

Diseño de suela para calzado deportivo personalizado para atletismo mediante el principio de optimización topológica.

Victor Alejandro Quesada Plata

Trabajo de grado para optar el título de diseñador industrial

Director:

Juan Alexis Mejia Iguaran

codirector:

Edher Duvan Fonseca Abril

Universidad industrial de Santander
Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de diseño industrial

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

La realización de este trabajo de tesis representa la culminación de un proceso largo, exigente y profundamente transformador. No fue solo un reto académico, sino también personal, marcado por años de esfuerzo, dudas, práctica profesional, trabajo simultáneo y una constante lucha interna. Por eso, este logro no me pertenece únicamente a mí, sino a todas las personas que, de distintas maneras, hicieron posible llegar hasta aquí.

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la **Universidad Industrial de Santander** y a la **Escuela de Diseño Industrial**, por brindarme un espacio de formación en el que pude desarrollar no solo habilidades técnicas y creativas, sino también una visión crítica y profesional del diseño, de manera especial a mi director de tesis, **Juan Alexis Mejía**, y a mi codirector, **Duván Fonseca** por su acompañamiento, orientación y disposición a lo largo de este proceso. Sus observaciones, exigencia y criterio fueron fundamentales para darle forma, enfoque y solidez a este proyecto. Igualmente, agradezco a los **jurados evaluadores**, por su tiempo, lectura y aportes, que contribuyeron a fortalecer este trabajo.

Quiero agradecer profundamente a **mi madre Maria Yaned**. Este logro es el fruto de su trabajo, de su lucha constante y de no haber renunciado nunca al sueño de verme culminar esta etapa. Gracias por sostenerme incluso cuando yo mismo dudaba, por el sacrificio silencioso y por enseñarme, con el ejemplo, a no rendirme.

A **Tobías**, quien fue durante muchos años mi ejemplo a seguir. Gracias por exigirme a pensar y a aprender, incluso cuando no lo entendía. Hoy reconozco que gran

parte del carácter que tengo y de la forma en que enfrento los retos nació de esas enseñanzas.

A mis amigos, gracias por hacer este camino más llevadero, a **Juanjo**, por su aporte a mi crecimiento, por el empuje que me dio durante toda la carrera. A **Lina**, por su compañía, cariño y ayuda en los últimos semestres, en una etapa decisiva de este proceso.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, hicieron parte de este recorrido. Esta tesis no solo representa el cierre de una etapa académica, sino el resultado de años de aprendizaje, esfuerzo y transformación personal.

Tabla de contenido

1. Objetivo general	15
1.1. Objetivos Específicos:	15
2. Planteamiento del problema	16
2.2. Descripción del problema	16
3. Marco Teórico	19
3.1. Medición de Presión Plantar	19
3.2. Qué es la impresión 3D como funciona.	22
3.3. Antecedentes	23
3.4. Personalización y escaneo 3D en calzado deportivo	26
3.5. Diseño paramétrico y nuevos modelos de fabricación	28
3.6. Anatomía y Biomecánica del Pie	29
3.7. Anatomía Básica	32
3.8. Variabilidad morfológica del pie	34
4. Pisada y distribución de presiones.	37
4.1. Articulaciones de acomodación	40
4.2. Articulaciones de propulsión o movimiento	40
5. Diseño de Prueba de registro de huellas plantares en diferentes velocidades.....	44
5.1. Objetivo	44
5.2. Protocolo Experimental	45
6. Evaluación experimental de la deformación en estructuras topológicas impresas en TPU para aplicaciones en suelas deportivas.....	54
6.1. Justificación	55
6.2. Materiales y equipos	55
6.3. Metodología experimental	55
6.4. Variables analizadas.....	56
6.5. Resultados y análisis	56
6.6. Conclusión	59
7. Requerimientos	60
8. Proceso creativo	62
9. Evaluación experimental de parámetros de impresión en TPU: selección del ángulo de deposición óptimo.....	70

9.1.	Justificación.....	70
9.2.	Objetivo.....	71
9.3.	Metodología	71
9.4.	Variables analizadas.....	72
9.5.	Resultados	74
9.6.	Conclusión.....	76
10.	Geometrización y modelado.....	77
11.	Protocolo de validación comparativa	82
11.1.	Objetivo.....	83
11.2.	Condiciones de la prueba	83
11.3.	Resultados	84
12.	Análisis computacional de optimización topológica, aproximación mediante simulación FEA	85
12.1.	Propiedades del material	86
12.2.	Cálculo del módulo de corte	86
12.3.	Distribución de cargas por zona.....	87
12.4.	Cargas dinámicas - condición de carrera.....	88
12.5.	Presiones equivalentes por zona.....	89
13.	Verificación R10.....	92
14.	Oportunidades de mejora.....	93
15.	Conclusiones generales	94
15.1.	Conclusiones por objetivo específico.....	96
16.	Recomendaciones	98
17.	Referencias Bibliográficas.....	100
18.	Apéndices	105

Lista de Figuras.

Figura 1 Impresión 3d	23
Figura 2 Adidas MC87 4D	24
Figura 3 ACTIBREEZE™ Sansdal.....	25
Figura 4	26
Figura 5 ATHOS zapatos para escalar	27
Figura 6 Despiece explosionado de zapato ATHOS	27
Figura 7 Tipos de pisada	31
Figura 8 Arcos plantares.....	34
Figura 9 Tipos de pies	36
Figura 10 Grados de libertad	38
Figura 11 Distribución de cargas según tipo de pie.	39
Figura 12 Ciclos de marcha.....	43
Figura 13 Preparación de pape para muestras.	48
Figura 14 Prueba previa a tomar datos	49
Figura 15 Muestra de huella con áreas de presión	50
Figura 16 Galería de huellas tomadas para extracción de forma.....	51
Figura 17 Mapa de distribución de presiones.....	52
Figura 18 Mapa de calor creado con las formas extraídas de la prueba.....	53
Figura 19 Geometrías de impresión con variaciones topológicas	56
Figura 20 Prueba de deformación.....	57
Figura 21 Grafica de deformación vs Geometría	58
Figura 22 Grafica de rigidez vs Geometría	59
Figura 23 Alternativas en skechtbook.	62

Figura 24 Evolución de forma con ayuda de Vizcom.	63
Figura 25 Proceso de cambios según el criterio del usuario en Vizcom.....	64
Figura 26 Alternativa seleccionada por el usuario.	65
Figura 27 Modelado en Blender.	66
Figura 28 Ajuste del modelado con las medidas exactas del usuario.....	67
Figura 29 Pruebas de slicer vertical.	68
Figura 30 Prueba de slicer de diferentes % de rellenos.....	70
Figura 31 Prueba de ángulos de impresión en Bambu Lab.....	72
Figura 32 Datos de slicer a 45 grados.	73
Figura 33 Datos de slicer a 30 grados.	73
Figura 34 Datos de slicer a 90 grados.	73
Figura 35 Datos de slicer a 0 grados.	74
Figura 36 Fallo de impresión a 90 grados.	76
Figura 37 Geometrización de áreas de presión para cada pie.	78
Figura 38 Modelado de áreas de presión.....	78
Figura 39 Proceso de modelado de áreas de presión media.	79
Figura 40 Resultado de modelado de presión baja.....	80
Figura 41 Resultado de slicer de asignación de relleno en las áreas.....	81
Figura 42 Slicer final de suela derecha para impresión.....	81
Figura 43 Prototipo pre-prueba de validación.....	82
Figura 44 Usuario en la prueba de validación en fase de trote.....	84
Figura 45 Ingreso de datos a Fusión para aplicar optimización topológica.	90
Figura 46 Resultado de la optimización topológica.	91

Lista de tablas.

Tabla 1 Espacio de registro	45
Tabla 2 Requerimientos de la prueba	45
Tabla 3 Datos obtenidos después de la prueba	57
Tabla 4 Tabla de requerimiento de diseño.....	60
Tabla 5 Comparación de resultados por ángulo de impresión en TPU	74
Tabla 6 Propiedades mecánicas del TPU 95A ingresadas en Fusion 360	86
Tabla 7 Distribución de cargas estáticas por zona del modelo (usuario 70 kg)	88
Tabla 8 Distribución de cargas dinámicas por zona en condición de carrera.....	89
Tabla 9 Presiones equivalentes por zona en condición estática.	89

Lista de ecuaciones.

Ecuación 1 Delta de deformación porcentual.....	57
Ecuación 2 Ecuación de cálculo de corte del TPU a partir del módulo de Young y la razón de Poisson	87
Ecuación 3 Cálculo de carga estática.	87
Ecuación 4 Cálculo de cargas dinámicas.....	88

Lista de apéndices

Apéndice A. User Persona.

Apendice B. Mapa de empatía.

Resumen

Título: Diseño de suela para calzado deportivo personalizado para atletismo mediante el principio de optimización topológica.

Autor: Victor Alejandro Quesada Plata

Palabras clave: optimización topológica, suela deportiva, impresión 3D, biomecánica del pie, presión plantar, fabricación aditiva, TPU, calzado personalizado

El calzado deportivo contemporáneo enfrenta un reto central: lograr productos más ligeros sin sacrificar resistencia, estabilidad ni durabilidad. A pesar de los avances tecnológicos, la mayoría de las zapatillas para atletismo se desarrollan bajo modelos estandarizados que no responden a las diferencias biomecánicas entre usuarios, limitando su eficiencia funcional y estructural (Elvira Hernández, 2021). Esta estandarización genera distribución inadecuada de cargas, absorción deficiente de impactos y presencia de material en zonas sin función estructural relevante, afectando el rendimiento, el confort y la seguridad del usuario (Nordin & Frankel, 2001). Frente a este escenario, el presente trabajo propone la aplicación del principio de optimización topológica como fundamento de diseño para suelas de calzado deportivo personalizadas. Este principio —distribuir el material únicamente donde los esfuerzos mecánicos lo demandan— se implementa mediante la variación de geometrías de relleno en manufactura aditiva: estructuras de mayor rigidez en zonas de alta presión plantar y estructuras más flexibles en zonas de menor demanda mecánica, reduciendo el peso total sin comprometer el desempeño estructural (Bendsøe & Sigmund, 2004).

La metodología integra tres componentes. Primero, el análisis experimental de la pisada mediante registro de huellas plantares, construyendo un mapa de distribución de presiones por zonas. Segundo, la evaluación mecánica de geometrías de relleno impresas en TPU bajo ensayos de deformación estática, estableciendo una jerarquía de rigidez entre patrones. Tercero, la asignación de cada geometría a su zona correspondiente, generando una suela con propiedades mecánicas heterogéneas adaptadas al perfil biomecánico del usuario. Complementariamente, la investigación incorpora una visión sostenible: la reducción selectiva de material y el uso de manufactura aditiva representan estrategias con potencial para disminuir el impacto ambiental de la producción convencional de calzado (Nike Inc., 2022). En conclusión, este trabajo demuestra que la optimización topológica, implementada desde el diseño industrial mediante manufactura aditiva, es una herramienta viable para desarrollar calzado deportivo más ligero, eficiente, personalizado y sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Director Juan Mejía. Codirector Duván Fonseca.

Abstract

Title: Design of a sole for customized athletics sports shoes using the principle of topological optimization.

Author: Victor Alejandro Quesada Plata

Keywords: topological optimization, sports sole, 3D printing, foot biomechanics, plantar pressure, additive manufacturing, TPU, custom footwear

Contemporary athletic footwear faces a central challenge: achieving lighter products without sacrificing strength, stability or durability. Despite technological advances, most athletics shoes are developed under standardized models that do not respond to biomechanical differences between users, limiting their functional and structural efficiency (Elvira Hernández, 2021). This standardization generates inadequate load distribution, poor shock absorption and the presence of material in areas without relevant structural function, affecting performance, comfort and user safety (Nordin & Frankel, 2001). Faced with this scenario, the present work proposes the application of the principle of topological optimization as a design foundation for customized sports shoe soles. This principle—distributing the material only where mechanical stresses demand it—is implemented by varying fill geometries in additive manufacturing: higher rigidity structures in areas of high plantar pressure and more flexible structures in areas of lower mechanical demand, reducing overall weight without compromising structural performance (Bendsøe & Sigmund, 2004).

The methodology integrates three components. First, the experimental analysis of the footprint by recording plantar footprints, building a map of pressure distribution by zones. Second, the mechanical evaluation of TPU printed fill geometries under static deformation tests, establishing a hierarchy of stiffness between patterns. Third, the assignment of each geometry to its corresponding area, generating a sole with heterogeneous mechanical properties adapted to the user's biomechanical profile. In addition, the research incorporates a sustainable vision: the selective reduction of material and the use of additive manufacturing represent strategies with the potential to reduce the environmental impact of conventional footwear production (Nike Inc., 2022). In conclusion, this work demonstrates that topological optimization, implemented from industrial design through additive manufacturing, is a viable tool to develop lighter, more efficient, personalized and sustainable sports footwear.

* Degree Project

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. Director Juan Mejía. Co-director Duván Fonseca.

Códigos UNESCO: 3313 Tecnología e Ingeniería Mecánicas 3312 Tecnología de Materiales 2406 Biofísica (Biomecánica) 3310 Tecnología Industrial

Introducción

El diseño de calzado deportivo ha avanzado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la convergencia entre la biomecánica, la ingeniería de materiales y las tecnologías de fabricación digital. No obstante, uno de los desafíos más persistentes en este campo continúa siendo la personalización estructural del calzado: la capacidad de adaptar las propiedades mecánicas de la suela a las características biomecánicas específicas de cada usuario. La mayoría de los modelos disponibles en el mercado se desarrollan bajo parámetros estandarizados que no contemplan la variabilidad individual de la pisada, lo que genera ineficiencias en la distribución de cargas, absorción deficiente de impactos y presencia de material en zonas donde no cumple ninguna función estructural relevante (Elvira Hernández, 2021).

Frente a esta problemática, la **optimización topológica** emerge como una de las herramientas de diseño estructural más poderosas desarrolladas en las últimas décadas. Su principio fundamental consiste en distribuir el material disponible exclusivamente en las regiones donde los esfuerzos mecánicos lo demandan, eliminándolo progresivamente de aquellas zonas donde su contribución estructural es mínima o nula. En su formulación computacional clásica, este proceso se ejecuta mediante algoritmos iterativos basados en el método de elementos finitos, que calculan la densidad óptima de material en cada punto del dominio de diseño a partir de las condiciones de carga aplicadas (Bendsøe & Sigmund, 2004). El resultado es una estructura que maximiza el rendimiento mecánico con el mínimo uso de material posible, reduciendo peso sin comprometer resistencia ni durabilidad.

Sin embargo, la implementación directa de algoritmos de optimización topológica en el diseño de calzado presenta limitaciones prácticas significativas cuando se busca trasladar los resultados a un proceso de fabricación personalizado y replicable. La complejidad geométrica de las estructuras óptimas generadas computacionalmente, sumada a la necesidad de adaptar el diseño a las condiciones biomecánicas individuales de cada usuario, plantea retos considerables en términos de fabricación y accesibilidad del proceso productivo (Elvira Hernández, 2021).

En este contexto, el presente trabajo propone una aproximación alternativa que conserva el principio esencial de la optimización topológica —la diferenciación espacial del material según la demanda de carga— e implementa dicho principio a través de la **variación de geometrías de relleno en manufactura aditiva**. Esta estrategia encuentra respaldo en investigaciones recientes que demuestran que la rigidez estructural de componentes impresos en 3D depende directamente del patrón de relleno seleccionado y de su densidad, independientemente del volumen total de material empleado (Chatpun et al., 2025; Benning et al., 2025). En materiales flexibles como el TPU, esta relación es especialmente relevante: distintas geometrías de relleno producen comportamientos mecánicos significativamente diferentes bajo condiciones de carga compresiva equivalentes (Kim et al., 2023).

El punto de partida de esta metodología es el análisis experimental de la pisada del usuario. A partir del registro de huellas plantares bajo diferentes condiciones de velocidad —caminata, trote y carrera— se construye un mapa de distribución de presiones dividido en zonas cromáticas que representan niveles de carga diferenciados: desde las

regiones de máxima presión, localizadas principalmente en el talón y la zona metatarsal del antepié, hasta las áreas de contacto mínimo en los bordes laterales y el mediopié.

A cada zona se le asigna una geometría de relleno con propiedades mecánicas específicas, seleccionada a partir de ensayos experimentales de deformación bajo carga estática controlada realizados sobre cuatro muestras de TPU con patrones geométricos distintos, impresas mediante manufactura aditiva. Este enfoque representa una interpretación aplicada del principio de optimización topológica, adaptada a las condiciones reales de un proceso de diseño industrial personalizado. La suela resultante no es homogénea en su estructura interna: es una pieza con zonas de alta rigidez donde el pie ejerce mayor fuerza, y zonas de mayor flexibilidad y menor masa donde la demanda mecánica es reducida. Esto es, en esencia, el objetivo que persigue la optimización topológica: llevar el material justo donde se necesita y retirarlo de donde no cumple función estructural (Bendsøe & Sigmund, 2004). La diferencia radica en el método de implementación, que en este proyecto se resuelve mediante una herramienta fabricable, accesible y directamente personalizable: la manufactura aditiva con variación de geometría de relleno según el perfil biomecánico del usuario.

1. Objetivo general

Definir un proceso de diseño de suelas para calzado deportivo de atletismo personalizado, mediante la aplicación del principio de optimización topológica basado en el análisis experimental de cargas biomecánicas e implementado a través de la variación de geometrías de relleno en manufactura aditiva.

1.1. Objetivos Específicos:

- Explorar el estado del arte en optimización topológica estructural aplicada a componentes de calzado deportivo, analizando sus principios fundamentales, casos de implementación industrial y limitaciones técnicas reportadas en la literatura, con énfasis en las aproximaciones alternativas mediante manufactura aditiva.
- Definir restricciones técnicas y ambientales para el diseño de suelas de calzado deportivo, mediante el análisis experimental de la distribución de presiones plantares del usuario bajo condiciones de caminata, trote y carrera, construyendo un mapa de zonas de carga como criterio de diseño diferenciado.
- Evaluar el comportamiento mecánico de geometrías de relleno impresas en TPU mediante manufactura aditiva, a través de ensayos experimentales de deformación bajo carga estática controlada, con el fin de establecer una jerarquía de rigidez estructural que permita asignar cada geometría a la zona de presión plantar correspondiente y proponer un diseño de suela con propiedades mecánicas heterogéneas adaptadas al perfil biomecánico del usuario.

2. Planteamiento del problema

2.2. Descripción del problema

El calzado deportivo ha evolucionado con la incorporación de tecnologías avanzadas para mejorar el rendimiento de los atletas. Un calzado más liviano permite mejorar la velocidad y reducir la fatiga, pero si su estructura no es lo suficientemente robusta, puede afectar la seguridad y comodidad del usuario (Elvira Hernández, 2020). Por otro lado, la producción masiva de este tipo de productos sigue generando un alto impacto ambiental debido al uso excesivo de materiales y los procesos de fabricación convencionales (Nike Inc., 2022).

Actualmente, la mayoría de los diseños se basan en enfoques tradicionales de manufactura que imponen límites en cuanto a optimización estructural y eficiencia en el uso de materiales. Esto lleva a que muchos modelos incorporen refuerzos innecesarios o, por el contrario, presenten zonas de desgaste prematuro (Pérez & Gómez, 2021). A pesar de los avances en la fabricación aditiva y en la aplicación de materiales más ligeros, la industria aún no ha logrado integrar completamente procesos que permitan la reducción de peso sin comprometer la funcionalidad y durabilidad del calzado (Adidas, 2021).

Desde la perspectiva del usuario, las necesidades varían en función del tipo de deporte, la biomecánica del atleta y las condiciones de uso. Un corredor, por ejemplo, requiere una distribución óptima de la carga en la suela para mejorar la respuesta en cada pisada y reducir el impacto en las articulaciones (Rodríguez et al., 2019). En este sentido, el diseño de calzado sigue dependiendo en gran medida de pruebas empíricas y ajustes iterativos, lo que limita la posibilidad de desarrollar soluciones más precisas y personalizadas (Measuring the User Experience, 2013).

El problema se vuelve aún más complejo cuando se considera la necesidad de reducir el impacto ambiental. La mayoría de los métodos actuales de producción generan un alto porcentaje de residuos, y los materiales utilizados no siempre son reciclables o biodegradables. Solo unas pocas marcas se han preocupado por utilizar biopolímeros; sin embargo, la incorporación de la optimización topológica en el diseño del calzado representa una oportunidad para abordar estos desafíos desde una perspectiva diferente, permitiendo la creación de estructuras más eficientes que maximicen el rendimiento y minimicen el desperdicio (Tullis & Albert, 2008).

La industria del calzado genera una enorme cantidad de residuos debido al uso de materiales no reciclables y procesos de producción contaminantes. Se estima que, a nivel mundial, el consumo anual alcanza los 20.000 millones de pares de zapatos, de los cuales menos del 5% son reciclados (iResiduo, 2023). En el caso de Colombia, se reporta que el país desecha aproximadamente 700 toneladas de residuos relacionados con el calzado cada año (iResiduo, 2023).

Ante este panorama, este proyecto busca ser parte del cambio al explorar alternativas como el uso de polímeros y métodos de producción que minimicen el desperdicio. Desde la Escuela de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander, se pretende proponer un enfoque diferente en la fabricación de calzado, con el objetivo de reducir el impacto ambiental y contribuir al compromiso por la conservación del medioambiente.

Según Elvira Hernández (2021), cada persona tiene una manera única de caminar, correr y apoyar el pie, lo que pone en evidencia la falta de personalización en el diseño

del calzado deportivo actual. Aunque las zapatillas se fabrican en tallas estándar, estas no reflejan la diversidad de las pisadas humanas.

Con los avances en la recopilación de datos y en la computación, ha surgido la posibilidad de desarrollar calzado adaptado a cada usuario. Esta innovación no solo beneficiaría a los deportistas, sino que también representa una de las principales motivaciones de este proyecto, el cual busca sentar las bases para herramientas que permitan la personalización del calzado. En este sentido, la fabricación aditiva y la impresión 3D ofrecen nuevas oportunidades para optimizar la producción de zapatillas deportivas. Ignorar estas tecnologías significaría desaprovechar la posibilidad de transformar el diseño del calzado y mejorar la experiencia del usuario (Elvira Hernández, 2021).

Tanto en una postura relajada al estar de pie como durante el movimiento, el pie no apoya completamente toda la planta, sino solo ciertas áreas. Esto es evidente, por ejemplo, cuando se deja una marca en la arena, ya que la huella muestra una distribución desigual de presiones: algunas zonas soportan más peso, mientras que otras apenas hacen contacto (Elvira Hernández, 2021).

De acuerdo con Elvira Hernández (2021), la singularidad de la pisada está influenciada por el grado de pronación o supinación que presente cada persona. Según esta característica, se pueden clasificar en pronadores, supinadores o neutros. Los pronadores tienden a exagerar el movimiento de pronación, lo que provoca un colapso del arco plantar y genera una inclinación del pie hacia el interior. En casos extremos, esta condición se conoce como pies planos. Por otro lado, los supinadores tienen una

inclinación del pie hacia el exterior, lo que reduce el área de contacto y eleva el arco plantar. La mayoría de la población tiende a la pronación.

3. Marco Teórico

3.1. Medición de Presión Plantar

Según el autor Elvira Hernández (2021), la incorporación de datos biomecánicos reales es fundamental en el diseño de calzado deportivo, ya que permite adaptar el producto a las características individuales del usuario. En este sentido, la medición de variables como la presión plantar y la temperatura del pie se convierte en una herramienta clave para personalizar y optimizar el rendimiento del calzado.

La presión plantar es un parámetro esencial que refleja cómo se distribuye la carga en la planta del pie durante actividades como correr. Dispositivos como plantillas instrumentadas o plataformas de fuerza permiten registrar estos datos con precisión y en tiempo real. Estas mediciones ayudan a identificar zonas de alta presión que podrían causar lesiones o incomodidades, lo que resulta útil para rediseñar la suela de forma más eficiente. Hernández menciona que, al conocer estos patrones, es posible redistribuir estratégicamente el material en la suela mediante herramientas como la optimización topológica, reduciendo peso sin comprometer la resistencia estructural.

El análisis de la distribución de presiones plantares puede abordarse mediante distintos niveles de instrumentación, que van desde sistemas electrónicos de alta precisión hasta métodos de registro manual de bajo costo. Entre los sistemas instrumentados más utilizados en investigación clínica y biomecánica deportiva se encuentran plataformas de presión como el Novel Emed® y el TekScan MatScan®, así como plantillas con sensores integrados como el Novel Pedar® y el Tekscan F-Scan®, los cuales permiten cuantificar

con precisión las presiones en tiempo real durante la marcha dinámica. En esta misma categoría se encuentran las plantillas **Moticon OpenGo** (Moticon GmbH, Alemania), un sistema inalámbrico de plantillas sensoradas que integra 16 sensores capacitivos de presión distribuidos biomecánicamente sobre la superficie plantar, junto con un acelerómetro y giroscopio tridimensional para la medición simultánea de parámetros cinemáticos del pie. El sistema OpenGo consiste en plantillas completamente inalámbricas con almacenamiento interno integrado, que pueden utilizarse en prácticamente cualquier tipo de calzado, permitiendo llevar los métodos de análisis biomecánico al campo y a la vida cotidiana, sin las limitaciones de cables o dispositivos externos de almacenamiento de datos.

En el marco del presente proyecto se contempló inicialmente el uso de las plantillas Moticon OpenGo disponibles en la Escuela de Fisioterapia de la Universidad Industrial de Santander, las cuales habrían permitido obtener registros cuantitativos de presión plantar dinámica en condiciones reales de marcha y carrera. Sin embargo, su utilización no fue posible dentro de los tiempos disponibles para el desarrollo del proyecto, debido a limitaciones administrativas relacionadas con la gestión de las baterías especiales requeridas para el funcionamiento del equipo. Esta restricción operativa determinó la necesidad de adoptar un método alternativo de registro de huella plantar ejecutable con los recursos disponibles en el entorno universitario.

El método de registro mediante **fotopodograma**, técnica de huella plantar con tinta sobre papel, constituyó la alternativa metodológica adoptada. Esta técnica utiliza tinta o pintura para obtener la huella plantar cuando el sujeto pisa sobre papel, siendo reconocida por su popularidad y alta confiabilidad entre investigadores biomecánicos y

médicos para la clasificación de criterios del pie. Estudios de concordancia entre el pedígrafo y plataformas de presión instrumentadas han demostrado correlación lineal positiva entre ambos métodos en la evaluación de índices del arco plantar (Rodríguez-Sanz et al., 2021). En el contexto de este proyecto, cuyo objetivo es identificar zonas de presión diferenciada como criterio de diseño y no cuantificar valores absolutos de presión, el método empleado resulta metodológicamente coherente con el alcance de la investigación.

Según Vicén, del Coso Garrigós, González Millán y Salinero Martín (2011), el desempeño del calzado deportivo se evalúa considerando su capacidad para facilitar movimientos como frenado, aceleración, giros, saltos y aterrizajes. Para lograrlo, los diseñadores ponen especial atención a las suelas y capelladas, usando diversos materiales y combinaciones para mejorar la tracción, estabilidad y movilidad. Las suelas, por ejemplo, incluyen áreas rígidas para controlar los movimientos y evitar desplazamientos innecesarios, además de diseños que optimizan la fijación al suelo y la eficiencia en los giros.

En términos de prevención de lesiones, uno de los enfoques más importantes es controlar la pronación excesiva y reducir el impacto. La sobrepronación, que está relacionada con lesiones por sobreuso, se controla con innovaciones como entresuelas de doble densidad, contrafuertes reforzados, estabilizadores mediales y un diseño ergonómico que favorece la alineación del pie. Las fuerzas de impacto generadas al correr, producidas por el contacto del pie con el suelo, pueden predisponer a lesiones, por lo que el calzado debe ofrecer amortiguación adecuada para absorber y distribuir el impacto.

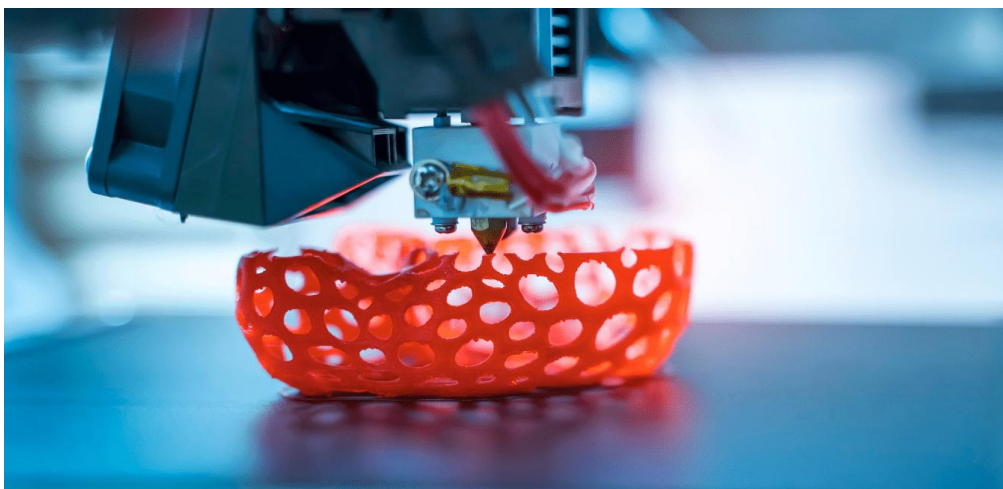
El confort del calzado deportivo también es crucial, ya que depende de su diseño anatómico, lo que permite una adaptación adecuada al pie y reduce la fricción. Además, debe proteger las prominencias óseas, facilitar los movimientos de los dedos y mantener una temperatura y humedad adecuadas dentro del zapato. La estructura del calzado incluye varios componentes como la capellada, la plantilla, la entresuela, la suela y el contrafuerte, todos ellos diseñados para mejorar la experiencia del usuario (Vicén, del Coso Garrigós, González Millán, & Salinero Martín, 2011)

3.2. Qué es la impresión 3D como funciona.

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un proceso mediante el cual se crean objetos tridimensionales al depositar material capa por capa, partiendo de un diseño digital. A diferencia de los métodos de fabricación tradicionales, que son sustractivos, la impresión 3D permite construir directamente las piezas sin necesidad de moldes o herramientas complejas. Según Autodesk (s.f.), el modelo digital se divide en finas capas mediante un software especializado, y cada capa se imprime sucesivamente hasta completar el objeto.

Aunque la impresión 3D comenzó siendo un proceso lento y costoso, con los avances tecnológicos se ha vuelto mucho más rápida y asequible, esta evolución ha permitido que la tecnología se aplique en diversas áreas, como la medicina, la arquitectura y la industria, facilitando la creación de prototipos y piezas personalizadas

Figura 1
Impresión 3



Nota. Adaptado de *Revolución de la impresión 3D*, por Ibertronica (s.f.).<https://ibertronica.es/blog/actualidad/revolucion-impresion-3d/>

3.3. Antecedentes

El uso de la impresión 3D en el diseño y fabricación de calzado deportivo ha cobrado relevancia en la última década, especialmente en marcas líderes que buscan optimizar el rendimiento, la personalización y la eficiencia productiva. Empresas como Adidas, ON cloud, ASICS y Puma han incorporado procesos de fabricación aditiva en componentes clave del calzado, principalmente en entresuelas y estructuras internas, demostrando la viabilidad industrial de esta tecnología.

Un ejemplo representativo es el modelo Adidas MC87 4D, un zapato de golf que incorpora una entresuela impresa en 3D mediante el proceso Digital Light Synthesis (DLS) desarrollado por Carbon. El diseño de esta entresuela se basa en el análisis de datos biomecánicos de atletas, lo que permitió generar una estructura de malla optimizada para ofrecer durabilidad, flexibilidad y adaptación al movimiento del usuario. Este caso evidencia cómo el diseño asistido por computador y la fabricación aditiva permiten crear geometrías complejas imposibles de obtener mediante métodos tradicionales.

Figura 2
Adidas MC87 4D



Nota. Adaptado de *MC87 4D Spikeless Golf Shoes* [Fotografía de producto], por Adidas (2024). <https://www.adidas.com.ph/mc87-4d-spikeless-golf-shoes/ID0225.html>

De manera similar, ASICS ha implementado la impresión 3D en el desarrollo de sus sandalias híbridas ACTIBREEZE™, en colaboración con la empresa LuxCreo. Estas sandalias presentan una estructura de rejilla que mejora la transpirabilidad y la comodidad, además de contribuir a la recuperación del atleta tras la actividad deportiva. Este diseño demuestra cómo la simulación y el diseño digital permiten optimizar la interacción entre el producto y el cuerpo humano.

Figura 3
ACTIBREEZE™ Sandal



Nota. Adaptado de *Actibreeze Hybrid Sandal 2* [Fotografía de producto], por ASICS (2024). <https://www.asics.com/es/es-es/actibreeze-hybrid-sandal-2/p/1013A171-300.html>

Otro antecedente relevante es la zapatilla 3D MTRX, desarrollada por Puma y Porsche Design, cuya entresuela impresa en 3D presenta una geometría inspirada en el logotipo cúbico de Porsche Design. La estructura de rejilla, fabricada con resinas elásticas, destaca por su ligereza, durabilidad y capacidad de absorción, confirmando el valor estético y funcional de la fabricación aditiva en productos deportivos de alto rendimiento.

Figura 4
Tenis 3D MTRX



Nota. Adaptado de *Porsche Design 3D MTRX II* [Fotografía de producto], por Puma (2024). <https://us.puma.com/us/es/pd/tenis-de-piel-para-hombre-porsche-design-3d-mtrx-ii/308402>.

3.4. Personalización y escaneo 3D en calzado deportivo

Más allá de la producción industrial, la impresión 3D ha permitido avanzar hacia la personalización del calzado mediante el escaneo tridimensional del pie del usuario. Un caso destacado son los zapatos de escalada ATHOS, desarrollados en Barcelona, los cuales buscan resolver los problemas de ajuste extremo que tradicionalmente afectan a los escaladores. Estos zapatos se fabrican mediante MultiJet Fusion (HP) utilizando TPU, permitiendo crear calzado a medida a partir de un escaneo del pie realizado con fotografías, lo que mejora el ajuste, el confort y el rendimiento deportivo.

Figura 5
ATHOS zapatos para escalar



Nota. Adaptado de Athos, las zapatillas de escalada impresas en 3D [Imagen en artículo], por 3DNatives (2021). <https://www.3dnatives.com/es/athos-zapatillas-escalada-3d-010920212/>

Figura 6
Despiece explosionado de zapato ATHOS



Nota. Adaptado de Athos, las zapatillas de escalada impresas en 3D [Imagen en artículo], por 3DNatives (2021). <https://www.3dnatives.com/es/athos-zapatillas-escalada-3d-010920212/>

En esta misma línea, la zapatilla Pleko, desarrollada por el atleta Miro Buroni en colaboración con Diadora, incorpora múltiples componentes impresos en 3D, como la plantilla, la suela y los picos. El proceso combina escaneo 3D del pie y simulación del movimiento durante la carrera, permitiendo adaptar el diseño a las necesidades biomecánicas del atleta. El uso de materiales compuestos, como la fibra de carbono, y procesos de sinterización de polvo evidencia el potencial de la simulación digital en el diseño funcional del calzado.

3.5. Diseño paramétrico y nuevos modelos de fabricación

El diseño paramétrico ha sido otro factor clave en la evolución del calzado impreso en 3D. Las zapatillas Parametriks Print 001, desarrolladas por Nathan Smith, utilizan algoritmos paramétricos implementados en Grasshopper para Rhinoceros, lo que permite modificar la geometría del calzado mediante la variación de parámetros digitales. Este enfoque facilita la adaptación del diseño a las dimensiones del pie del usuario y optimiza el proceso de fabricación, reduciendo tiempos y recursos.

Finalmente, la empresa Zellerfeld, fundada en 2020, propone un modelo de producción completamente automatizado basado en impresión 3D, con el objetivo de eliminar procesos tradicionales como el ensamblaje con adhesivos y costuras. Su modelo Heel Your Sole se fabrica íntegramente mediante una estructura de entramado impreso en 3D, es personalizable mediante escaneo desde un dispositivo móvil y destaca por su enfoque sostenible, ya que utiliza únicamente el material necesario y permite el reciclaje total del calzado al final de su vida útil.

3.6. Anatomía y Biomecánica del Pie

El pie humano constituye una estructura anatómica altamente especializada cuya función principal es conectar el cuerpo con el entorno físico, permitiendo tanto la estabilidad en posición estática como la locomoción dinámica. Desde el punto de vista biomecánico, el pie no solo soporta el peso corporal, sino que también actúa como un sistema complejo de absorción de impactos, adaptación al terreno y generación de impulso durante la marcha y la carrera (Nordin & Frankel, 2001). Su estudio resulta fundamental en disciplinas como la ingeniería biomédica, el diseño industrial y el desarrollo de calzado técnico, donde comprender la interacción entre estructuras anatómicas y fuerzas externas es determinante para optimizar el rendimiento y prevenir lesiones.

Anatómicamente, el pie está compuesto por 26 huesos, múltiples articulaciones sinoviales, ligamentos y grupos musculares intrínsecos y extrínsecos que trabajan de manera coordinada. Esta arquitectura permite movimientos en los tres planos del espacio —sagital, frontal y transversal— posibilitando flexión, extensión, inversión, eversion y rotaciones complejas (Palastanga, Field & Soames, 2012). Los arcos plantares —longitudinal medial, longitudinal lateral y transversal— desempeñan un papel clave en la distribución de cargas y en la elasticidad estructural del pie, funcionando como mecanismos de amortiguación natural frente a las fuerzas de reacción del suelo.

Desde la perspectiva biomecánica, el análisis del pie se centra en dos grandes dimensiones: la cinemática (estudio del movimiento sin considerar fuerzas) y la cinética (estudio de las fuerzas que generan o modifican dicho movimiento). Durante la marcha, el pie atraviesa fases específicas —contacto inicial, apoyo medio, despegue y fase de

oscilación— en las cuales las demandas mecánicas varían considerablemente (Hamil & Knutzen, 2015). En la fase de apoyo, por ejemplo, el pie debe adaptarse al terreno y absorber impactos; en la fase de propulsión, debe comportarse como una estructura rígida capaz de transmitir eficientemente la fuerza generada por la musculatura de la extremidad inferior.

Diversos estudios han demostrado que las fuerzas de reacción del suelo pueden alcanzar valores superiores al peso corporal durante actividades dinámicas como la carrera, lo que incrementa la relevancia del diseño estructural tanto del pie como del calzado que lo acompaña (Nordin & Frankel, 2001). En este sentido, la interacción entre el pie y la suela del calzado constituye un sistema biomecánico integrado. Las propiedades del material, la rigidez, la geometría de la entresuela y la distribución de densidades influyen directamente en la redistribución de presiones plantares y en los patrones de movimiento articular (Smith et al., 2012).

La literatura científica contemporánea enfatiza que el diseño de calzado no puede abordarse únicamente desde criterios estéticos o comerciales, sino que debe sustentarse en evidencia biomecánica rigurosa. Investigaciones recientes señalan que variaciones en la amortiguación o en la rigidez de la suela pueden alterar la cinemática del tobillo y la rodilla, modificar la activación muscular y afectar la eficiencia mecánica global del sistema locomotor (Mohammadi & Nourani, 2023). Por tanto, el modelado y la simulación de suelas requieren considerar parámetros como distribución de cargas, comportamiento viscoelástico de materiales y condiciones reales de apoyo.

En el contexto del presente trabajo, esta revisión de literatura tiene como objetivo establecer un marco teórico sólido que permita comprender el comportamiento estructural

y funcional del pie bajo diferentes condiciones de carga. A partir del análisis anatómico y biomecánico, se busca identificar los criterios fundamentales que deben incorporarse en el diseño y simulación de suelas, garantizando coherencia entre las exigencias fisiológicas del sistema musculoesquelético y las soluciones técnicas propuestas.

En síntesis, el estudio del pie desde la biomecánica no solo proporciona una comprensión detallada de su funcionamiento interno, sino que también constituye la base científica indispensable para el desarrollo de productos que interactúan directamente con él. La correcta integración entre anatomía, análisis de fuerzas y diseño estructural representa un elemento central en la investigación y desarrollo de calzado funcional y eficiente.

Figura 7
Tipos de pisada



Biomechanics of footwear design. (2012). Journal of Foot and Ankle Research, 5(Suppl

1), 11. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-5-S1-I1>

3.7. Anatomía Básica

El pie humano constituye una estructura anatómica compleja diseñada para cumplir funciones de soporte, equilibrio y locomoción. Está conformado por 26 huesos, aproximadamente 33 articulaciones y más de un centenar de estructuras blandas entre músculos, ligamentos y tendones, que trabajan de manera coordinada para garantizar estabilidad y movilidad simultáneamente (Palastanga, Field & Soames, 2012). Su organización anatómica responde a una distribución segmentaria que permite diferenciar tres regiones principales: antepié, mediopié y retropié.

Los huesos del pie se agrupan anatómicamente de distal a proximal de la siguiente manera:

- **Falanges** El antepié está compuesto por cinco dedos, cada uno constituido por tres falanges (proximal, media y distal), excepto el primer dedo o hallux, que presenta únicamente dos (proximal y distal). Estas estructuras cumplen una función esencial en la fase de despegue durante la marcha, facilitando la transmisión de fuerzas propulsivas. El hallux, debido a su mayor robustez estructural, soporta una proporción significativa de la carga durante la fase terminal del apoyo (Nordin & Frankel, 2001).
- **Metatarso** El metatarso está conformado por cinco huesos largos numerados del I al V en sentido medial a lateral. El primer metatarsiano presenta mayor grosor y resistencia estructural, debido a su papel fundamental en la distribución de cargas durante la propulsión. Las cabezas metatarsianas forman una superficie de apoyo que contribuye a la configuración del arco transversal anterior. Desde el punto de vista biomecánico, esta región actúa como palanca

durante la fase de impulso, permitiendo la transferencia eficiente de fuerzas hacia el suelo (Hamil & Knutzen, 2015).

- **Tarso** El tarso está compuesto por siete huesos: calcáneo, astrágalo (talus), navicular, cuboides y tres cuneiformes (medial, intermedio y lateral). El astrágalo constituye el elemento de conexión entre la pierna y el pie, articulándose con la tibia y el peroné para formar la articulación talocrural. El calcáneo, por su parte, es el hueso de mayor tamaño y desempeña un papel clave en la absorción inicial del impacto durante el contacto con el suelo. Los huesos del mediopié participan activamente en la conformación y mantenimiento de los arcos plantares, esenciales para la elasticidad estructural del pie (Palastanga et al., 2012).

Desde el punto de vista estructural, la disposición ósea del pie permite la formación de tres arcos principales:

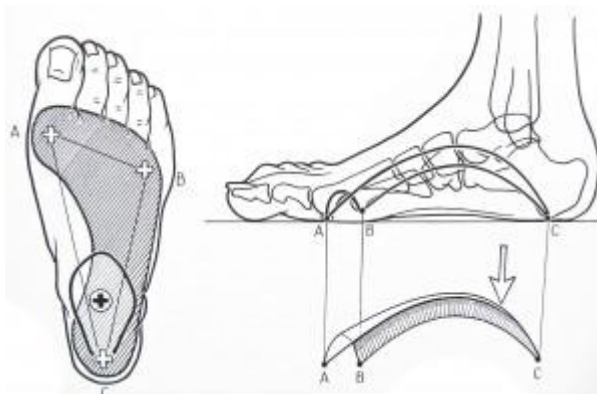
- Arco longitudinal medial
- Arco longitudinal lateral
- Arco transversal

Estos arcos funcionan como sistemas de amortiguación y distribución de cargas, adaptándose dinámicamente a las exigencias mecánicas impuestas durante la marcha y otras actividades locomotoras. La integridad de estos arcos depende tanto de la arquitectura ósea como del soporte ligamentario y muscular (Nordin & Frankel, 2001).

En conjunto, la anatomía básica del pie revela un diseño estructural optimizado para alternar entre rigidez y flexibilidad según las demandas funcionales. Esta dualidad

constituye un elemento central en el análisis biomecánico y en la modelación de sistemas de soporte externo, como las suelas de calzado, donde la comprensión detallada de la estructura anatómica resulta indispensable para garantizar coherencia funcional.

Figura 8
Arcos plantares



Biomechanics of footwear design. (2012). *Journal of Foot and Ankle Research*, 5(Suppl 1), II. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-5-S1-II>

3.8. Variabilidad morfológica del pie

El pie humano presenta una elevada variabilidad morfológica entre individuos, incluso dentro de poblaciones con características físicas similares. Esta variabilidad se manifiesta tanto en la longitud relativa de los dedos, conocida como **fórmula digital**, como en la distribución espacial y la longitud relativa de los metatarsianos, factores que influyen en la biomecánica del apoyo y en la distribución de cargas plantares (Menz et al., 2013). Dichas diferencias morfológicas tienen implicaciones clínicas y funcionales, ya que pueden modificar los patrones de presión plantar, la estabilidad y el riesgo de lesiones en actividades deportivas o de la vida diaria.

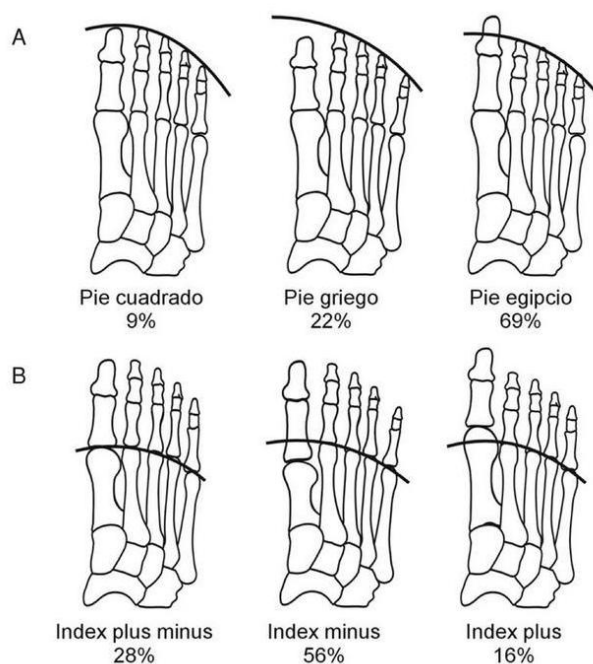
En relación con la fórmula digital, se han descrito tres configuraciones principales del pie. El **pie egipcio** se caracteriza por presentar un hallux significativamente más largo que el resto de los dedos, siendo el tipo más frecuente en la población general. El **pie griego**, por el contrario, muestra un segundo dedo más largo que el primero, lo que puede generar cambios en la distribución de cargas hacia el antepié central. Finalmente, el **pie cuadrado** presenta una longitud similar en los tres primeros dedos, generando una superficie de contacto más uniforme en la región anterior del pie (Kouchi, 1998).

Estas diferencias morfológicas no son únicamente descriptivas, sino que influyen en la función biomecánica. Diversos estudios han demostrado que la longitud relativa del hallux y de los metatarsianos modifica el momento de palanca durante la fase de propulsión y afecta la eficiencia mecánica de la marcha y la carrera (Menz et al., 2013). En particular, un hallux más largo puede favorecer la transmisión de fuerzas en la fase de despegue, mientras que configuraciones alternativas pueden redistribuir las cargas hacia los metatarsianos centrales, incrementando el riesgo de metatarsalgia o lesiones por sobrecarga.

Por otro lado, la denominada **fórmula metatarsal** clasifica la relación entre la longitud del primer metatarsiano y los siguientes. Se describen tres patrones principales:

- **Index plus**, donde el primer metatarsiano es más largo que el segundo.
- **Index minus**, en el cual el primer metatarsiano es más corto.
- **Index plus minus**, donde ambos presentan longitudes similares.

Figura 9
Tipos de pies



Biomechanics of footwear design. (2012). *Journal of Foot and Ankle Research*, 5(Suppl 1), 11. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-5-S1-11>

Esta clasificación se ha relacionado con alteraciones biomecánicas en la distribución de presiones plantares y con el desarrollo de patologías del antepié, como hallux valgus o sobrecarga metatarsal (Buldt et al., 2018). No obstante, es importante destacar que la fórmula digital y la fórmula metatarsal no son mutuamente excluyentes, pudiendo coexistir diferentes combinaciones dentro de un mismo individuo.

Desde el punto de vista del diseño de calzado y del modelado biomecánico, esta variabilidad representa un desafío significativo. La literatura reciente sugiere que la personalización del calzado, basada en parámetros anatómicos individuales, puede mejorar la eficiencia locomotora y reducir el riesgo de lesiones (Nigg et al., 2017). En consecuencia, la comprensión de la diversidad morfológica del pie constituye un

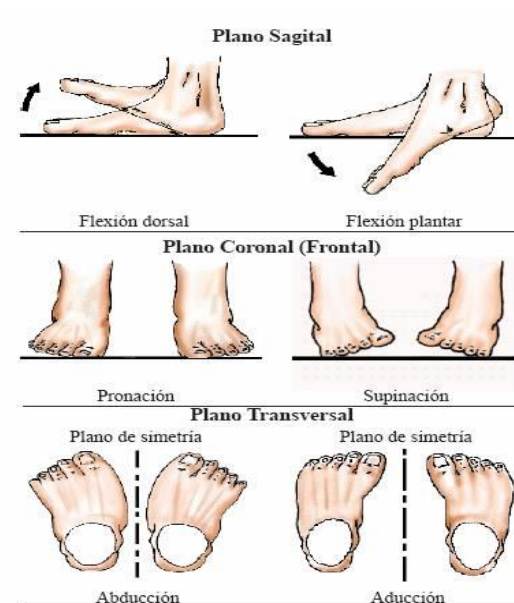
elemento clave para el desarrollo de suelas optimizadas mediante técnicas avanzadas como la optimización topológica y la manufactura aditiva.

En síntesis, el análisis de la fórmula digital y metatarsal no solo proporciona una base para la clasificación anatómica, sino que también ofrece información relevante para el estudio biomecánico, la prevención de lesiones y el diseño de soluciones tecnológicas orientadas a la funcionalidad del pie humano.

4. Pisada y distribución de presiones.

El pie puede analizarse desde una perspectiva biomecánica como un sistema articular complejo conectado al tobillo, conformado por múltiples articulaciones interdependientes que permiten movimientos tridimensionales y adaptativos durante la locomoción. Este sistema actúa como un mecanismo dinámico capaz de alternar entre configuraciones de alta movilidad y estados de mayor rigidez, lo cual resulta esencial para la absorción de impactos y la generación de impulso durante la marcha y la carrera (Leardini et al., 2007).

Figura 10
Grados de libertad



Marino, L., González, Y., González, C., & Rupcich, M. (2013). Propuesta de modelo multisegmento del pie para el análisis de marcha. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 28(4), 143–158.

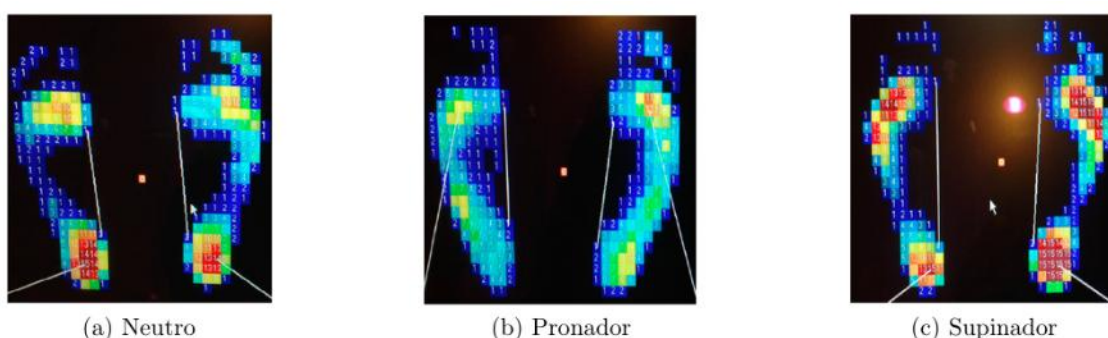
En términos generales, el complejo tobillo–pie presenta libertad de movimiento en los tres planos espaciales. En el plano sagital se desarrollan los movimientos de flexión dorsal y flexión plantar, los cuales constituyen los desplazamientos predominantes durante el ciclo de la marcha. En el plano frontal o coronal se producen los movimientos de inversión y eversión, relacionados con la adaptación del pie a superficies irregulares y el control de la estabilidad lateral. Finalmente, en el plano transversal se presentan los movimientos de abducción y aducción, asociados a la rotación interna y externa del pie respecto al eje longitudinal de la pierna (Nordin & Frankel, 2001).

Diversos estudios han demostrado que, aunque estos movimientos pueden describirse de forma aislada, en condiciones funcionales reales el pie se comporta como un sistema acoplado. La combinación simultánea de movimientos en los tres planos da

lugar al fenómeno de pronación y supinación, que representan patrones tridimensionales complejos y no simples rotaciones en un único eje (Leardini et al., 2007). Este acoplamiento cinemático permite la adaptación progresiva del pie durante las distintas fases del apoyo.

Figura 11

Distribución de cargas según tipo de pie.



Elvira Hernández, J. (2021). Diseño y optimización de suela para calzado deportivo mediante fabricación aditiva [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. Consultado el 31 de marzo de 2025, en:

https://oa.upm.es/68949/1/TFG_JORGE_ELVIRA_HERNANDEZ.pdf

Desde el punto de vista funcional, el rango de movimiento más significativo se presenta en el plano sagital. La flexión dorsal suele oscilar entre 10° y 20° , mientras que la flexión plantar puede alcanzar valores entre 40° y 50° , dependiendo del individuo y del tipo de actividad (Nordin & Frankel, 2001). Este comportamiento explica por qué el análisis biomecánico clásico ha priorizado estos movimientos al describir el funcionamiento general del tobillo. No obstante, investigaciones recientes destacan que los movimientos en los planos frontal y transversal son determinantes en la distribución de presiones plantares y en la prevención de lesiones (Buldt et al., 2018).

El complejo formado por la articulación talocrural y la articulación subtalar puede considerarse como un sistema de tipo **cardán heterocinético**, dado que sus ejes de rotación no son paralelos ni coincidentes, lo que genera movimientos combinados y no lineales. Esta característica explica la elevada capacidad de adaptación del pie a diferentes superficies y condiciones de carga (Leardini et al., 2007).

Desde una perspectiva cinemática, las articulaciones del pie se pueden clasificar en dos grandes grupos funcionales:

4.1. Articulaciones de acomodación

Este grupo incluye principalmente las articulaciones del tarso y del mediopié. Su función principal consiste en permitir la adaptación del pie a irregularidades del terreno, contribuyendo a la amortiguación de impactos y a la estabilidad postural. Estas articulaciones presentan mayor movilidad en las fases iniciales del apoyo, cuando el pie actúa como una estructura flexible.

4.2. Articulaciones de propulsión o movimiento

Comprenden las articulaciones del tobillo y del antepié, particularmente las metatarsfalángeas. Estas estructuras adquieren mayor rigidez durante la fase final de la marcha, facilitando la transmisión de fuerzas y la generación de impulso. Este cambio funcional está asociado al mecanismo de tensión de la fascia plantar, conocido como mecanismo windlass, el cual incrementa la rigidez del arco plantar y optimiza la eficiencia mecánica (Hicks, 1954).

Tras considerar la variabilidad morfológica del pie y su clasificación estructural, es fundamental analizar su función principal dentro del sistema locomotor. El pie desempeña un papel determinante en la locomoción humana, siendo la marcha uno de los

procesos biomecánicos más complejos e importantes para la interacción entre el cuerpo y el entorno. En este sentido, la coordinación entre el pie, las extremidades inferiores y los grupos musculares asociados permite el desplazamiento eficiente del cuerpo, la absorción de impactos y la adaptación a diferentes superficies.

Desde una perspectiva biomecánica, el análisis de la marcha humana constituye una herramienta clave para la identificación de alteraciones musculoesqueléticas, ya que los patrones de movimiento y distribución de cargas reflejan el estado funcional del sistema locomotor. Según Luximon y Zhang (2006), la evaluación del ciclo de la marcha permite detectar anomalías estructurales, compensaciones y desequilibrios que pueden derivar en lesiones o patologías.

El ciclo de la marcha se define como el intervalo comprendido entre dos contactos iniciales consecutivos del mismo pie con el suelo. Este ciclo comienza cuando un pie entra en contacto con la superficie y finaliza cuando ese mismo pie vuelve a contactar nuevamente. Este concepto es fundamental en el estudio de la biomecánica del pie, ya que permite analizar el comportamiento dinámico de las estructuras óseas, articulares y musculares durante el desplazamiento.

El ciclo de la marcha se divide en dos fases principales: la fase de apoyo y la fase de balanceo. La fase de apoyo ocurre cuando el pie está en contacto con el suelo, mientras que la fase de balanceo corresponde al periodo en el que el pie se encuentra en el aire, avanzando hacia el siguiente punto de contacto (Luximon & Zhang, 2006). En condiciones normales de marcha, la fase de apoyo representa aproximadamente el 60% del ciclo, mientras que la fase de balanceo constituye el 40% restante.

Durante la fase de apoyo pueden distinguirse tres subperiodos:

1. Apoyo inicial de ambas extremidades.
2. Apoyo unipodal.
3. Apoyo terminal de ambas extremidades.

Cada periodo de doble apoyo corresponde aproximadamente al 10% del ciclo total, representando cerca del 20% en conjunto, mientras que el apoyo unipodal ocupa alrededor del 40%. En esta etapa, el cuerpo transfiere progresivamente la carga de un pie al otro, lo que genera variaciones en la presión plantar y en la distribución de fuerzas sobre las estructuras del pie. Esta transferencia de carga resulta crítica para el diseño de sistemas de amortiguación y distribución de esfuerzos en el calzado deportivo.

Durante el contacto inicial, el impacto suele producirse en la región del talón, proceso conocido como golpe de talón. Posteriormente, el pie progresa hacia una fase de apoyo medio en la que el peso corporal se distribuye sobre la totalidad de la superficie plantar. Finalmente, el ciclo culmina con el despegue en la región del antepié, especialmente en los metatarsianos y los dedos, etapa conocida como despegue o impulso. Este mecanismo permite la generación de energía propulsiva necesaria para el desplazamiento (Luximon & Zhang, 2006).

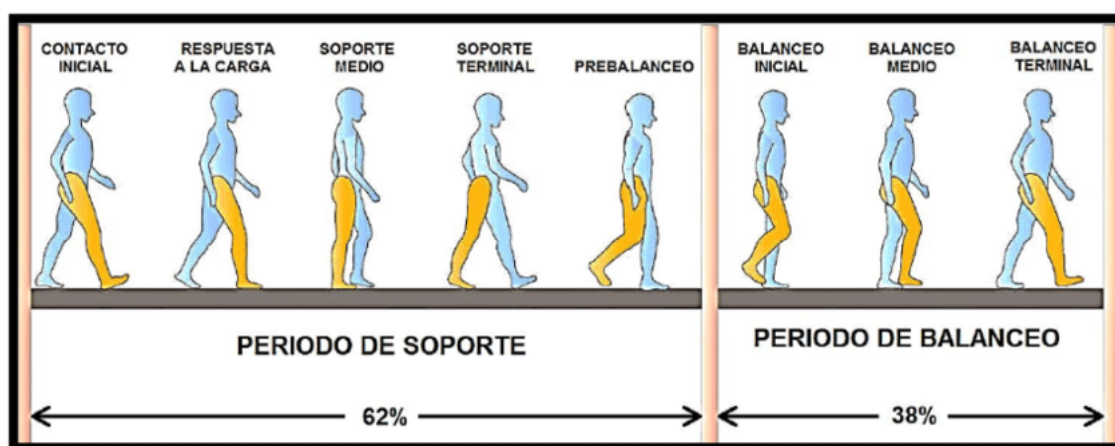
Por otra parte, la fase de balanceo permite el avance de la extremidad sin contacto con el suelo, preparando el siguiente ciclo. Esta fase también cumple funciones importantes en términos de eficiencia energética, estabilidad y control neuromuscular.

Es importante destacar que los porcentajes de las fases de la marcha pueden variar en función de la velocidad, la edad, el tipo de superficie y el nivel de actividad física. A

medida que aumenta la velocidad, la duración del apoyo disminuye y, al pasar de caminar a correr, el periodo de doble apoyo desaparece, generándose una fase de vuelo en la que ambos pies permanecen sin contacto con el suelo.

Asimismo, el concepto de paso y zancada permite describir con mayor precisión la locomoción. Un paso se define como el intervalo entre los contactos consecutivos de pies opuestos con el suelo, mientras que la zancada corresponde al ciclo completo de un mismo pie. Estos parámetros resultan fundamentales en el análisis cinemático y dinámico de la marcha, así como en el diseño ergonómico del calzado.

Figura 12
Ciclos de marcha



Ciclo de marcha completo y todas las fases que lo componen (Anónimo, sf).

La etapa de empatía tuvo como propósito comprender al usuario desde su experiencia real con el calzado deportivo, antes de establecer cualquier criterio de diseño. El usuario del proyecto es un ingeniero civil de 26 años, residente en Bucaramanga, con actividad deportiva recreativa centrada en el running y el tenis, con una frecuencia de entrenamiento de una a dos sesiones semanales aproximadamente. Antes de iniciar el proceso de diseño, el usuario reportó molestias recurrentes con su calzado habitual, en

el talón, durante sesiones de carrera de duración media y desgaste prematuro del calzado en zonas del talón y algunas veces en la zona delantera. Adicionalmente, manifestó no conocer su tipo de pisada, lo que evidencia que sus decisiones de compra de calzado se basaban en criterios estéticos y de precio antes que en criterios funcionales o biomecánicos. (véase Apéndice B).

A partir de esta aproximación inicial se construyó un perfil de usuario y un mapa de empatía que permitieron identificar factores, molestias físicas, desgaste inequitativo y desconocimiento biomecánico y sus ganancias esperadas confort durante la carrera, ligereza y soporte.

5. Diseño de Prueba de registro de huellas plantares en diferentes velocidades

5.1. Objetivo

Registrar las huellas plantares de un usuario corriendo descalzo con tinta, a distintas velocidades, para analizar la distribución de apoyo y las variaciones del patrón de pisada. Esta información permitirá identificar requerimientos de personalización para el diseño de una suela

Condiciones Generales

- Superficie: lisa, limpia y nivelada. (pista atlética)
- Papel: rollo continuo o láminas unidas (mínimo 60 cm de ancho).
- Tinta: lavable, no tóxica, aplicada con esponja o bandeja.
- Registro: cámara (smartphone con trípode).

5.2. Protocolo Experimental

Cada ensayo consta de una zona de aceleración, una zona de registro (cubierta con papel) y una zona de frenado. Las longitudes se ajustan para permitir pruebas en espacios reducidos.

Tabla 1
Espacio de registro

Modalidad	Zona de aceleración	Zona de registro (papel)	Zona de frenado	Longitud total aprox.
Caminata	1 m	2 m	1 m	4 m
Trote suave	2 m	3 m	2 m	7 m
Carrera	3 m	4 m	3 m	10 m

Repeticiones y Control

- 2 repeticiones válidas por condición de velocidad.
- Total: 3 ensayos por participante.
- Descanso: 3 minutos entre ensayos, 2 minutos entre velocidades.

Tabla 2
Requerimientos de la prueba

Categoría	Elemento	Descripción / Función	Recomendaciones / Parámetro de uso
Toma de huellas	Papel bond o kraft	Superficie donde se registran las huellas.	Rollos o pliegos de 60–100 cm de ancho. Total, aprox

			70 m Papel kraft blanco o mantequilla.
	Cinta adhesiva ancha	Fija el papel al suelo.	Usa cinta de enmascarar o de embalaje. Evita desplazamientos.
	Tinta o pintura lavable	Permite transferir la huella del pie.	Tinta no tóxica o témpera líquida oscura (negra o azul). Aplicar en capa fina y uniforme.
	Esponja o bandeja para entintar	Superficie de entintado de los pies.	Esponja plana humedecida con tinta para lograr distribución homogénea.
	Toallas húmedas / trapo	Limpieza entre ensayos.	Ten varias disponibles junto a agua y jabón.
Registro y medición	Cámara / celular	Graba el recorrido para estimar velocidad y zancada.	Coloca lateral o cenital. Iluminación constante.
	Cronómetro / temporizador	Medir tiempo de paso sobre la zona de registro.	Puede usarse video para determinar tiempo exacto.
	Metro / cinta métrica	Medir distancias (aceleración, registro, frenado).	Marca con cinta las longitudes en el suelo.
	Cinta o marcadores de color	Delimitar inicio y fin de zona de registro.	Usa colores brillantes para distinguir zonas.

	Computador o libreta	Registrar observaciones y resultados.	Anotar ensayo, velocidad, número de huellas válidas, observaciones.
Seguridad y comodidad	Toalla o tapete final	Evita resbalones al terminar la carrera.	Lona seca.
	Asistente o ayudante	Apoyo para limpieza y control de tiempos.	Ideal si hay grabación o más de un ensayo.
	Bolsas o cartón	Almacenamiento de segmentos de papel.	Identifica cada ensayo con código o fecha.

El análisis de la distribución de presiones plantares constituye un parámetro biomecánico fundamental para comprender la interacción entre el pie y la superficie de apoyo durante actividades locomotoras, y representa una herramienta clave en el diseño de calzado deportivo personalizado (Renganathan et al., 2022). Para la obtención de estos datos en el presente proyecto se empleó el método de registro de huella plantar mediante tinta sobre papel —conocido en la literatura especializada como fotopodograma—, técnica que ha sido reconocida como estándar para la evaluación estructural del pie debido a su bajo costo, facilidad de aplicación y ausencia de equipos sofisticados (Murillo-Alemán et al., 2024).

La prueba experimental se llevó a cabo en la pista atlética del estadio 8 de Marzo de la Universidad Industrial de Santander. Se dispuso una superficie continua de papel a lo largo de un tramo de la pista, sobre la cual el participante realizó desplazamientos bajo tres condiciones de velocidad: caminata, trote y carrera, con el objetivo de registrar las

variaciones en la distribución de contacto del pie bajo distintas demandas mecánicas. Cada condición fue repetida en múltiples ocasiones para garantizar la consistencia de los registros obtenidos.

Figura 13

Preparación de pape para muestras.



Autor

El principio físico del método se basa en la relación directa entre la presión ejercida por el pie sobre la superficie y la cantidad de tinta transferida al papel: las zonas donde el pie ejerce mayor carga generan una transferencia más intensa de tinta, mientras que las áreas de menor contacto producen registros más difusos o ausentes. Esta correlación ha sido documentada en la literatura biomecánica como un indicador

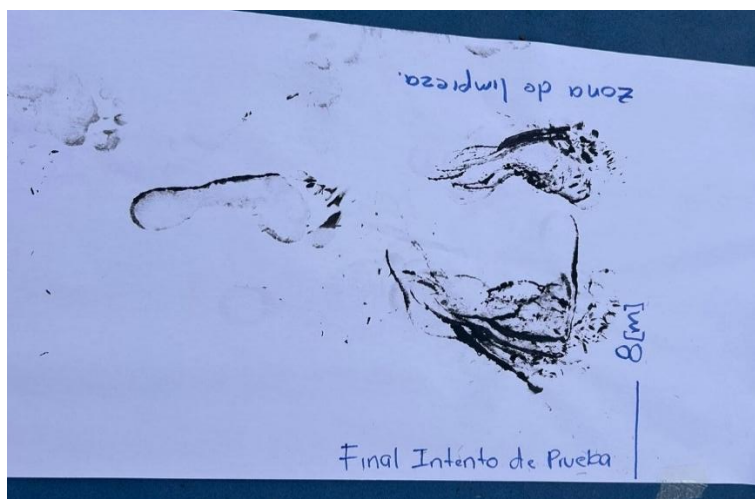
confiable para la identificación cualitativa de zonas de alta y baja presión plantar en etapas preliminares de análisis del pie (Murillo-Alemán et al., 2024).

Una vez preparada la superficie de registro, se procedió a realizar las diferentes pruebas de marcha. El participante caminó a lo largo del tramo cubierto con papel, permitiendo que cada paso quedara registrado sobre la superficie. Durante el recorrido se realizaron múltiples repeticiones con el objetivo de obtener un conjunto de datos suficiente para el análisis posterior.

Los resultados obtenidos durante la prueba fueron documentados mediante fotografías y observación directa de las huellas registradas sobre el papel. Este registro permitió analizar posteriormente las características de la pisada, así como comparar los diferentes patrones observados durante las pruebas.

Figura 14

Prueba previa a tomar datos



Autor

El registro de la pisada constituye una herramienta relevante para comprender la interacción entre el pie y la superficie durante la marcha. Esta información resulta

particularmente útil en investigaciones relacionadas con el diseño de calzado deportivo, ya que permite identificar las zonas del pie que experimentan mayor contacto y carga durante el desplazamiento.

Figura 15

Muestra de huella con áreas de presión



Autor

Con el propósito de identificar las zonas de mayor presión plantar durante la marcha, se realizó un análisis gráfico a partir de las huellas registradas durante las pruebas de caminata, trote y carrera. Las huellas obtenidas fueron documentadas mediante registro fotográfico y posteriormente analizadas para identificar patrones de contacto entre el pie y la superficie.

El análisis se desarrolló bajo la hipótesis de que las variaciones en la intensidad de la tinta registrada en el papel permiten inferir diferencias en la presión ejercida por el pie. En este contexto, se asumió que las zonas donde la tinta aparece más difusa o con

menor concentración corresponden a áreas donde el pie ejerció mayor presión sobre la superficie, debido a una mayor transferencia de carga durante el contacto.

A partir de las huellas obtenidas, se realizó un proceso de interpretación gráfica mediante el trazado de curvas de contorno que delimitan regiones de comportamiento similar en términos de intensidad de contacto. La superposición y acumulación de estos trazos permitió construir un mapa de distribución de presiones dividido en cinco zonas cromáticas diferenciadas: rojo (presión máxima), naranja (presión alta), amarillo (presión media), verde (presión baja) y azul (presión mínima). Este mapa cromático constituye el criterio de diseño central para la asignación diferenciada de geometrías de relleno en la suela.

Figura 16
Galería de huellas tomadas para extracción de forma.



Autor

Figura 17
Mapa de distribución de presiones.



Autor

Mediante la superposición y acumulación de estos trazos fue posible identificar las regiones donde las huellas presentan mayor recurrencia, lo que permitió establecer un patrón general de distribución de presiones plantares.

El análisis de las curvas de nivel y del mapa de calor obtenido evidencia que las zonas de mayor presión se concentran principalmente en tres regiones del pie: el talón, la zona metatarsal del antepié y, en menor medida, algunas áreas laterales del mediopié.

Figura 18

Mapa de calor creado con las formas extraídas de la prueba



Autor

Este comportamiento corresponde al patrón biomecánico típico de la marcha humana, en el cual el contacto inicial se produce en el talón, seguido de una transferencia progresiva de la carga hacia el mediopié y finalmente hacia el antepié durante la fase de impulso.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las huellas constituyen una base conceptual para el desarrollo del diseño de la suela propuesta en esta investigación. La identificación de las zonas de mayor presión permite orientar la distribución de materiales y estructuras internas dentro del diseño de la suela, reforzando aquellas áreas donde se concentran mayores cargas durante la marcha.

De esta manera, el proceso de análisis de huellas y generación de curvas de nivel se integra como una herramienta de diseño biomimético, permitiendo adaptar la estructura de la suela a las necesidades biomecánicas del pie.

Es importante reconocer que el método de fotopodograma presenta limitaciones inherentes respecto a los sistemas instrumentados de medición de presión plantar, tales como plataformas de fuerza o plantillas con sensores, los cuales ofrecen mayor precisión cuantitativa y medición dinámica en tiempo real (Renganathan et al., 2022). Sin embargo, para los propósitos de este proyecto —que busca identificar patrones cualitativos de distribución de carga como criterio de diseño, y no cuantificar valores absolutos de presión— el método empleado resulta adecuado y coherente con el alcance de una investigación de diseño industrial en etapa de prototipado preliminar.

6. Evaluación experimental de la deformación en estructuras topológicas impresas en TPU para aplicaciones en suelas deportivas

La optimización topológica en el diseño permite desarrollar estructuras con mejor relación entre peso, rigidez y capacidad de absorción de impactos. Para esto se hizo una validación experimental para verificar su comportamiento mecánico real, se realizó una evaluación preliminar de deformación en diferentes estructuras topológicas fabricadas mediante impresión 3D en material TPU, con el fin de analizar su respuesta ante cargas estáticas controladas.

El objetivo de este proceso fue determinar cuál pieza presenta mayor rigidez mecánica y mejor desempeño estructural, manteniendo constante el volumen de material. Esto permite establecer criterios de selección, descartando configuraciones menos eficientes en etapas tempranas del desarrollo y evaluar experimentalmente la deformación de cuatro estructuras topológicas impresas en TPU bajo una carga estática controlada.

6.1. Justificación

En el diseño de calzado deportivo, la rigidez estructural influye directamente en la estabilidad, el retorno de energía y la distribución de cargas durante la marcha y la carrera. Las pruebas de deformación permiten validar de forma preliminar el comportamiento de las geometrías optimizadas, facilitando la toma de decisiones en el proceso de diseño.

Aunque los ensayos de laboratorio con máquinas universales ofrecen mayor precisión, las pruebas experimentales simplificadas representan una alternativa viable en etapas iniciales de investigación, permitiendo comparar configuraciones estructurales bajo condiciones controladas.

6.2. Materiales y equipos

- Impresora 3D Bambu A1
- Material flexible TPU.
- Peso estático.
- Regla para medición de deformación.
- Registro fotográfico para documentación experimental.

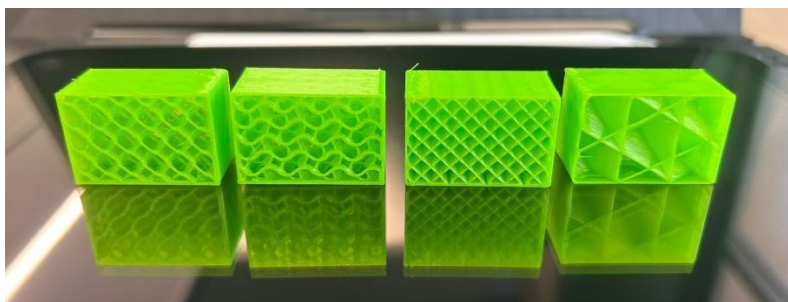
6.3. Metodología experimental

Se fabricaron cuatro muestras con diferentes patrones de estructura topológica, manteniendo constante el volumen total de material con el fin de garantizar condiciones de comparación equivalentes. Cada muestra fue sometida a una carga estática mediante la aplicación de un peso de 1531 g colocado sobre la superficie superior de la estructura. La medición de la deformación se realizó utilizando una regla graduada, registrando la altura inicial y final de cada pieza.

Para mejorar la confiabilidad de los resultados, cada prueba fue repetida en dos ocasiones, complementando el proceso con documentación fotográfica que permitió verificar visualmente el comportamiento de las estructuras durante la carga. Las imágenes obtenidas se utilizaron para el análisis comparativo de la deformación, así como para la validación visual del modo de compresión de cada geometría.

Figura 19

Geometrías de impresión con variaciones topológicas



Autor

6.4. Variables analizadas

- Deformación vertical bajo carga estática.
- Rigidez relativa de cada estructura.
- Comportamiento estructural durante la compresión.

6.5. Resultados y análisis

El análisis de los resultados permitió identificar diferencias significativas en el comportamiento mecánico de las estructuras topológicas evaluadas. Se observó que algunas geometrías presentaron mayor deformación, lo que indica menor rigidez estructural, mientras que otras mostraron una resistencia superior ante la carga aplicada.

Esta comparación permitió establecer un orden jerárquico desde las estructuras con mayor deformación hasta aquellas con menor deformación, facilitando la selección

de configuraciones con mejor desempeño mecánico para aplicaciones en suelas deportivas.

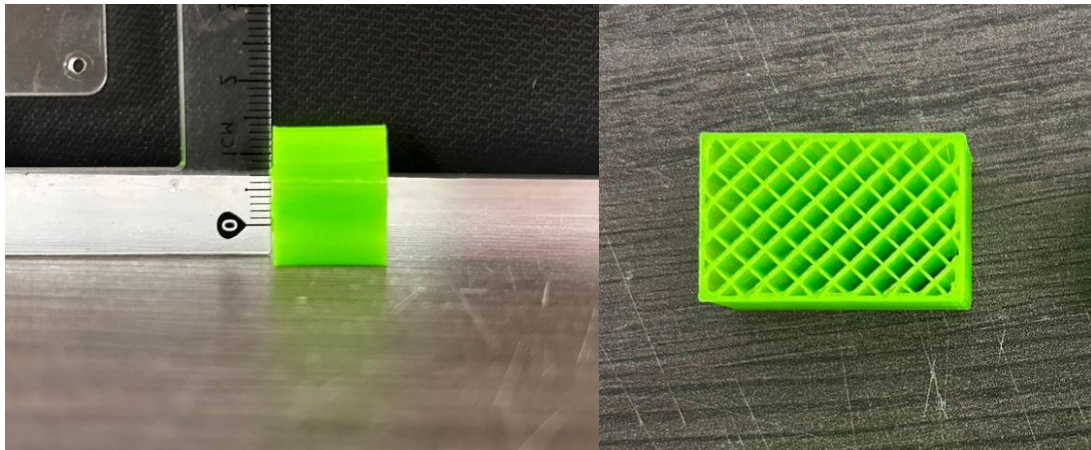
Ecuación 1

Delta de deformación porcentual

$$d = \frac{x_i - x_f}{x_i} * 100$$

Figura 20

Prueba de deformación.



Autor

Tabla 3

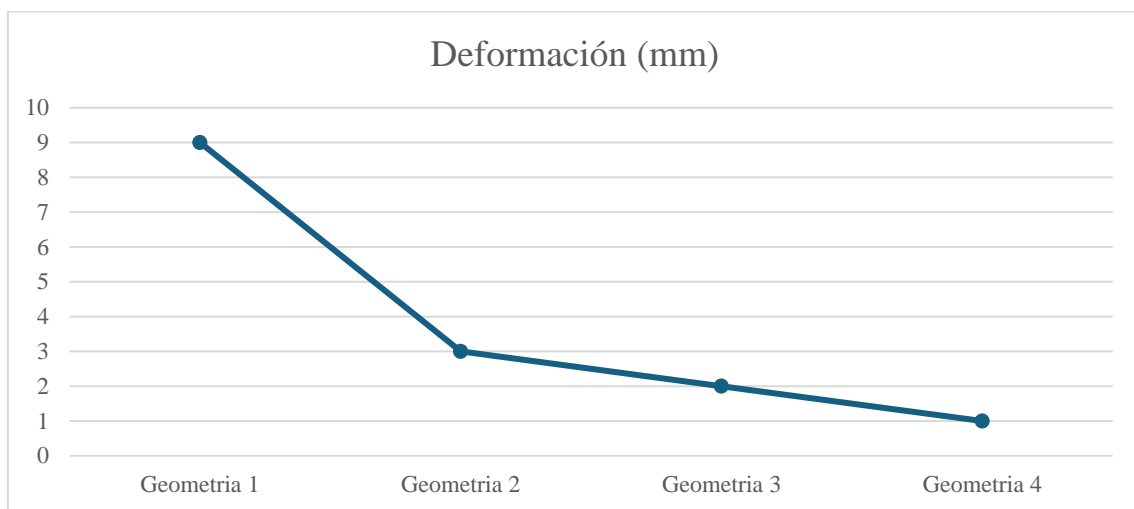
Datos obtenidos después de la prueba

Muestra	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Deformación (mm)	Deformación (%)	Rigidez (N/mm)
Geometria 1	20	11	9	45	1.667
Geometria 2	20	17	3	15	5.001

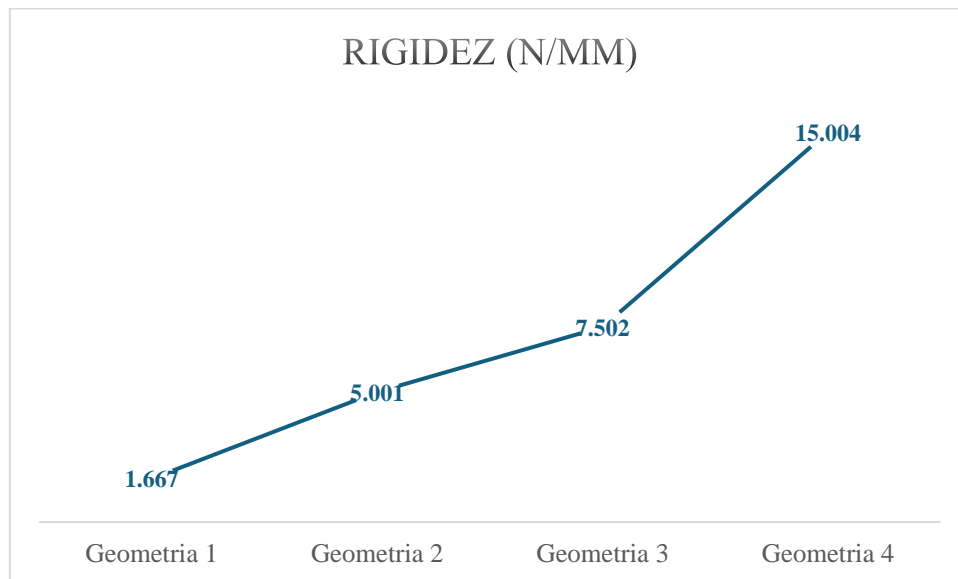
Geometria	20	18	2	10	7.502
3					
Geometria	20	19	1	5	15.004
4					

Figura 21

Grafica de deformación vs Geometría



Autor

Figura 22*Grafica de rigidez vs Geometría**Autor*

Los resultados evidencian que la geometría interna de las estructuras tiene un impacto directo en la rigidez y resistencia mecánica, incluso cuando el volumen de material permanece constante. Esto confirma que el diseño topológico es un factor determinante en el desempeño estructural de componentes impresos en TPU.

Las estructuras con menor deformación presentan mayor potencial para aplicaciones donde se requiere estabilidad y soporte, mientras que aquellas con mayor deformación podrían emplearse en zonas de absorción de impactos. Este enfoque permite optimizar la distribución de propiedades mecánicas en la suela, adaptando la rigidez según las necesidades biomecánicas del usuario.

6.6. Conclusión

Las pruebas de deformación permitieron identificar la influencia de la geometría topológica en la rigidez estructural de componentes impresos en TPU. Este proceso experimental facilitó la selección de configuraciones con mayor potencial para su

aplicación en suelas deportivas, reduciendo el número de diseños en fases posteriores de desarrollo.

7. Requerimientos

Los requerimientos de diseño sintetizan, en criterios verificables, las necesidades biomecánicas del usuario, las restricciones del proceso de manufactura aditiva y los resultados experimentales obtenidos en las etapas previas. Su formulación marca el cierre de la etapa de definición dentro de la metodología y establece los parámetros que orientan tanto las decisiones de diseño como la posterior validación del prototipo

Tabla 4
Tabla de requerimiento de diseño

N°	Requerimiento	Método de verificación	Instrumento	Criterio de éxito	¿Cumple?	Tipo
R1	Diferenciación de rigidez entre zonas	Datos del experimento de deformación	Bambu studio	Zona roja más rígida que zona azul	Sí / No	Desempeño
R2	Zona de mayor presión no colapsa bajo carga del usuario	Observación visual bajo carga manual	Observación directa por zona	Comportamiento post-prueba	Sí / No	Restricción
R3	Amortiguación diferenciada por zona	Datos del experimento de deformación	Porcentaje de deformación por geometría	Zonas azules deforman más que zonas rojas bajo carga equivalente	Sí / No	Desempeño
R4	Diseño corresponde al mapa de presiones	Superposición visual	Mapa cromático sobre modelo	Zonas del modelo coinciden con regiones del mapa	Sí / No	Restricción
R5	Flexión metatarsal natural	Flexión manual de la suela	Transportador o referencia angular impresa	Flexión $\geq 45^\circ$ sin resistencia perceptible	Sí / No	Desempeño
R6	Sin zonas de presión concentrada	Cuestionario al usuario - Fase A	Escala Likert 1-5	Calificación $\geq 4/5$	Sí / No	Desempeño
R7	Fabricabilidad íntegra en Bambu A1	Inspección visual post-impresión	Observación directa por zona	Sin fallas, delaminación ni errores geométricos	Sí / No	Restricción

R8	Continuidad estructural entre zonas	Inspección visual y táctil	Flexión manual de la suela completa	Sin delaminación entre zonas al flexionar	Sí / No	Restricción
R10	Reducción de material $\geq 20\%$	Comparación de pesos	Báscula de cocina + datos del slicer	Prototipo pesa $\geq 20\%$ menos que suela sólida equivalente	Sí / No	Desempeño
R10	Sostenible	La suela debe reducir el volumen de material respecto a una suela sólida convencional de igual geometría exterior	Sostenible	Reducción $\geq 20\%$ de material por uso de geometrías de relleno no sólido	Comparación de peso entre suela prototipo y suela sólida convencional de igual talla báscula de cocina.	Desempeño

Los requerimientos de diseño sintetizan, en criterios verificables, las necesidades biomecánicas del usuario, las restricciones del proceso de manufactura aditiva y los resultados experimentales obtenidos en las etapas previas. Su formulación marca el cierre de la etapa de definición dentro de la metodología de diseño y establece los parámetros que orientan tanto las decisiones de diseño como la posterior validación del prototipo.

En el marco de la etapa de ideación de la metodología, la bocetación manual constituyó la primera herramienta de exploración formal del diseño de la suela. El objeto de la bocetación fue la **forma exterior de la suela**, su silueta general, el perfil lateral, la geometría de la zona del talón, la transición hacia el antepié y la configuración de la superficie de contacto con el suelo. Estas decisiones formales no son arbitrarias: responden directamente a los datos biomecánicos obtenidos en la etapa de análisis de la pisada, dado que la geometría exterior de la suela debe ser coherente con el mapa de distribución de presiones plantares del usuario. Las zonas de mayor carga —talón y antepié— determinan las regiones donde la suela requiere mayor superficie de apoyo y

continuidad estructural, mientras que las zonas de menor presión —bordes laterales y mediopié— admiten configuraciones más ligeras o con mayor reducción de material.

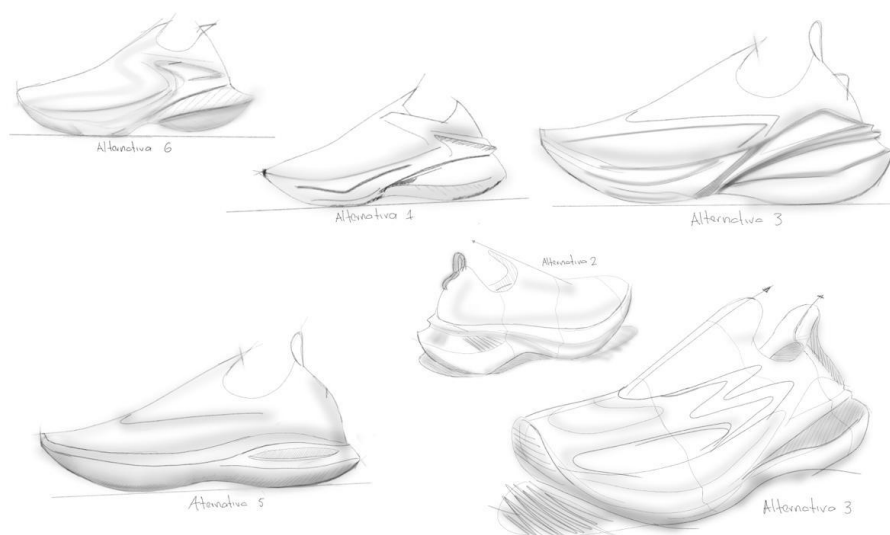
8. Proceso creativo

Durante esta etapa se desarrollaron múltiples propuestas de bocetos que exploraron diferentes aproximaciones a la forma exterior de la suela, variando aspectos como el perfil del talón, la curvatura del arco longitudinal, el ancho del antepié y la relación visual entre las distintas zonas de la suela.

Los bocetos generados en esta etapa sirvieron como insumo directo para la siguiente fase del proceso: la visualización asistida por inteligencia artificial mediante la herramienta Vizcom, que permitió acelerar la evaluación de las propuestas formales y facilitar la toma de decisiones hacia el diseño definitivo.

Figura 23

Alternativas en sketchbook.



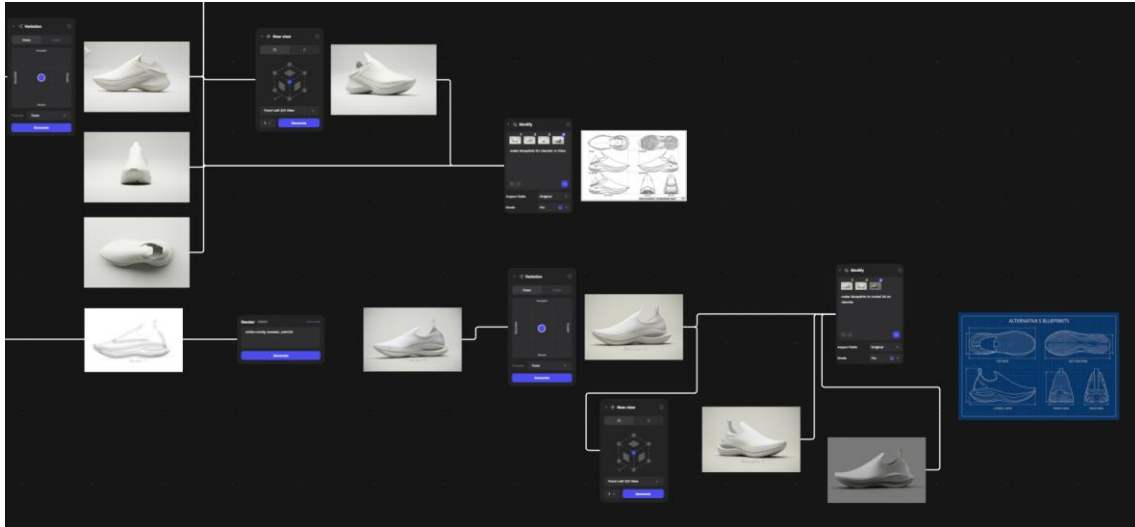
Autor

Una vez generadas las propuestas de bocetación manual, el proceso de visualización fue acelerado mediante el uso de **Vizcom** (Vizcom Inc., 2024), una plataforma de inteligencia artificial especializada en diseño de producto que permite transformar bocetos en dos dimensiones en renders fotorrealistas en tiempo real. Esta herramienta está diseñada específicamente para diseñadores industriales y de producto, con el objetivo de reducir el tiempo entre la concepción de una idea y su visualización como imagen de alta fidelidad, manteniendo el control creativo del diseñador sobre la forma, los materiales y el acabado del objeto.

El uso de herramientas de inteligencia artificial en etapas tempranas del proceso de diseño industrial ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, respaldado por investigaciones que documentan su capacidad para acelerar la ideación, ampliar el espacio de exploración formal y mejorar la comunicación entre el diseñador y el usuario durante las fases de evaluación de conceptos. De acuerdo con Llorente-Cejudo et al. (2025), la inteligencia artificial permite a los diseñadores industriales explorar un rango más amplio de ideas y experiencias, incluyendo aquellas no imaginadas previamente, y desarrollar conceptos iniciales de diseño con mayor rapidez que mediante métodos tradicionales.

Figura 24

Evolución de forma con ayuda de Vizcom.

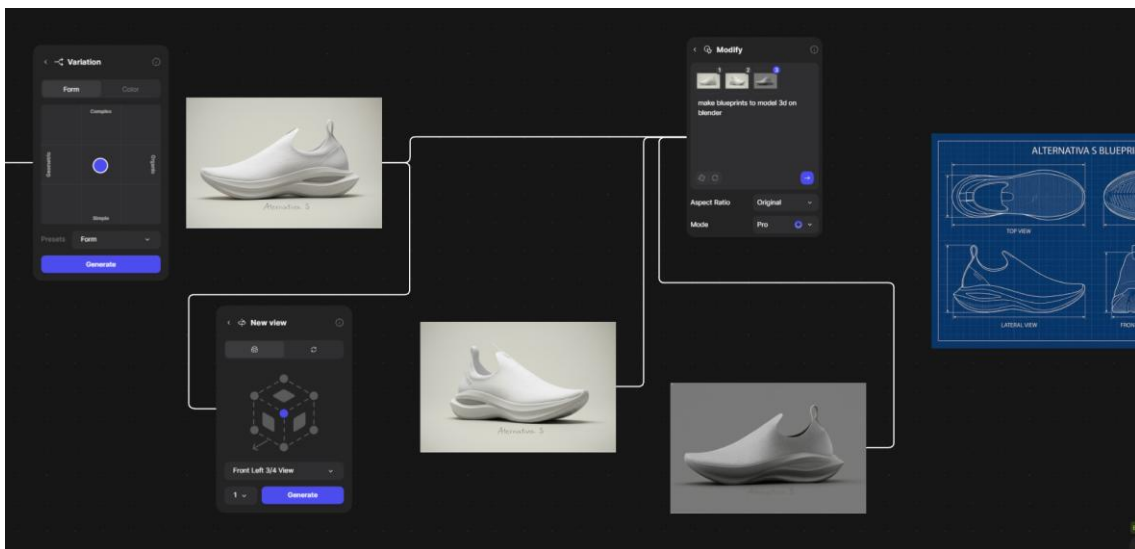


Autor

La etapa de aprobación del diseño por parte del usuario constituye un momento clave dentro del proceso de diseño, dado que garantiza que las decisiones formales tomadas por el diseñador respondan a las expectativas y preferencias reales de la persona para quien se diseña.

Figura 25

Proceso de cambios según el criterio del usuario en Vizcom.



Autor

Se hizo una verificación presentando al usuario los renders generados mediante Vizcom a partir de los bocetos de la forma exterior de la suela. El criterio de evaluación en esta instancia fue exclusivamente **estético y formal**, se solicitó al usuario que identificara la propuesta que mejor respondía a sus expectativas en términos de forma, perfil y configuración visual general de la suela, sin considerar aún los aspectos funcionales o estructurales. La propuesta seleccionada por el usuario constituyó el punto de partida para la etapa de modelado tridimensional.

Figura 26

Alternativa seleccionada por el usuario.



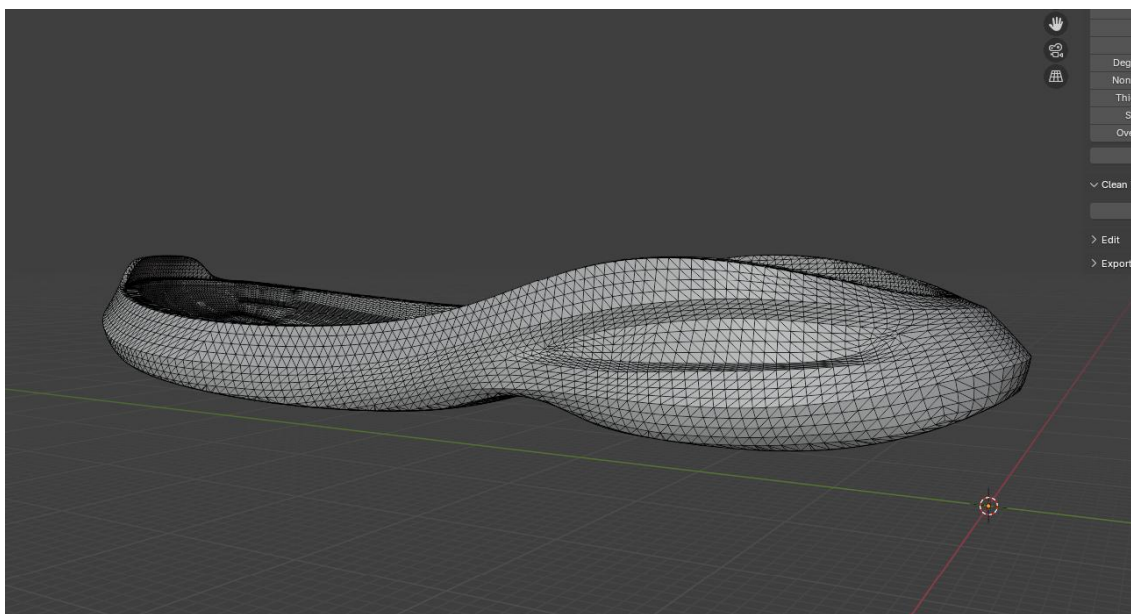
Autor

Con la propuesta formal aprobada por el usuario, se procedió a la construcción del modelo tridimensional de la suela mediante el software **Blender** una plataforma de

modelado, animación y visualización de código abierto ampliamente utilizada en proyectos de diseño industrial, investigación académica y manufactura aditiva. La elección de Blender como herramienta de modelado responde a su capacidad para gestionar geometrías de alta complejidad orgánica mediante herramientas de modelado poligonal y de mallas, las cuales ofrecen un mayor grado de libertad formal en comparación con los entornos CAD paramétricos convencionales, especialmente en las etapas tempranas de definición morfológica del producto.

El modelo resultante corresponde a una **malla poligonal** que representa fielmente la geometría exterior de la suela aprobada en la etapa anterior, incluyendo la diferenciación volumétrica de las cinco zonas de presión plantar identificadas en el mapa cromático. Esta representación en malla constituyó la base geométrica para el proceso de conversión a sólido paramétrico desarrollado en la siguiente etapa del flujo de trabajo.

Figura 27
Modelado en Blender



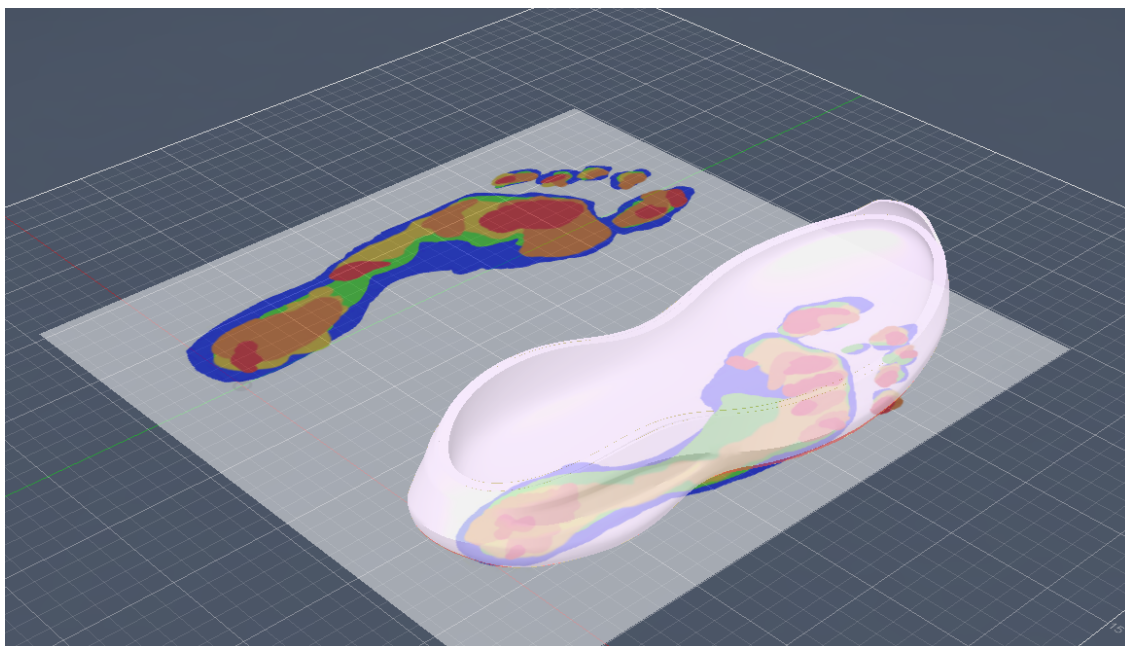
Autor

La malla poligonal generada en Blender, si bien representa con fidelidad la geometría exterior de la suela, no constituye por sí misma un formato adecuado para la preparación de archivos de manufactura aditiva que requieran control paramétrico sobre dimensiones, tolerancias y configuraciones de impresión. Para resolver esta limitación, el modelo fue importado y procesado en **Autodesk Fusion 360**.

Una vez obtenido el sólido paramétrico, Fusion 360 permitió realizar ajustes dimensionales del modelo, verificar la integridad geométrica de la superficie y preparar el archivo para su posterior configuración en el software de laminado Bambu.

Figura 28

Ajuste del modelado con las medidas exactas del usuario



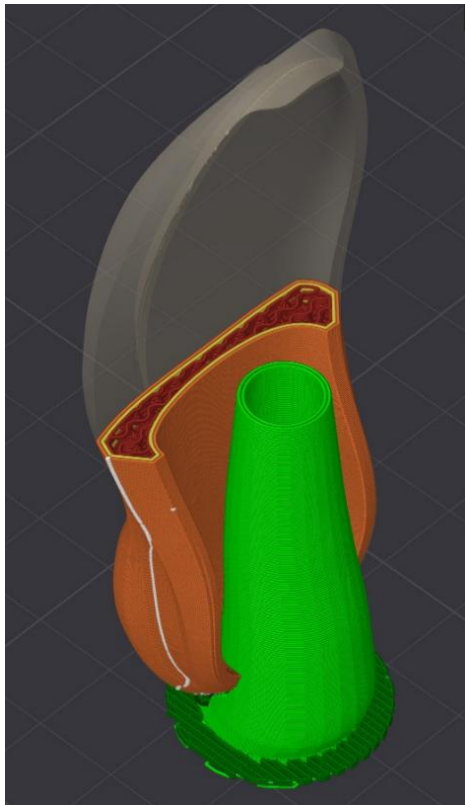
Autor

Con el modelo sólido paramétrico definido en Autodesk Fusion 360, la etapa final del proceso de modelado consistió en la preparación de las muestras de impresión

mediante el software de laminado. En esta fase, el objetivo no fue imprimir directamente el prototipo final de la suela, sino fabricar una serie de **muestras de geometría reducida** con variaciones sistemáticas en los parámetros de impresión, con el propósito de identificar la configuración que ofreciera el mejor desempeño mecánico antes de comprometer material y tiempo en una pieza de mayor escala.

Figura 29

Pruebas de slicer vertical.



Autor

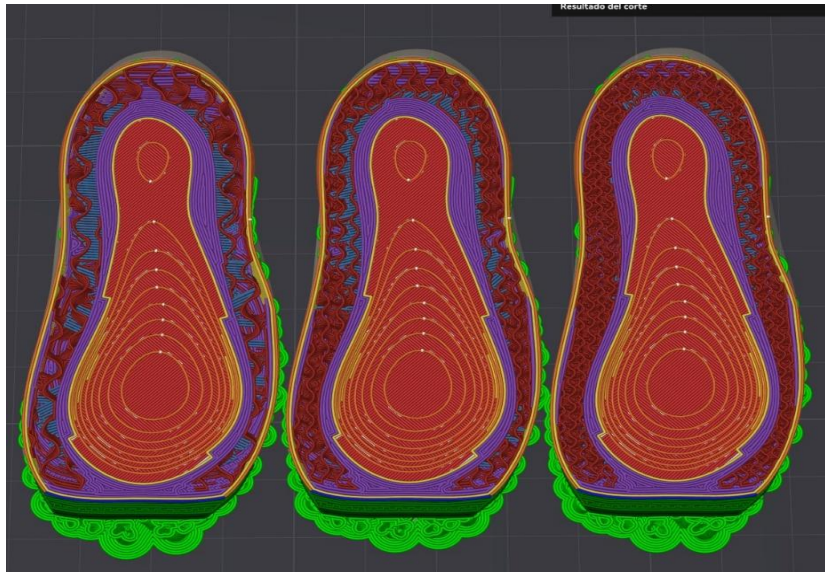
La decisión de explorar distintas configuraciones de impresión responde a una premisa bien documentada en la literatura de manufactura aditiva, los parámetros de proceso en tecnología FDM no son neutros respecto al comportamiento mecánico del componente resultante. Variables como la densidad de relleno, el ángulo de deposición y

la orientación de construcción inciden directamente sobre la rigidez, resistencia y anisotropía del material impreso (Raut et al., 2025; Hamoud et al., 2024). En materiales flexibles como el TPU, esta sensibilidad es especialmente pronunciada, dado que su comportamiento viscoelástico amplifica el efecto de la dirección de deposición sobre la respuesta mecánica bajo carga (Kim & Lee, 2023).

Las variables evaluadas durante esta etapa fueron tres. En primer lugar, la **densidad de relleno**, que determina el porcentaje del volumen interior de la muestra ocupado por material, incidiendo directamente sobre la rigidez y el peso del componente. En segundo lugar, el **ángulo de impresión**, entendido como la orientación de los trazos de deposición respecto al plano horizontal, cuya variación modifica la distribución de esfuerzos internos y la resistencia ante cargas específicas. En tercer lugar, el **sentido de impresión**, es decir, la orientación espacial en que la pieza es construida capa a capa, factor que determina la dirección de mayor resistencia del componente debido a la naturaleza anisotrópica del proceso FDM (Hamoud et al., 2024).

Figura 30

Prueba de slicer de diferentes % de rellenos.



Autor

9. Evaluación experimental de parámetros de impresión en TPU: selección del ángulo de deposición óptimo

9.1. Justificación

En manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM), la orientación de impresión constituye uno de los parámetros de proceso con mayor incidencia sobre las propiedades mecánicas del componente resultante, debido al proceso de construcción capa a capa. Investigaciones recientes han demostrado que variaciones en el ángulo de deposición modifican significativamente la resistencia a la tracción, la rigidez y la integridad superficial de piezas impresas en materiales flexibles como el TPU, lo que justifica su evaluación sistemática previo a la fabricación del prototipo final (Hamoud et al., 2024; Kim & Lee, 2023).

9.2. Objetivo

Determinar el ángulo de deposición óptimo para la impresión de muestras en TPU mediante la evaluación comparativa de tres orientaciones, con base en criterios de calidad superficial.

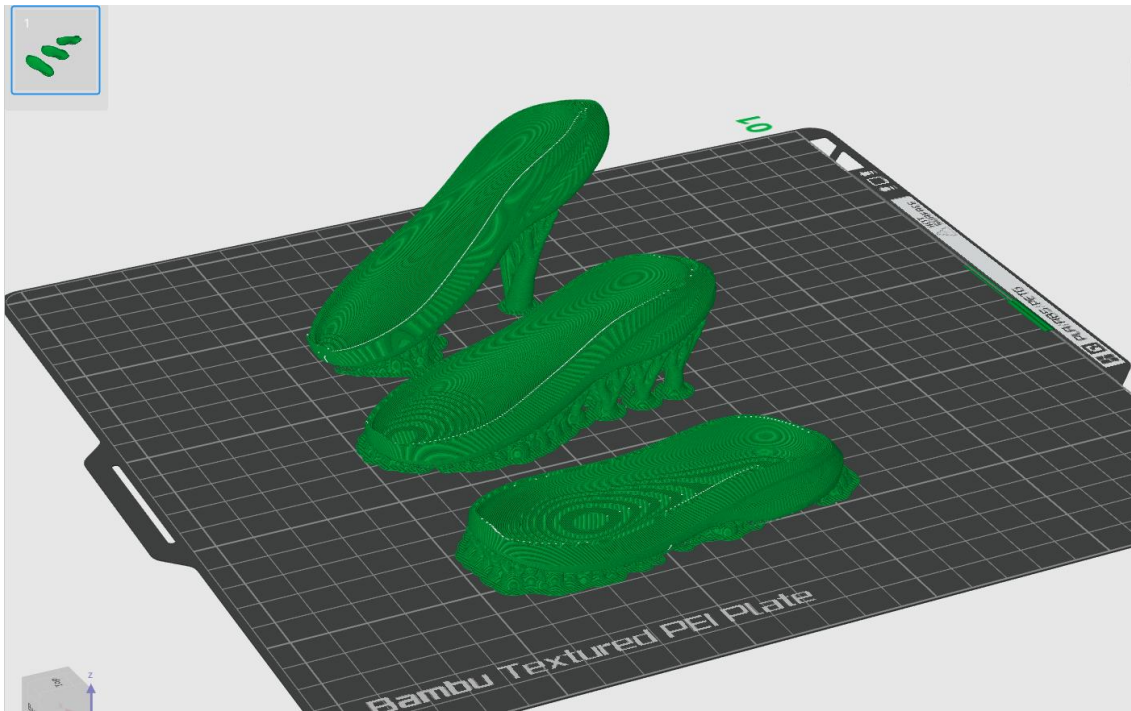
9.3. Metodología

Se fabricaron muestras geoméricamente idénticas en TPU, manteniendo constantes todos los parámetros de impresión a excepción del ángulo de deposición, el cual fue variado sistemáticamente en cuatro condiciones: **0°**, **30°**, **45°** y **90°** respecto al plano horizontal de construcción. Esta estrategia de variación de un único parámetro con control de las demás variables garantiza la validez comparativa de los resultados, al aislar el efecto específico del ángulo de deposición sobre el comportamiento del material (Raut et al., 2025).

La evaluación de cada muestra se realizó mediante criterio **inspección visual de calidad superficial**, orientada a identificar defectos de impresión como delaminación entre capas, irregularidades geométricas o pérdida de integridad en las paredes de la geometría.

Figura 31

Prueba de ángulos de impresión en Bambu Lab.

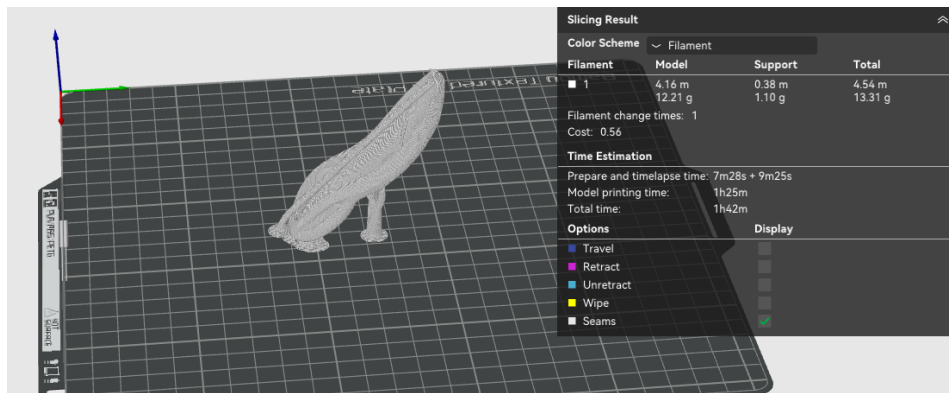


Autor

9.4. Variables analizadas

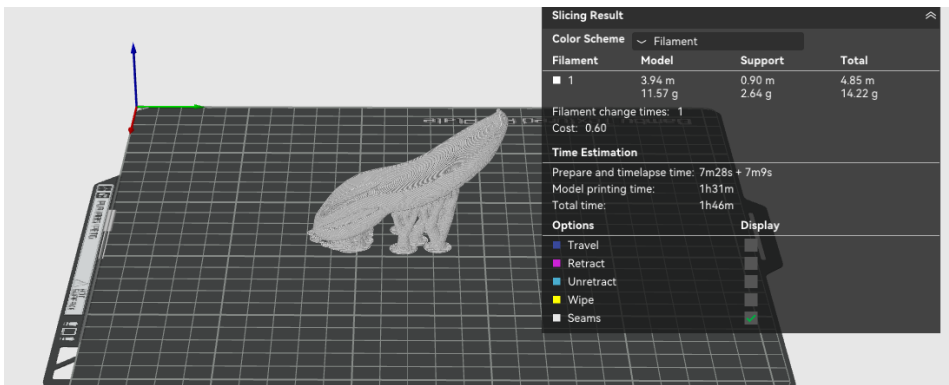
- Calidad superficial e integridad geométrica por inspección visual y presencia de defectos de impresión por orientación

Figura 32
 Datos de slicer a 45 grados.



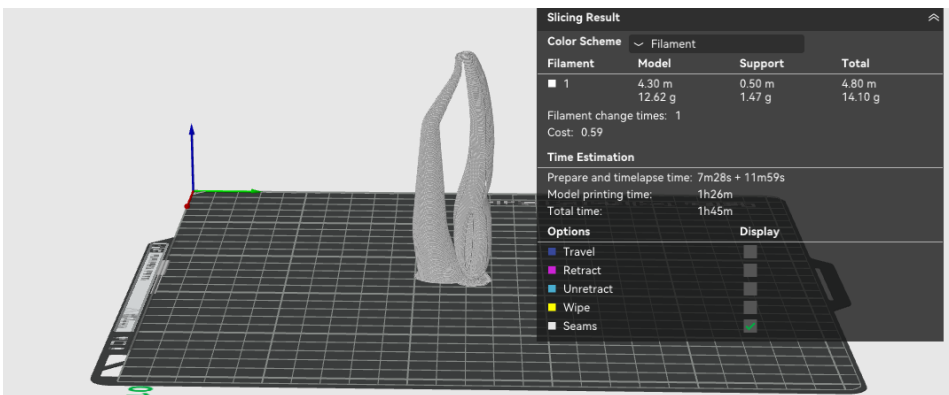
Autor

Figura 33
 Datos de slicer a 30 grados.

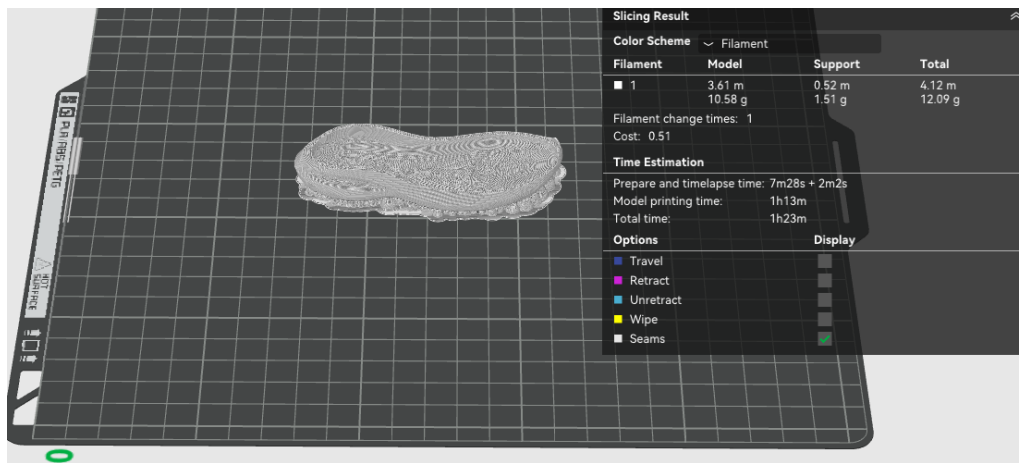


Autor

Figura 34
 Datos de slicer a 90 grados.



Autor

Figura 35*Datos de slicer a 0 grados.**Autor***Tabla 5***Comparación de resultados por ángulo de impresión en TPU*

Orientación	Material	Soporte	Total	Tiempo
Vertical	12.62 g	1.47 g	14.10 g	1h 45m
Horizontal	10.58 g	1.51 g	12.09 g	1h 23m
45 grados	12.21 g	1.10 g	13.31 g	1h 42m
30 grados	11.57 g	2.64 g	14.22 g	1h 46m

Autor

Nota. Los tiempos corresponden a estimaciones obtenidas en el software de laminado Bambu Lab sobre la geometría real de la suela, validadas mediante muestras físicas de 7 cm.

9.5. Resultados

La selección del ángulo de deposición óptimo para la fabricación de la suela en TPU se determinó a partir de una prueba comparativa entre cuatro configuraciones: 0°, 30°, 45° y 90°. El proceso de selección se desarrolló en dos fases complementarias. En la primera, se realizó un análisis comparativo en el software de laminado Bambu Lab simulando cada orientación sobre la geometría real de la suela, lo que permitió obtener

estimaciones de tiempo de impresión y volumen de material incluyendo soportes para cada configuración, antes de ejecutar ninguna impresión física. En la segunda fase, se fabricaron muestras reducidas de 7 cm en cada uno de los cuatro ángulos evaluados, con el fin de verificar el comportamiento real del TPU en cada orientación.

Los resultados de ambas fases fueron consistentes. La orientación a 0° presentó el menor consumo de soportes, la mejor calidad superficial y el tiempo de impresión más eficiente de las cuatro configuraciones evaluadas, con una estimación de aproximadamente 1.23 horas para la pieza a escala real. Las configuraciones a 30° y 45° mostraron un incremento progresivo en el volumen de soportes requeridos y en el tiempo de impresión —1.46 y 1.42 horas respectivamente—, con una calidad superficial notablemente inferior en las zonas de contacto con los soportes. Estos factores, sumados al mayor gasto de material que implican, llevaron a descartarlas como configuraciones viables para el prototipo final.

La orientación a 90° fue la más problemática. Además de proyectar el mayor consumo de soportes y un tiempo estimado de impresión de aproximadamente 1.45 horas, las muestras físicas de 7 cm fabricadas en esta orientación fallaron durante el proceso: la flexibilidad intrínseca del TPU, combinada con la vibración generada por el movimiento del cabezal a medida que aumenta la altura de la pieza, produjo inestabilidad estructural que comprometió la geometría antes de completarse la impresión. Este comportamiento descarta la orientación vertical como una opción viable para la fabricación de geometrías flexibles en este material, independientemente del tiempo disponible.

Figura 36

Fallo de impresión a 90 grados.



Autor

Con base en los resultados del análisis en software y en las muestras físicas, se seleccionó la orientación a 0° como parámetro de fabricación definitivo. El prototipo final fue impreso en orientación horizontal con las medidas reales del pie del usuario, obteniendo una pieza íntegra, con el menor consumo de material de soporte posible y una calidad superficial coherente con los requerimientos de diseño establecidos.

9.6. Conclusión

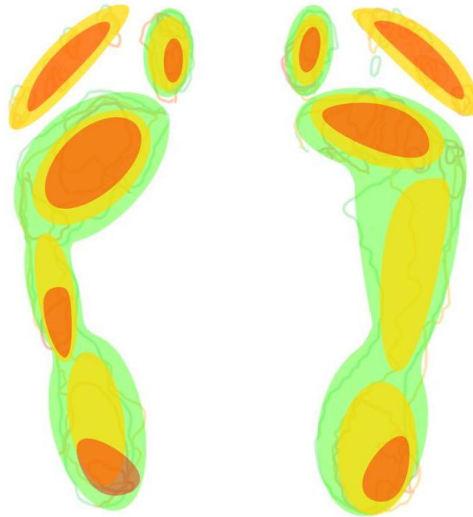
El análisis comparativo entre las cuatro orientaciones de impresión confirmó que la configuración a 0° es la más adecuada para la fabricación de la suela. La combinación del estudio previo en software y la verificación física con muestras permitió tomar una decisión fundamentada en datos concretos de tiempo, consumo de material y calidad superficial, sin necesidad de fabricar piezas a escala real en cada orientación. La orientación vertical fue la que evidenció de forma más contundente las limitaciones del

material: el TPU no tolera bien las impresiones de gran altura por su flexibilidad, y la vibración del cabezal termina comprometiendo la pieza antes de completarse. Las configuraciones a 30° y 45°, aunque físicamente viables, implicaban un gasto de soportes y un tiempo de impresión que no se justificaban. La orientación horizontal no solo ganó en eficiencia, sino que produjo la mejor pieza.

10. Geometrización y modelado

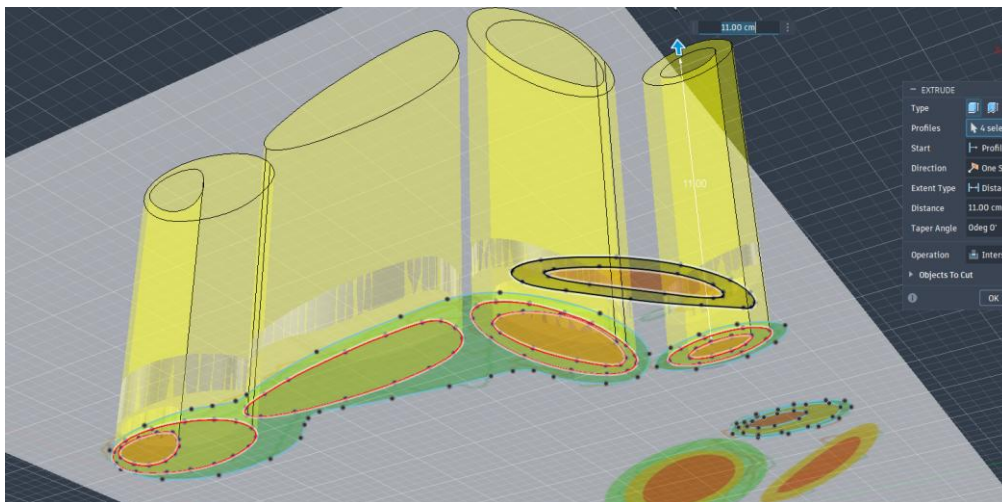
Una vez definidos los parámetros de orientación de impresión, se procedió a realizar el ajuste final del modelo tridimensional en Fusion 360. En esta etapa, las cuatro zonas de presión plantar identificadas en el mapa cromático fueron delimitadas como **cuerpos independientes** dentro del ensamblaje, de manera que el software de laminado Bambu Lab pudiera reconocerlas como objetos diferenciados y asignarles configuraciones de impresión individuales. Esta distinción es fundamental para que la variación de densidades de relleno —que constituye el principio de optimización topológica del proyecto— pueda ejecutarse de forma controlada y verificable dentro de una misma sesión de impresión.

Figura 37
Geometrización de áreas de presión para cada pie.



Autor

Figura 38
Modelado de áreas de presión.

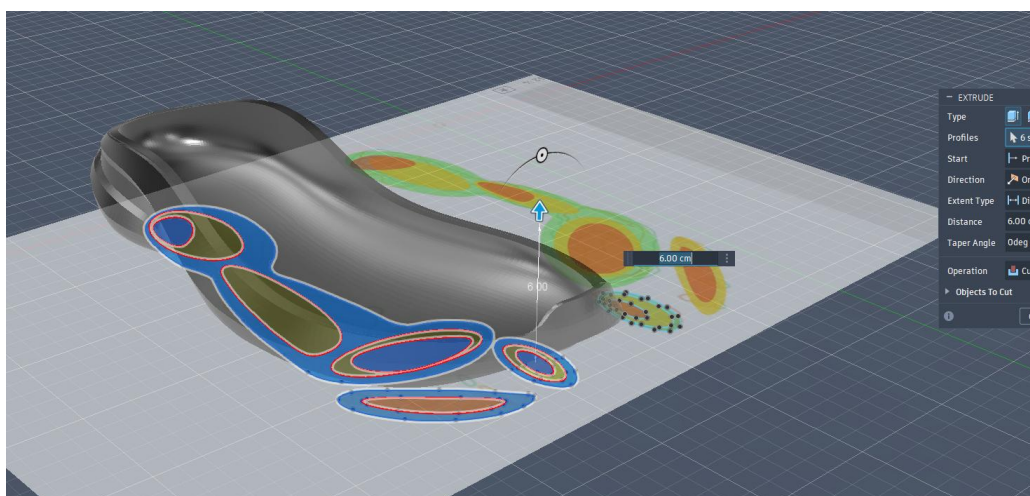


Autor

La asignación de densidades de relleno a cada cuerpo se estableció a partir de dos criterios complementarios: los resultados del ensayo experimental de deformación, que determinaron la jerarquía de rigidez entre geometrías, y las recomendaciones técnicas para impresión funcional en TPU. La literatura especializada en manufactura aditiva con filamentos flexibles establece que un relleno mínimo del 15% representa el umbral funcional para piezas en TPU que requieren integridad estructural bajo carga, siendo el rango entre 15% y 35% el adecuado para aplicaciones que demandan variaciones controladas de rigidez (IN3DTEC, 2024; Wevolver, 2024). Con base en esto, la distribución de densidades quedó configurada de la siguiente manera: la zona azul —correspondiente a la región de menor presión plantar— recibió un relleno del 15%, equivalente al mínimo funcional recomendado para TPU; la zona verde, con carga baja-media, se configuró al 18%; la zona amarilla, de carga media-alta, al 25%; y la zona roja —región de máxima presión, correspondiente al talón y la cabeza de los metatarsianos— recibió el mayor porcentaje de relleno, con un 35%.

Figura 39

Proceso de modelado de áreas de presión media.

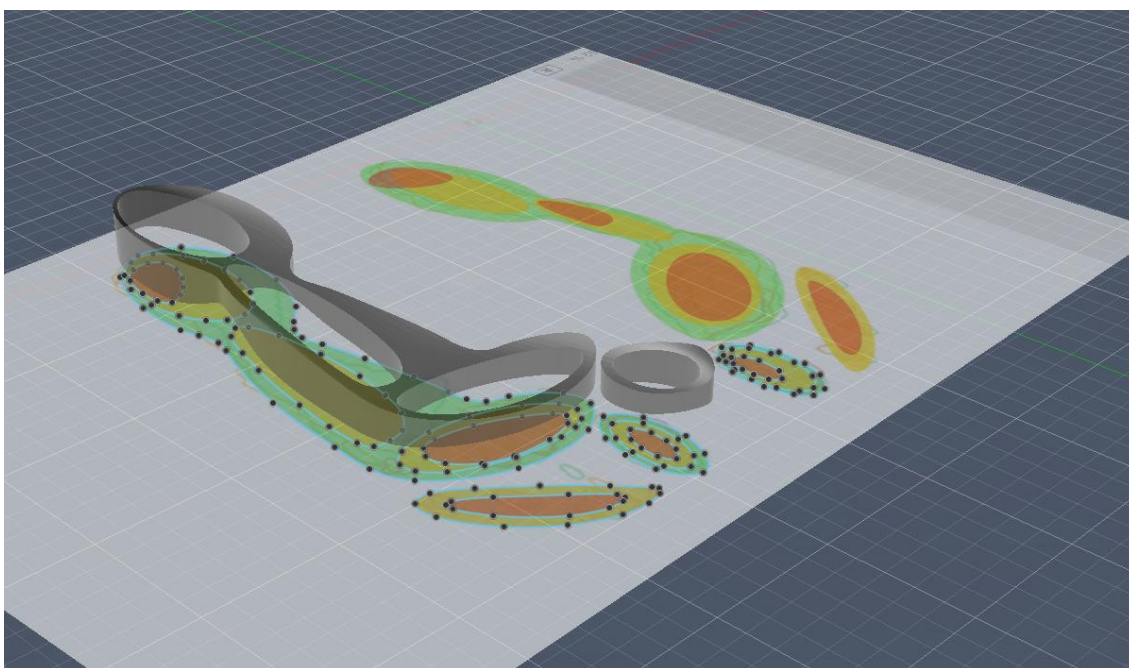


Autor

Con el modelo correctamente configurado, los cuatro cuerpos fueron exportados individualmente en formato STL e importados a Bambu Lab, donde se verificó que cada zona fuera reconocida como un objeto independiente dentro de la cama de impresión. Esta verificación es un paso crítico del proceso pues si el software no distingue los cuerpos como entidades separadas, la asignación diferenciada de parámetros no es posible y la suela se imprimiría como una pieza homogénea.

Figura 40

Resultado de modelado de presión baja.

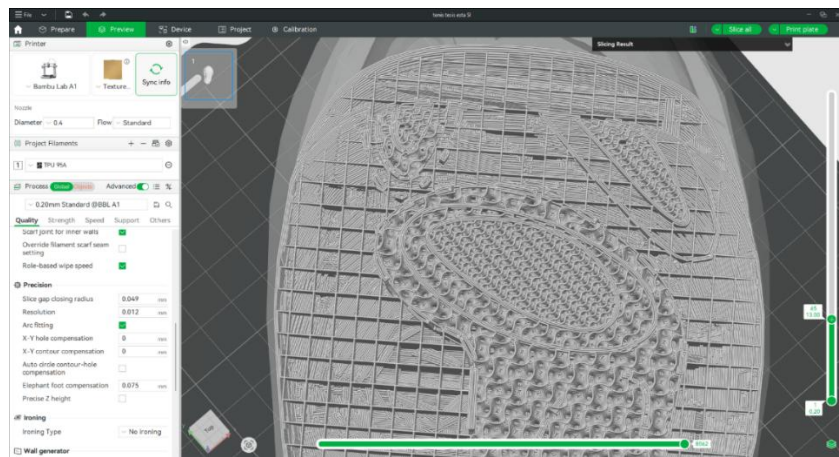


Autor

Una vez confirmado el reconocimiento individual de cada zona, se procedió a realizar los ajustes finales de impresión. A cada cuerpo se le asignó su geometría de relleno específica y su densidad correspondiente, y se verificó la coherencia entre las interfaces de contacto entre zonas para garantizar la continuidad estructural de la pieza durante y después de la impresión. Se revisaron adicionalmente los parámetros globales

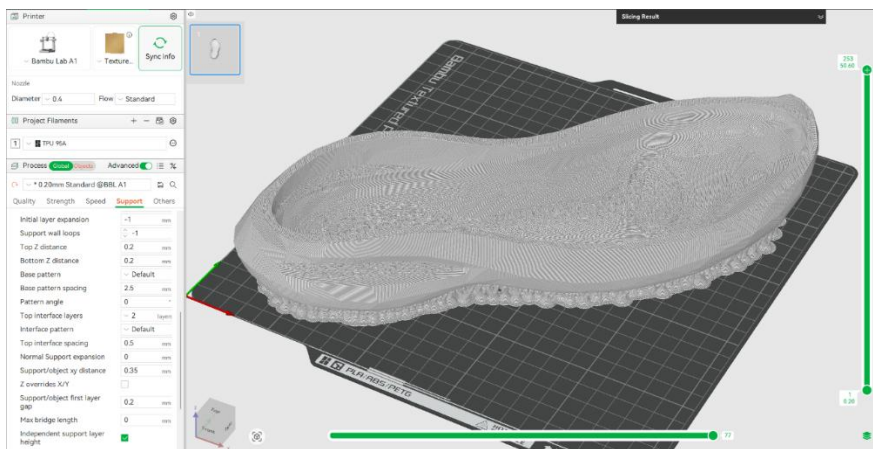
de impresión: velocidad de extrusión reducida acorde a las exigencias del TPU, temperatura de boquilla, adhesión a la cama y generación de soportes en las zonas que lo requerían. Solo después de validar que todos los parámetros fueran correctos para cada sector, el archivo fue enviado a la impresora en orientación horizontal, dando inicio al proceso de fabricación del prototipo final a escala real con las medidas del pie del usuario.

Figura 41
Resultado de slicer de asignación de relleno en las áreas.



Autor

Figura 42
Slicer final de suela derecha para impresión



Autor

Figura 43

Prototipo pre-prueba de validación.



Autor

11. Protocolo de validación comparativa

La validación del prototipo se estructuró como una prueba de uso comparativa, en la que el usuario evalúa la suela prototipo y su calzado de running convencional bajo las mismas condiciones de actividad física, permitiendo contrastar directamente la percepción subjetiva de ambas condiciones frente a los requerimientos de diseño establecidos.

La elección de un diseño comparativo responde a una decisión metodológica deliberada. Evaluar el prototipo de forma aislada produciría datos de percepción sin referencia, lo que limitaría la capacidad de determinar si el diseño representa una mejora real respecto al calzado convencional. Al incorporar una condición de control —el calzado habitual del

usuario— cada rúbrica de evaluación adquiere un punto de comparación concreto, aumentando la validez de las conclusiones.

11.1. Objetivo

Verificar el cumplimiento de los requerimientos de diseño de la suela deportiva personalizada mediante una prueba de uso con el usuario, contrastando su percepción subjetiva de confort, soporte y comportamiento por zonas entre la suela prototipo y su calzado de running convencional, y documentando el estado de cada requerimiento frente a los criterios de éxito establecidos en la tabla PDS.

11.2. Condiciones de la prueba

La prueba se desarrolló en dos fases secuenciales con un descanso de 10 minutos entre ellas. En la **Fase A**, el participante portó la suela prototipo instalada dentro de su calzado habitual de running durante una sesión continua de 30 minutos, estructurada en tres actividades progresivas: caminata (10 minutos), trote (10 minutos) y carrera (10 minutos). En la **Fase B**, repitió exactamente la misma secuencia con su calzado convencional sin ninguna modificación. El orden —prototipo primero, convencional después— se estableció deliberadamente para garantizar que la fatiga acumulada no afectara la evaluación del prototipo, que es el objeto principal de análisis. Al finalizar cada fase, el participante completó el instrumento de evaluación correspondiente (véase Apéndice A).

Figura 44

Usuario en la prueba de validación en fase de trote.



Autor

11.3. Resultados

El promedio general del prototipo fue de 3,92 sobre 5, frente a 4,38 del calzado de referencia. El criterio de éxito establecido —promedio $\geq 4/5$ — no se alcanzó en esta primera iteración, pero ese número solo tiene sentido si se lee en contexto: el prototipo fue comparado con un calzado de running de alta gama, producto de décadas de desarrollo tecnológico e ingeniería especializada. Que un primer prototipo universitario, fabricado con manufactura aditiva y basado en el análisis de pisada del propio usuario, se ubique a 0,46 puntos de ese estándar es, en sí mismo, un resultado que vale la pena destacar.

Lo más importante que revelaron los datos no es el número final sino dónde se concentraron las molestias. El usuario no reportó incomodidad en las zonas de alta presión —talón central y metatarsianos— que son precisamente las áreas donde el diseño debía funcionar. Los puntos de presión se ubicaron en los **bordes laterales del talón**. El principio de diferenciación de rigidez funcionó; lo que falló fue la transición geométrica

entre zonas. El propio usuario lo describió con precisión “la suela quedó un poco alta en esos bordes y recomiendo redondearlos”. Es un ajuste menor, no una falla conceptual.

En el otro extremo, el prototipo superó al calzado convencional en el criterio más relevante para el proyecto: la **respuesta a su tipo de pisada** (5/5 vs 4/5). El usuario reconoció que una suela diseñada a partir de su propio perfil biomecánico responde mejor a su pisada que su calzado habitual de alta gama. Eso es exactamente lo que este proyecto buscaba demostrar. Los resultados no confirman la hipótesis de forma completa, pero sí validan que el camino es correcto y que una segunda iteración con los bordes ajustados tiene fundamento real para mejorar los resultados.

12. Análisis computacional de optimización topológica, aproximación mediante simulación FEA

Con el prototipo físico en proceso de fabricación y los parámetros de impresión definidos, se realizó una aproximación computacional al principio de optimización topológica mediante el módulo de simulación **Shape Optimization** de Fusion 360. Este análisis complementa la metodología experimental del proyecto al trasladar el mismo principio de distribución diferenciada de cargas —derivado del mapa de presiones plantares— a un entorno de elementos finitos, permitiendo contrastar visualmente la distribución de material estructuralmente necesario con las decisiones de diseño tomadas a lo largo del proceso.

Dado que Fusion 360 no incluye el TPU en su biblioteca de materiales por defecto, fue necesario construir el material de forma manual a partir de propiedades mecánicas verificadas en fichas técnicas de fabricantes y estudios publicados sobre filamentos TPU 95^a para manufactura aditiva. Los valores ingresados corresponden al comportamiento

del material impreso en condición de 100% de relleno, lo que representa el límite superior de rigidez dentro del rango de densidades utilizadas en el prototipo (15%–35%).

12.1. Propiedades del material

Tabla 6

Propiedades mecánicas del TPU 95^a ingresadas en Fusion 360

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo de Young ϵ	26	Mpa
Razón de Poisson (ν)	0,47	—
Módulo de corte (G)	8,84	Mpa
Densidad (ρ)	1,22	g/cm ³
Resistencia a la fluencia	8,6	Mpa
Resistencia última a tracción	39	Mpa
Conductividad térmica	0,25	W/(m·K)
Coefficiente de expansión térmica	150	$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
Calor específico	0,998	J/(g·°C)

Autor

Nota. Los valores corresponden al material impreso al 100% de relleno (condición bulk). Las propiedades reales de cada zona del prototipo son menores en función del porcentaje de relleno asignado, tal como se determinó experimentalmente en el ensayo de deformación.

12.2. Cálculo del módulo de corte

El módulo de corte no está disponible directamente en las fichas técnicas del TPU 95A para manufactura aditiva, por lo que fue calculado analíticamente a partir del módulo de Young y la razón de Poisson mediante la relación de elasticidad isotrópica:

Ecuación 2

Ecuación de cálculo de corte del TPU a partir del módulo de Young y la razón de Poisson

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{26 \text{ MPa}}{2(1 + 0,47)} = \frac{26}{2,94} = 8,84 \text{ MPa}$$

12.3. Distribución de cargas por zona

Las cargas aplicadas en la simulación se calcularon a partir de la distribución de presiones plantares documentada por Elvira Hernández (2021), quien establece que en condición estática el **60% del peso corporal** actúa sobre el calcáneo y el **40% restante** sobre el antepié. Para el usuario del proyecto, con un peso corporal de 70 kg, la fuerza resultante por pie en condición estática

Ecuación 3

Cálculo de carga estática.

$$F_{pie} = \frac{m \cdot g}{2} = \frac{70 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{2} = 343,4 \text{ N}$$

Esta fuerza fue distribuida entre las cuatro zonas del modelo según la correspondencia establecida entre el mapa cromático de presiones plantares y la anatomía funcional del pie:

Tabla 7

Distribución de cargas estáticas por zona del modelo (usuario 70 kg)

Zona	Color	% del peso por pie	Fuerza estática (N)	Relleno asignado
Talón + 1er metatarsiano	Roja	70%	240,3 N	35%
Metatarsianos 2-4	Amarilla	16%	54,9 N	25%
Mediopié / transición	Verde	10%	34,3 N	18%
Bordes laterales	Azul	4%	13,7 N	15%
Total		100%	343,4 N	

Autor

Nota. La distribución porcentual se obtuvo de Elvira Hernández (2021) para la condición estática. La zona roja concentra la carga del talón (60% del total) más la contribución del primer metatarsiano (estimada en ~25% de la carga del antepié), lo que resulta en el 70% del total por pie.

12.4. Cargas dinámicas - condición de carrera

Para la condición de carrera, las fuerzas de reacción del suelo (Ground Reaction Forces, GRF) pueden alcanzar entre 2 y 3 veces el peso corporal del atleta (Nordin & Frankel, 2001). Aplicando un factor conservador de 2,5

Ecuación 4

Cálculo de cargas dinámicas.

$$F_{carrera} = F_{pie} \times 2,5 = 343,4 \times 2,5 = 858,5 \text{ N por pie}$$

Tabla 8

Distribución de cargas dinámicas por zona en condición de carrera.

Zona	Fuerza estática (N)	Factor dinámico	Fuerza dinámica (N)
Roja	240,3	× 2,5	600,9
Amarilla	54,9	× 2,5	137,3
Verde	34,3	× 2,5	85,8
Azul	13,7	× 2,5	34,3
Total	343,4		858,5

*Autor***12.5. Presiones equivalentes por zona**

Para verificar la coherencia de los valores de carga con los rangos documentados en la literatura, se calcularon las presiones equivalentes por zona asumiendo áreas de contacto aproximadas para una talla 43:

Tabla 9

Presiones equivalentes por zona en condición estática.

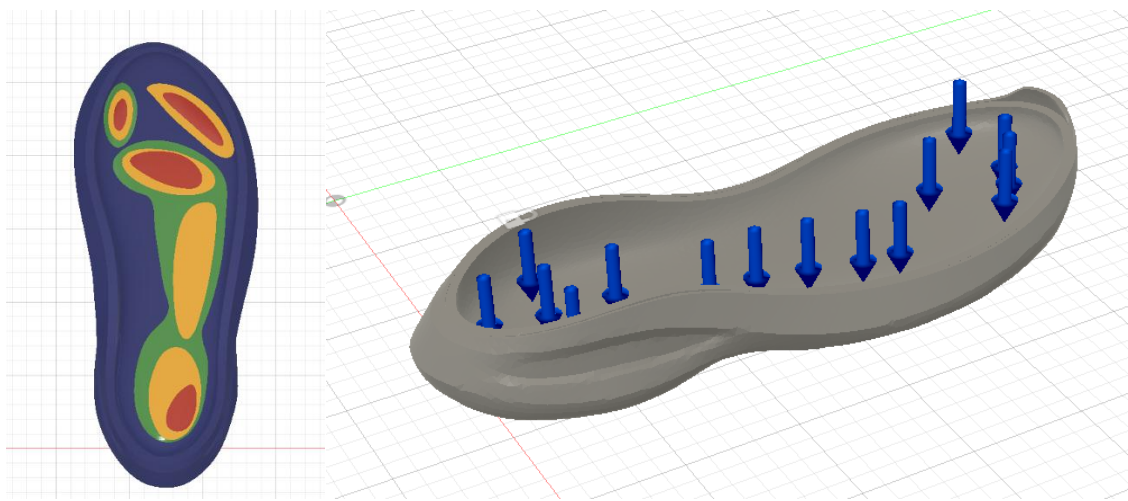
Zona	Fuerza (N)	Área estimada (cm ²)	Presión (kPa)	Referencia literatura
Roja	240,3	28	85,8	Picos hasta 200 kPa (Elvira Hernández, 2021)
Amarilla	54,9	20	27,5	Zona metatarsal media
Verde	34,3	15	22,9	Mediopié, baja carga
Azul	13,7	10	13,7	Bordes, carga mínima

Autor

Nota. Los valores de presión calculados son coherentes con los rangos reportados por Elvira Hernández (2021), quien documenta presiones de hasta 200 kPa en zonas críticas del pie. Las áreas de contacto corresponden a estimaciones para talla 4 y pueden variar según la morfología del usuario.

Figura 45

Ingreso de datos a Fusión para aplicar optimización topológica.

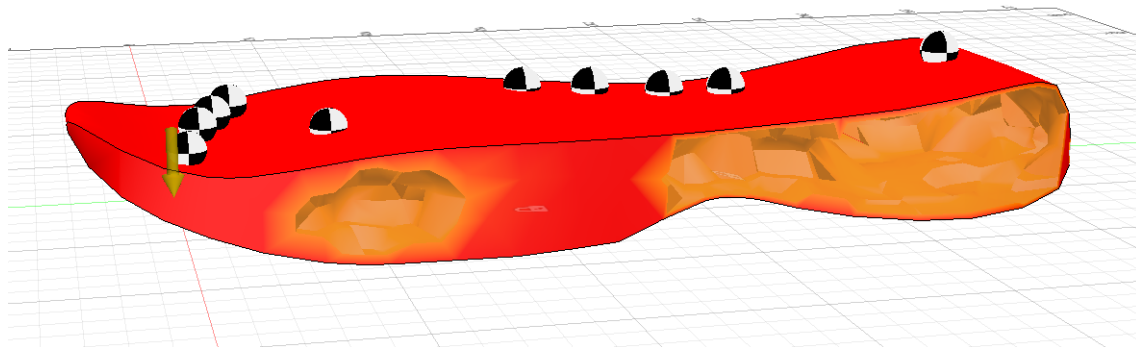


Autor

El mapa de calor resultante muestra una distribución de esfuerzos que coincide de forma significativa con el mapa de presiones plantares que originó el diseño. Las zonas en **rojo intenso** — que representan las regiones de mayor demanda estructural y que el algoritmo preserva como material imprescindible — se concentran en el **talón y la región metatarsal**, correspondientes exactamente a las zonas roja y amarilla del mapa cromático de presiones. Las zonas en **naranja y amarillo** indican regiones de esfuerzo intermedio, localizadas en la transición hacia el mediopié, coherentes con las zonas verde y azul de menor carga plantar.

Figura 46

Resultado de la optimización topológica.



Autor

Este resultado tiene una implicación directa para el argumento central del proyecto: el algoritmo de optimización topológica computacional, alimentado con las mismas cargas derivadas del análisis de pisada del usuario, distribuye el material estructuralmente necesario en las mismas regiones que el proceso de diseño manual identificó como zonas de alta demanda mecánica. Dicho en términos simples, el mapa de presiones plantares y el resultado de la simulación FEA señalan el mismo lugar. Esto no es una coincidencia — es la validación computacional del principio metodológico del proyecto.

Es importante señalar que esta simulación constituye una **aproximación** al comportamiento real de la suela por dos razones. Primera, el material fue modelado como sólido isótropo al 100% de relleno, cuando en realidad cada zona del prototipo tiene una densidad de relleno diferente que modifica sus propiedades mecánicas efectivas. Segunda, Fusion 360 no soporta materiales ortotrópicos, lo que significa que la anisotropía inherente al proceso FDM donde las propiedades varían según la dirección de deposición de las capas no está representada en el modelo. Estas limitaciones son

reconocidas en la literatura de simulación para manufactura aditiva y son esperables en el contexto. Sin embargo, los resultados cualitativos la coincidencia entre zonas de alta demanda estructural y zonas de alta presión plantar son suficientemente robustos para respaldar el argumento del proyecto.

13. Verificación R10

La verificación del requerimiento R10 se realizó mediante comparación directa entre el peso del prototipo fabricado y unos tenis deportivos, mismos que se utilizaron en la prueba de validación. El calzado prototipo ensamblado registró un peso de 263 gramos frente a los 313 gramos del tenis de running convencional del usuario, representando una reducción de 50 gramos equivalente al 16% del peso total. Este resultado no alcanza el umbral del 20% definido en R10, pero la comparación se realizó entre dos calzados completos de uso deportivo, no entre una suela sólida y una suela con relleno parcial, que habría producido una diferencia posiblemente mayor. El tenis convencional del usuario es un producto de running de alta gama, fabricado con materiales y procesos industriales optimizados para el rendimiento y la ligereza. Que un primer prototipo universitario ensamblado con componentes comerciales accesibles resulte un 16% más liviano que ese producto es, en ese contexto, un resultado que considero destacable.

Adicionalmente la simulación en identificó que el 40% del volumen de la suela es estructuralmente prescindible bajo las cargas del usuario, lo que indica que iteraciones futuras con ajustes en las densidades de relleno de las zonas de menor demanda — zonas azul y verde — tienen margen concreto para ampliar esa diferencia y alcanzar el umbral establecido. Entonces se considera parcialmente cumplido, la reducción de peso es real y medible, el principio de uso eficiente de material está validado tanto física como

computacionalmente, y el camino hacia el cumplimiento pleno del criterio está trazado para una posible segunda iteración.

14. Oportunidades de mejora

- Los resultados obtenidos a lo largo del proyecto permiten identificar con precisión un conjunto de oportunidades de mejora para iteraciones futuras del diseño. Estas no las veo como señales de fracaso sino como el producto natural de un primer ciclo riguroso, cada da área de mejora identificada está sustentada en evidencia experimental concreta y tiene una solución técnica aparentemente viable.
- El hallazgo más específico del protocolo de validación fue la percepción de incomodidad en los bordes laterales del talón, zona de transición entre la geometría de mayor rigidez El usuario recomendó expresamente redondear esos bordes para suavizar el contraste mecánico entre zonas. En términos de diseño, esto se traduce en incorporar una **zona de transición gradual** entre aristas.
- La reducción de peso obtenida fue del 16% frente al 20% establecido como criterio de éxito en R10. La simulación identificó que el 40% del volumen de la suela es estructuralmente prescindible bajo las cargas del usuario, lo que indica que existe margen real para reducir aún más las densidades de relleno en las zonas de menor demanda mecánica particularmente la zona azul (15%) y verde (18%) sin comprometer la integridad estructural. Una reducción de entre 2 y 5 puntos porcentuales en esas zonas podría ser suficiente para superar el umbral del 20%.
- El protocolo de validación se ejecutó con un único usuario, lo que es coherente con el alcance de un proyecto de diseño personalizado, pero limita la generalización de los resultados. Una segunda iteración del proyecto debería incorporar al menos dos o tres usuarios con perfiles de pisada diferentes para evaluar la replicabilidad del proceso

metodológico que es precisamente el objetivo de R9 y establecer si el flujo de trabajo fotopodograma, mapa de presiones, geometrías diferenciadas produce resultados consistentes entre distintos usuarios.

- La prueba de validación comparativa se basó exclusivamente en la percepción subjetiva del usuario mediante escala Likert. Una iteración futura con acceso a plantillas instrumentadas permitiría obtener datos cuantitativos de distribución de presiones antes y después del uso de la suela, cerrando el ciclo de validación con evidencia biomecánica objetiva y no solo perceptual.

15. Conclusiones generales

Este trabajo demostró que el principio de optimización topológica puede implementarse de forma viable en el diseño de suelas de calzado deportivo personalizado mediante manufactura aditiva, sin recurrir a algoritmos computacionales de elementos finitos ni a equipos de laboratorio especializados. La estrategia propuesta, asignar geometrías de relleno de diferente rigidez a zonas del modelo según la distribución de presiones plantares del usuario produjo una suela con propiedades mecánicas heterogéneas y adaptadas al perfil biomecánico específico de la persona para quien fue diseñada. Este resultado constituye una aportación metodológica concreta al campo del diseño industrial personalizado, un proceso replicable, accesible y fundamentado experimentalmente que traduce datos biomecánicos individuales en decisiones de fabricación diferenciadas.

El prototipo fabricado fue sometido a una prueba de uso comparativa frente a un calzado de running de alta gama, obteniendo un promedio general de 3,92 sobre 5 frente a 4,38 del calzado convencional. Aunque el criterio de éxito de promedio $\geq 4/5$ no fue

alcanzado en esta primera iteración, la diferencia de 0,46 puntos frente a un producto industrialmente optimizado es un resultado competitivo para un primer prototipo. Más significativo aún fue que el usuario calificó la respuesta de la suela a su tipo de pisada con 5/5 superando al calzado convencional en ese criterio específico lo que confirma que el principio metodológico funciona: una suela diseñada a partir del mapa de presiones del propio usuario es percibida como más ajustada a su pisada que su calzado habitual.

La simulación computacional de Shape Optimization en Fusion 360 aportó validación complementaria al proceso, el algoritmo identificó como material estructuralmente necesario las mismas zonas que el análisis de pisada había señalado como de alta demanda mecánica, talón y región metatarsal, confirmando que la distribución de material propuesta en el diseño es coherente con los principios de la optimización topológica. Esta convergencia entre el método experimental y el computacional constituye uno de los aportes más sólidos del proyecto.

El proceso de diseño se estructuró bajo la metodología Design Thinking, lo que permitió partir de las necesidades reales del usuario, desconocimiento de su pisada, molestias en el talón, desgaste desigual del calzado y construir un producto que responde directamente a esas necesidades desde su arquitectura interna. La fabricación en TPU mediante impresión 3D FDM con impresora Bambu A1 demostró ser una plataforma tecnológica suficiente para implementar la variación de geometrías de relleno a escala de producto funcional, con un resultado estructuralmente íntegro y un peso total 16% inferior al calzado convencional del usuario.

En síntesis, este proyecto demuestra que el diseño industrial, apoyado en herramientas de manufactura aditiva accesibles y en datos biomecánicos obtenidos con

instrumentos no especializados, puede producir soluciones de calzado personalizado que compiten funcionalmente con productos de alta industria en criterios de respuesta a la pisada, ligereza y coherencia estructural. Las áreas de mejora identificadas son específicas, localizadas y técnicamente abordables, lo que posiciona este trabajo no como un resultado cerrado sino como una primera iteración exitosa con fundamento claro para su continuación.

15.1. Conclusiones por objetivo específico

Objetivo específico 1 *Explorar el estado del arte en optimización topológica aplicada al calzado deportivo.*

La revisión de literatura permitió identificar que la optimización topológica computacional, si bien ofrece resultados estructuralmente óptimos, presenta limitaciones significativas para su implementación directa en procesos de diseño personalizados y replicables. Los casos de implementación industrial revisados, entre ellos el modelo Adidas MC87 4D y desarrollos de ON Running y Puma, recurren a tecnologías de manufactura de alta complejidad y costo que no son tan accesibles. Frente a ese panorama, se hicieron aproximaciones alternativas que implementan el principio topológico mediante variación de geometrías de relleno en manufactura aditiva, lo que validó la pertinencia del enfoque propuesto en este trabajo. La exploración del estado del arte no solo fundamentó la metodología, sino que permitió establecer con precisión la distinción entre optimización topológica computacional clásica y la aproximación experimental desarrollada en este proyecto, diferenciación que resultó determinante para enmarcar correctamente el alcance y los aportes del trabajo.

Objetivo específico 2 *Definir restricciones técnicas y ambientales mediante el análisis experimental de la distribución de presiones plantares.*

El análisis experimental de la pisada del usuario mediante fotopodograma bajo condiciones de caminata, trote y carrera produjo un mapa cromático de presiones dividido en cuatro zonas diferenciadas, que constituyó el criterio central de diseño de toda la suela. Este proceso demostró que una herramienta de bajo costo y aplicación directa como el fotopodograma con tinta es suficiente para obtener información biomecánica individualizada con el nivel de resolución requerido para tomar decisiones de diseño diferenciadas por zona. El mapa resultante identificó el talón y la región metatarsal como zonas de alta demanda mecánica, los bordes laterales como zonas de baja carga, y el mediopié como zona de transición —distribución que fue posteriormente corroborada por la simulación computacional y por la percepción del usuario durante la validación. El objetivo fue cumplido en su totalidad.

Objetivo específico 3 *Evaluar el comportamiento mecánico de geometrías de relleno impresas en TPU y asignarlas a las zonas de presión correspondientes.*

El ensayo experimental de deformación bajo carga estática controlada sobre cuatro geometrías de relleno impresas en TPU 95A permitió establecer una jerarquía de rigidez con densidades de 35% para la zona roja, 25% para la amarilla, 18% para la verde y 15% para la azul. El prototipo fabricado con esta configuración demostró integridad estructural completa, sin fallas ni delaminación entre zonas, y fue percibido por el usuario como funcionalmente coherente con su patrón de pisada. El objetivo fue cumplido. La única área de ajuste identificada fue la transición geométrica entre zonas, cuyos bordes

laterales en el talón generaron incomodidad moderada que el usuario recomendó suavizar mediante redondeo de aristas.

16. Recomendaciones

La primera y más concreta recomendación que surge de este proyecto es **redondear los bordes de transición entre zonas de diferente rigidez**, particularmente en los laterales del talón. El propio usuario lo señaló con precisión al finalizar la prueba, la incomodidad no estaba en las zonas de alta presión, donde el diseño funcionó correctamente, sino en el límite entre la geometría más rígida y la más flexible. Este ajuste no requiere rediseñar la suela desde cero ni cambiar la lógica de distribución de zonas. Es una modificación geométrica, ejecutable directamente en el modelo, que tiene el potencial de transformar un prototipo con resultado parcial en uno que supere el criterio de validación en una segunda prueba.

La segunda recomendación apunta a **ajustar las densidades de relleno de las zonas de menor carga**. La simulación identificó que el 40% del volumen de la suela es estructuralmente prescindible, y la reducción de peso obtenida fue del 16% frente al 20% establecido como criterio. Reducir entre 2 y 5 puntos porcentuales el relleno de las zonas azul y verde, que ya están en sus mínimos funcionales de 15% y 18%, requiere primero verificar experimentalmente que esas densidades menores no comprometen la integridad estructural bajo carga dinámica. Si el ensayo de deformación confirma que el material aguanta, el criterio R10 se alcanza sin ningún cambio de diseño adicional.

En tercer lugar, se podría **validar el proceso con más usuarios con perfiles de pisada diferentes**. El proyecto demostró que el flujo fotopodograma - mapa de presiones -geometrías diferenciadas - prototipo funciona para un usuario específico. Pero una de las

hipótesis del proyecto es que este proceso es replicable y produce resultados consistentes para distintas personas. Aplicar el mismo protocolo a un usuario pronador y a uno supinador, por ejemplo, produciría mapas cromáticos distintos, asignaciones de geometría distintas y prototipos distintos. Si los tres usuarios reportan que su suela responde mejor a su pisada que su calzado habitual, el argumento de la personalización queda completamente validado.

Finalmente, se recomienda **explorar la incorporación de zonas de transición gradual como una quinta geometría de relleno** dentro del modelo de distribución de zonas. En lugar de cuatro cuerpos con densidades discretas, 15%, 18%, 25% y 35%, una iteración futura podría incluir franjas de transición con densidades intermedias entre zonas adyacentes, reproduciendo de forma más fiel el comportamiento que los algoritmos de optimización topológica generan cuando trabajan sin restricciones de manufactura. Esta modificación agregaría complejidad al modelo, pero reduciría el contraste mecánico en las interfaces y respondería directamente a la observación más importante que dejó la validación con el usuario.

17. Referencias Bibliográficas

- Adidas. (2024). *MC87 4D Spikeless Golf Shoes* [Fotografía de producto].
<https://www.adidas.com.ph/mc87-4d-spikeless-golf-shoes/ID0225.html>
- Agresta, C., Giacomazzi, C., Harrast, M., & Zandler, J. (2022). Running injury paradigms and their influence on footwear design features and runner assessment methods: A focused review to advance evidence-based practice for running medicine clinicians. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 815675.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2022.815675>
- Autodesk Inc. (2024). *Autodesk Fusion 360* (Versión 2.0) [Software]. Autodesk.
- Baumfeld, D., Macedo, B., Raduan, F., Nery, C., Baumfeld, T., & Zambelli, R. (2023). Towards functionally individualised designed footwear recommendation for overuse injury prevention: A scoping review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 15, 148. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00760-x>
- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2004). *Topology optimization: Theory, methods, and applications* (2.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>
- Blender Foundation. (2024). *Blender* (Versión 4.2) [Software]. Blender Foundation.
- Brown, T. (2009). *Change by design: How design thinking transforms organizations and inspires innovation*. HarperBusiness.
- Chatpun, S., Dissaneewate, T., Kwanyuang, A., Nouman, M., Srewaradachpaisal, S., & Movrin, D. (2025). *Effects of infill pattern and density on mechanical*

performance and plantar pressure distribution of 3D-printed insoles during walking. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0894.v1>

Desmyttere, G., Hajizadeh, M., Bleau, J., & Begon, M. (2023). 3D printing of individual running insoles: A case study. *Orthopedic Research and Reviews*, *15*, 105–118. <https://doi.org/10.2147/ORR.S399624>

Elvira Hernández, J. (2021). *Estudio y desarrollo de herramientas de optimización topológica para el diseño de mediasuelas de zapatillas* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/68949/>

Gómez, L., Velásquez, S., Castaño, P., Valderrama, S., & Ruíz, M. (2018). La antropometría y la baropodometría como técnicas de caracterización del pie y herramientas que proporcionan criterios de ergonomía y confort en el diseño y fabricación de calzado: Una revisión sistemática. *Prospectiva*, *16*(1), 7–17. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1305>

Hamoud, M., Abdalaziz, O., Barakat, A., & Gad, A. (2024). Effect of infill patterns and print orientation on the mechanical properties of manufactured polylactic acid parts. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, *334*(3), 5–18. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.23>

Jandova, S., & Mendricky, R. (2022). Benefits of 3D printed and customized anatomical footwear insoles for plantar pressure distribution. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *9*(6), 547–556. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0002>

- Kim, H. J., & Lee, S. (2023). Study on CNT/TPU cube under the 3D printing conditions of infill patterns and density. *Scientific Reports*, *13*, 17765. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44951-5>
- Kovacs, B., Ferenczi, T., & Tornai, R. (2025). Survey of FOSS 3D/2D graphics software Blender usage in science, academia, and industry. *The Visual Computer*. <https://doi.org/10.1007/s00371-025-04281-1>
- Li, J., Jung, I., & Lee, S. (2024). Analysis of plantar pressure of midsole prepared by 3D printed biomimetic structures with different densities. *Fashion and Textiles*, *11*, 34. <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00402-x>
- Li, Z., Yang, X., & Chen, H. (2018). Research and application of Autodesk Fusion 360 in industrial design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *359*, 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/359/1/012037>
- Llorente-Cejudo, A., Pernas-Velarde, A., & Vallverdú-Bayés, J. (2025). Effectiveness of the AI using different typologies of design methods. *Research in Engineering Design*. <https://doi.org/10.1007/s00163-025-00449-x>
- Luo, G., Sterzing, T., & Sun, X. (2020). Systematic review of the role of footwear constructions in running biomechanics: Implications for running-related injury and performance. *Journal of Healthcare Engineering*, *2020*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2020/9328947>
- Luo, G., Sun, X., Ahamed, N. U., Fu, W., & Ding, H. (2022). The implications of sports biomechanics studies on the research and development of running shoes: A

systematic review. *Bioengineering*, 9(10), 543.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering9100543>

Moticon GmbH. (2024). *OpenGo sensor insoles: Wireless pressure, force and motion sensing* [Producto]. Moticon.

Muir, B. C., & Li, J. S. (2022). Evaluation of novel plantar pressure-based 3D printed insoles. *Clinical Biomechanics*, 98, 105739.
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105739>

Murillo-Alemán, G., Urrio-Carrillo, G., Cruz-López, S., Urrio-López, A., Carba-López, D. E., Guereca-Tic, J. R., & González-Ibarra, J. R. (2024). Biomechanical evaluation of plantar pressure distribution towards a customized 3D orthotic device: A methodological case study through a finite element analysis approach. *Applied Sciences*, 14(4), 1650. <https://doi.org/10.3390/app14041650>

Nike Inc. (2022). *FY22 Nike, Inc. impact report*. Nike.

Nordin, M., & Frankel, V. H. (2001). *Basic biomechanics of the musculoskeletal system* (3.^a ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

Procházka, M., & Gopsill, J. (2025). Artificial intelligence in generative design: A structured review of trends and opportunities in techniques and applications. *Designs*, 9(4), 79. <https://doi.org/10.3390/designs9040079>

Raut, N. P., Bhosale, S. M., Salunkhe, M. S., Kolekar, A. B., & Gombi, S. L. (2025). Effects of part orientation, infill pattern, and infill density on the mechanical properties of 3D printed. En M. Mallaiah, S. Thapliyal & S. Chandra Bose (Eds.),

Recent advances in additive manufacturing, Volume 2. ICAM 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3165-0_36

Rodríguez-Sanz, D., Calvo-Lobo, C., Unda-Solano, F., Sanz-Corbalán, I., Romero-Morales, C., & López-López, D. (2021). Concordance between pressure platform and pedigraph. *Diagnostics*, *11*(12), 2322. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11122322>

Stöggel, T., & Martinier, A. (2017). Validation of Moticon's OpenGo sensor insoles during gait, jumps, balance and cross-country skiing specific imitation movements. *Journal of Sports Sciences*, *35*(2), 196–206. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1161205>

Vicén, J. A., del Coso Garrigós, J., González Millán, C., & Salinero Martín, J. J. (2011). Análisis de las características del calzado deportivo y su influencia en la prevención de lesiones. *Journal of Sport and Health Research*, *3*(1), 45–52.

Vizcom Inc. (2024). *Vizcom: AI-powered design tool for industrial designers* [Software]. Vizcom.

18. Apéndices

Apéndice A. User Persona

El siguiente instrumento sintetiza el perfil del usuario desde donde se fundamentó el proceso de diseño.

<https://drive.google.com/drive/folders/11hyZlAiL2CgbfVUusTF1d8nqTA804kxf?usp=sharing>

Apendice B. Mapa de empatia

Se profundiza en la comprensión del usuario Este instrumento, permitió identificar que el desconocimiento del usuario sobre su propia pisada era la necesidad central que justificaba el análisis de presiones plantares como punto de partida del diseño.

<https://drive.google.com/drive/folders/11hyZlAiL2CgbfVUusTF1d8nqTA804kxf?usp=sharing>