar la respuesta [32, 33].

Una matriz ortogonal de Taguchi es un diseño experimental que permite elegir un producto o proceso que funcione de manera más consistente en un entorno operativo. Se trata de un método de optimización que utiliza una serie de experimentos en diferentes situaciones para asignar los factores seleccionados para un experimento.

Es importante señalar que normalmente se lleva a cabo un análisis estadístico mediante análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las variables estadísticamente significativas. Por lo tanto, un diseño de Taguchi acoplado con un análisis ANOVA podría ayudar a determinar las condiciones óptimas para un proceso [34].

2.5 Máquina de medición por coordenadas

Las Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC) son herramientas increíblemente versátiles y flexibles gracias a su método de capturar las dimensiones de un objeto. Su diseño físico se adapta a la tarea específica, lo que significa que puedes encontrar diferentes tipos de MMC según lo que necesites medir. Lo que realmente define el alcance de una MMC es su capacidad de medición (es decir, qué tan grande es el objeto que puede manejar), su nivel de precisión (qué tan exactas son sus lecturas) y, de forma crucial, la potencia de su software. Además, la integración de diversas tecnologías de palpado, como las sondas mecánicas, los sistemas ópticos de visión y la palpación láser, expande enormemente sus aplicaciones. Esta combinación permite que una sola MMC se adapte a una gama mucho más amplia de desafíos de medición.[30]

Una CMM es una máquina de medición de coordenadas que emplea tres componentes móviles que se trasladan a lo largo de guías con recorridos ortogonales. Un operador guía, un palpador alrededor de la pieza para realizar mediciones (x,y,z) del tipo: dimensional, posicional, desviaciones geométricas y mediciones de contorno. Los tipos más comunes para las CMM, son: Cantiléver, Puente, Gantry, Brazo Horizontal, Portal, Puente fijo y Brazo articulado.[35]

2.6 Escaneado de tercera dimensión 3D

El escaneado 3D es un método de recopilación de datos e información de objetos y superficies del mundo real para crear un modelo tridimensional. Para ello se utilizan dispositivos especializados como escáneres 3D que emplean distintas tecnologías, como la luz estructurada, el láser o la fotogrametría, para recopilar datos. Existen varias tecnologías para obtener y procesar este tipo de información, como la fotogrametría y la generación asistida por inteligencia artificial.

2.7 Análisis de parámetros de la fabricación por filamento fundido

En la AM utilizando el proceso FFF implica establecer ciertos valores para las distintas variables que se encuentran en el proceso. Todos estos se pueden introducir con la ayuda de un software o la unidad de control de la máquina y construyen los llamados parámetros de entrada. En la figura 4 se muestra un diagrama ampliado de causa y efecto de la tecnología FFF para obtener una precisión dimensional (PD) y calidad superficial (CS) correcta [36] [37] [38].

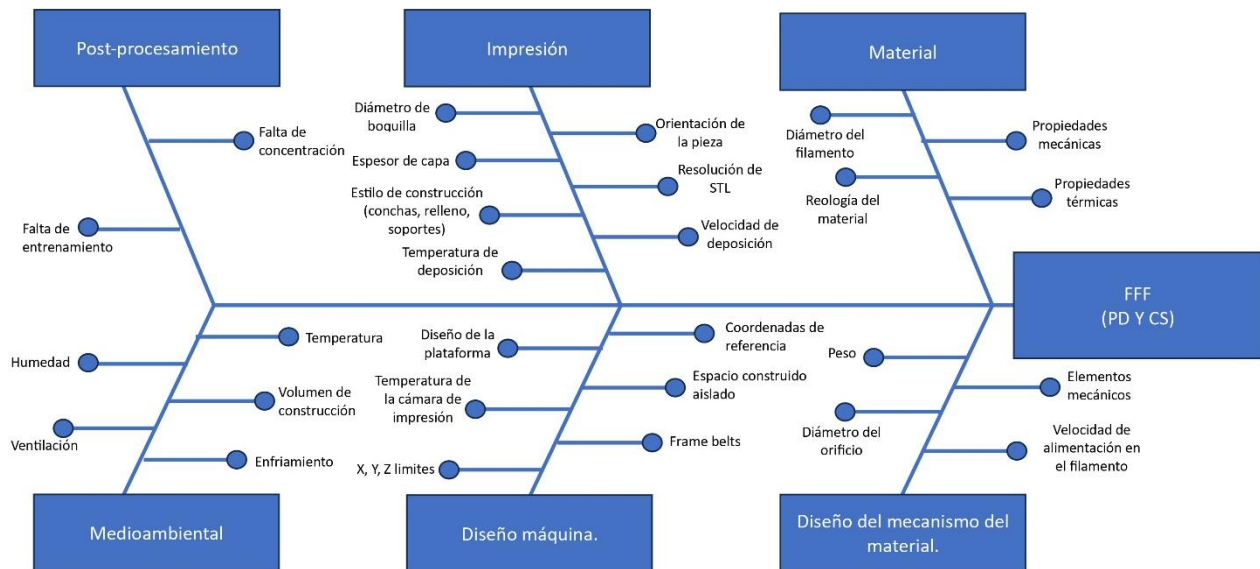


Figura 4: Diagrama de causa y efecto en el proceso FFF para mejorar la PD y CS.

2.8 Efectos en los parámetros de control en materiales

La elección de materiales y procesos de fabricación para ortesis es la clave del éxito como se menciona anteriormente. Por lo tanto, el usuario de FFF selecciona los parámetros de

control antes de preparar la pieza digital 3D para la impresión. Algunos de estos parámetros cambian (tipo de material, diámetro del filamento, diámetro de boquilla, etc.) mientras que otros permanecen constantes (dimensiones del lecho calentado, dimensiones del volumen de construcción, cámara cerrada, etc.).

El parámetro de control más importante es el tipo de material. Muchas opciones de materiales con diferentes colores ahora están disponibles comercialmente. Los materiales de impresión más comunes para FFF son ácido poliláctico (PLA) [39], y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), sin embargo, FFF también se puede incluir el policarbonato (PC) [40], poliamida (PA) [41], polipropileno (PP) [42], poliuretanos termoplásticos (TPU) [2], tereftalato de polibutileno (PBT) [43], polietilentereftalato-glicol (PET-G) [44], poliéter éter cetona (PEEK) [45], poliariletercetona (PAEK) [46], polieterimida PEI (ULTEM) [47], alcohol polivinílico (PVA) [48], y poliestireno de alto impacto (HIPS) [49].

PEEK, PEI, PAEK son polímeros de alto rendimiento y necesitan una temperatura de cámara superior a 30°C (ver tabla 1).

Tabla 1: Rangos de temperatura recomendadas de la boquilla, de la cama y cámara para polímeros convencionales y de alto rendimiento.

Materiales convencionales de impresión 3D			
Matriz polimérica	Temperatura de extrusión C°	Temperatura de la cama C°	Temperatura de la cámara C°
PLA	180-220	No requiere	No requiere
ABS	220-250	80-100	No requiere
TPU	195-230	60-90	No requiere
PVA	195-200	45-60	No requiere
HIPS	220-250	80-110	No requiere
PBT	230-250	Arriba de 60	No requiere
PP	220-270	90-100	No requiere
PA	220-270	75-90	No requiere
PETG	230-250	60-80	No requiere
PETG-CF	240-270	90-110	No requiere
Polímeros de alto rendimiento de impresión 3D.			
PEEK	410-430	140-160	70-90
PEI (ULTEM)	360-380	140-160	70-90
PAEK	380-400	140-160	90-110

2.9 Control de parámetros para la generación de soportes en impresión 3D.

Las estructuras de apoyo también afectan la calidad, el tiempo y el costo de proceso FFF, para esto se requiere analizar distintos trabajos que contengan pruebas con impresiones que requieran uso de soportes. En la literatura se menciona que cualquier geometría voladiza mayor a 45° requerirá de algún material de soporte, así que el ángulo voladizo crítico predeterminado será de 45°.

Tabla 2: Antecedentes de trabajos realizados con requerimiento de soportes en modelos impresos en la manufactura aditiva.

Pruebas con impresiones que requieren el uso de soportes en trabajos encontrados				
Polímero	Tecnología	Angulo	Observación	Autor
PLA	FFF	Mayor de 55°	Se considero el ajuste en un voladizo con ángulo de 55°, esto proporciona una restricción de voladizo más relajada para conseguir esos voladizos la orientación optima de la pieza fue 270°.	[50]
PVA	FFF	Mayor de 45°	PVA mostraron una disminución de la cristalinidad y la temperatura de fusión, mientras que la temperatura de degradación inicial y el índice de fusión aumentaron de 173.04 C°.	[48]
Ti-6Al-4V	SLM	Mayor de 45°	Se observó que la distancia máxima entre 2 puntos de soporte proyectados debe respetar el radio máximo de un punto de soporte bajo capacidad AM para evitar cualquier colapso de la superficie durante la impresión, máximo de voladizo se establece en 45°.	[51]
PLA	FFF	Mayor de 45°	Optimización de la orientación de la pieza, por la cantidad de soportes afecta al tiempo de construcción de la pieza, así como la precisión de la superficie. Esto puede medirse por el área de apoyo o el volumen de apoyo. Se busco una orientación de la pieza que optimizara el volumen de apoyo para una menor cantidad de tiempo de impresión.	[52]
PVC	FFF	30° y 45°	El ángulo recomendable para este bisel es entre 30° y 45°. s formas libres que poseen hacen que sus tiempos de construcción difieran a pesar que sus volúmenes de material constructivo sean similares. Volumen de soporte generado.	[53]

2.10 Marco conceptual

La elección de materiales y procesos de fabricación para las AFO es la clave de su éxito. Si bien muchos autores han destacado los beneficios de la tecnología de impresión 3D en la fabricación de dispositivos, pocos investigadores se han centrado en el diseño de dispositivos ortopédicos. Tradicionalmente, los dispositivos ortopédicos personalizados se realizaban

utilizando moldes de yeso, lo que requería múltiples vistas de pacientes y procesos de fabricación laboriosos y que requieren de mucho tiempo. La tabla 3 muestra trabajos relacionados recientes sobre materiales y métodos actualmente disponibles desde la optimización de materiales, hasta ortesis definidas y construidas mediante la manufactura aditiva y otros dispositivos de asistencia.

Tabla 3: Antecedentes de trabajos realizados de ortesis aplicando la manufactura aditiva.

Trabajos informados sobre materiales y métodos existentes			
Material	Objetivo	Observación	Autor
Epoxy con fibra de carbono	AFO	Presentaron una metodología de análisis estructural en 3D para acelerar el proceso de diseño de una AFO. Se puede concluir que el enfoque presentado es ideal para obtener numéricamente resultados globales y locales de AFOs.	[54]
PLA y ABS	AFO	Diseñar, fabricar y suministrar AFOs personalizados específicos para cada paciente. El artículo presenta una ortesis de tobillo-pie motorizada que puede utilizarse como dispositivo de asistencia para personas discapacitadas.	[55]
Polímeros con composiciones de fibra de carbono y biomateriales	Varios tipos ortesis	Selección de materiales aplicados en la impresión 3D. Aplicaciones de productos impresos en 3D fabricados con distintos materiales y diferentes procesos de fabricación.	[56]
Bioimpresión con manufactura aditiva	Comparativa de materiales y tecnología de impresión en ortesis.	El progreso de la manufactura aditiva en sus distintas tecnologías que satisfacen en el sector médico, y los distintos procesos que se desarrollaron destacando avances en precisión y materiales. Se enfatiza la importancia de continuar con la investigación para mejorar la eficiencia y ampliar las aplicaciones.	[57]
PA12	Ortesis de brazo	Se realizan pruebas en diferentes materiales, midiendo su resistencia, durabilidad y comportamiento ante distintas condiciones de impresión. Los resultados muestran que ciertos materiales ofrecen ventajas significativas en términos de resistencia y flexibilidad.	[58]

Los tipos comunes de materiales utilizados como termoplásticos, carbono y otros materiales impresos en 3D se utilizan en el campo de la ortesis según la necesidad de los pacientes y el tipo de dispositivo que reciban. Los avances tecnológicos hacen que cada vez sea mayor el uso de aparatos que reemplazan funcionalmente partes del cuerpo artificiales, órganos y extremidades, lo que permite a los pacientes llevar una vida más cercana a la normalidad. Los avances en biomateriales han permitido a médicos y científicos reemplazar partes del cuerpo afectadas con materiales naturales o sintéticos, como metales, cerámicas, polímeros, etc. Estos materiales permiten crear el mejor dispositivo para cada paciente con distintas resistencias, rigideces y pesos al igual que la mejor personalización posible al nivel de actividad del paciente

y el uso del dispositivo.

De los otros puntos más críticos de la investigación es la optimización paramétrica del proceso FDM y su impacto en las propiedades mecánicas y la calidad de las piezas impresas en la tabla 4 se agregaron trabajos realizados basados en optimizaciones de parámetros de impresión basados en la precisión dimensional, necesarios en la construcción de los componentes que se imprimieron en esta investigación. Nos centramos en investigaciones realizadas y publicadas a partir del 2020 al 2024 en esta sección se ofrece un resumen de los hallazgos críticos de algunos estudios con alta citación. Cabe destacar que la tabla 4 muestra investigaciones seleccionadas para ofrecer a los lectores una visión más clara de los descubrimientos de FFF más relevantes de este campo.

Tabla 4: Antecedentes de trabajos realizados de ortesis aplicando la manufactura aditiva.

Trabajos informados sobre métodos de impresión existentes		
Objetivo	Observación	Autor
La precisión del poliestireno expandible mecanizado con una herramienta de ABS impresa en FFF.	La orientación de construcción se vio significativamente afectada por la profundidad de corte. Los resultados experimentales revelaron la viabilidad del uso de herramientas de ABS impresas en 3D para el mecanizado de materiales poliméricos blandos.	[59]
Investigación basada en experimentos sobre la optimización de parámetros del proceso FFF para mejorar la calidad de piezas y sostenibilidad del proceso.	El patrón de relleno fue la clave que afectó la precisión dimensional tanto en el interior como en el exterior de la muestra. Su metodología mejoró la sostenibilidad del proceso sin afectar la productividad ni la calidad de la pieza.	[60]
La sensibilidad del material impreso FDM a la humedad se identificó mediante una prueba rápida.	La prueba sugirió que se registró un aumento significativo en las dimensiones de las muestras producidas cuando el nivel de contenido de humedad del filamento es del 0,74%.	[61]
Se realizó una investigación sobre el efecto de la temperatura de impresión y el color del filamento en la DA de muestras de PLA impresas mediante FDM.	El experimento demostró que la apariencia de la muestra cambia según el color del termoplástico utilizado, incluso si todo lo demás permanece igual. Por lo tanto, se sugirió que, al ajustar la configuración de FDM, es importante elegir el color correcto de plástico PLA del fabricante adecuado.	[62]
Se realizó una investigación sobre los efectos de la unidad controladora de aire en la DA de estructuras porosas fabricadas con FDM.	Las piezas fabricadas en una habitación con aire acondicionado tenían una diferencia de tamaño de alrededor del 2% en comparación con las piezas fabricadas sin aire acondicionado, donde la diferencia era de alrededor del 2,5%.	[63]
Se examinó la compensación del comportamiento de contracción en componentes fabricados mediante FDM.	La observación indicó que la capa depositada experimentó una deformación en el plano xy similar a la forma de una hoja de trébol. Posteriormente, se realizó un análisis exhaustivo de un demostrador de soportes para validar estos hallazgos.	[64]

Capítulo 3. Metodología

Esta investigación tiene como objetivo optimizar los parámetros de impresión FFF para la presión dimensional de una geometría compleja utilizando soportes a una ortesis de pie tobillo utilizando el método Taguchi. En la figura 5 muestra como un diagrama de flujo empleado para la investigación.

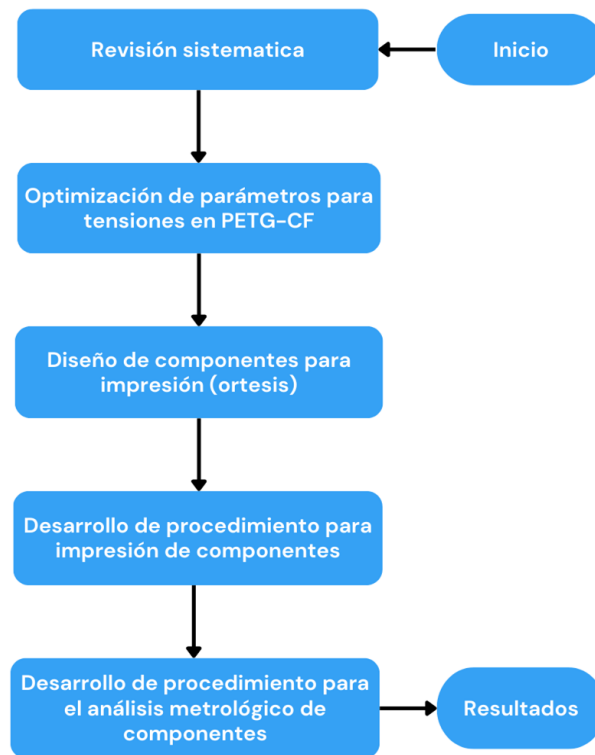


Figura 5: Diagrama de flujo de metodología para el desarrollo de la investigación.

La revisión sistemática se realiza para obtener la información de metodologías empleadas en otras investigaciones donde trabajos FFF realizados fueron similares a la metodología empleada en esta investigación.

3.1 Optimización de parámetros para esfuerzos de tensión

En la segunda tarea de esta metodología se adopta como se muestra en la figura 6 el objetivo es optimizar los parámetros de impresión FFF para las resistencias de tensiones mecánicas aplicando el material polietileno reforzado con fibra de carbono (PETG-CF), con 80 % de Tereftalato de polietileno y 20 % de fibra de carbono, y la parte estadística para la optimización del proceso se utilizará el método Taguchi. Se utilizó el software SolidWorks para

realizar el diseño como se muestra en la figura 7, para construir un modelo de prueba estática que cumpla con la norma ASTM D638-22 tipo 1 (ASTM, 2022). El formato de lenguaje de teselación estándar (STL) de muestra diseñada y se importó al software de línea ideaMaker 4.1.1 Raise3D donde se especifican los parámetros de proceso FFF para posteriormente realizar un corte y obtener el código G e importarlo a la impresora FFF.

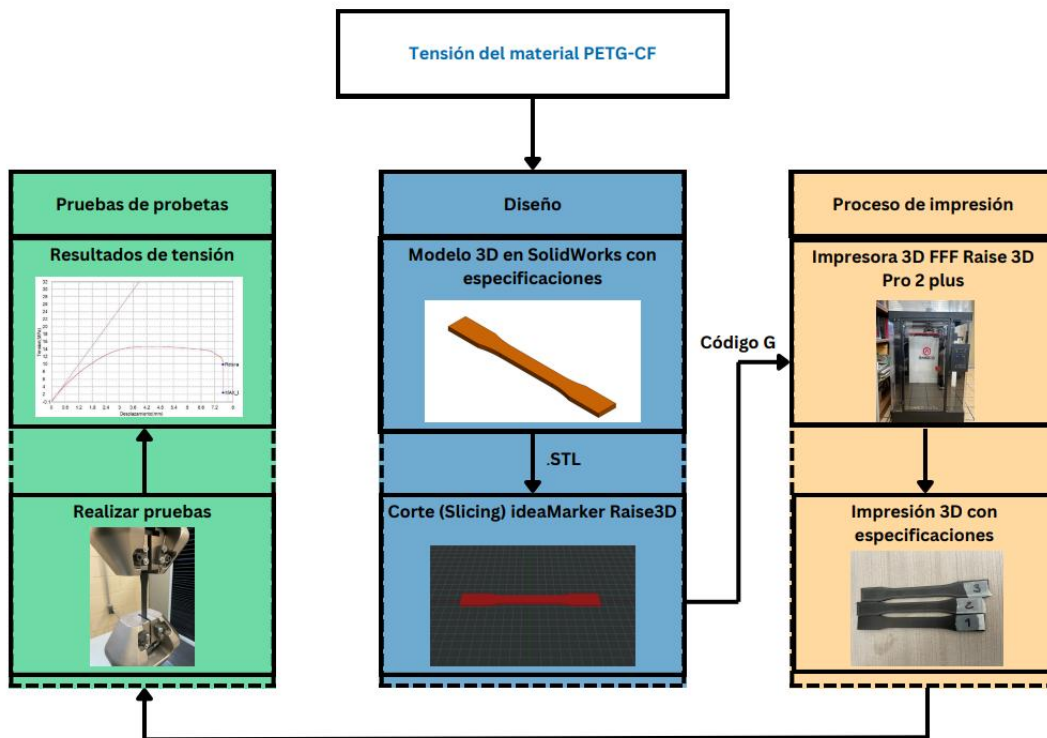


Figura 6: Diagrama de flujo de metodología para la optimización de parámetros para resistencia a la tensión.

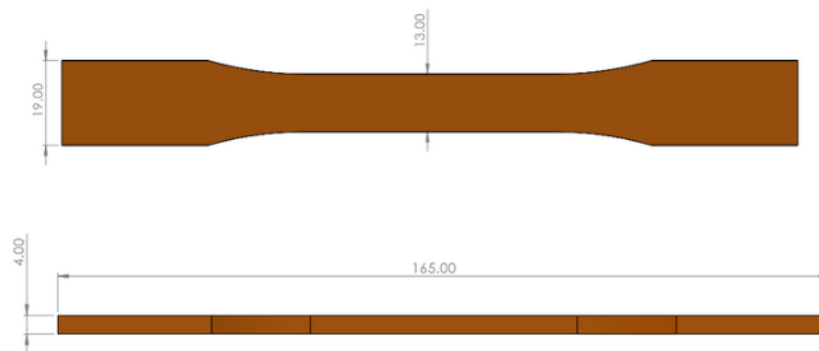


Figura 7: Modelo CAD de ASTM D638 tipo 1

Los ensayos de tensión es una de las técnicas de caracterización mecánica más utilizadas. Esto permite la determinación de múltiples cantidades estandarizadas utilizadas en cálculos estructurales como tensión de fractura, tensión máxima, etc. La Shimadzu AGS-X 100 KN se emplea como herramienta de prueba de tensión para las probetas impresas en 3D. La máquina se muestra en la figura 8.



Figura 8: Máquina de tensión Shimadzu AGS-X 100 K

Para estudiar los parámetros del proceso FFF es crucial utilizar los métodos de diseño sistemático de experimentos (DOE), como el diseño ortogonal de Taguchi. Estos métodos proporcionan un enfoque estructurado y sistemático para evaluar el efecto de múltiples variables de entrada en única variable de salida, lo que permite una caracterización más precisa de la superficie de respuesta y la identificación de configuraciones óptimas de los parámetros del proceso. El método Taguchi es un método estadístico que utiliza una matriz ortogonal para diseñar experimentos y analizar resultados. Esto es útil para mejorar la solidez de los procesos identificando factores clave que influyen en el rendimiento y determinando los niveles óptimos de estos factores.

Se realizó una prueba piloto para determinar varios parámetros de impresión FFF que influyen en la tensión y esfuerzos del modelo impreso en 3D. En consecuencia, los parámetros de impresión y su rango que se han considerado son el patrón de relleno, que varía entre líneas, triángulo, panal y giroide, y la densidad de relleno entre 25 al 100 % con pasos del 25%, la altura de capa del 0,3 mm al 0,15 mm, la temperatura de boquilla de 245 °C a 260 °C con pasos de 5 °C, orientación de trama θ de 0° a 90° con pasos de 30 ° como se muestran en la tabla 5. En la tabla 6 se muestran los parámetros que serán fijos en todos los niveles, los parámetros se seleccionaron conforme el fabricante específica.

El diseño experimental se realizará mediante el uso del método de matriz ortogonal de Taguchi, donde se puede reducir el número total de experimentos y obtener estadísticamente el mismo resultado válido como si se utilizara el diseño factorial 4×5 . El grado de libertad (DOF) se obtiene restando 1 del número de niveles. El grado de libertad para cada factor con 4 niveles será 3. Por lo tanto, el grado de libertad total para 5 factores con 4 niveles será 15. Por lo tanto, el grado de libertad apropiado para este experimento será la matriz ortogonal L_{16} . La tabla 7 incluye el diseño experimental de los parámetros de fabricación FFF seleccionados para este experimento.

Para fines experimentales el método Taguchi implica la optimización de los parámetros del proceso mediante un diseño experimental robusto. La relación señal-ruido es un parámetro de calidad que se utiliza para evaluar el efecto de factores de entrada en las respuestas. En el estudio de investigación actual, todas las respuestas de salida son características de calidad del tipo más grande es mejor, la meta del experimento es maximizar la respuesta. Para evaluar las relaciones S/N, se ha utilizado el tipo de características de calidad, cuanto más grande, es mejor, que se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\sum \frac{1}{n} \right) \quad [1]$$

Tabla 5: *Parámetros de control de impresión FFF con 4 niveles*

Nivel	Patrón de relleno	Temperatura de boquilla C °	Orientación de construcción θ	Altura de capa (mm)	Densidad de relleno %
1	Triangular	245	0	0.3 mm	25
2	Panal	250	30	0.25 mm	50
3	Giroide	255	60	0.2 mm	75
4	Líneas	260	90	0.15 mm	100

Tabla 6: *Parámetros de impresión seleccionados según especificaciones del fabricante.*

Parámetros	Valor
Temperatura de la cama	100°C
Plataforma	Falda
Ancho de línea	0,4 mm
Densidad de relleno	40 %
Espesor de pared	0,8 mm
Líneas de pared	2
Velocidad de ventilador por capa	100%
Velocidad de impresión	90 mm/s
Espesor de capa relleno	0,1 mm
Porcentaje de superposición de relleno	30%

Tabla 7: *Diseño experimental de los parámetros de impresión matriz ortogonal L 16*

Patrón de relleno	Temperatura de boquilla C °	Orientación de construcción	Altura de capa	Densidad de soporte %
Triangulo	245	0	0,30	25
Triangulo	250	30	0,25	50
Triangulo	255	60	0,20	75
Triangulo	260	90	0,15	100
Panal	245	30	0,20	100
Panal	250	0	0,15	75
Panal	255	90	0,30	50
Panal	260	60	0,25	25

Giroide	245	60	0,15	50
Giroide	250	90	0,20	25
Giroide	255	0	0,25	100
Giroide	260	30	0,30	75
Línea	245	90	0,25	75
Línea	250	60	0,30	100
Línea	255	30	0,15	25
Línea	260	0	0,20	50

Los archivos de código G obtenidos del software de corte se utilizaron para fabricar muestras utilizando una impresora FFF Raise3D Pro2 Plus con dimensiones de impresión 305x305x605 mm, con diámetro de boquilla 0,4 mm. En este estudio se utilizó el material Tereftalato de polietileno reforzado con fibra de carbono (PETG-CF) de 1,75 mm de diámetro de filamento. Los cuatro patrones de relleno que se definieron para las pruebas experimentales fueron (Triangulo, Panal, líneas, giroide) con densidades de relleno de; 25, 50, 75 y 100 %, junto con los parámetros mencionados en el diseño de experimento Taguchi. Luego, los modelos se imprimen en consecuencia. Se utiliza una máquina de pruebas de tensión (marca) basada en normas, en este caso de estudio se utiliza la norma ASTM D638-22 para realizar las pruebas de tensión, y tomar la medición de tensión de cada probeta.

3.2 Diseño de componentes en CAD para impresión y análisis

3.2.1 Adquisición de datos geométricos mediante escaneo 3D

Para la adquisición de datos geométricos del pie se propuso un escaneo 3D para la obtención de datos geométricos del pie, y el escáner utilizado en este trabajo es el escáner 3D Range 2 de Revopoint el cual recaudara los datos geométricos mediante un mapeo 3D y creara una representación digital midiendo los objetos de manera rápida y precisa sin necesidad de verificación manual de los datos geométricos. Este proceso se realiza utilizando el software Revo Scan 5 de Revopoint para corregir el mapeo 3D que se realizó suavizando superficies de las geometrías obtenidas, construcción de malla conjunto y cerrar puntos de la malla, al finalizar los ajustes mencionados se exportará un modelo de malla en archivo STL.

3.2.2 Diseño CAD de componentes y simulación

Los modelos CAD se realizarán en el software SolidWorks, se trabaja con ayuda de los

datos geométricos obtenidos del escaneo 3D se decidió diseñar el dispositivo ortopédico con un espesor de 3 mm para evitar daños durante el uso repetido y la aplicación en segmentos específicos. Al finalizar el diseño se realizó una optimización topológica para la disminución de masa del modelo diseñado. Una vez obtenido el modelo optimizado se realizó un rediseño el cual indico la optimización de disminución de masa del modelo.

El rediseño se sometió a una simulación de estrés aplicando el teorema de Von Mises el cual nos permite visualizar el estrés del diseño, ya que tendrá que resistir determinadas cargas durante su vida útil por lo que debe diseñarse en consecuencia. Para simularlo se aplicó una fuerza de 50 N en el extremo de la puntera mientras que el extremo opuesto esta con una sujeción. Realmente, la distribución de fuerzas es más compleja y difícil de determinar con precisión, sin embargo 50 N de fuerza se consideran suficientes para esta aplicación. Al obtener un resultado positivo con pocos desplazamientos en la simulación y un factor de seguridad (FOS) aceptable se realizará la generación del formato STL del diseño. En la figura 9 se muestra un diagrama de flujo donde se grafica el procedimiento exacto a seguir para el análisis del diseño de componentes y procedimiento para impresión.

El filamento PETG-CF (Shenzhen Creality 3D Technology Co, Ltd.) se adquirió de una fuente en línea conocida. El filamento PETG tenía un contenido de volumen de polímero, V_w , del 80%, y un contenido de volumen de CF, V_w , del 20%. La densidad del PETG-CF era de 1,34 g/cm³. El PETG-CF suele derivar de una combinación de glicol y tereftalato de polietileno, y generalmente se lo considera un material de impresión 3D respetuoso con el medio ambiente debido a sus propiedades y es 100% reciclable. El PETG-CF requiere una temperatura de lecho de alrededor de 80 °C, y es necesaria una temperatura de la boquilla del extrusor en el rango de 240–250 °C para imprimir el compuesto PETG-CF. Este estudio tiene como objetivo crear y evaluar el diseño de la AFO con el material PETG-CF fabricados con mallas poliméricas impresas en 3D en un entorno de laboratorio.

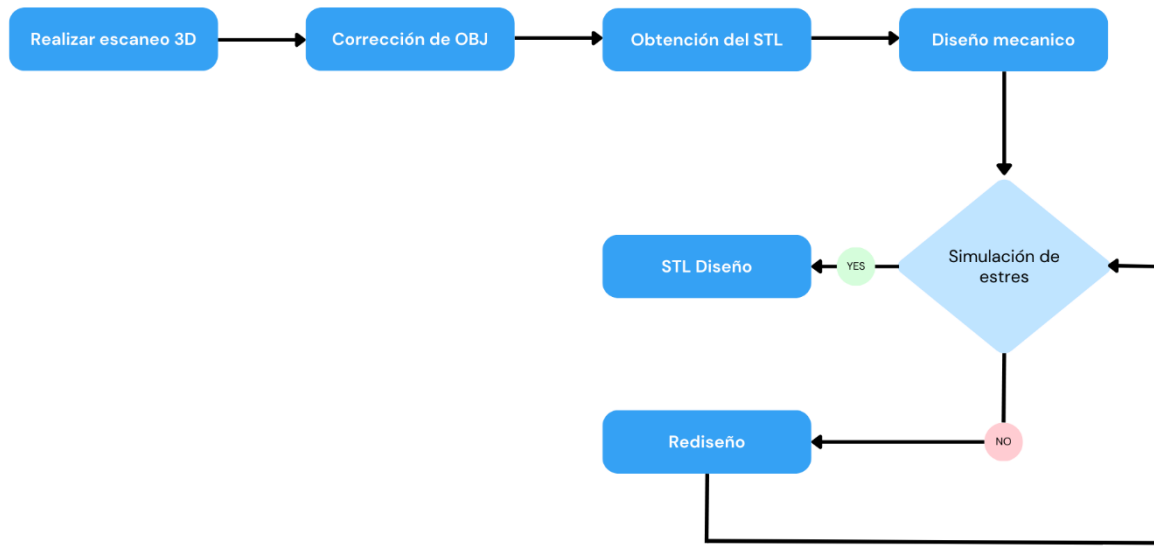


Figura 9: Diagrama de flujo de metodología para el desarrollo del diseño.

3.3 Desarrollo de procedimiento para impresión de componentes

El corte o selección de parámetros de impresión 3D es un paso importante para convertir un modelo de comandos en pasos para la impresora 3D. Existen distintas herramientas de software de corte en el mercado, pero una buena herramienta de corte puede mejorar los resultados de la impresión. [65], cada software está diseñado para principiantes, aficionados, usuarios avanzados y profesionales. IdeaMaker de Raise3D es una poderosa herramienta de corte donde se está realizando este caso de estudio sobre el modelo de una AFO basado en el material PETG-CF en una impresora de fabricación por filamento fundido Raise3D.

3.3.1 Materiales de impresión

Los filamentos que se utilizaron fueron: PETG-CF como material de modelo el cual se realizó una comparación de dos distintos materiales para la impresión de soportes PLA y PVA, esto para realizar la evaluación de que efecto dimensional ocasiona en el material de modelo estos materiales mencionados en el PETG-CF. El filamento PLA de 1.75mm de diámetro fue adquirido de la página oficial del fabricante (Shenzhen Creality 3D Technology Co, Ltd.). El filamento PVA del fabricante (Polymaker Co, Ltd). Los parámetros de impresión de los soportes y el resguardo para evitar la absorción de humedad se tomaron en cuenta con las instrucciones que proporciona el fabricante.

3.4 Desarrollo de análisis metrológico de componentes

La presente sección detalla la metodología implementada para la inspección metrológica de los componentes, la cual se fundamenta en un procedimiento sistemático que garantiza la precisión, reproducibilidad y confiabilidad de los datos obtenidos. Esta metodología se estructura en tres fases principales: Programación de la medición, configuración y ejecución dimensional, las cuales se describen a continuación en la figura 10.

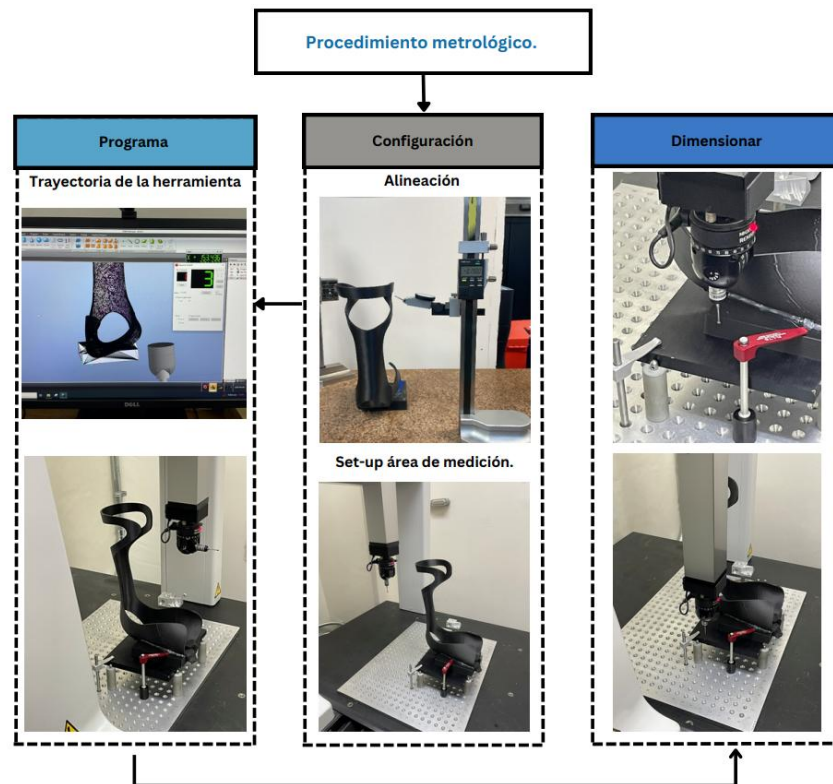


Figura 10: Diagrama de flujo del procedimiento metrológico.

Fase de Configuración: Esta primera fase comprende la preparación física del sistema de medición y del componente en el entorno de trabajo de la CMM, asegurando las condiciones óptimas para la adquisición de datos. La alineación y Posicionamiento Inicial del Componente fue colocado cuidadosamente sobre la mesa de la CMM. Antes de colocarse en la CMM se realizó una alineación física inicial del componente utilizando un medidor de altura digital de precisión. Este paso fue crítico para establecer una base de referencia sólida y asegurar que el componente estuviera correctamente nivelado y orientado, coincidiendo con la alineación virtual definida en la fase de programación. La estabilidad y el posicionamiento preciso del componente son fundamentales para la exactitud y repetibilidad de las mediciones de la CMM.

Fase de Programación de la Medición en CMM esta etapa se enfoca en la planificación digital y la elaboración del programa de inspección para la Máquina de Medición por Coordenadas (CMM) marca Mitutoyo modelo Crysta Plus 504 fue la que se utilizó para realizar las mediciones de este proyecto de investigación y se muestra en la figura 11.

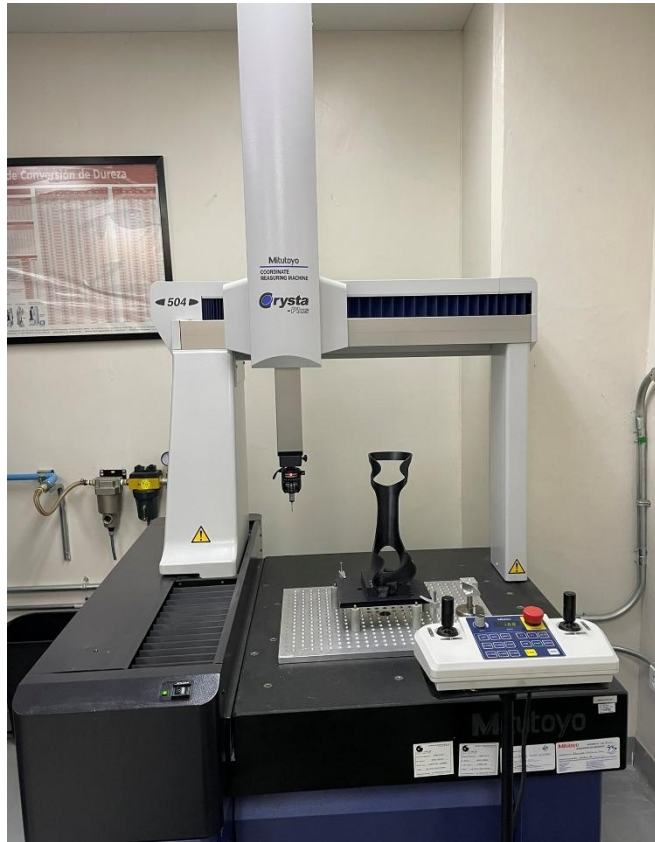


Figura 11: Máquina de medición por coordenadas Mitutoyo Crysta Plus 504

Generación del Programa y Definición de la Trayectoria del Palpador: Utilizando el software de programación CMM Manager Qxsoft y se cargó el modelo CAD nominal del componente a inspeccionar. Sobre este modelo digital, se definieron meticulosamente los puntos críticos, las geometrías de interés y las características dimensionales y geométricas (GD&T) que requerían verificación. Posteriormente, se programó la trayectoria que seguiría el palpador de la CMM para contactar estos puntos o escanear las superficies de manera eficiente y exhaustiva. Esta programación anticipada es fundamental para asegurar que todas las características relevantes para la funcionalidad y el ensamblaje del componente sean cubiertas, minimizando errores humanos, optimizando los tiempos de inspección y garantizando la repetibilidad del proceso.

Preparación Virtual para la Medición: En esta subetapa, se llevó a cabo la alineación virtual del modelo CAD con la orientación física prevista del componente en la bancada de la CMM. Esta alineación preestablecida en el software es crucial para establecer un sistema de coordenadas de la pieza en la CMM que corresponda de manera precisa con el sistema de coordenadas del diseño, permitiendo una interpretación correcta de las desviaciones dimensionales y geométricas.

La fase final corresponde a la ejecución automatizada de la medición y la adquisición de los datos dimensionales del componente mediante la CMM.

Adquisición de Datos Mediante Palpado por Contacto: El programa de medición desarrollado fue ejecutado por la CMM. El palpador de contacto de la CMM interactuó directamente con la superficie del componente, siguiendo la trayectoria predefinida y tocando los puntos específicos de interés para finalmente recopilar de forma sistemática todos los datos dimensionales necesarios para esta evaluación.

Capítulo 4: Resultados y discusión

4.1 Optimización de parámetros para la resistencia mecánica del PETG-CF

4.1.1 Modelado e impresión de las probetas de la norma ASTM D638-22.

El modelo 3D de la probeta como se muestra en la figura 7, se genera a partir de las instrucciones y tablas dimensionales que estipula la norma [66], utilizando el software CAD SolidWorks, para posteriormente ser exportados al formato de archivo STL. Este archivo STL, que representa la geometría del modelo, fue luego importado a un software de laminado o "slicer". En este programa, el modelo se divide en capas individuales, y estas instrucciones se convierten en código G (G-code), un lenguaje que dirige los movimientos de las herramientas de la impresora 3D según la información generada capa por capa (Figura 12). Conforme a lo estipulado por el Diseño de Experimentos (DOE), se procedió a la impresión de un total de 16 modelos (probetas), cada una bajo parámetros de impresión específicos, lo cual se ilustra en la Figura 13.

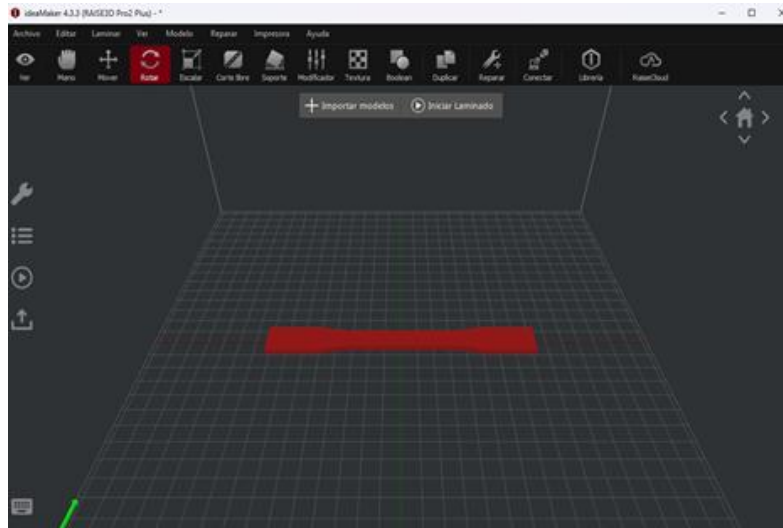


Figura 12: Modelos de la ASTM D638 en el cortador ideaMaker 4.1.1 Raise3D.



Figura 13: Modelos de la ASTM D638 impresos en FFF con PETG-CF según el DOE de la matriz ortogonal L 16

4.1.2 Pruebas de ensayo de tensión

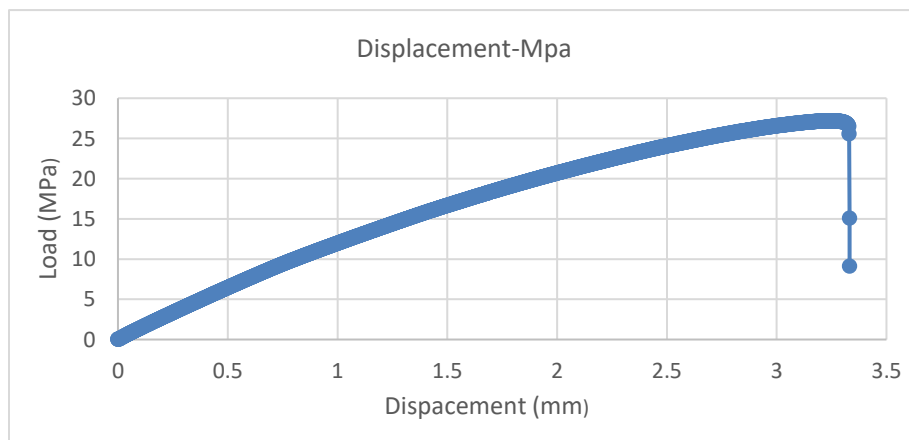
Las pruebas de tracción se ejecutaron en una máquina universal de ensayos, aplicando una velocidad de carga constante de 2 mm/min. Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, con cada ensayo replicado tres veces para asegurar la fiabilidad y repetibilidad de los resultados.

Las pruebas se llevaron a cabo en probetas con forma de mancuerna, evaluando el comportamiento bajo diversos patrones de relleno (líneas, triángulo, panal y giroide) y densidades de relleno (25%, 50%, 75% y 100%). Además, se controlaron otros parámetros de impresión considerados críticos para las pruebas de tensión, como la temperatura de extrusión, el ángulo de construcción y la altura de capa. La Figura 14 ilustra el método de sujeción de la probeta en la máquina de tensión.



Figura 14: Máquina de tensión realizando el trabajo de tracción en probeta.

Se realizaron 16 ensayos de tensión en probetas para examinar el comportamiento mecánico del material PETG reforzado con fibra de carbono fabricado por el proceso FFF. Debido a los resultados experimentales de pruebas podemos ver una caracterización completa del material utilizado para registrar otros parámetros como el desplazamiento, longitud de deformación, cara y transversales. Los resultados de las pruebas muestran que el comportamiento mecánico del material es elástico plástico. En la gráfica 1 se muestra la curva de fuerza desplazamiento de la probeta numero 4 con 27.19 MPa y con los siguientes parámetros; patrón de relleno “triangulo”, Temperatura de boquilla 260° C, Orientación de trama 90°, altura de capa 0,15 mm, Densidad de relleno 100%.



Grafica 1: Curvas de fuerza desplazamiento probeta 4

4.1.3 Mecanismos de daño en probetas

La figura 15 muestra todas las probetas que fueron analizadas después de la fractura. La mayoría de las rupturas de los polímeros son dúctiles debido a la reorientación y el estiramiento del plástico en filiformes, esto hace que el material se deforme de una manera considerable.



Figura 15: Probetas con ruptura

Al observar los resultados de rotura de las probetas se produjo en diferentes secciones de las muestras analizadas al final del ensayo de tensión. Los parámetros seleccionados para cada probeta fueron distintos y ciertos factores de ellos influyen en la zona en la que se rompe en las muestras. En la tabla 8 se muestran los resultados de tensión de las probetas impresas.

Tabla 8: Resultados de tensión de probetas

EXP	Patrón de relleno	Temperatura de boquilla C °	Orientación de construcción	Altura de capa	Densidad de soporte %	MPa
1	Triangulo	245	0	0,30	25	15.94
2	Triangulo	250	30	0,25	50	24.46
3	Triangulo	255	60	0,20	75	24.66
4	Triangulo	260	90	0,15	100	27.19
5	Panal	245	30	0,20	100	23.20
6	Panal	250	0	0,15	75	19.45
7	Panal	255	90	0,30	50	18.28
8	Panal	260	60	0,25	25	17.65
9	Girode	245	60	0,15	50	17.38

10	Girode	250	90	0,20	25	15.50
11	Girode	255	0	0,25	100	22.94
12	Girode	260	30	0,30	75	21.65
13	Línea	245	90	0,25	75	18.29
14	Línea	250	60	0,30	100	26.58
15	Línea	255	30	0,15	25	13.94
16	Línea	260	0	0,20	50	15.98

4.1.4 Optimización de los parámetros de impresión para las resistencias de esfuerzos de tensión.

Mencionado en la metodología para obtener un modelo impreso con mayor resistencia a las tensiones, se toma en consideración la característica de Taguchi “Más grande, es mejor”, cuyo valor se obtiene mediante la fórmula 1.

La relación señal-ruido (S/N) para cada nivel basado en la característica de más grande es mejor se muestra en la tabla 6 que representa el parámetro óptimo, es decir, el parámetro con la relación (S/N) más alta para minimizar la variación absoluta y el impacto de cada elemento establecido en el valor delta. Por lo tanto, según los valores mencionados en la tabla 9, y los gráficos de la figura 16. El parámetro óptimo para una mayor resistencia y es cuando el patrón de relleno triangular, la temperatura de la boquilla es de 250° C, la orientación de trama es de 60°, la altura de capa de 0,30 mm y la densidad de relleno es del 100%.

Tabla 9: Respuesta para relaciones de señal y ruido (S/N)

Nivel	Patrón de relleno	Temperatura de boquilla C	Orientación de construcción	Altura de capa	Densidad de soporte %
1	26.56	25.36	25.26	26.06	23.94
2	25.74	26.20	25.91	26.00	25.11
3	25.59	25.40	26.23	25.47	26.11
4	26.56	25.36	25.26	26.06	23.94
Delta	1.39	0.84	0.97	0.59	3.95
Rango	2	4	3	5	1

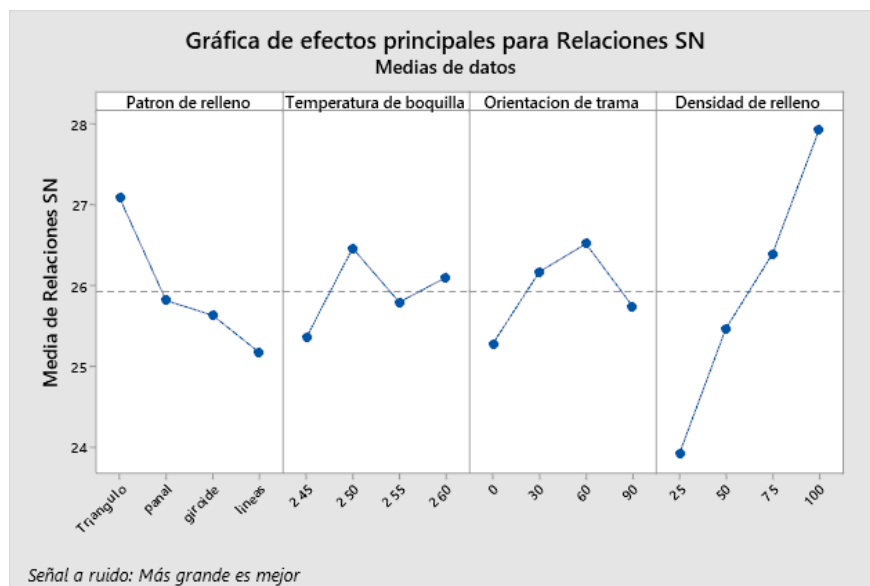


Figura 16: Grafica de efectos principales para relaciones (S/N)

Los datos se analizan de una manera más a fondo utilizando el ANOVA cual resultado se muestra en la tabla 10. Se puede observar que los valores de p de la densidad de relleno y patrón de relleno son valores significantes ya que sus valores son muy cercanos a 0; esto indica que los dos parámetros mencionados son muy significativos en relación con la resistencia de esfuerzos de los modelos impresos en 3D. La densidad de relleno tiene la mayor contribución del 178.404 con lo que respecta a la mejora de la resistencia, seguida con el patrón de relleno con un 45.809, los parámetros restantes contienen en su valor p alto lo cual los hace insignificante en la variable de respuesta, esto sugiere que los cambios en el predictor no estén asociados con cambios en la respuesta. El siguiente valor de contribución es la orientación de trama con 20.103. Además, el análisis de regresión se realiza en el conjunto de datos que determina el coeficiente, valor R2 del 98.18%.

Tabla 10: Resultados de ANOVA

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust	MC Ajust	F	P
P.R	3	25.36	25.26	26.06	23.94	0.049
TEMP	3	26.20	25.91	26.00	25.11	0.169
O.T	3	25.40	26.23	25.47	26.11	0.136
D.R	3	25.36	25.26	26.06	23.94	0.007
Error	3	4.842	4.842	4.842		
Total	15	265.799				

En la figura 17 se muestra la gráfica de probabilidad normal, el cual el valor residual estándar está dentro del rango aceptable de ± 0.8 , lo que indica que no hay un delineador en estos datos.

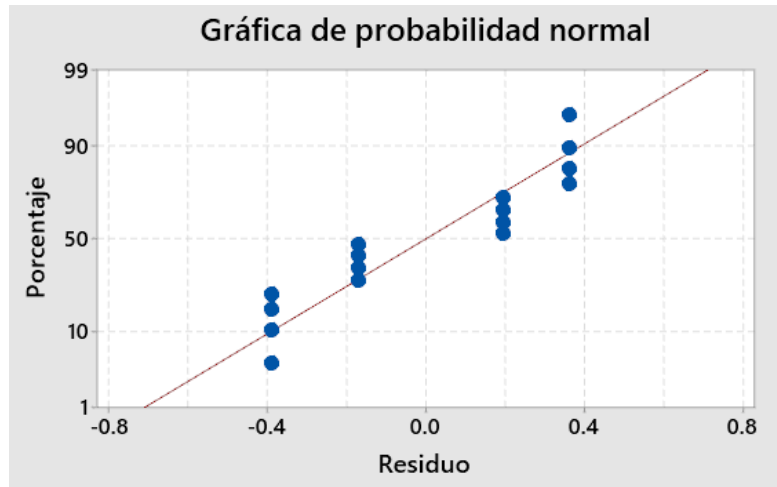


Figura 17: Gráfica de probabilidad normal

4.1.5 Validación de resultado

La densidad del relleno influye en gran medida en la resistencia de tensión de las probetas utilizando el material PETG-CF como se muestra en el análisis ANOVA en la tabla 6. La resistencia óptima se logra cuando la densidad de relleno es de 100%, se puede observar que los esfuerzos aumentan mientras mayor porcentaje de densidad de construcción tiene la impresión 3D como se ve en el gráfico de medias S/N que se muestra en la figura 16. Dely. *et al.* [67] realizaron un estudio experimental donde examinaron las respuestas de las muestras del PETG-CF con las mismas densidades que se utilizaron para este estudio (25%, 50%, 75% y 100%) bajo diferentes presiones de impacto dando como resultado 2,4 bar de presión con el 100% de densidad, entre mayor densidad de relleno más resistente es el componente impreso en 3D. Entre los cuatro tipos de relleno que se seleccionaron, el patrón de relleno con mayor hallazgo es el triangular, que es similar al resultado de Alafaghani, *et al* [68] . La temperatura de impresión óptima para la resistencia de tensión se observa a 250°C los hallazgos de Valvez, Silva, & Reis [69] se alineo con el estudio del PETG-CF donde la temperatura óptima fue de 250°C. la literatura reporta que la temperatura de boquilla consecuente a la viscosidad y la velocidad de impresión están relacionadas y deben ser analizadas Abeykoon, Sri-Amphorn, *et al.* [70] , pero en este estudio no se utilizó como parámetro la velocidad de impresión. El ángulo

de trama o también conocido como el ángulo de construcción se define como la forma de orientar la pieza en una plataforma de construcción con respecto a los ejes X, Y y Z. En ciertos artículos, la orientación de construcción representó un parámetro cuantitativo Raju, Gupta, Bhanot, *et al.* [71], pero en otros, se consideró como parámetro categórico Jesús Miguel Chacón, *et al.* [72]. La orientación de trama muestra reducción de rugosidad de superficie Anitha, Arunachalam, & Radhakrishnan [73]; Raju et al. [71] y catalogaron que el parámetro es significativo para la calidad de superficie, sin embargo, también Alafaghani et al. [68] examinaron el impacto del parámetro de orientación de construcción como un parámetro significativo para la precisión dimensional. En este trabajo se estudió este parámetro para observar la importancia de la orientación de impresión en la resistencia de la pieza y determinar su valor significativo como parámetro importante en la resistencia de tensiones.

4.1.6 Parámetros de impresión

El parámetro de impresión 3D óptimo obtenido mediante el método de Taguchi con mayor característica que se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Parámetros óptimos para impresión a mayor resistencia

Patrón de relleno	Temperatura	Orientación de trama	Altura de capa	Densidad de relleno
Triangulo	250	60	0,30	100

4.2 Diseño de componentes para impresión y análisis

4.2.1 Escaneado 3D obtención geométrica de pie-tobillo

En la actualidad, el escaneado 3D de superficies ofrece diversas posibilidades de aplicaciones médicas. El desarrollo de prótesis, órtesis y exoesqueletos médicos a medida es otra gran aplicación de escaneado 3D. El primer objetivo del diseño es diseñar de la geometría interna para que corresponda perfectamente a la forma anatómica del pie y tobillo del paciente. Por lo tanto, los datos geométricos que rodean el pie y el tobillo también son requeridos. Una forma precisa de obtener los datos geométricos del pie es realizar un escaneado 3D. En este estudio se utilizó el Revopoint™ modelo RANGE 2, un escáner de mano, y el software Revo Scan 5.5.0 del mismo equipo de Revopoint™ para obtener y procesar escaneos 3D de la superficie del pie. El escáner RANGE 2 utiliza luz estructurada infrarroja para obtención de geometrías de objetos 3D, tiene una resolución de 0,1 mm, que se define como la capacidad de

resolver detalles en el objeto escaneado y una precisión dimensional de 0,1 mm para que coincida con el valor real de la cantidad medida.

Se desarrolló un método de adquisición de datos, consiste en una exploración continua que orbita el escáner de mano a 360° alrededor del pie, como se muestra en la figura 18. La adquisición de datos se realizó tres veces, los errores máximos resultantes de esas exploraciones se utilizaron para calcular error máximo medio de cada adquisición de datos. Para el escaneado del pie se realizó orbitando 360° alrededor del pie hasta incluir la información posible sobre el objeto examinado. La clave para una buena reconstrucción es la alta calidad de imágenes: la nitidez y la iluminación uniforme son fundamentales. Por lo tanto, el fondo debe ser de un solo color o preferiblemente, debe contener características reconocibles o patrones de color que ayuden durante la fase de alineación. El pie debe mantenerse rígido e inmóvil; además no debe tener objetos brillantes y superficies transparentes. En este caso se utilizó patrones de seguimiento para garantizar un resultado de precisión dimensional en CAD tridimensional.

Se realizaron 550 fotos del pie en los diferentes ángulos las cuales se cargaron en el software Revo Scan 5.5.0 de Revopoint™ este guía al usuario a través de los pasos necesarios para obtener el modelo 3D, sin embargo, fueron necesarios algunos pasos adicionales para asegurar la mayor calidad posible de los resultados. El procedimiento adaptado se describe en los siguientes pasos.

- Nube de puntos ligada. Este paso no forma parte directamente del flujo de trabajo, pero tiene una importancia fundamental para obtener buenos resultados globales. Utilizando la herramienta de *fusión de puntos en avanzado*, se eliminan todos los puntos con un valor elevado de incertidumbre de reconstrucción.
- Limpieza de nubes dispersas. Todos los puntos pertenecientes al fondo o a cualquier otro detalle no deseado deben eliminarse manualmente. Esto puede hacerse fácilmente utilizando la herramienta de *eliminar los puntos del marcador* que proporciona el software.
- Distancia de punto. Esto es la distancia promedio entre puntos adyacentes en una nube de puntos fusionada. Los valores de distancia más altos generan detalles más uniformes con más detalles y menos datos, mientras que los valores más bajos generar un modelo más detallado con mayor ruido y mayor volumen de datos. La distancia que se seleccionó fue de *0.20 mm*.
- Detección de superposición. Es la distancia entre el ruido de la nube de puntos

en la superficie local y la superficie real. Si es menor que el valor establecido, se considera ruido y se elimina. Si supera el valor establecido, no se elimina. En esta herramienta se seleccionó una *detección de superposición de 0.35 mm*.

- Configuración de escaneo. Esto es antes de comenzar escanear, permite recopilar mayor información de la nube de puntos y se obtienen geometrías más precisas, en superficies complejas del objeto escaneado incluyendo dimensiones.
- Seguimiento de escaneo. Este paso es el método de escaneo es el rastreador óptico para ayudar a los escáneres a seguir el objeto que se está escaneando. Esto permite que el proceso de escaneado sea más eficiente, preciso y predecible. Puede facilitarse esto utilizando la herramienta de *Seguimiento de escaneo a marcadores* que proporciona el software.
- Creación de malla. En este paso final el software construye una malla 3D a partir de la densa nube de puntos. RevoScan cuenta con un algoritmo muy eficiente para esta tarea, por lo que generalmente tarda solo unos segundos en completarse.
- Exportación de mallas, directamente en formato STL. Esto ayudara a generar un formato fácil de manipular en el software SolidWorks entre otros programas CAD o cortadores de impresoras 3D.

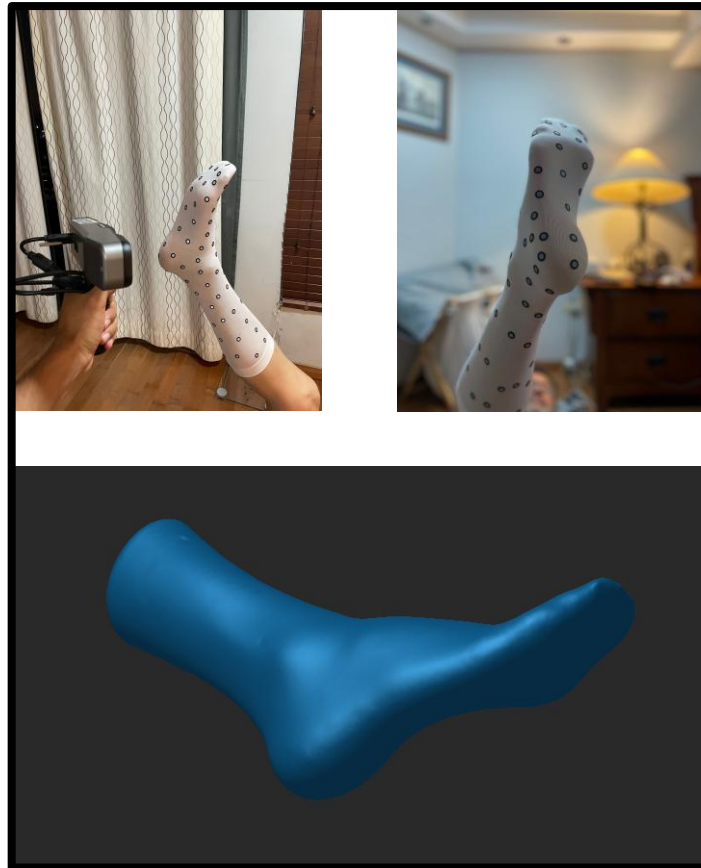


Figura 18: Fotos del pie y el modelo 3D resultante

La exportación de la malla, directamente en formato STL con 29,858 vértices y 59,719 polígonos como se muestra en la figura 19.



Figura 19: Malla resultante de los datos geométricos del pie-tobillo.

En las tablas 12 y 13, resume los principales parámetros de las nubes de puntos y la malla que se calcularon en este estudio de caso. Todos los cálculos se realizaron en un equipo Dell™ Windows 11 home Microsoft Corporate, con un procesador Intel™ Core i7 de 6 núcleos a 3,90 GHz, 32 GB de RAM y grafica dedicada Nvidia Quadro M1200 de 4GB.

Tabla 12: Parámetros de renderizado

Descripción	Parámetros
Renderizado	Fusionado
Tipo de modelo	Continuo
Configuración de escaneo	Alta precisión
Seguimiento de escaneo	Marcadores

Tabla 13: Detalles de nube de puntos

Descripción	Parámetros	Tiempo
Nube de puntos ligada	3,875,763	8 min
Fusión de nube de puntos (Distancia)	0.2 mm	3 min
Aislamiento	15 %	1 min
Detección de superposición	0.35 mm	1 min
Suavizado	10 %	0 min
Simplificación	40 %	2 min

4.2.2. Importación de datos en el modelador CAD

En este paso consiste en importar la malla del pie a un modelador CAD. Esta malla servirá de referencia para el diseño de esta AFO. Existen diversos programas que pueden manejar archivos STL de gran tamaño, sin embargo, estos no suelen permitir una buena parametrización del proyecto. El software de CAD mecánico SolidWorks™ fue elegido para este propósito. El software SolidWorks™ puede generar modelos muy bien parametrizados, lo que resulta fundamental durante la fase de modelado y simulación. La edición directa de archivos STL es compleja, debido a las numerosas caras y aristas, esto hace engorroso el modelado de la malla. Gracias al complemento Mesh modeling, el programa consigue corregir la mayoría de los errores de la malla importada automáticamente, sin embargo, para poder realizar cualquier modelado a su alrededor, SolidWorks™ debe reconocer el objeto importado

como un cuerpo solido o superficie. En este caso elegimos utilizar el complemento de *Mesh Modeling* para evitar otro proceso o método de diseño más engorroso provocando un trabajo más elaborado de diseño.

4.2.3. Modelado de la AFO

El modelado de la ortesis se dividió en 2 partes: Modelado del mallado y modelado de la superficie inferior de la ortesis y exterior.

Es importante dejar un espacio entre la superficie interior del pie, a fin de compensar eventuales errores geométricos de construcción y dejar espacio para el pie si este se encuentra inflamado. La superficie interior se genera mediante la herramienta de *Offset On-Surface*. El tamaño del offset no está universalmente acordado y debe determinarse por experiencia y también dimensiones de cada paciente.



Figura 20: Generación de cuerpo solido de un mallado.

Para comenzar a generar un diseño mediante un mallado STL, primero tenemos que obtener información de esa geometría para poder manipular en el software CAD en este caso como se mencionó anteriormente, la herramienta de diseño *Mesh modeling* nos permite generar superficies o convertir los datos geométricos importados en un sólido y esta se genera con una operación llamada *Convert to mesh body* figura 20. Esta característica es convertir la malla en un cuerpo sólido, que permite que podamos modelar sobre estos datos geométricos y tener control sobre esta geometría.

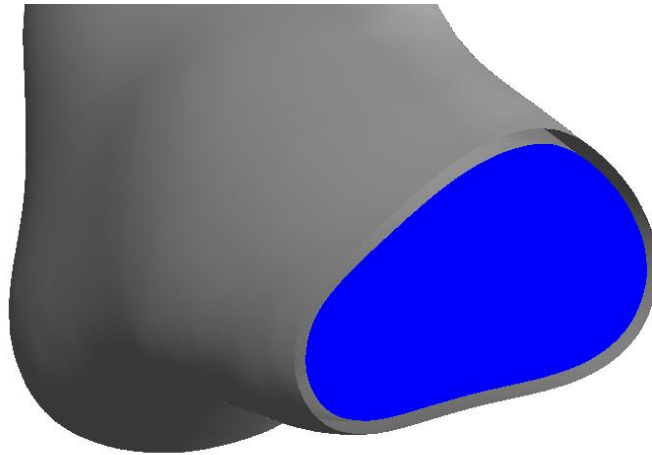


Figura 21: Generación de la superficie interior mediante la herramienta Offset on-surface.

Para crear una superficie sobre este cuerpo solido ya que se utilizará como guía para el modelado de la AFO. Para crear la superficie inferior de la ortesis se utiliza una operación llamada *Offset On-Surface* en SolidWorks™ figura 21. Esta nos permite generar un desplazamiento de superficie del cuerpo solido obteniendo la geometría exterior del solido (datos geométricos) para así no generar ningún boceto. Al utilizar esta herramienta te permite evitar el diseño de la superficie interior de la AFO. A diferencia de la creación de un *Loft*, no hay una geometría exacta que deba trazarse con precisión, por lo que se requieren más planos para poder guiar la superficie que se requiere obtener como resultado. Por lo tanto, esto permite una mayor estabilidad y eficacia del programa, por el otro lado, se sacrifica parte del control sobre la geometría resultante. Por lo tanto, se realizó el desplazamiento de la superficie para copiar toda la geometría tal cual se escaneo. Para crear la superficie interior se adoptan los siguientes pasos:

- Crear el mallado a cuerpo solido
- Utilizando la operación de *Offset On-Surface*, se genera un desplazamiento de superficie exterior de los datos geométricos del pie-tobillo, en este caso se realizó una equidistancia de 3 mm (Figura 22).

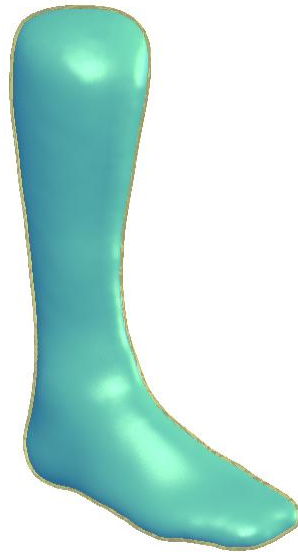


Figura 22: *Generación de equidistancia de superficie.*

En principio, este dispositivo cumpliría con su función, pero sería imposible llevarlo a la práctica. Por lo tanto, hay que diseñar una abertura que permita introducir el pie cómodamente y garantice una circulación de aire saludable. La forma del AFO viene dada por un corte de superficie, pero antes de esto se debe crear un *croquis de referencia* al punto de origen de la geometría con el plano de vista lateral, para poder generar un croquis lateral a medio punto de la AFO figura 23.



Figura 23: *Generación de croquis con referencia.*

El croquis de referencia se va a utilizar para realizar el dibujo en planos xy para dibujar mediante *splines*. La posición de sus puntos de control es otro parámetro importante. En la figura 24 se muestra el croquis para el *corte de superficies*. Para realizar el corte es importante tener la geometría cerrada para poder generar secciones para realizar el corte, este se mostrará en colores, morado para las superficies que se van a recortar y azul para las superficies que se van a conservar.

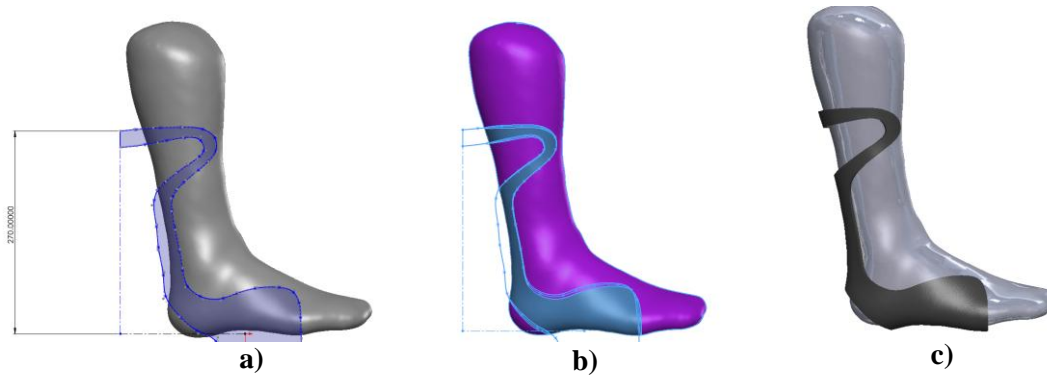


Figura 24: Recorte de superficies. A) Dibujo de la AFO. B) Selección de recorte de superficie. C) Ortesis en superficie.

Después de limar todos los bordes afilados, la ortesis esta lista para darle espesor, ya que el diseño solo está en superficies y no tiene espesor. Para este caso utilizaremos la operación de Dar espesor, seleccionaremos toda la superficie, para después indicar hacia que dirección, seleccionando espesor a lado 1, para generar el espesor al lado exterior del modelo, de esta manera la ortesis esta lista para ser optimizada como se muestra en la figura 25.



Figura 25: AFO diseño completo.

4.2.4 Simulación de esfuerzos de la AFO

La ortesis de pie tobillo tendrá que resistir determinadas cargas durante su vida útil, por lo que debe diseñarse en consecuencia. Se realiza una simulación por elementos finitos del modelo, que luego se optimiza mediante aproximaciones sucesivas. Las cargas deben aplicarse en la simulación dependen de una función específica del dispositivo, que en este caso de estudio es simplemente sostener el pie en las fases de despliegue y contacto del talón en cada paso. Para simularlo, se aplica una fuerza de 50 N en el extremo de la puntera del modelo AFO, mientras que el extremo opuesto con una sujeción. En realidad, la distribución de las fuerzas de contacto es mucho más complejo y difícil de determinar con precisión, sin embargo 50 N se consideran suficientemente precautorio para esta aplicación como se muestra en la figura 26.

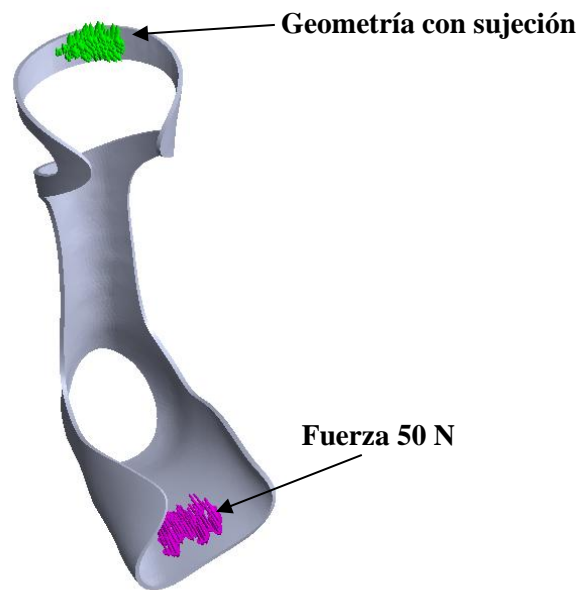


Figura 26: Definición de cargas y restricciones para la simulación.

La ortesis se imprime en PETG-CF (Tereftalato de polietileno con fibra de carbono), un material de impresión no común. Las características no isotrópicas de este material impreso en 3D son conocidas ya que se realizaron en esta investigación. Los valores de tensión máxima de tracción y módulo de Young encontrados se confirmaron mediante ensayos de tracción realizados.

El dispositivo se imprime en una impresora Raise3D Pro2 Plus. Debido al tamaño de la cama de impresión debe imprimirse en posición vertical, es decir, con su eje z paralelo al eje z de la máquina. Esta elección no afectará en la construcción de la geometría final, ya que la resistencia mecánica se encuentra en la dirección y.

Los estudios realizados de elementos finitos se realizan en SolidWorks Simulation. Las características del material definido en el software se enumeran en la tabla 14. La configuración de la simulación y los principales resultados se muestran en la figura 27. Estos resultados finales se aplican a la ortesis de pie tobillo totalmente optimizado.

Tabla 14: Características elásticas isotrópicas del material utilizado para la simulación FEM.

Modulo elástico	1.02e+16 N/m ²
Radio de Poisson	0.375
Módulo de corte	1.375e+14 N/m ²
Densidad de masa	2171.85 kg/m ³
Resistencia a la tracción	5.5e+13 N/m ²
Limite elástico	68,940,000 N/m ²

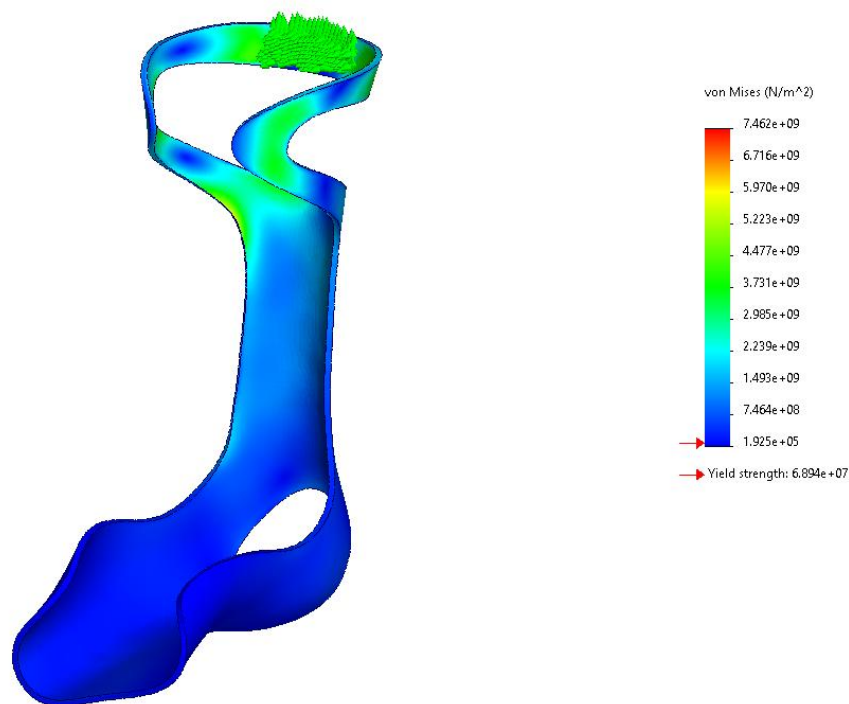


Figura 27: Simulación limite elástico de modelo von Mises.

La superficie de la ortesis está mapeada con una escala de colores que indica los niveles de tensión (esfuerzo de Von Mises), medida en Newtons por metro cuadrado (N/m²). Debido a la isotropía transversal del material, se eligió este diseño ya que la pieza es suficientemente robusta.

La escala cromática dispuesta verticalmente a la derecha de la figura define el rango de los valores de esfuerzo calculados. Este rango abarca desde $1.925e +09 \text{ N/m}^2$ (coloreado en azul profundo, indicativo de esfuerzos mínimos) hasta $7.462e +05 \text{ N/m}^2$ (coloreado en rojo intenso, representando las concentraciones de esfuerzo máximas).

Observaciones detalladas de la distribución de esfuerzos:

- El resto de la geometría de la ortesis, que abarca las secciones que envuelven la parte inferior de la pierna y la base en la que se asienta el pie, es un azul pálido y verde. Estos colores se utilizan donde se espera que haya niveles relativamente bajos de forcé, lo que indica una transferencia de carga de manera efectiva o que son áreas menos críticas estructuralmente en la simulación de carga.
- Los puntos fuertes más críticos se encuentran de manera notable encima de la parte trasera de la ortesis. Esta región altamente tensada está marcada por la exhibición de colores que oscilan bruscamente desde el tinte naranja hasta el rojo oscuro, magnificado al valor máximo de $7.462e +05 \text{ N/m}^2$.

La significativa discrepancia entre los esfuerzos máximos simulados y el límite de fluencia del material sugiere que, bajo la condición de carga aplicada, la ortesis podría experimentar una deformación plástica considerable o incluso una posible falla estructural en las áreas identificadas con alta concentración de esfuerzos.

La Figura 28 representa visualmente el centrado en la distribución del desplazamiento tridimensional en una ortesis de extremidad inferior, análoga a una órtesis tobillo-pie. Este análisis es fundamental para evaluar la rigidez estructural del diseño y predecir la respuesta de deformación del componente bajo las cargas operativas simuladas.

La superficie del modelo de la ortesis está mapeada mediante una escala cromática que denota la magnitud del desplazamiento resultante (URES), cuantificada en milímetros (mm). Esta escala, visible a la derecha de la figura, se extiende desde un valor mínimo de $1.000e -03 \text{ mm}$ (representado por un azul oscuro), indicativo de regiones con desplazamiento prácticamente nulo (típicamente áreas con restricciones de contorno o alta rigidez), hasta un máximo de $5.491e -03 \text{ mm}$ (en rojo intenso), que corresponde a la magnitud máxima de desplazamiento dentro del rango de la escala.

Observaciones de la distribución del desplazamiento:

- La mayor parte de la estructura de la ortesis, incluyendo la sección superior que abraza la pantorrilla y el cuerpo principal del dispositivo, se muestra en tonos de

azul y cian. Esta distribución de colores es consistente con bajos niveles de desplazamiento, lo que sugiere que estas áreas poseen una elevada rigidez y/o están sujetas a condiciones de contorno que limitan su movimiento.

- La zona de mayor desplazamiento y deformación se localiza de manera distintiva en la parte inferior y anterior de la sección que soporta la planta del pie. Esta región exhibe una transición de colores hacia el amarillo, naranja y rojo, culminando en un parche de color magenta/púrpura. Este parche señala el punto exacto donde se registra el desplazamiento máximo absoluto en el modelo, con un valor de $2.745e-03$ mm.
- El valor de desplazamiento mínimo absoluto (Min) señalado en la parte superior de la ortesis es de $5.000e-03$ mm, lo que refuerza la interpretación de una restricción de movimiento en esa área.

El análisis de desplazamiento revela que, bajo las condiciones de carga simuladas, la ortesis presenta una rigidez considerable en sus segmentos proximales y centrales, mientras que la zona de la planta del pie es la más susceptible a la deformación. La concentración del desplazamiento en esta región específica (marcada en magenta) indica el punto donde la carga aplicada induce la mayor flexibilidad o donde la estructura es menos resistente a la deformación.

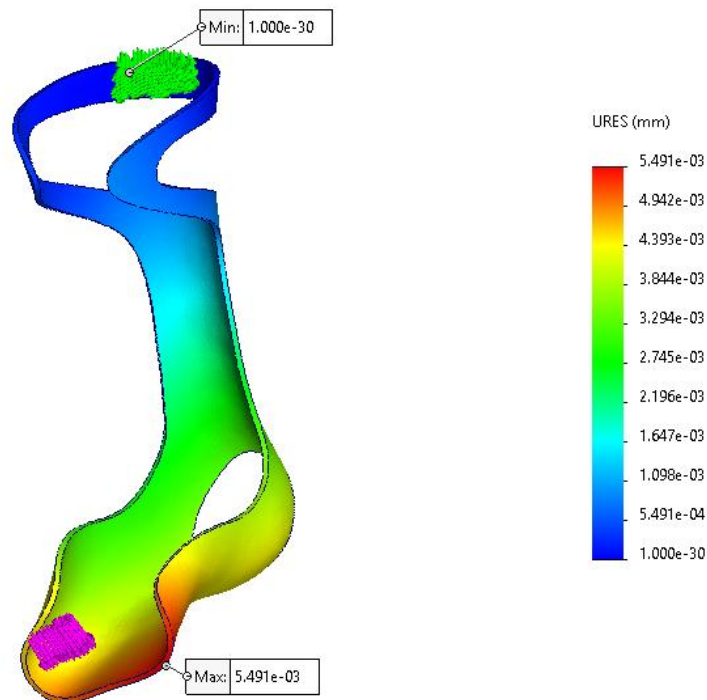


Figura 28: Simulación límite elástico de modelo von Mises.

4.2.5 Preparación para la impresión de componentes.

Las impresiones se realizaron en el software de corte ideaMaker 4.1.1 Raise3D para generar el código G de cada una de las ortesis a imprimir. La impresora que se utilizó para realizar las tres impresiones marca Raise3D Pro 2 Plus equipada con doble extrusor y boquillas de 0.4 mm. Las tres impresiones de estas ortesis fueron producidas con el material PETG-CF como material principal con diámetro de filamento de 1.75 mm. Se llevaron a cabo tres impresiones diferentes con variados materiales de soporte, con el propósito de comparar la precisión dimensional y calidad superficial de algunos voladizos de todos los modelos impresos. La primera ortesis se imprimió con el mismo material del modelo PETG-CF configurando con los siguientes parámetros de impresión que se muestran en la tabla 15.

Tabla 15: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PETG-CF

Altura de capa	0.20 mm	Distancia de retracción	6.5 mm
Anchura de línea superior/inferior	0.4 mm	Velocidad de impresión	100 mm/s
Grosor de pared	1.8 mm	Ángulo de soporte	35°
Densidad de relleno	100%	Patrón de soporte	Pilares
Patrón de relleno	Triangulo	Densidad de soporte	60 %
Temperatura de impresión	250°C	Ratio de Relleno	80 %
Temperatura de cama	90°C	Capa Z superior	0.20 mm
Velocidad de ventilador	100%	Orientación de construcción	60°
Material de soporte	PETG-CF	Patrón de relleno de soportes	Giroide
Temperatura de impresión soporte	250°C	Velocidad de impresión en soporte	60 mm/s
Tipo de salto en Z	Espiral	Perímetro preciso	Activado

Los parámetros que fueron utilizados para esta impresión se obtuvieron de la optimización mediante el método de Taguchi que se realizó en esta investigación y parámetros que recomienda el fabricante del material utilizado, sin embargo, los parámetros de impresión de soporte se obtuvieron de otros trabajos de investigación que se citaron en la tabla 2.

En la figura 29 se puede observar el laminado del modelo con el software ideaMaker (a) y el modelo impreso con soportes incluidos (b). En la sección (a) se muestra la escritura del modelo, las capas y los pasos de impresión que se realizaron en todo el tiempo de impresión. En la sección (b) se encuentra la ortesis impresa junto con los soportes en los puntos con voladizos.

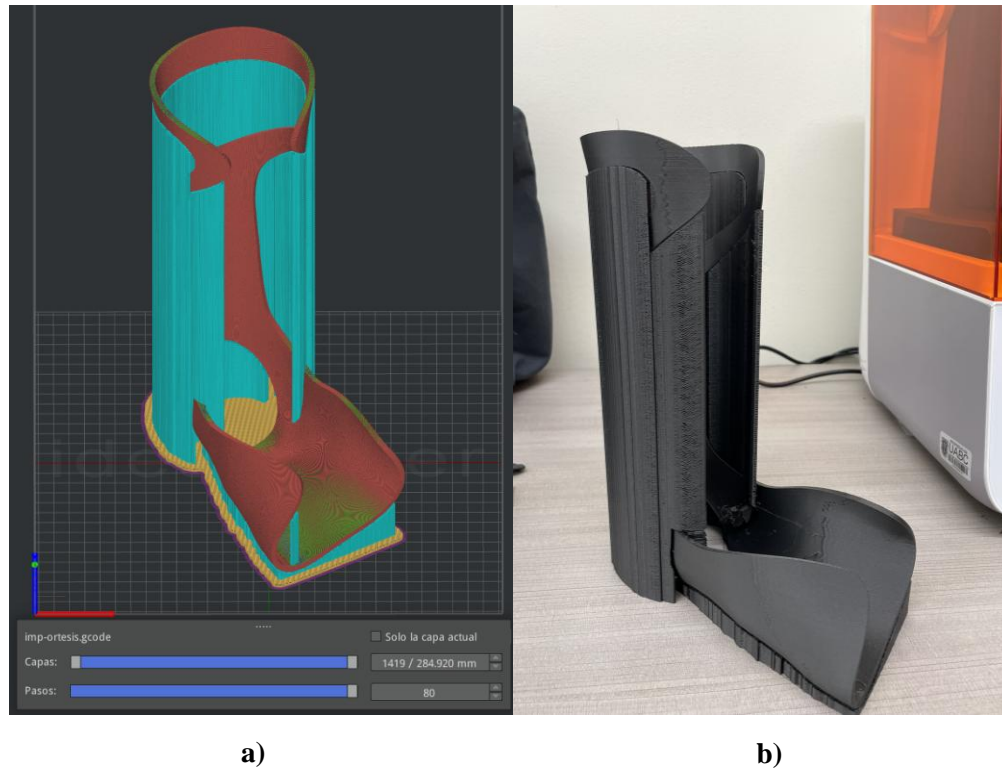


Figura 29: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso.

La impresión con material de soporte PETG-CF se construyó en un tiempo de 27 horas, 42 minutos y 54 segundos y se utilizaron 298 gramos de material que equivale a 102.66 metros de filamento. En esta pieza se parametrizó con los soportes a 1 capa de distancia en el eje Z con 0.20 mm para retirar fácilmente los soportes, sin generar delaminación en la capa donde tubo soporte con los pilares. La calidad superficial de la pieza es ideal, sin embargo, las capas donde se requería soporte tubo defectos notables como delaminación en la parte superior trasera de la ortesis como se muestran en la figura 29. El voladizo superior frontal no tubo delaminación de capa. El número de líneas de código G fue de 3,519,348. La impresión tubo soporte de adhesivo en la cama para evitar el levantamiento de la primera capa de impresión en la cama de impresión. La cama de impresión fue nivelada a 0.20 mm de la boquilla de impresión, con una hoja calibradora de 0.20 mm.

La Tabla 16 detalla las condiciones ambientales (temperatura y humedad de la ciudad) y del material (temperatura y humedad) registradas durante la impresión. Antes de la impresión, el filamento fue almacenado herméticamente por 9 horas y secado a 60 °C en un secador Creality Space Pi Filament Dryer (rango de 50-70 °C) hasta alcanzar un 15% de humedad. Este proceso de secado es crucial para reducir la humedad del filamento durante la extrusión, lo que previene errores comunes de impresión como el levantamiento de capa o el 'stringing', y mejora la calidad general del modelo.

Tabla 16: *Temperaturas registradas al momento de impresión.*

Condiciones ambientales		Condiciones herméticas del material	
Temperatura	16 °C	Temperatura	60 °C
Humedad	64 %	Humedad	15%
Fecha	24/02/25	Fecha	24/02/25
	25/02/25		25/02/25

Para remover todos los soportes no fue necesario utilizar ningún tipo de herramienta, se agregó el parámetro un espacio entre el modelo y el soporte de 0.20 mm que permite retirar los soportes de una manera más sencilla y evitar dañar la capa que estaba sobre el soporte como se muestra en las figuras 30 y 31.



Figura 30: *Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF caída trasera de soporte.*



Figura 31: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PETG-CF removiendo soportes.

El costo de este modelo impreso con el material seleccionado PETG-CF con los 298 gramos utilizados por la impresión se adapta a la fórmula 2.

$$C = M + E + T \quad [2]$$

Donde:

- C es el total del costo del dispositivo impreso
- M es el coste del material utilizado $M = 600 \text{ \$/kg} \times 0.298 \text{ kg/print} = 178.80\text{\$}$
- E es el coste de la energía utilizada $E = 1.164 \text{ \$/kWh} \times 600 \text{ W} / 1000 \text{ Vatios/hr} = 0.70$; $27.6 \text{ h} \times 0.70\text{\$} = 19.80\text{\$}$
- T es el tiempo de impresión que corresponde al costo de mano de obra $T = 200\text{\$/h} \times 5\%$ de dedicación = $10.0 \text{ \$/hr}$; $10 \text{ \$/hr} \times 27.6 = 276.00$.

$$C = 178.80 + 19.80 + 276.00 = 476.60$$

La segunda impresión se realizó con el material PLA para los soportes configurando con los siguientes parámetros de impresión que se muestran en la tabla 17.

Los parámetros que fueron utilizados para esta impresión se obtuvieron de la optimización mediante el método de Taguchi que se realizó en esta investigación y parámetros que recomienda el fabricante del material utilizado, sin embargo, los parámetros de impresión

de soporte se obtuvieron de otros trabajos de investigación que se citaron en la tabla 2.

En la figura 32 se puede observar el laminado del modelo con el software anterior (a) y el modelo impreso con soportes incluidos (b). En la sección (a) se muestra la escritura del modelo, las capas y los pasos de impresión que se realizaron en todo el tiempo de impresión. En la sección (b) se encuentra la ortesis impresa junto con los soportes en los puntos con voladizos del modelo impreso.

Tabla 17: *Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PLA*

Altura de capa	0.20 mm	Distancia de retracción	6.5 mm
Anchura de línea superior/inferior	0.4 mm	Velocidad de impresión	100 mm/s
Grosor de pared	1.8 mm	Ángulo de soporte	35°
Densidad de relleno	100%	Patrón de soporte	Pilares
Patrón de relleno	Triangulo	Densidad de soporte	60 %
Temperatura de impresión	250°C	Ratio de Relleno	80 %
Temperatura de cama	90°C	Capa Z superior	0.20 mm
Velocidad de ventilador	100%	Orientación de construcción	60°
Material de soporte	PLA	Patrón de relleno de soportes	Giroide
Temperatura de impresión soporte	210°C	Velocidad de impresión en soporte	60 mm/s
Tipo de salto en Z	Espiral	Perímetro preciso	Activado

Esta impresión fue ejecutada meticulosamente empleando la misma configuración de parámetros y el idéntico proceso de impresión que se utilizó en el modelo anterior. Mantuvimos constantes factores cruciales como la velocidad de impresión, la altura de capa, la densidad de relleno y los patrones de soporte, buscando así una base comparativa sólida. Sin embargo, en un esfuerzo por mejorar significativamente la calidad y la integridad estructural de la pieza, se implementó un cambio estratégico en la temperatura de impresión del material de soporte.

Específicamente, la temperatura del extrusor para el soporte se ajustó a 210°C. Esta modificación no fue arbitraria; se realizó con el objetivo primordial de mitigar y eliminar las indeseadas deformaciones en las capas de impresión que se habían observado previamente.

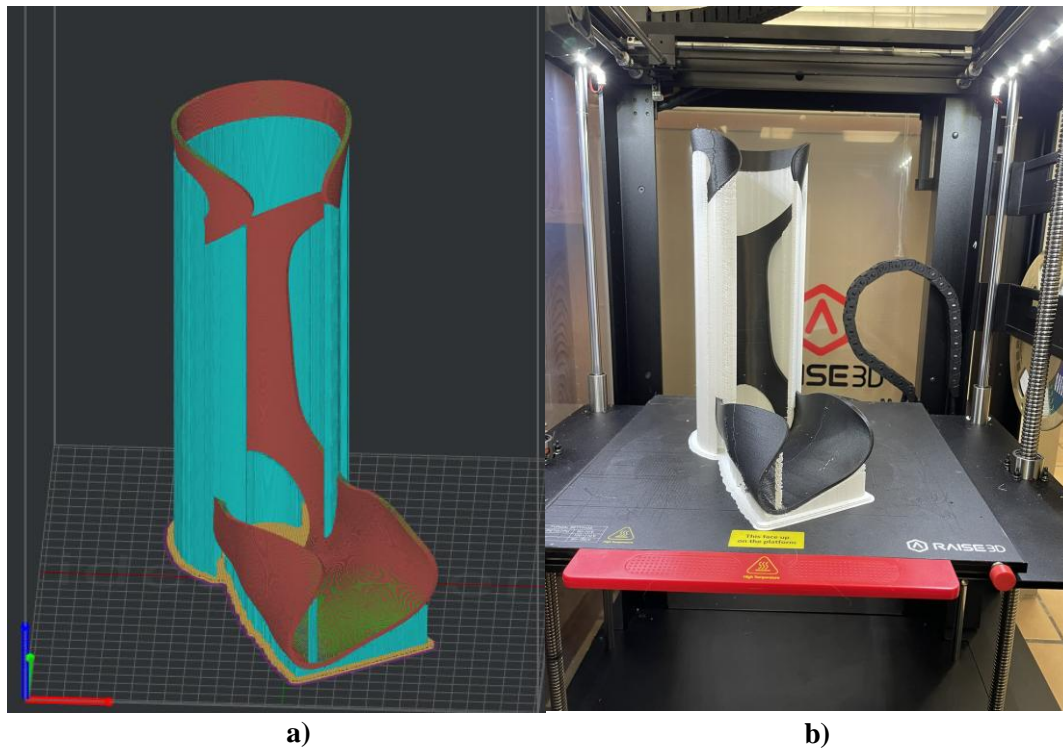


Figura 32: Impresión de primer modelo de impresión con material de soporte PLA. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso.

La impresión con material de soporte PLA se construyó en un tiempo de 30 horas, 2 minutos y 12 segundos y se utilizaron 123.6 gramos de material que equivale a 41.46 metros de filamento, y para el material PETG CF fueron 177.6 gramos que equivale a 60.90 metros de filamento. En esta pieza se parametrizo con los soportes a 1 capa de distancia en el eje Z con 0.20 mm idéntico al primer modelo impreso esto es para retirar fácilmente los soportes, sin generar delaminación en la capa donde tubo soporte con los pilares. La calidad superficial de la pieza es ideal, sin embargo, las capas donde se requería soporte tubo defectos notables como delaminación en la parte superior trasera de la ortesis como se muestran en la figura 29. El voladizo superior frontal no tubo delaminación de capa. El número de líneas de código G fue de 3,523,342. La impresión tubo soporte de adhesivo en la cama para evitar el levantamiento de la primera capa de impresión en la cama de impresión. La cama de impresión fue nivelada a 0.20 mm de la boquilla de impresión, con una hoja calibradora de 0.20 mm. La temperatura registrada el día de la impresión.

La Tabla 18 presenta las condiciones ambientales (temperatura y humedad de la ciudad) y del material (temperatura y humedad) registradas el día de la impresión. Ambos materiales fueron previamente almacenados en condiciones herméticas durante 9 horas y secados a 60 °C,

logrando reducir su humedad al 18% antes de iniciar la impresión para evitar algún tipo de problema al proceso de impresión como algún delaminado o desprendimiento de la cama de impresión.

Tabla 18: Temperaturas registradas al momento de impresión PLA.

Condiciones ambientales		Condición hermética del material	
Temperatura exterior	16 °C	Temperatura material	60 °C
Humedad exterior	77 %	Humedad material	18 %
Fecha	25/02/25	Fecha	25/02/25
	26/02/25		26/02/25

Para remover todos los soportes no fue necesario utilizar ningún tipo de herramienta, se agregó el parámetro un espacio entre el modelo y el soporte de 0.20 mm que permite retirar los soportes de una manera más sencilla y evitar dañar la capa que estaba sobre el soporte como se muestra en la figura 33.



Figura 33: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PLA.

El costo de este modelo impreso con el material seleccionado PETG-CF con los 177.6 gramos y 123.6 gramos de PLA utilizados por la impresión se adapta a la fórmula 3.

$$C = M1 + M2 + E + T \quad [3]$$

Donde:

- M_2 es el coste del segundo material utilizado en este caso se utilizó PLAM=315 \$/kg x 0.123 kg/print= 38.93\$

$$C = 106.56 + 38.93 + 21.00 + 300 = 466.50$$

La tercera impresión se llevó a cabo utilizando material PVA específicamente para las estructuras de soporte, cuyos parámetros de configuración se detallan en la Tabla 19. Los ajustes empleados para esta impresión particular se basaron en de acuerdo al material lo permite, este material es soluble lo cual los parámetros son distintitos a los otros dos modelos impresos. No obstante, es relevante mencionar que los parámetros de impresión para los soportes fueron obtenidos de investigaciones previas que se referencian en la Tabla 2.

La Figura 34 ofrece una visualización dual: en la sección (a) se muestra el proceso de laminado digital del modelo con el software empleado anteriormente, mientras que en la sección (b) se presenta el modelo físico impreso con los soportes ya integrados. La parte (a) ilustra aspectos como la designación o escritura del modelo, la organización de las capas y las distintas etapas del proceso de impresión a lo largo del tiempo total de ejecución. Por su parte, la sección (b) exhibe la ortesis impresa junto con los soportes colocados estratégicamente en aquellos puntos del diseño que presentan partes que sobresalen sin apoyo directo.

Tabla 19: Parámetros de impresión de ortesis con material de soporte PVA

Altura de capa	0.20 mm	Distancia de retracción	6.5 mm
Anchura de línea superior/inferior	0.4 mm	Velocidad de impresión	100 mm/s
Grosor de pared	1.8 mm	Ángulo de soporte	35°
Densidad de relleno	100%	Patrón de soporte	Pilares
Patrón de relleno	Triangulo	Densidad de soporte	75 %
Temperatura de impresión	250°C	Ratio de Relleno	80 %
Temperatura de cama	90°C	Capa Z superior	0.00 mm
Velocidad de ventilador	100%	Orientación de construcción	60°
Material de soporte	PLA	Patrón de relleno de soportes	Giroide
Temperatura de impresión soporte	210°C	Velocidad de impresión en soporte	45 mm/s
Tipo de salto en Z	Espiral	Perímetro preciso	Activado

Aunque esta impresión mantuvo los mismos parámetros y proceso de impresión que el modelo anterior, se realizó una modificación específica en la temperatura, velocidad de impresión y capa Z superior utilizada para imprimir los soportes. Los parámetros de impresión

de la ortesis son idénticos en las tres impresiones. La temperatura utilizada se ajustó a 220°C. Esta modificación se realizó con la finalidad de evitar la formación de deformaciones no deseadas en las capas durante el proceso de impresión. Adicionalmente, la velocidad de impresión se redujo a 45 mm/s, lo cual corresponde al valor máximo recomendado por el fabricante Fused Materials para su material PVA. En cuanto al parámetro de la 'capa Z superior', su distancia con respecto al material de modelo se cambió a 0.00 mm. Esto se debe a que el material empleado PVA es soluble en agua, permitiendo así que el material de soporte contacte directamente el material del modelo sin necesidad de establecer una altura de capa de separación entre el material modelo PETG CF al PVA.

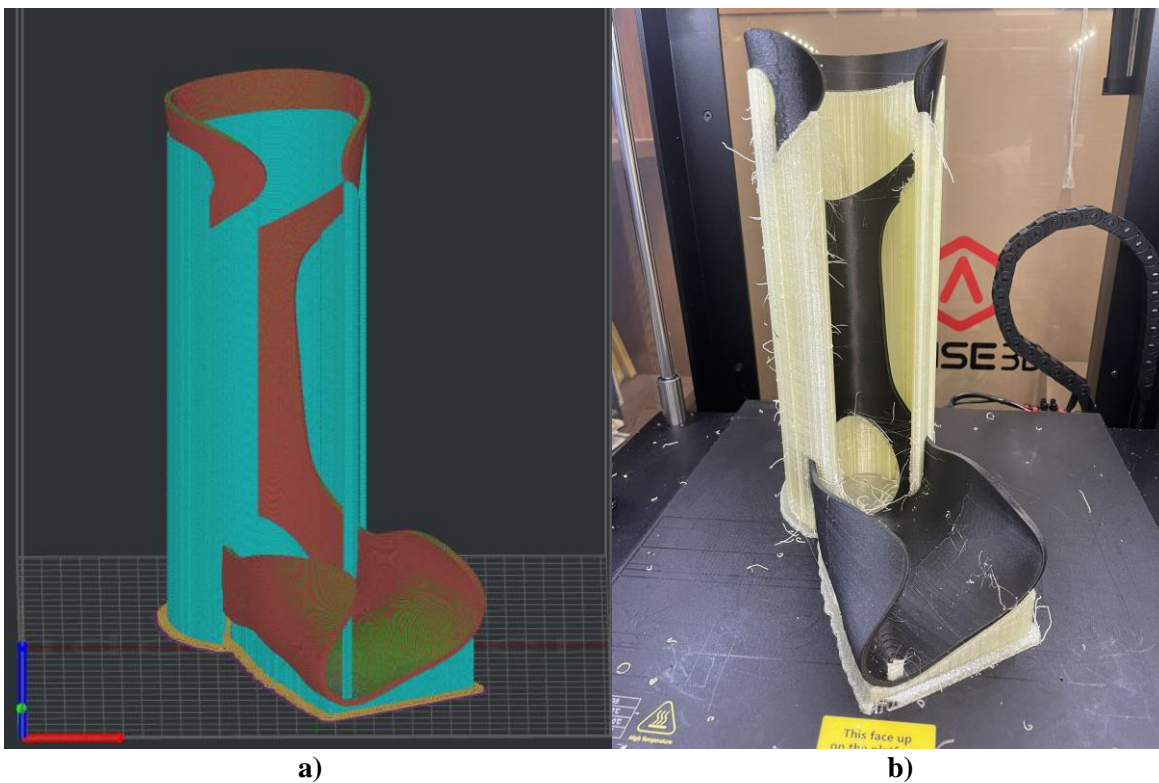


Figura 34: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PVA. A) Laminado del modelo. B) Modelo impreso.

La impresión que empleó material de soporte PVA se completó en un tiempo de 32 horas, 29 minutos y 31 segundos. Para su realización, se consumieron 194 gramos de material PVA (lo que equivale a 65.06 metros de filamento) y 205.1 gramos de material PETG CF (equivalentes a 70.48 metros de filamento). Los soportes para esta pieza se configuraron con una distancia de una capa (0.00 mm) en el eje Z, replicando el ajuste del primer modelo impreso. El PVA no necesita distancia de soportes ya que no provoca delaminación en la capa donde contacta al voladizo ya que este material se disuelve en agua. Si bien la calidad superficial

general de la pieza fue ideal, se observaron defectos notables en las capas que requirieron soporte, específicamente delaminación en la sección superior trasera de la ortesis, tal como se ilustra en la Figura 36. Es importante mencionar que el voladizo superior frontal no presentó este problema de delaminación de capa.

El archivo de impresión constó de un total de 3,553,106 líneas de código G. Se aplicó un soporte adhesivo en la cama de impresión para prevenir que la primera capa se levantara. La cama de impresión se niveló a 0.20 mm de la boquilla, utilizando una hoja calibradora de esa medida. Las condiciones ambientales (temperatura y humedad) registradas el día de la impresión.

La Tabla 20 detalla la temperatura registrada el día de la impresión, incluyendo tanto la humedad ambiental de la ciudad como la temperatura y humedad del propio material utilizado. Este material, previo al inicio de la impresión, fue almacenado en condiciones herméticas durante 9 horas a 60 °C, un proceso que logró disminuir su humedad hasta un 20% en ambos materiales.

Tabla 20: Temperaturas registradas al momento de impresión PVA.

Condiciones ambientales		Condición hermética del material	
Temperatura	18 °C	Temperatura	60 °C
Humedad	79 %	Humedad	20 %
Fecha	02/03/25	Fecha	02/03/25
	23/03/25		23/03/25

La remoción de todos los soportes se logró con la utilización de un contenedor con 8 L de agua durante 6 horas 30 minutos, como se ilustra en la figura 35.



Figura 35: Remoción en agua de soportes PVA.

Esta pieza no obtuvo ningún daño por residuos de filamento de soporte, pero después de sacar la pieza del agua una vez que el material fue disuelto en el agua, se secó perfectamente donde se mantuvo en un área controlada de humedad a 25% y a una temperatura de 50 °C, esto por el tiempo en contacto con el agua directo. En la figura 36 se muestra la cara donde tuvo todo el soporte trasero del modelo.



Figura 36: Impresión del modelo de impresión con material de soporte PVA, caída trasera de soporte.

El costo de este modelo impreso con el material seleccionado PETG-CF con los 205.1 gramos y 194 gramos de PVA utilizados por la impresión se adapta a la fórmula 3.

$$C = 123.06 + 288.00 + 22.50 + 322.20 = 619.06$$

Este modelo impreso fue el mas costoso de las 3 impresiones. Esto se debe a que el costo del material del PVA es de 1500 \$/kg.

4.2.6 Desarrollo de medición a componentes impresos (CMM)

La implementación del sistema de medición por coordenadas, (CMM), para piezas impresas, fue necesario verificar que el modelo construido cumpla con los requerimientos y

poder validar frente al diseño original. Con este proceso se identificaron las desviaciones y se observó cuáles fueron los parámetros de impresión óptimos de la pieza impresa. Para comenzar con el proceso de medición se realizaron estas fases de proceso:

Preparación del diseño de referencia (CAD): El punto de partida en todo el proceso es el modelo CAD de la pieza. Incluye todas las dimensiones y tolerancias nominales, que se utilizarán en adelante como la referencia maestra para compararse con la pieza físicamente impresa. Por ello, es imprescindible que el modelo CAD sea preciso y esté actualizado.

Fabricación por impresión 3D: Una vez definido la geometría del componente, la pieza se imprime mediante la tecnología 3D apropiada. Durante esos pasos, es necesario tener en cuenta cómo el material y los parámetros de impresión influyen la precisión dimensional y la calidad superficial.

Acondicionamiento y sujeción de la pieza: Antes de mediciones, la pieza impresa debe ser acondicionadas. La limpieza, es decir, la eliminación de soportes. En caso de necesidad, el tratamiento térmico se lleva a cabo en la pieza de trabajo para dejar estabilizada dimensionalmente. Por último, la pieza se sujeta de forma segura a la mesa del MMC. La elección del aparato de sujeción es crítica para no romper la pieza y todavía permitir el acceso a todas las propiedades para su medición alineada.

Programación de la CMM: Se realizó el programa de inspección, para entrenar el seguimiento de la herramienta en el software de la CMM. Esto implicó:

- Importar modelo CAD de la pieza.
- Se seleccionaron las características geométricas críticas para medir.
- Se definió una estrategia de medición, es decir, los puntos específicos que la herramienta de la CMM donde toco los puntos.
- Se estableció la estrategia de tolerancias dimensionales y geométricas como especifica el diseño.

Ejecución de la medición: La CMM, guiada por el programa, activa su herramienta de alta precisión, donde se desplaza sobre la superficie de la pieza, registrando los puntos de coordenadas en (X, Y, Z). Estos datos representan la geometría real de la pieza.

Con base en los puntos previos se realizó la corrida piloto en la primera pieza con alineación y sujeción para verificar el alabeo y contracción ya que las piezas impresas en 3D, especialmente las de los polímeros, son susceptibles a la contracción y el alabeo durante el

enfriamiento. Para este paso lo que se utilizó fue un medidor de altura marca Mitutoyo Absolute Digimatic series 570 con precisión de 0.01mm, apoyados de una mesa de granito.

Esta configuración fue necesario imprimir un molde que permita asentar el modelo y poder alinear conforme las medias del CAD y poder realizar las mediciones en la CMM. El molde se diseñó con base de cavidad para obtener la geometría exacta de la ortesis, este modelo se muestra en la figura 37.

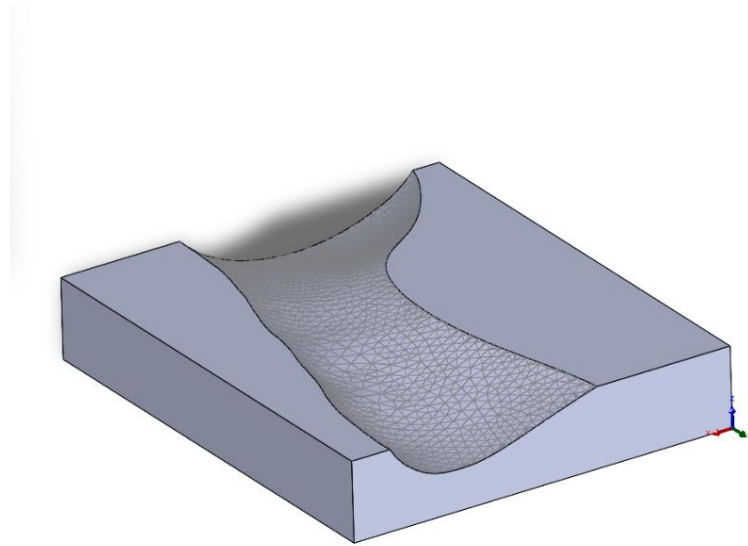


Figura 37: Modelo de molde para la ortesis de pie tobillo.

Para la fabricación de este molde, se tomó la decisión técnica de imprimir con una altura de capa sumamente fina de 0.14 mm. La principal motivación detrás de esta configuración de capa tan reducida es la búsqueda de una mayor precisión de construcción. Cada capa, al ser más delgada, permite una deposición de material más incremental y controlada. Esto se traduce directamente en una fidelidad dimensional superior del molde, lo cual es crítico cuando se busca replicar geometrías complejas o tolerancias ajustadas.

El primer paso que se realizó fue colocar el molde en la mesa de granito y hacer ensamblar la ortesis de pie tobillo impresa en donde se hará la sujeción como se muestra en la figura 38. Se aseguró estar libre de contaminantes como polvo, o algún otro material que pudiera afectar la planicidad del molde en la mesa de granito.

Como paso previo a la alineación, se revisó el desfase que presentaba el diseño en el CAD. Esto implicó identificar el punto más elevado para medir con precisión la proyección del corte de la superficie, como se ilustra en la Figura 39.



Figura 38: Alineación de ortesis con molde.

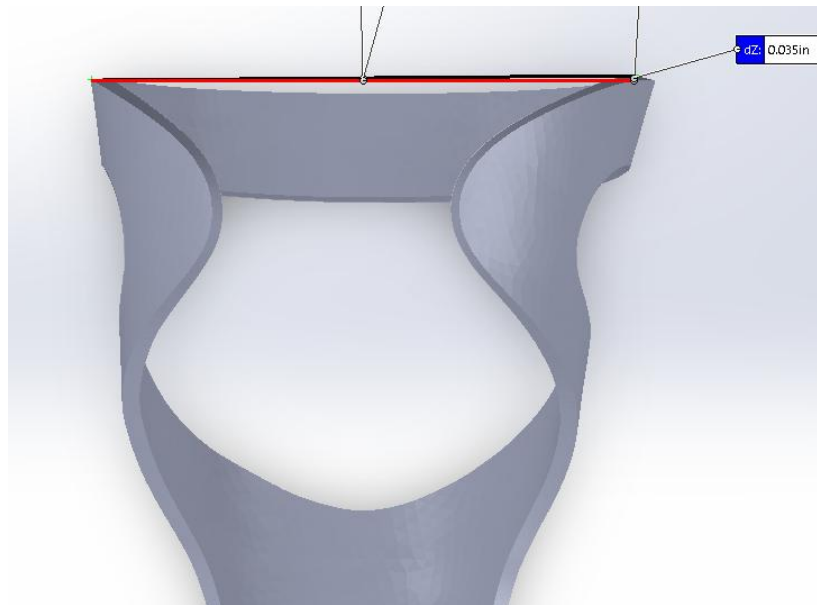


Figura 39: Desfase en diseño de la ortesis.

El diseño del aparato presenta un ligero desfase, que es un resultado directo de cómo se proyecta el corte en la superficie del material. Este efecto es completamente esperado y forma parte del proceso, ya que la base de todo el diseño reside en las formas anatómicas y únicas del pie de cada paciente. En otras palabras, la naturaleza irregular de un pie real introduce estas pequeñas variaciones. A pesar de esta observación, la diferencia de altura entre los extremos del diseño es mínima, de solo 0.035 pulgadas (aproximadamente 0.88 mm). Esta es una desviación tan pequeña que no representa ningún impedimento para la validación del modelo

final ni para el rendimiento funcional del aparato una vez que esté en uso. De hecho, este valor, aunque diminuto, resultó ser un punto de referencia fundamental que nos permitió realizar el proceso de alineación de forma exitosa y precisa.

La alineación se llevó a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado y meticuloso para las tres piezas impresas, garantizando la consistencia en todo el proceso. Se inició siempre por el lado izquierdo del modelo, que servía como nuestro punto de partida de referencia. Con sumo cuidado, se posicionó la punta del aparato hasta que el palpador del marcador de altura registró una lectura de 0.005 pulgadas. Esta lectura inicial era crucial, ya que confirmaba que se había establecido un contacto adecuado y uniforme con la cara de la pieza que sería el punto de referencia para todas las mediciones subsiguientes. Una vez asegurado el contacto inicial y establecido el indicador en 0.000 pulgadas, procedimos al siguiente punto de control. En esta etapa, el operador movía la ortesis con movimientos controlados y precisos hasta que el medidor de altura arrojaba una dimensión de 0.037 pulgadas. Este ajuste fino es el que corrige el desfase inicial y asegura que la pieza final tenga la forma y altura deseadas. Es importante destacar que todas las mediciones y ajustes durante el proceso de alineación se realizaron exclusivamente en pulgadas, manteniendo la coherencia con los parámetros de diseño. La Figura 40 ilustra con claridad este paso crítico del proceso de alineación, mostrando la posición y la medición final para asegurar la exactitud.



Figura 40: Alineación del modelo

Una vez que todas las piezas fueron alineadas meticulosamente, el siguiente paso crítico consistió en la configuración precisa de la base de medición de la Máquina CMM marca Mitutoyo Crysta Plus 504. Esta etapa es de suma importancia, ya que su objetivo principal es asegurar un acoplamiento perfecto de la pieza a medir dentro del volumen de trabajo de la CMM.

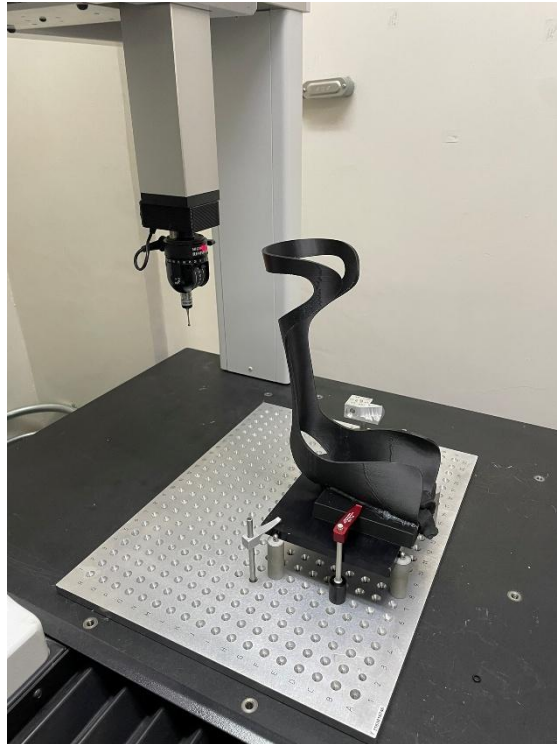


Figura 41: Configuración de área para mediciones de la máquina CMM.

El proceso de configuración implica definir cuidadosamente el espacio de medición disponible y el recorrido de la sonda para cada modelo específico. Esto se realiza con el fin de garantizar que la herramienta de medición (el palpador de la CMM) pueda acceder a todos los puntos de interés de la pieza sin riesgo de colisionar con ella o con la propia base de la máquina. De igual manera, se verifica que no haya restricciones de alcance que impidan la toma de datos en áreas críticas del diseño. Esta configuración anticipada no solo optimiza el tiempo de medición, sino que también es fundamental para prevenir posibles daños a la pieza o al equipo, y para asegurar la integridad y precisión de los datos dimensionales obtenidos. En la figura 41 se muestra la configuración de la máquina junto con el primer modelo PETG-CF.

La fase inicial para la medición precisa de las piezas comenzó con el desarrollo exhaustivo de un programa de trayectoria de la herramienta dentro del entorno del software CMM Manager de QxSoft. Este proceso se inició con la importación del modelo CAD

tridimensional de la ortesis en formato IGES, un estándar ampliamente reconocido para el intercambio de gráficos, lo que aseguró la fidelidad del diseño original. Una vez importado el modelo, se siguieron los siguientes pasos secuenciales para la configuración y ejecución del programa de medición:

- Establecimiento del sistema de coordenadas base mediante palpados en la cama: Se llevaron a cabo cuatro palpados estratégicos en la superficie de la cama de la CMM, donde la ortesis estaba firmemente asentada (ilustrado en la Figura 42). Estos puntos fueron cruciales para establecer el sistema de coordenadas de la máquina en relación con la pieza, garantizando que todas las mediciones subsiguientes se referenciaran correctamente.
- Referencia a los planos del molde: Posteriormente, se realizaron tres toques de palpado en combinación con el recorrido de la herramienta sobre los planos frontal y lateral del molde en el que la ortesis estaba sobrepuesta (como se observa en la Figura 43). Esta acción adicional permitió una alineación más precisa de la ortesis dentro del sistema de coordenadas de la CMM, compensando cualquier pequeña desviación en su colocación inicial.
- Configuración de recorrido de salida para la reorientación del palpador: Se programó un recorrido de salida específico para la herramienta. Este movimiento tenía como finalidad reorientar el palpador a un ángulo de 90 grados, una posición óptima que facilitaría la realización de los palpados dimensionales más detallados y específicos requeridos en el modelo de la ortesis (tal como se representa en la Figura 44).
- Definición de puntos de palpados críticos en el voladizo del modelo: Se identificaron y programaron cinco puntos de palpado específicos en la misma cara o voladizo prominente del modelo. Para cada uno de estos puntos, se integró en el programa el recorrido de entrada y salida del palpador (detallado en la Figura 45). Esto aseguró una adquisición de datos consistente y repetible en las zonas de mayor interés dimensional.
- Todos estos pasos se realizaron de la misma manera en cada una de las ortesis impresas.

Una vez que todos los parámetros y trayectorias fueron meticulosamente definidos, se procedió a ejecutar el programa de CMM. Esto inició el recorrido automatizado de la herramienta, durante el cual se tomaron todas las mediciones planificadas de manera precisa.

Tras la finalización del ciclo de medición, se exportó un informe detallado de tolerancias en coordenadas para cada modelo individual. Este informe es esencial, ya que proporciona los datos dimensionales clave necesarios para evaluar la conformidad de las piezas fabricadas con respecto al diseño original. Es fundamental subrayar que cada uno de estos pasos, desde la configuración inicial hasta la exportación final del informe, se ejecutó de manera idéntica y consistente para cada una de las ortesis impresas. Esta uniformidad en el procedimiento garantizó la comparabilidad de los resultados y la fiabilidad de las mediciones obtenidas a lo largo de todo el estudio.

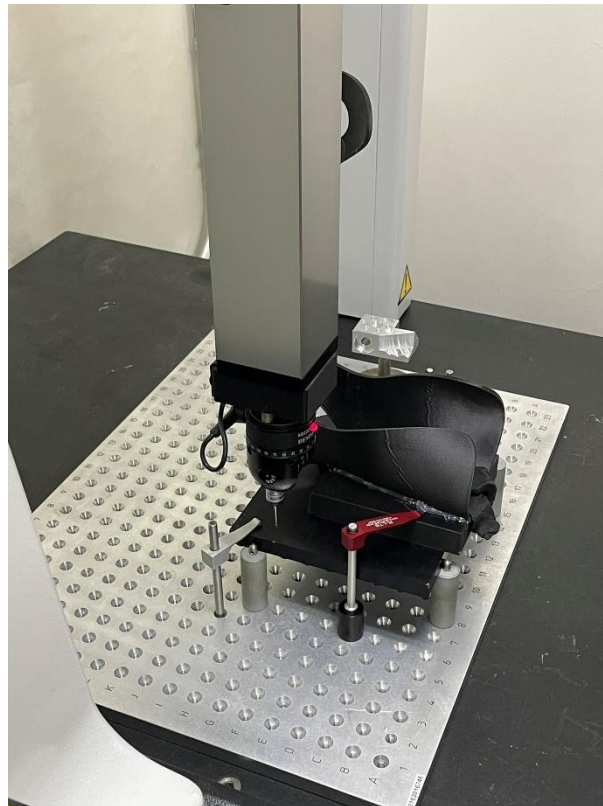


Figura 42: Paleado a configuración de base.



Figura 43: Palpado a los planos laterales para su configuración.



Figura 44: Cambio de configuración de herramienta de 0 grados a 90 grados.

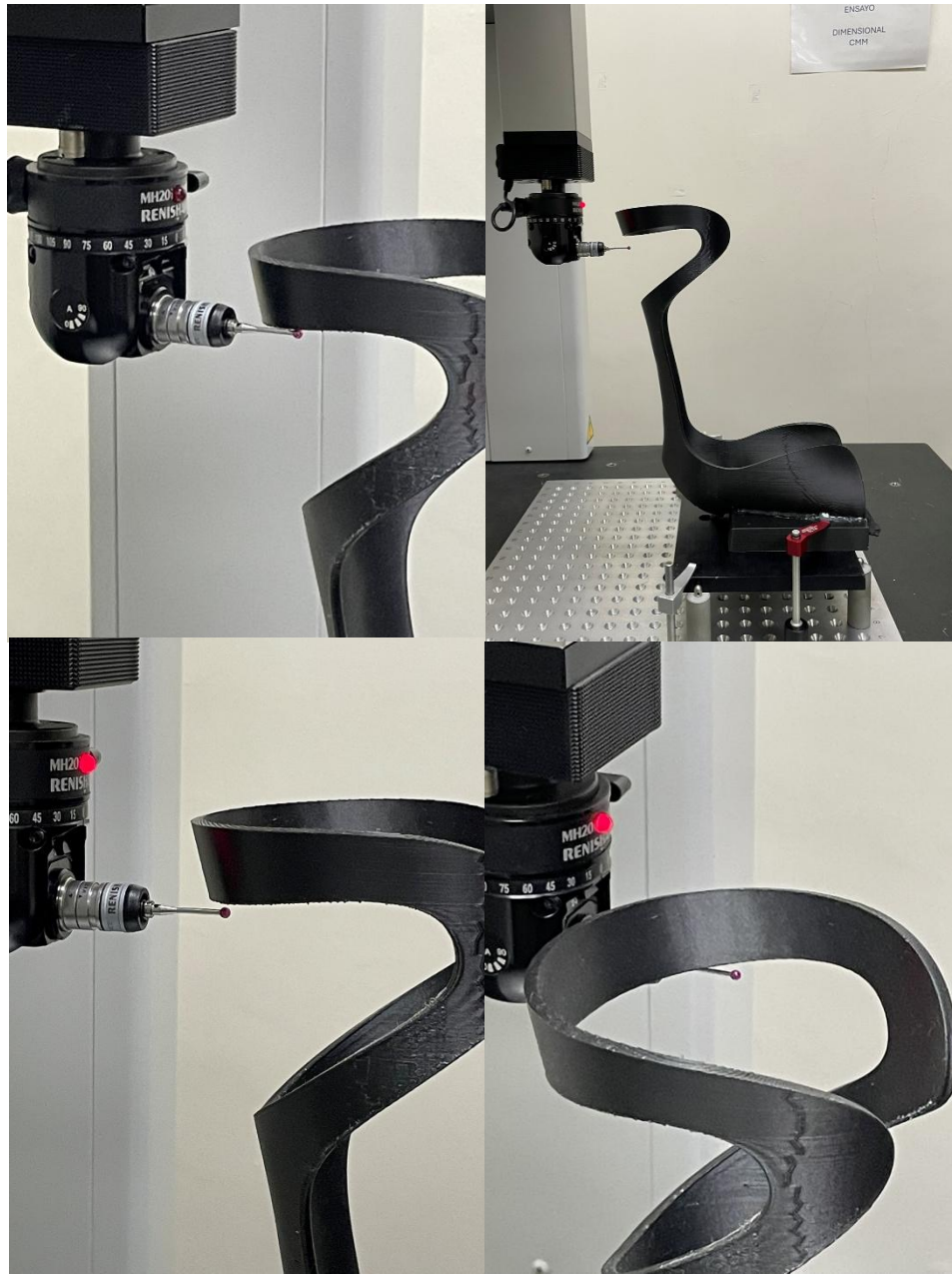


Figura 45: Puntos de palpeo en el voladizo superior de la ortosis.

La programación de la trayectoria de la herramienta fue complementada con una capacidad robusta de visualización y simulación dentro del propio software. Esto permitió una revisión completa y anticipada de todo el recorrido que la herramienta seguiría, desde el punto de inicio hasta el final de la medición.

Esta simulación virtual no solo facilitó la confirmación de la ruta planificada, sino que también fue crucial para identificar y corregir posibles colisiones o interferencias con la pieza o los accesorios de fijación antes de la ejecución física en la Máquina CMM. Al poder visualizar

cada movimiento de la sonda en tiempo real dentro del entorno digital como se muestra en la figura 46, se aseguró la optimización de la eficiencia del programa y se minimizó el riesgo de errores operativos, garantizando así la integridad tanto de la pieza como del equipo de medición.

Para evaluar la precisión de fabricación de las ortesis, se realizó un riguroso análisis estadístico de las desviaciones dimensionales. Este análisis se centró en cinco puntos específicos previamente definidos en la geometría de cada modelo.

El estudio incluyó la medición de tres piezas de ortesis. Es crucial destacar que todas estas piezas correspondían al mismo diseño CAD y fueron producidas utilizando idénticos parámetros de fabricación. Esta homogeneidad en el diseño y el proceso de manufactura es fundamental, ya que permite que los resultados de las mediciones sean directamente comparables y que las desviaciones observadas puedan atribuirse a la variabilidad inherente al proceso o a factores específicos de la máquina de producción, y no a diferencias en el modelo o en la configuración de la impresora.

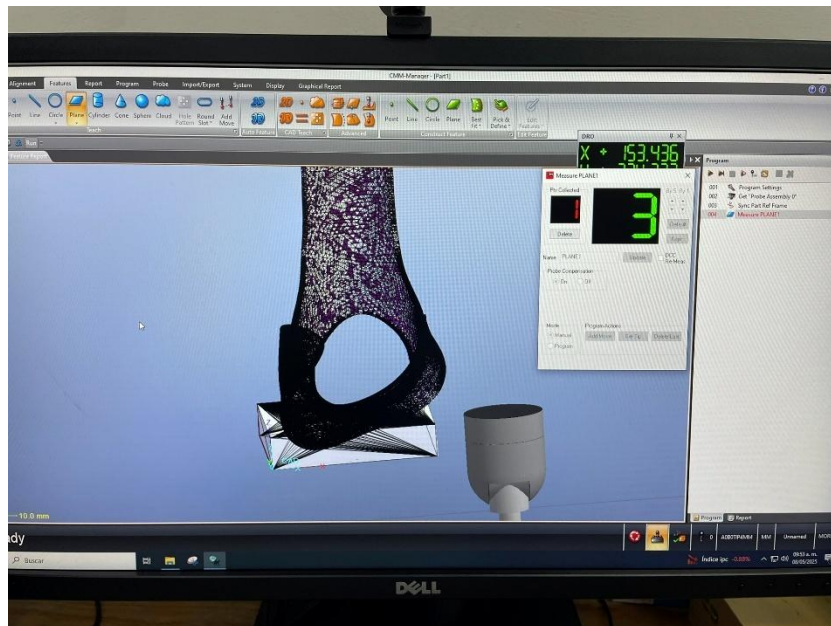


Figura 46: Simulación de trayectoria de herramienta en el software CMM Manager.

Al examinar las desviaciones máximas y mínimas en estos cinco puntos críticos, el análisis proporcionó una comprensión cuantitativa de la variabilidad dimensional de las ortesis, lo cual es esencial para validar la repetibilidad del proceso de fabricación y la fidelidad del producto final con respecto al diseño original.

La primera medición fue la ortesis con el material de soporte PVA Para obtener

información que permita realizar una comparación CAD de la pieza, se pueden observar 5 puntos de reporte de tolerancia que se obtuvo mediante la CMM con desviaciones máximas positivas, siendo de la mayor tolerancia en el punto 2 en **X= 0.021, Y= 0.415, Z= 0.204 mm**, en la tabla 21 se muestra el reporte completo.

Tabla 21: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PVA.

Reporte de tolerancia 1			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	31.871	31.741	0.091
Y	172.355	172.17	0.130
Z	269.24	269.21	0.021
Reporte de tolerancia 2			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	37.768	37.798	0.021
Y	185.185	185.773	0.415
Z	269.41	269.121	0.204
Reporte de tolerancia 3			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	56.904	56.896	0.005
Y	202.234	202.461	0.160
Z	268.87	268.765	0.074
Reporte de tolerancia 4			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	81.031	81.037	0.004
Y	207.569	207.375	0.137
Z	267.08	267.434	0.250
Reporte de tolerancia 5			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	81.031	81.037	0.004
Y	207.569	207.375	0.137
Z	267.08	267.434	0.250

La tabla referenciada presenta de manera exhaustiva los datos dimensionales que se obtuvieron de las mediciones realizadas en cada uno de los ejes principales del modelo impreso. Es fundamental destacar que, dentro de este conjunto de mediciones, las dimensiones relativas al eje Z (vertical) poseen una importancia crítica, siendo las de mayor relevancia para el análisis de la precisión de esta pieza específica.

Adentrándonos en los resultados, la Figura 47 proporciona una representación visual detallada de las desviaciones absolutas de longitud registradas durante la medición del voladizo del componente. Al examinar esta figura, se puede determinar que la desviación máxima detectada alcanzó los 0.250 mm, mientras que la desviación mínima observada fue de 0.074 mm. La desviación promedio es de 0.140 mm, ambas desviaciones se localizan específicamente en el eje Z, la desviación promedio se promediaron en todos los ejes en los 5 puntos especificados.

La particular importancia de este eje reside en que sus mediciones son un indicador directo y crucial de la "caída" o el asentamiento vertical de la primera capa de impresión que se apoya sobre el material de soporte. Las variaciones en el eje Z en esta área reflejan directamente cómo la estructura de soporte interactuó con la capa inicial del voladizo, lo cual puede impactar significativamente en la estabilidad, la precisión dimensional y la calidad superficial de esa característica crítica de la pieza impresa.

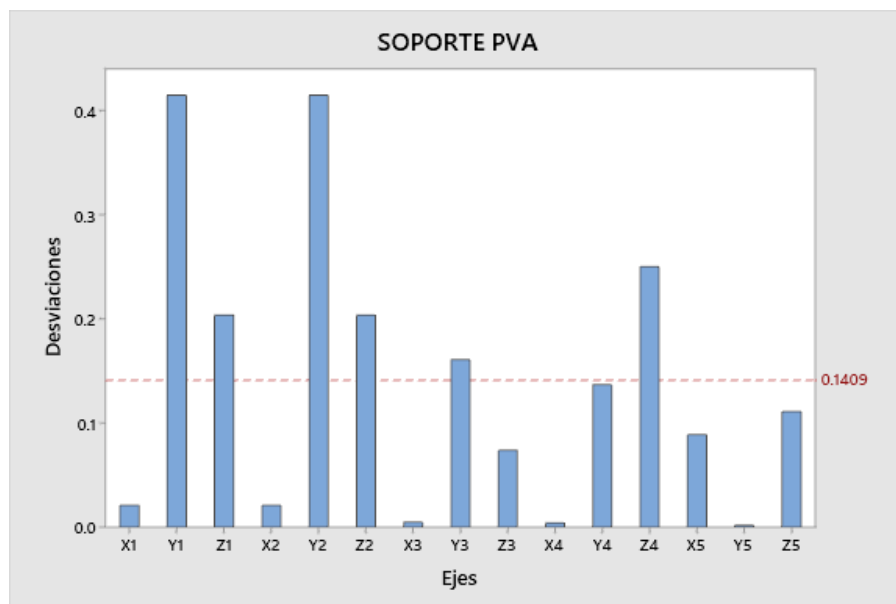


Figura 47: Desviación de medición de los ejes en material PVA.

Para la pieza impresa subsiguiente, que incorporó PLA como material de soporte, se obtuvieron los resultados aquí presentados. Estos fueron generados mediante la aplicación de un análisis idéntico de las desviaciones máximas y mínimas a lo largo de los tres ejes coordenados, centrándose específicamente en la misma característica de voladizo.

Esta metodología estandarizada tuvo como propósito fundamental facilitar una comparación sistemática y objetiva entre las tres ortesis evaluadas, cada una fabricada con materiales diferenciados. Los datos cuantitativos y detallados correspondientes a esta configuración particular se consolidan en la tabla 22.

Tabla 22: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PLA.

Reporte de tolerancia 1			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	31.871	30.17	1.202
Y	172.355	174.465	1.492
Z	269.24	269.322	0.057
Reporte de tolerancia 2			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	37.768	38.361	0.419
Y	185.185	187.46	1.608
Z	269.41	271.234	1.289
Reporte de tolerancia 3			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	56.904	56.91	0.004
Y	202.234	204.517	1.614
Z	268.87	266.256	1.848
Reporte de tolerancia 4			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	81.031	81.51	0.338
Y	207.569	208.158	0.416
Z	267.08	265.357	1.218
Reporte de tolerancia 5			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	123.264	123.25	0.009

Y	186.819	184.75	1.463
Z	269.95	267.94	1.421

El análisis de los resultados se visualiza en la Figura 48, la cual ilustra detalladamente las desviaciones absolutas de longitud cuantificadas durante la medición del voladizo del componente al igual que la pieza anterior. Al examinar esta representación gráfica, se determina que la desviación máxima registrada en el eje Z para la característica del voladizo alcanzó los 1.850 mm. Concomitantemente, la desviación mínima observada en este mismo eje fue de 0.057 mm. Adicionalmente, se calculó una desviación promedio de 0.679 mm. Es importante señalar que, mientras que las desviaciones máxima y mínima se localizaron específicamente en el eje Z para el voladizo, la desviación promedio se obtuvo a partir de un promedio de las mediciones realizadas en los cinco puntos especificados, considerando todos los ejes dimensionales. Esta impresión representa la pieza con la mayor deformación y el asentamiento más pronunciado de la primera capa del voladizo. Este problema se atribuye directamente a la humedad a la que estuvo expuesto el material y a la adherencia inadecuada entre el PLA (material de soporte) y el PETG-CF (material del modelo). Como consecuencia, la primera capa del voladizo tiende a retraerse al momento de retirar el soporte.

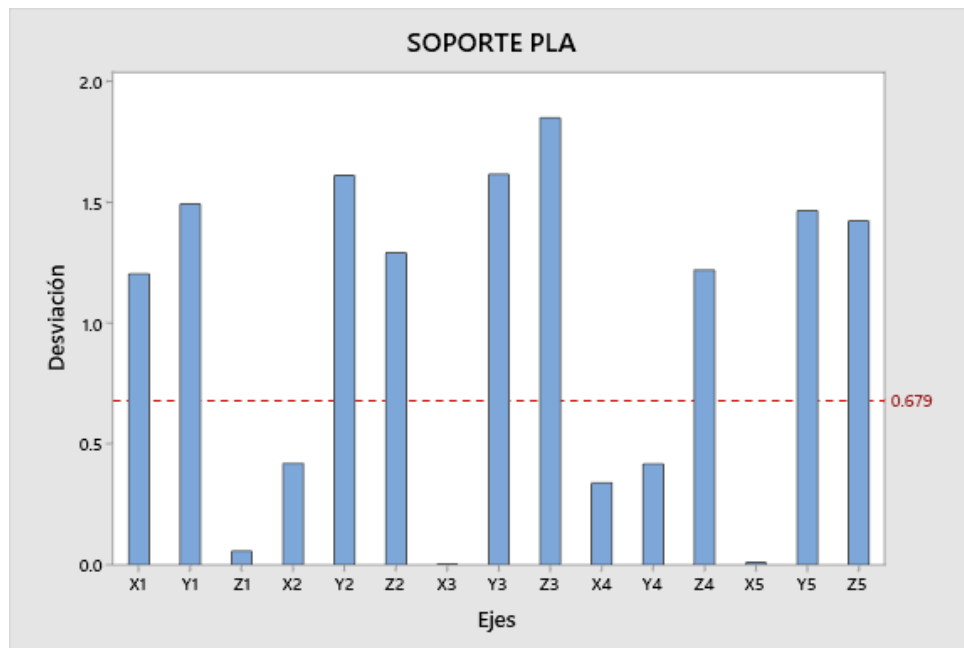


Figura 48: Desviación de medición de los ejes en material PLA.

La última pieza dimensionada, que utilizó PETG-CF como material de soporte (igual que el material del modelo), arrojó los resultados detallados a continuación. Estos fueron obtenidos mediante la aplicación de un análisis riguroso y consistente de las desviaciones máximas y mínimas en los tres ejes, específicamente en la región del voladizo. Los datos cuantitativos y completos de esta configuración se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23: Reporte de desviaciones de la pieza impresa con soportes PETG-CF.

Reporte de tolerancia 1			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	31.871	31.897	0.0183
Y	172.355	173.557	0.549
Z	269.24	269.912	0.475
Reporte de tolerancia 2			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	37.768	38.262	0.349
Y	185.185	186.049	0.610
Z	269.41	269.274	0.096
Reporte de tolerancia 3			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	56.904	57	0.067
Y	202.234	202.644	0.289
Z	268.87	267.837	0.730
Reporte de tolerancia 4			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	81.031	81.037	0.004
Y	207.569	208.409	0.593
Z	267.08	267.303	0.157
Reporte de tolerancia 5			
Eje	CAD	Dimensión	Desviación.
X	123.264	122.39	0.618
Y	186.819	186.823	0.002
Z	269.95	269.345	0.427

Cabe destacar que esta impresión incorporó soportes elaborados con el idéntico material que el modelo, una característica que produjo beneficios notables. No obstante, su calidad de impresión final no superó a la pieza impresa con PVA. Tal como se detalla en la Figura 49, que ilustra visualmente las desviaciones absolutas de longitud, el eje Z de este voladizo registró una desviación máxima de 0.730 mm y una mínima de 0.096 mm. Aunque estas desviaciones específicas se presentaron en el eje Z, la desviación promedio global, calculada desde cinco puntos a través de todos los ejes, fue de 0.225 mm.

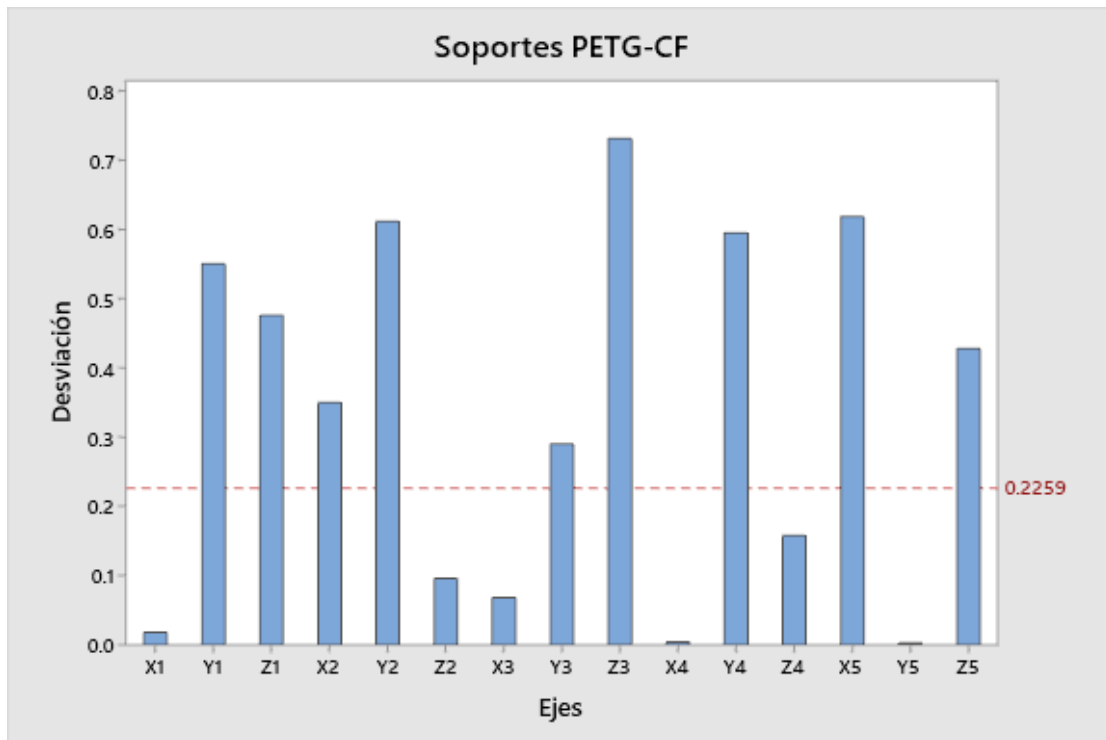


Figura 49: Desviación de medición de los ejes en material PLA.

Podemos afirmar que la impresión que alcanzó la calidad superficial y precisión dimensional más altas fue la ortesis que utilizó PVA como material de soporte. Este resultado favorable se debe a una característica clave del PVA: la capacidad de depositarlo en contacto directo con el material del modelo (sin necesidad de una distancia en el eje Z). Al ser hidrosoluble, el PVA se remueve simplemente con agua sin causar daño a las delicadas capas de los voladizos. Esta propiedad es crucial, ya que permite optimizar y reducir eficazmente el efecto de "caída" o deformación de las capas en las secciones voladizas de los modelos impresos.

Capítulo 5: Discusión y conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo principal llevar a cabo un análisis metrológico de precisión sobre componentes impresos mediante Fabricación por Filamento Fundido (FFF) que requieren el uso de estructuras de soporte. Los hallazgos obtenidos confirman que la selección del termoplástico utilizado para los soportes tiene un impacto discernible y cuantificable en la precisión dimensional de las piezas finales. El estudio reveló que el PVA se comportó como el material de soporte más eficaz para las geometrías sometidas a prueba. En promedio, el PVA indujo una desviación de 0.1409 mm en todos los ejes. Esta cifra es notablemente menor que la desviación de 0.679 mm producida por el PLA en las superficies voladizas, una diferencia que se confirmó como estadísticamente significativa. Asimismo, el PETG-CF resultó en una desviación media de 0.225 mm. Estos resultados son de particular relevancia en el contexto de la manufactura aditiva, donde la promesa de geometrías complejas y personalización a menudo se ve desafiada por las limitaciones inherentes al proceso FFF, especialmente en zonas que requieren soporte. Las inconsistencias dimensionales, como las identificadas en este estudio, pueden comprometer la funcionalidad, el ajuste de ensamblaje y la apariencia estética de los componentes finales. La literatura existente ha señalado repetidamente la importancia de la optimización de parámetros en FFF para mejorar tanto las propiedades mecánicas como las geométricas, y nuestros hallazgos refuerzan la idea de que la interacción material-soporte es un parámetro crítico que merece atención detallada.

La aplicación rigurosa del análisis metrológico mediante Máquinas de Medición por Coordenadas (CMM) fue fundamental para la cuantificación precisa de estas diferencias dimensionales. La capacidad de la CMM para capturar coordenadas tridimensionales con alta exactitud permitió no solo identificar desviaciones macroscópicas, sino también detectar variaciones sutiles en las zonas de contacto y en las superficies soportadas. Este enfoque metrológico proporciona una base objetiva y reproducible para evaluar el impacto de los soportes, superando las limitaciones de mediciones manuales o métodos menos precisos que podrían enmascarar las diferencias significativas. La versatilidad y la precisión del software de la CMM, junto con sus distintos sistemas de palpado, fueron cruciales para realizar una caracterización geométrica exhaustiva de las piezas, permitiendo la comparación directa con el modelo CAD y la visualización de los mapas de desviación.

Las desviaciones observadas pueden atribuirse a varios mecanismos durante el proceso de impresión FFF. La adherencia entre el material de soporte y el material de la pieza, las

diferencias en las propiedades térmicas entre los termoplásticos utilizados, y la facilidad o dificultad de remoción del soporte, son factores que probablemente influyen en la distorsión y el estrés residual que se acumula en las capas adyacentes a los soportes. El resumen de esta tesis ya destaca que los puntos voladizos tienden a caer si no se solidifican adecuadamente, lo que subraya la naturaleza crítica de la interacción soporte-pieza en la estabilidad dimensional.

Implicaciones Prácticas:

Los resultados de este estudio tienen importantes implicaciones para la fabricación aditiva industrial. La selección cuidadosa del material de soporte, basándose en la precisión dimensional requerida para la aplicación, puede ser tan crítica como la elección del material principal del componente. Para aplicaciones de alta precisión, como la fabricación de prototipos funcionales, utillajes o componentes de ingeniería, la optimización de los soportes no es solo una cuestión de remoción eficiente, sino también de asegurar la tolerancia geométrica. Este conocimiento puede guiar a los fabricantes en la definición de protocolos de impresión más robustos y en la anticipación de la necesidad de post-procesamiento.

Limitaciones y Futuras Líneas de Investigación:

A pesar de la robustez del análisis metrológico, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser reconocidas. Se determinó que el PVA constituyó el material de soporte más eficaz para la configuración geométrica específica empleada, lo cual se atribuye a su habilidad superior para proporcionar apoyo al material del modelo. Futuras investigaciones podrían expandir este análisis a una gama más amplia de materiales de soporte, incluyendo hidrosolubles y materiales de ruptura, así como a geometrías más complejas y de mayor tamaño que presenten diferentes configuraciones de voladizos. Además, sería valioso investigar el impacto de los parámetros de impresión específicos de los soportes (por ejemplo, densidad de relleno del soporte, patrón de soporte, distancia entre el soporte y la pieza) en la precisión dimensional. La integración de técnicas de escaneo 3D óptico o láser en el análisis metrológico podría ofrecer una densidad de puntos aún mayor en las superficies complejas, complementando los palpadores de contacto de la MMC y proporcionando una visión más completa de las desviaciones superficiales. Finalmente, un estudio que correlacione las diferencias dimensionales inducidas por los soportes con el rendimiento mecánico o la vida útil de los componentes sería una adición valiosa para el conocimiento en FFF.

5.1 Conclusión

La presente investigación ha abordado de manera sistemática el impacto del uso de diferentes materiales termoplásticos para soportes en la precisión dimensional de componentes impresos por Fabricación por Filamento Fundido (FFF), un aspecto crítico para la adopción industrial de esta tecnología. Mediante un riguroso análisis metrológico asistido por Máquinas de Medición por Coordenadas (CMM), se ha demostrado de manera concluyente que la elección del material de soporte no es un factor trivial, sino que influye significativamente en la exactitud geométrica de las piezas finales.

Los hallazgos de este estudio confirman que las diferencias en las propiedades térmicas y de adherencia entre los termoplásticos de soporte y el material principal de la pieza inducen variaciones dimensionales medibles, especialmente en las superficies que estuvieron en contacto directo con los soportes, además de la exposición de la humedad del material. Esta cuantificación precisa, lograda gracias a la alta resolución y fiabilidad de las MMC, subraya la necesidad de considerar la interacción soporte-pieza como un parámetro de diseño y proceso fundamental para garantizar la calidad y la funcionalidad de los componentes FFF. La capacidad de las MMC para detectar y cuantificar estas desviaciones con alta precisión es indispensable para la validación de piezas en entornos de fabricación aditiva que exigen tolerancias estrictas.

En síntesis, esta investigación aporta conocimiento empírico crucial para la optimización de los procesos de FFF, destacando que una selección informada del material de soporte puede mitigar las inconsistencias dimensionales y reducir la necesidad de extensivos post-procesamientos. Esto contribuye directamente a la mejora de la eficiencia productiva y la calidad final de los productos impresos en 3D, facilitando una mayor integración de la FFF en aplicaciones industriales de alta exigencia.

Finalmente, este trabajo no solo resuelve una cuestión de precisión en la FFF, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones. Se recomienda explorar el comportamiento de otros pares de materiales de soporte/pieza, la influencia de parámetros específicos de impresión de los soportes y el desarrollo de estrategias de optimización automatizadas, con el fin de avanzar aún más en la madurez y fiabilidad de la tecnología FFF.

Referencias

1. Bravo Marmolejo, V.O. and J.Á. Diosdado De la Peña, *MANUFACTURA ADITIVA PARA PROTOTIPADO RÁPIDO*. JÓVENES EN LA CIENCIA, 2017. **3**(2): p. 2675-2679.
2. Kechagias, J.D., N. Vidakis, and M. Petousis, *Parameter effects and process modeling of FFF-TPU mechanical response*. Materials and Manufacturing Processes, 2023. **38**(3): p. 341-351.
3. Kechagias, J., *Materials for Additive Manufacturing*. AIMS Materials Science, 2022. **9**: p. 785-790.
4. Heredia Martínez, C.A. and J.P. Franco Rubio, *Tecnologías de fabricación aditiva. La impresora 3D, antecedentes y funcionamiento*. Ignis, 2014(7): p. 24-30.
5. Christoph, R., R. Munoz, and A. Hernández, *Manufactura Aditiva*. Realidad y Reflexión, 2017. **43**: p. 97.
6. Rosel Solís, M.J., et al., *Additive manufacturing and materials compounds in the design of transtibial prostheses for sports use*. REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS, 2018. **1**(1): p. 27-43.
7. Kechagias, J., et al., *Key parameters controlling surface quality and dimensional accuracy: a critical review of FFF process*. Materials and Manufacturing Processes, 2022. **37**(9): p. 963-984.
8. Dal Maso, A. and F. Cosmi, *3D-printed ankle-foot orthosis: a design method*. Materials Today: Proceedings, 2019. **12**: p. 252-261.
9. Christiyan, K.G.J., U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, *A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. **114**(1): p. 012109.
10. Cha, Y.H., et al., *Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software*. Applied Bionics and Biomechanics, 2017. **2017**: p. 9610468.
11. Walbran, M., K. Turner, and A.J. McDaid, *Customized 3D printed ankle-foot orthosis with adaptable carbon fibre composite spring joint*. Cogent Engineering, 2016. **3**(1): p. 1227022.
12. Tao, Y., et al., *A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication*. Journal of Materials Research and Technology, 2021. **15**: p. 4860-4879.

13. Daminabo, S.C., et al., *Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems*. Materials Today Chemistry, 2020. **16**: p. 100248.
14. Ligon, S.C., et al., *Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing*. Chemical Reviews, 2017. **117**(15): p. 10212-10290.
15. Torreblanca Díaz, D., *Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos*. Iconofacto, 2016.
16. Turner, B.N., R. Strong, and S.A. Gold, *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling*. Rapid prototyping journal, 2014. **20**(3): p. 192-204.
17. Bikas, H., P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **83**: p. 389-405.
18. Tagliaferri, V., et al. *Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies*. Materials, 2019. **12**, DOI: 10.3390/ma12244161.
19. Kruth, J.-P., et al., *Lasers and materials in selective laser sintering*. Assembly Automation, 2003. **23**(4): p. 357-371.
20. Parandoush, P. and D. Lin, *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. Composite Structures, 2017. **182**: p. 36-53.
21. Li, J., K.-D. Hong, and T. Yuan, *Slotted hemispherical resonators for 3-D printed waveguide filters with extended spurious-free stopbands*. IEEE Access, 2019. **7**: p. 130221-130235.
22. Le Bihan, P., et al. *Three-Dimensional Frequency Selective Surface for Single-Polarized Filtering Applications with Angular Stability*. in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2020. IEEE.
23. Li, N., et al., *Review of 3D printing in photocatalytic substrates and catalysts*. Materials Today Energy, 2022: p. 101100.
24. Boderó, I.A., G.S. Espinoza, and N.C. Pérez, *Aplicación de la manufactura aditiva en el procesamiento de alimentos*. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 2021. **6**(9): p. 837-856.

25. Muñoz Caracuel, A., *Sistemas de liberación controlada de fármacos obtenidos por impresión 3D. Mecanismos de liberación y factores que influyen*. 2020.
26. Godoi, F.C., et al., *Fundamentals of 3D food printing and applications*. 2018: Academic press.
27. Costa, J., *Procesos de manufactura con tecnología 3D*. CTS Cafe, 2019: p. 40-49.
28. Wu, Y. and A. Wu, *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*. 1997: Ediciones Díaz de Santos.
29. Box, G., *Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations*. Technometrics, 1988. **30**(1): p. 1-17.
30. Machado, N.I.C., & Wengler, S, *La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad*. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, 2015. **23**(37).
31. Li, N., et al., *A review on mixture design methods for geopolymer concrete*. Composites Part B: Engineering, 2019. **178**: p. 107490.
32. Thamizhmanii, S., S. Sapparudin, and S. Hasan, *Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method*. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, 2007. **20**(1-2): p. 503-506.
33. Okolie, J.A., et al., *Modeling and process optimization of hydrothermal gasification for hydrogen production: A comprehensive review*. The Journal of Supercritical Fluids, 2021. **173**: p. 105199.
34. Nalbant, M., H. Gökkaya, and G. Sur, *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*. Materials & design, 2007. **28**(4): p. 1379-1385.
35. Mesa-Palacio, L.d.J., G. Calle-Trujillo, and J.J. Arbeláez-Toro, *Diseño, construcción y fabricación de una máquina prototipo de medición por coordenadas*. TecnoLógicas, 2011(26): p. 11-25.
36. Mosleh, N., A.M. Rezadoust, and S. Dariushi, *Determining process-window for manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced composite Using 3D-printing*. Materials and Manufacturing Processes, 2021. **36**(4): p. 409-418.
37. Väisänen, A.J.K., et al., *Occupational exposure to gaseous and particulate contaminants originating from additive manufacturing of liquid, powdered, and filament plastic materials and related post-processes*. Journal of Occupational and

- Environmental Hygiene, 2019. **16**(3): p. 258-271.
38. Tsiolikas, A., et al., *Robust design application for optimizing ABS fused filament fabrication process: A case study*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **564**(1): p. 012021.
 39. Rodríguez-Panes, A., J. Claver, and A.M. Camacho, *The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis*. Materials, 2018. **11**(8): p. 1333.
 40. Vidakis, N., et al., *Strain Rate Sensitivity of Polycarbonate and Thermoplastic Polyurethane for Various 3D Printing Temperatures and Layer Heights*. Polymers, 2021. **13**(16): p. 2752.
 41. Vidakis, N., et al., *Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyamide 12 over Multiple Recycling Processes*. Materials, 2021. **14**(2): p. 466.
 42. Leng, J., et al., *Tailored crystalline structure and enhanced impact strength of isotactic polypropylene/high-density polyethylene blend by controlling the printing speed of fused filament fabrication*. Journal of Materials Science, 2020. **55**(28): p. 14058-14073.
 43. Cao, S., et al., *Synthesis and properties of modified PBT for FDM*. Rapid Prototyping Journal, 2017. **23**(4): p. 804-810.
 44. Kechagias, J.D., et al., *Surface characteristics investigation of 3D-printed PET-G plates during CO2 laser cutting*. Materials and Manufacturing Processes, 2022. **37**(11): p. 1347-1357.
 45. Honigmann, P., et al., *Patient-Specific Surgical Implants Made of 3D Printed PEEK: Material, Technology, and Scope of Surgical Application*. BioMed Research International, 2018. **2018**: p. 4520636.
 46. Garcia-Leiner, M., et al., *Characterization of polyaryletherketone (PAEK) filaments and printed parts produced by extrusion-based additive manufacturing*. Polymer International, 2021. **70**(8): p. 1128-1136.
 47. Chueca de Bruijn, A., G. Gómez-Gras, and M.A. Pérez, *Mechanical study on the impact of an effective solvent support-removal methodology for FDM Ultem 9085 parts*. Polymer Testing, 2020. **85**: p. 106433.
 48. Ni, F., G. Wang, and H. Zhao, *Fabrication of water-soluble poly(vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing*

- application*. Journal of Applied Polymer Science, 2017. **134**(24).
49. Mizera, A., et al., *Tensile impact behaviour of 3D printed parts on FFF/FDM printer Zortrax M200*. MATEC Web Conf., 2018. **210**: p. 04049.
 50. Langelaar, M., *Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018. **57**(5): p. 1985-2004.
 51. Wang, Z., Y. Zhang, and A. Bernard, *Lightweight porous support structure design for additive manufacturing via knowledge-based bio-inspired volume generation and lattice configuration*. Virtual and Physical Prototyping, 2022. **17**(4): p. 894-918.
 52. Matos, M., A. Rocha, and A. Pereira, *Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **107**.
 53. Moncayo, C.M., F.S.C. Díaz, and E.C. Nieto, *Desarrollo de prototipos de plantilla y suela utilizando prototipado rápido FDM*. 2005.
 54. Stier, B., J.-W. Simon, and S. Reese, *Numerical and experimental investigation of the structural behavior of a carbon fiber reinforced ankle-foot orthosis*. Medical Engineering & Physics, 2015. **37**(5): p. 505-511.
 55. Wojciechowski, T., A. Bruzgielewicz, and K. Niemczyk, *Report from the 5th Lithuanian-Polish Otorhinolaryngological Congress*. Polish Otorhinolaryngology Review, 2019. **8**(3): p. 55-56.
 56. Ranjan, R., et al., *A critical review on Classification of materials used in 3D printing process*. Materials Today: Proceedings, 2022. **61**: p. 43-49.
 57. Amaya-Rivas, J.L., et al., *Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview*. Heliyon, 2024. **10**(5): p. e26641.
 58. Zakręcki, A., et al., *Innovative Approaches to 3D Printing of PA12 Forearm Orthoses: A Comprehensive Analysis of Mechanical Properties and Production Efficiency*. Materials, 2024. **17**(3): p. 663.
 59. Sandhu, K., et al., *Surface Characteristics of Machined Polystyrene with 3D Printed Thermoplastic Tool*. Materials, 2020. **13**(12): p. 2729.
 60. Camposeco-Negrete, C., *Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **108**(7): p. 2131-2147.

61. Hamrol, A., M. Cugier, and F. Osiński. *Identification of the Sensitivity of FDM Technology to Material Moisture with a Fast Test*. in *Advances in Manufacturing III*. 2022. Cham: Springer International Publishing.
62. Frunzaverde, D., et al., *The Influence of the Printing Temperature and the Filament Color on the Dimensional Accuracy, Tensile Strength, and Friction Performance of FFF-Printed PLA Specimens*. *Polymers*, 2022. **14**(10): p. 1978.
63. Emir, E., et al. *Dimensional Accuracy of Porous Structures Manufactured Using Air Controller*. in *Advanced Manufacturing Processes IV*. 2023. Cham: Springer International Publishing.
64. Koers, T. and B. Magyar, *Compensation of the Shrinkage Behavior Occurring in Cylindrical Components in the FDM Process*. *Macromolecular Symposia*, 2023. **411**(1): p. 2200185.
65. Šljivic, M., et al., *Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. **659**(1): p. 012082.
66. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2022.
67. Daly, M., et al., *Dynamic analysis of 3D-printed CF-PETG composites with different infill densities*. *Progress in Additive Manufacturing*, 2024.
68. Alafaghani, A.a., et al., *Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach*. *Procedia Manufacturing*, 2017. **10**: p. 791-803.
69. Valvez, S., A.P. Silva, and P.N.B. Reis *Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts*. *Polymers*, 2022. **14**, DOI: 10.3390/polym14132564.
70. Abeykoon, C., P. Sri-Amphorn, and A. Fernando, *Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures*. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2020. **3**(3): p. 284-297.
71. Raju, M., et al., *A hybrid PSO–BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019. **30**: p. 2743-2758.
72. Chacón, J.M., et al., *Effect of nozzle diameter on mechanical and geometric performance of 3D printed carbon fibre-reinforced composites manufactured by fused*

- filament fabrication*. Rapid Prototyping Journal, 2021. **27**(4): p. 769-784.
73. Anitha, R., S. Arunachalam, and P. Radhakrishnan, *Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. **118**(1-3): p. 385-388.