



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial
Y Desarrollo de Producto

**Diseño y prototipado de calzado personalizado
por impresión 3D en un modelo de economía circular**

Autor:

Mario Hernández Fernández

Tutor:

Alberto Mansilla Gallo

Departamento:

CMEIM, Expresión Gráfica en la Ingeniería,
ICGF, IM e IPF

Valladolid, septiembre 2025

Deseo expresar mi más sentido agradecimiento a las personas que me han apoyado en la culminación de este Trabajo de Fin de Grado.

A **Alberto Mansilla Gallo**, por su invaluable guía y asesoramiento, que han sido la brújula que me ha dirigido en este estudio.

A todo el equipo de **Orthopint 3D**, por su generosa ayuda y por haberme permitido utilizar sus recursos y equipos esenciales para el desarrollo de este proyecto.

Y a **papá y mamá**, por su paciencia infinita y su apoyo incondicional.

A todos vosotros, muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado tiene como propósito el diseño y prototipado de un calzado a medida impreso completamente en 3D en un modelo de economía circular. El calzado diseñado responderá a aspectos relacionados con la estética, ergonomía, confort, funcionalidad y sostenibilidad. A lo largo de este proyecto se analizará el estado de la técnica actual referida a la fabricación de calzado por fabricación aditiva de las empresas líderes y emergentes. Se estudiarán los principios biomecánicos básicos necesarios para el diseño de un calzado óptimo que se adapte al pie y sus movimientos. Se expondrá el proceso de diseño que se ha llevado a cabo, desde la concepción del producto hasta la fase de postprocesado del prototipo. Se evaluará la viabilidad del prototipo y de la fabricación aditiva como alternativa a la fabricación tradicional de calzado.

PALABRAS CLAVE

Fabricación aditiva | Calzado personalizado | Prototipado | Sostenibilidad | Diseño de producto

ABSTRACT

The purpose of this final degree project is the design and prototyping of a custom-made footwear completely 3D printed in a circular economy model. The designed footwear will respond to aspects related to aesthetics, ergonomics, comfort, functionality and sustainability. Throughout this project we will analyze the current state of the art in additive manufacturing of footwear by leading and emerging companies. The basic biomechanical principles necessary for the design of optimal footwear that adapts to the foot and its movements will be studied. The design process that has been carried out, from product conception to the post-processing phase of the prototype, will be presented. The viability of the prototype and of additive manufacturing as an alternative to traditional footwear manufacturing will be evaluated.

KEY WORDS

Additive Manufacturing | Customized Footwear | Prototyping | Sustainability | Product Design

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. MEMORIA

1. Introducción.....	13
1.1. Justificación del proyecto.....	13
1.2. Objetivos generales y específicos.....	14
1.3. Estructura del documento.....	14
2. Estado del arte.....	17
2.1 Contexto de la industria del calzado.....	17
2.1.1 Contexto histórico.....	17
2.1.2 Contexto del mercado.....	22
2.1.3 Segmentación del mercado.....	25
2.1.4 Principales actores del sector.....	27
2.1.5 Fabricación de calzado tradicional y a medida.....	33
2.2 Tecnologías de impresión 3D de calzado.....	35
2.2.1 Innovaciones del calzado impreso en 3D.....	35
2.2.1.1 Empresas líderes en impresión 3D de calzado.....	35
2.2.1.2 Empresas emergentes.....	39
2.2.2 Tecnologías de impresión en 3D.....	42
2.2.3 Ventajas y limitaciones de la impresión 3D de calzado.....	47
2.2.4 Fabricación tradicional vs Impresión 3D.....	49
3. Fundamentos del diseño de calzado.....	50
3.1 Estructura básica del calzado.....	50
3.2 Fundamentos anatómicos del pie humano.....	53
3.3 Biomecánica del pie humano.....	58
3.4 Aspectos biomecánicos relacionados con el calzado.....	61
4. Desarrollo técnico de diseño del calzado deportivo-casual.....	64
4.1 Inspiración estética.....	64
4.2 Bocetos e ideas iniciales.....	65
4.2.1 Proyecto Aqua.....	67
4.2.2 Proyecto Croc.....	68
4.2.3 Proyecto Humo.....	69
4.3 Diseño final: Estética orgánica, funcional y sostenible.....	70
4.3.1 Upper.....	72

4.3.2 Mediasuela.....	73
4.3.3 Suela.....	74
4.3.4 Cuello.....	74
4.3.5 Proceso de modelado 3D de la zapatilla mediante software CAD.....	75
4.3.5.1. Diseño de la horma.....	75
4.3.5.2. Modelado de la zapatilla.....	78
5. Prototipado y fabricación.....	82
5.1 Equipo utilizado.....	82
5.2 Materiales escogidos.....	83
5.3 Parámetros clave de impresión.....	85
5.4 Postoricesado.....	88
5.5 Evaluación del prototipo.....	89
II.CONCLUSIONES.....	93
III.BIBLIOGRAFIA.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zapato prehistórico hallado en la cueva de Areni-1, Vayotz Dzor, Armenia [8].....	17
Figura 2. Sandalias pertenecientes a la esposa de Ramsés II, soberana de Nefertari [34].....	18
Figura 3. Sandalias de Psusennes. https://zapatotirapie.blogspot.com/	18
Figura 4. Caligae romana con suela tachonada con hierro, usada por el ejército. https://es.wikipedia.org/wiki/Caligae	18
Figura 5. Coturnos, usados por actores en los teatros. https://elmalditoirlandes.blogspot.com/	18
Figura 6. Ilustraciones de la Soleae romana. https://o-sur.com/	18
Figura 7. Zapato poulaine del siglo XV, del museo de Bellas Artes de Boston [42].....	19
Figura 8. Bota simple, usada por las clases más bajas. https://www.outfit4events.com/	19
Figura 9. Alpargata para mujer, Inglaterra 1660–1675 [42].....	19
Figura 10. Retrato de Luis XVI con zapatos de tacón, de Hyacinthe Rigaud. https://www cope.es/	19
Figura 11. Par de zapatos para niño de la Revolución Industrial [42].....	20
Figura 12. Botas simples, fabricadas en una línea de producción [42].....	20
Figura 13. Fábrica de zapatos. Producción en cadena de calzado con tallas estandarizadas [42].....	20
Figura 14. Zapatos Dior, diseñados por Roger Vivier en 1950 [42].....	20
Figura 15. Variedad de tipos de calzado comercializados en la actualidad. https://www.istockphoto.com/	21
Figura 16. Producción Mundial de calzado [14].....	22
Figura 17. Producción Mundial de calzado [14].....	22
Figura 18. Exportaciones de calzado globales [14].....	23
Figura 19. Consumo mundial de calzado [14].....	23
Figura 20. Importaciones globales de calzado [14].....	23
Figura 21. Fabricación de calzado en España en 2024 [14].....	24
Figura 22. Índice de Cifra de la industria del cuero y calzado en España 2024 [14].....	24
Figura 23. Volumen y Valor de Exportación en España desde 2015 hasta 2024 [14].....	24
Figura 24. Volumen y Valor de Importación en España desde 2022 hasta 2024 [14].....	24
Figura 25. Segmentación del mercado según el tipo de calzado [24].....	25
Figura 26. Logos usados por la compañía desde su creación hasta la actualidad. https://www.instagram.com/	27
Figura 27. Phil Knight sosteniendo en su mano dos zapatillas de la marca [27].....	27
Figura 28. Michael Jordan con las míticas Air Jordan 1 “Black Toe”. https://elpais.com/	27
Figura 29. Nike Air Force 1. https://www.nike.com/	28
Figura 30. Nike Air Jordan 1 “Chicago”. https://www.nike.com/	28
Figura 31. Nike Air Max 97. https://www.nike.com/	28
Figura 32. Nike Vaporfly. https://www.nike.com/	28
Figura 33. Logos usados en la actualidad por la compañía. https://es.linkedin.com/	29
Figura 34. Adolf “Adi” Dassler sosteniendo una zapatilla con tacos. https://www.impulsyn.com/	29
Figura 35. Zapatillas con las que la Selección Alemana de Fútbol ganó el Mundial en 1954. https://www.adidas.es/	29
Figura 36. Edición limitada de la colaboración de Adidas con la serie Dragon Ball Z. https://www.shoanime.com/	29
Figura 37. Adidas Stan Smith. https://www.adidas.es/	29
Figura 38. Adidas Samba. https://www.adidas.es/	30
Figura 39. Adidas Ultraboost. https://www.adidas.es/	30
Figura 40. Adidas Yeezy Boost. https://www.adidas.es/	30
Figura 41. Logos usados por la marca desde su fundación hasta la actualidad. https://koinonia.wordpress.com/	31
Figura 42. Rudolf Dassler con un ejemplar de las Puma Super Atom. https://fashionoutcom.wordpress.com/	31
Figura 43. Diego Armando Maradona atándose sus zapatillas Puma. https://www.pinterest.com/	31
Figura 44. Tommie Smith en el podio haciendo el saludo de “Black Power”. https://hyperbole.es/	31
Figura 45. Puma Suede. https://eu.puma.com/	32
Figura 46. Puma Clyde. https://eu.puma.com/	32
Figura 47. Puma Speedcat Leather y Ballet. https://eu.puma.com/	32
Figura 48. Puma Cali Varsity. https://eu.puma.com/	32
Figura 49. Línea de producción de Nike. https://consent.yahoo.com/	33
Figura 50. Hormas estandarizadas. https://airsonshoes.com/	33
Figura 51. Fabricación de la horma para pies deformados. https://www.ortopediasilvio.com/	33
Figura 52. Ejemplo de zapato ortopédico. https://dei.mowvu.sbs/	33
Figura 53. Modelo Zoom Vaporfly Elite Flyprint fabricado con tecnología FMD. https://25gramos.com/	35
Figura 54. Deposición de TPU fundido para la fabricación del Upper Flyprint. https://25gramos.com/	36
Figura 55 y 56. Eliud Kipchoge corriendo calzando las Zoom Vaporfly Elite Flyprint. https://www.nike.com/	36
Figura 57. Mediasuela fabricada con tecnología DLS [4].....	37
Figura 58. Zapatilla FutureCraft 4D de Adidas [19].....	37
Figura 59. Zapatilla Mostro 3D de Puma impresa con tecnología DLS [1].....	37

Figura 60. Zapatilla Mostro 3D de Puma [40].....	38
Figura 61. Cornelius Schmitt, CEO de Zellerfeld, junto a Heron Preston con el prototipo HERON01. https://www.forbes.com [39]	39
Figura 62. Sección de una zapatilla de Zellerfeld con el relleno de impresión. https://p3d.mx/	39
Figura 63. Muestra de cómo sacar las medidas de tu pie para realizar un pedido en Zellerfeld [49].....	40
Figura 64. Diversas zapatillas adquiribles en la tienda web de Zellerfeld [49].....	40
Figura 65. Nike AirMax 1000 en colaboración con Zellerfeld [25].....	40
Figura 66. Impresoras 3D de Prusa imprimiendo calzado de Koobz [48].....	41
Figura 67 y 68. Zapatillas impresas por Koobz [48].....	41
Figura 69. Scott Crump sosteniendo piezas impresas mediante FMDF. https://news.wsu.edu/	42
Figura 70. Impresión con tecnología FMDF. https://atienzaycliment.com/	42
Figura 71. Impresión con tecnología FMDF. https://www.3dnatives.com/	43
Figura 72. Prueba de flexibilidad de una suela fabricada con TPU. https://support.bcn3d.com/	43
Figura 73. Impresión 3D con la tecnología DLS. https://www.rpm-factories.de/	44
Figura 74. Partes que conforman una impresora DLS. https://www.protolabs.com/	44
Figura 75. Impresora DLS de Carbon 3D [17].....	45
Figura 76. Hormas estandarizadas para diseñar calzado. https://www.trcanje.rs/	50
Figura 77. Upper Flyknit diseñado por Nike. https://www.nike.com/	50
Figura 78. Sección de una zapatilla con el contrafuerte. https://www.latter.ee/	51
Figura 79. Plantillas de espuma. https://www.amazon.es/	51
Figura 80 y 81. Mediasuela fabricada con materiales plásticos. https://niviaenterprise.com/	51
Figura 82. Distintos diseños de suelas. https://runrepeat.com/	52
Figura 83. Zapatilla impresa en 3D por Zellerfeld. https://www.3dnatives.com/	52
Figura 84. Anatomía ósea del tobillo [47].....	53
Figura 85. Vista superior de la estructura ósea del pie humano. https://apiedecalleplasencia.es/	54
Figura 86. Plano frontal (A) y plano sagital (B) de la estructura ósea del talón [47].....	54
Figura 87. Arco longitudinal medial. https://www.fisioterapia-online.com/	54
Figura 88. Arco longitudinal lateral. https://www.fisioterapia-online.com/	55
Figura 89. Arco transversal. https://www.fisioterapia-online.com/	55
Figura 90. Representación de la estructura ósea del empeine. https://middlesexhealth.org/	55
Figura 91. Articulación tibioperoneoastragalina. https://www.kenhub.com/	56
Figura 92. Articulación subastragalina. https://www.stryker.com/	56
Figura 93. Articulación mediotarsiana. https://www.kenhub.com/	56
Figura 94. Flexo-extensión tibioperoneoastragalina. https://es.skimble.com/	57
Figura 95. Inversión y eversión subastragalina. https://es.scribd.com/	57
Figura 96. Abducción y aducción del tobillo. https://x.com/	57
Figura 97 y 98. Contacto inicial y fase inicial de apoyo [20].....	58
Figura 99. Fase media del apoyo [20].....	59
Figura 100 y 101. Fase final del apoyo y previa a la oscilación [20].....	59
Figura 102, 103 y 104. Fase primera, media y final de la oscilación [20].....	60
Figura 105. Fase de vuelo durante la carrera.....	60
Figura 106. Fases de impulso, despegue, vuelo y aterrizaje en salto.....	61
Figura 107. Variedad de zapatillas impresas en 3D de Zellerfeld [50].....	64
Figura 108. Bocetos iniciales. Elaboración propia	65
Figura 109. Boceto con anotación de diseño. Elaboración propia.....	66
Figura 110. Zapatilla "Aqua". Elaboración propia.....	67
Figura 111. Ondas formadas en el agua. https://estudoemcasaapoia.dge.mec.pt/	67
Figura 112. Prototipos de "Aqua". Elaboración propia.....	67
Figura 113. Proyecto "Croc". Elaboración propia.....	68
Figura 114. Sandalias Crocs.....	68
Figura 115. Prototipo de zapatilla. Elaboración propia.....	68
Figura 116. Prototipo de zapatilla. Elaboración propia.....	68
Figura 117. Proyecto "Humo v.1". Elaboración propia.....	69
Figura 118. Zapatilla Hezi, de Khamis Studio [50].....	69
Figura 119. Renderizado de Proyecto "Humo v2". Elaboración propia.....	69
Figura 120. Renderizado del diseño final. Elaboración propia.....	70
Figura 121. Vista lateral cortada de la zapatilla y horma. Elaboración propia.....	70
Figura 122 y 123. Vista superior y lateral de la zapatilla. Elaboración propia.....	71
Figura 124. Partes funcionales de la zapatilla. Elaboración propia.....	71
Figura 125. Vista lateral del Upper. Elaboración propia.....	72
Figura 126 y 127. Upper resaltado en azul. Elaboración propia.....	72

Figura 128. Vista lateral de la mediasuela. Elaboración propia.....	73
Figura 129. Mediasuela resaltada en verde. Elaboración propia.....	73
Figura 130. Suela. Elaboración propia.....	74
Figura 131. Cuello resaltado en amarillo. Elaboración propia.....	74
Figura 132 y 133. Escaneados del pie con Polycam. Elaboración propia.....	75
Figura 134 y 135. Escáner Einstar y escaneado 3D del pie. Elaboración propia.....	75
Figura 136 y 137. Modelo del pie y horma superior. Elaboración propia.....	76
Figura 138 y 139. Modelo de la huella y horma inferior. Elaboración propia.....	76
Figura 140. Horma en Rhino 8. Elaboración propia.....	77
Figura 141. Modelo final de la horma. Elaboración propia.....	77
Figura 142. Curvas planas. Elaboración propia.....	78
Figura 143 y 144. Curvas de la mediasuela inferior. Elaboración propia.....	78
Figura 145. Vista lateral de la mediasuela. Elaboración propia.....	79
Figura 146. Superficies de unión de la mediasuela. Elaboración propia.....	79
Figura 147. Bordes desnudos de la mediasuela. Elaboración propia.....	80
Figura 148. Modelo del upper completo. Elaboración propia.....	81
Figura 149. Dibujo de la suela. Elaboración propia.....	81
Figura 150. Definición de la suela unida a la mediasuela. Elaboración propia.....	81
Figura 151. Hellbot Magna SE 300. https://www.facebook.com/	82
Figura 152. Original Prusa XL. https://help.prusa3d.com/	82
Figura 153. Bobina de TPU 95A de Filaflex. https://recreus.com/	84
Figura 154. Modelo de la zapatilla introducido en Cura Ultimaker. Elaboración propia.....	85
Figura 155. Modelo de la zapatilla introducido en Cura Ultimaker. Elaboración propia.....	85
Figura 156. Parámetros del upper. Elaboración propia.....	86
Figura 157. Parámetros de la suela. Elaboración propia.....	86
Figura 158 y 159. Tabla de colores de velocidades y flujo. Elaboración propia.....	87
Figura 160. Tiempo y gasto de material estimado. Elaboración propia.....	87
Figura 161. Representación según tipo de línea. Elaboración propia.....	87
Figura 162. Limado de bordes. Elaboración propia.....	88
Figura 163. Pistola de calor. Elaboración propia.....	88
Figura 164. Fases de la marcha calzando el prototipo impreso. Elaboración propia.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Exportaciones de calzado globales [14].....	23
Tabla 2. Importaciones globales de calzado [14].....	23
Tabla 3. Comparación entre tecnologías de impresión 3D DLS y FMD. Elaboración propia.....	45
Tabla 4. Comparativa de la fabricación tradicional de calzado y la impresión 3D. Elaboración propia.....	49
Tabla 5 y 6. Propiedades mecánicas y térmicas de TPU 95A (según Ultimaker). https://ultimaker.com/	83
Tabla 7. Parámetros recomendados del Filaflex TPU 95A de Recreus. https://recreus.com/	84



Diseño y prototipado de calzado personalizado
por impresión 3D en un modelo de economía circular



MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del proyecto

A lo largo de la historia reciente, el calzado ha evolucionado y dejado de ser un simple accesorio funcional para convertirse en una seña de la expresión, estilo y diferenciación personal, especialmente entre la población joven. El auge del streetwear y las redes sociales han potenciado el interés por productos únicos, personalizados y tecnológicamente innovadores. Como consecuencia, la industria del calzado se ha visto obligada a buscar nuevas propuestas más creativas, sostenibles y adaptadas a los gustos y necesidades del usuario.

De manera paralela a estos cambios culturales, la fabricación aditiva ha redefinido cómo se conciben, diseñan y producen estos productos. Los líderes del sector como Adidas, Nike, Puma o empresas emergentes como Zellerfeld han empezado a integrar esta tecnología en sus flujos de trabajo, permitiendo la creación de calzado a medida totalmente personalizado. Este nuevo enfoque reduce el desperdicio de material derivado de la fabricación tradicional, acorta los períodos de diseño y desarrollo e introduce nuevas posibilidades de diseño inalcanzables con los métodos tradicionales. Más allá de la estética, la impresión 3D permite nuevos niveles de personalización y funcionalidad sin precedentes.

El proyecto desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado se basa en el potencial de la fabricación aditiva para el desarrollo de un calzado que se adapte al perfil morfológico de cada usuario, de forma similar a como lo hace una plantilla ortopédica personalizada. Mediante el uso de técnicas avanzadas de escaneado 3D y modelado paramétrico, el proceso de diseño desembocará en un calzado que se ajuste a la anatomía del pie, aumentando el confort y reduciendo el riesgo de lesiones.

La personalización ofrece mejoras indiscutibles en la ergonomía y la salud podológica, sobre todo para grupos específicos de la población (ancianos o personas con patologías podológicas), a menudo olvidados por una industria centrada en la moda urbana, que pueden beneficiarse significativamente de un calzado personalizado que satisfaga sus necesidades específicas.

Por lo tanto, este proyecto plantea el diseño y prototipado de un calzado impreso en 3D como una solución innovadora que integre tendencias sociales, necesidades funcionales y avances tecnológicos, con el fin de democratizar el acceso al calzado personalizado, garantizando que no sea un simple lujo exclusivo, sino una opción inclusiva, eficiente y práctica adaptada a las necesidades del usuario.

1.2 Objetivos generales y específicos

Objetivo general

Diseñar y prototipar un modelo de calzado personalizado mediante tecnologías de impresión 3D, integrando criterios estéticos y ergonómicos, atendiendo también a la búsqueda de una producción sostenible en un modelo de economía circular, con el fin de explorar nuevas formas de producción de calzado adaptadas a las necesidades individuales del usuario.

Objetivos específicos

- Investigar el estado de la técnica en el diseño y fabricación de calzado mediante impresión 3D, con especial atención a las tecnologías utilizadas por marcas referentes en el sector.
- Evaluar las tecnologías de impresión 3D más adecuadas para la fabricación de calzado, así como los materiales flexibles y funcionales disponibles (TPU, TPE, resinas, etc.).
- Desarrollar un modelo de calzado personalizado a través de software de diseño paramétrico, incorporando tanto criterios estéticos como ergonómicos.
- Producir un prototipo físico mediante impresión 3D, documentando todo el proceso técnico del modelado, fabricación y postprocesado.
- Comparar el resultado del prototipo con los métodos tradicionales de fabricación en términos de diseño, comodidad, tiempos, costes y sostenibilidad.
- Evaluar el potencial de la fabricación aditiva como solución escalable para diferentes perfiles de usuario, incluyendo personas mayores o con necesidades ortopédicas.
- Proponer recomendaciones para el desarrollo futuro de calzado impreso en 3D personalizado, considerando sus retos técnicos, estéticos y de mercado.

1.3 Estructura del documento

De acuerdo con los objetos mencionados anteriormente, a continuación se expondrá la estructura de los contenidos que se desarrollarán en este proyecto:

Investigación y análisis

- Revisión bibliográfica sobre la evolución del diseño de calzado, cómo pasa de ser un simple accesorio funcional a formar parte de la identidad individual.
- Análisis del estado actual del mercado de la industria del calzado, para hacernos una idea del alcance de este tipo de productos.
- Estudio de la técnica de marcas pioneras en el uso de tecnologías aditivas como Adidas, Nike o Zellerfeld, y su enfoque hacia públicos jóvenes y productos de moda.
- Estudio anatómico y ergonómico del pie humano, con especial atención a su funcionalidad durante la marcha, patologías comunes y principios de ajuste personalizado, similares a los utilizados en plantillas ortopédicas.

Diseño conceptual y técnico

- Selección del tipo de calzado a desarrollar, en función del público objetivo, el uso previsto y la viabilidad técnica del modelo.
- Elaboración de bocetos e ideación formal, con base en referencias estéticas contemporáneas y tendencias actuales.
- Diseño CAD y modelado tridimensional del calzado, utilizando herramientas de escaneado 3D y diseño paramétrico, que permitan ajustarlo a medidas reales y personalizadas.

Prototipado y fabricación

- Selección de la tecnología de impresión 3D más adecuada (FDM, SLS, etc.) y materiales compatibles con calzado funcional, principalmente flexibles.
- Preparación del archivo para impresión, incluyendo pruebas estructurales, orientación de piezas y generación de soportes.
- Impresión del prototipo y posterior postprocesado, con documentación detallada de los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

Evaluación y reflexión

- Análisis del prototipo en términos de ajuste, ergonomía, calidad del acabado, resistencia y estética.
- Comparación con calzado producido mediante métodos tradicionales, considerando aspectos como costes, tiempos, sostenibilidad y grado de personalización.
- Identificación de limitaciones y propuestas de mejora, tanto del diseño como del proceso técnico, con el fin de orientar futuras líneas de desarrollo.

2. Estado del arte

2.1 Contexto de la industria del calzado

El calzado se refiere a cualquier tipo de prenda o accesorio que se lleva en los pies, incluidos zapatos, botas, sandalias y zapatillas. El calzado está diseñado para proteger los pies de las fuerzas de impacto e irregularidades del terreno, proporcionar aislamiento térmico, apoyo y estabilidad y mejorar el confort general al caminar, correr o realizar otras actividades.

2.1.1 Contexto histórico.

El Homo sapiens desde sus inicios ha destacado sobre todas las demás especies no solo por su capacidad comunicativa y su resistencia física, sino también por su capacidad intelectual y la habilidad para desarrollar y fabricar herramientas que facilitarían la vida cotidiana. Aunque los primeros objetos fabricados por el ser humano estaban destinados a la caza, pesca y recolección (actividades esenciales de supervivencia), también empezaron a desarrollarse elementos destinados a la protección contra el entorno y condiciones climáticas adversas.

Uno de estos elementos es el calzado; se estima que fue creado aproximadamente hace 12000 años, en las etapas finales del paleolítico. El calzado más antiguo encontrado hasta la fecha fue descubierto en Armenia y data del año 5000 a.C., fabricado a partir de cuero de vacuno, relleno de fibras naturales y con un diseño rudimentario ajustado al pie y únicamente funcional para protegerlo de cortes, el frío, quemaduras, etc.[8].



Figura 1. Zapato prehistórico hallado en la cueva de Areni-1, Vayotz Dzor, Armenia

Más adelante, con el surgimiento de las antiguas civilizaciones, el uso del calzado obtendría otro significado aparte de la funcionalidad. En Egipto, a partir del 5000 a.C., empezó a usarse el calzado como un método de distinción de clases. Solo las clases más altas de la población vestían sandalias fabricadas a partir de papiro, palma o cuero, con la incorporación de oro y piedras preciosas para los faraones, mientras que los campesinos y esclavos caminaban completamente descalzos [42, 34].



Figura 2. Sandalias pertenecientes a la esposa de Ramses II, soberana de Nefertari

Figura 3. Sandalias de Psusennes I



En Grecia y Roma, al igual que en Egipto, el calzado era una forma de distinción entre los hombres libres y los esclavos, pero empezaron a adaptarse según el tipo de actividad a realizar, como por ejemplo botas o sandalias reforzadas de soldados, calzado del clero, zapatos con plataforma para los actores... El color era también una distinción entre las diferentes clases sociales de la antigua Roma [42, 43].



Figura 4. Caligae romana con suela tachonadas con hierro, usada por el ejército



Figura 5. Coturnos, usados por actores en los teatros



Figura 6. Ilustraciones de la Soleae romana

Durante la Edad Media se comenzaron a usar botas y zapatos cerrados debido a las condiciones climáticas y el uso del calzado se había extendido a casi toda la población, perdiendo así su función distintiva, pero adquiriendo ahora un significado estético y funcional, ensalzando virtudes o escondiendo defectos de los que lo llevaban. Por ejemplo, el zapato de tacón empezó a ser llevado por los hombres para disimular su corta estatura o zapatos con punta para disimular deformidades en los pies. El calzado comenzó a producirse en los gremios zapateros que regulaban el oficio y ofrecían zapatos para toda la población, aunque más simples y prácticos [43, 42, 3].



Figura 7. Zapato poulaine del siglo XV, del museo de Bellas Artes de Boston



Figura 8. Bota simple, usado por las clases mas bajas

Con la llegada del Renacimiento a Europa, los diseños de los zapatos empezaron a ser más ornamentados y ostentosos, convirtiéndose en una forma de expresión y una marca de los gustos y la personalidad. Pasaron de ser meramente funcionales a ver auténticas obras de arte en algunos casos. Comenzaron a utilizarse materiales como el terciopelo, sedas y bordados detallados, muy populares entre la aristocracia, y el uso de los zapatos de tacón comenzó a popularizarse entre las mujeres [42, 6].



Figura 9. Alpargata para mujer, Inglaterra 1660-1675



Figura 10. Retrato de Luis XVI con zapatos de tacón, de Hyacinthe Rigaud

Durante el siglo XVIII, con el surgimiento de la Revolución Industrial, la industria del calzado tuvo una transformación radical. Gracias a la industrialización y la incorporación de máquinas de coser, se crearon nuevos métodos de fabricación. El calzado comenzó a producirse en serie, por tallas estandarizadas, lo que produjo un abaratamiento de la producción y permitió el consumo a casi toda la población. Comenzaron a utilizarse materiales como el caucho, esencial para las zapatillas deportivas. Durante esta época surgieron marcas de dejar huella, como el zapato Oxford, que sigue vendiendo sus productos hasta la fecha [6, 42].



Figura 11. Par de zapatos para niño de la Revolución Industrial

Figura 12. Botas simples, fabricadas en una línea de producción

Figura 13. Fabrica de zapatos. Producción en cadena de calzado con tallas estandarizadas

El siglo XX se caracterizó por la diversificación en el calzado, donde comenzó a reflejar las tendencias y el estilo. Los zapatos dejaron de ser un simple complemento para convertirse en una poderosa manifestación de la moda y las tendencias de temporada. Las marcas de lujo elevaron el estatus del calzado a nuevas alturas. La combinación de moda, funcionalidad y tecnología continuó impulsando la innovación del diseño de calzado [42].



Figura 14. Zapatos Dior, diseñados por Roger Vivier en 1950

En la actualidad, la industria del calzado es un pilar clave de la economía mundial, siendo cada vez más demandada por la población y sujeta a continuos cambios producidos por la preferencia de los consumidores. Es un sector en constante evolución propulsada por la diversidad de productos y la adopción de innovadoras tecnologías de fabricación.

Esta tendencia es provocada por un aumento en la demanda de calzado, desde ropa de diario, calzado deportivo u ortopédico especializado. El aumento en el consumo de calzado es resultado de varios factores recalcables, como un aumento de la conciencia de las personas de la importancia de la actividad física para la salud y una mayor exposición de la moda impulsada por el uso de las redes sociales, especialmente entre la población joven [29, 30].

Además, las prioridades del consumidor son la búsqueda de mayor comodidad y durabilidad, lo que ha provocado que los fabricantes incorporen nuevos materiales más avanzados y tecnologías innovadoras, como, por ejemplo, sistemas de control de aplicaciones de música o seguimiento de entrenamientos, e incluso la incorporación de la impresión 3D o diseños basados en inteligencia artificial [29, 30].

Otra de las prioridades más destacables es la búsqueda de productos sostenibles y una fabricación amigable con el medio ambiente. La industria del calzado es causante del 1.4% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. La población mundial es cada vez más consciente de la importancia de la protección del medio ambiente, aumentando su interés en calzado ecológico, mediante el uso de materiales naturales y biodegradables y materiales plásticos reciclables [29, 30].



Figura 15. Variedad de tipos de calzado comercializados en la actualidad

2.1.2 Contexto de mercado

El mercado global del calzado ha demostrado un crecimiento constante en su valor. En 2024, el tamaño del mercado alcanzó un valor aproximado de USD 417.50 mil millones. Las proyecciones indican una trayectoria ascendente significativa, con una previsión de crecimiento a una tasa anual compuesta (CAGR) del 4.9% entre 2025 y 2034. Se espera que para el año 2034, el valor del mercado global del calzado alcance aproximadamente los USD 642.15 mil millones [24].

Este crecimiento en valor se atribuye a varios factores, incluyendo el aumento del poder adquisitivo de los consumidores, la expansión de las plataformas de comercio electrónico que facilitan el acceso a una mayor variedad de productos y la creciente demanda de calzado especializado, deportivo y sostenible [24].

A pesar del crecimiento en el valor del mercado, la producción global de calzado experimentó una contracción en 2024. La producción mundial fue de 22.4 mil millones de pares, lo que representa una disminución del 6% en comparación con el año anterior. Esta caída afectó a varias regiones, con retrocesos notables en África (-14%), Asia (-7%) y Europa (-5%) [12, 14, 16].

El continente asiático domina el 87% de la producción mundial. China se mantiene como el líder indiscutible en la producción mundial de calzado, representando el 55% del total con 12.300 millones de pares de zapatos fabricados en 2024. Le siguen India (11.6%) y Vietnam (6.3%) [12, 14, 16].

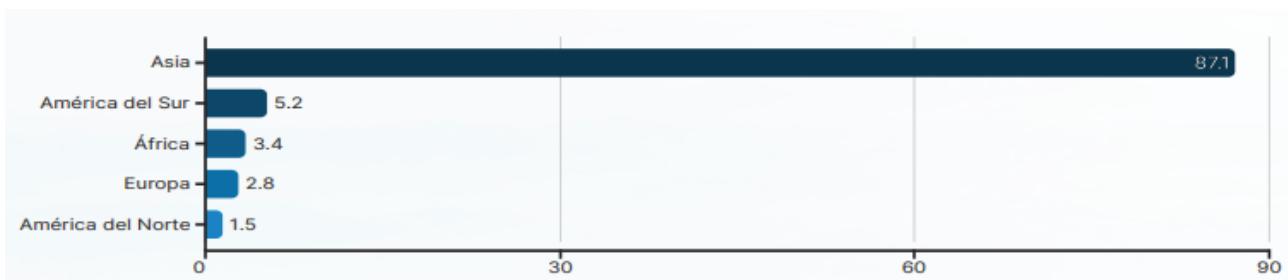


Figura 16. Producción Mundial de calzado

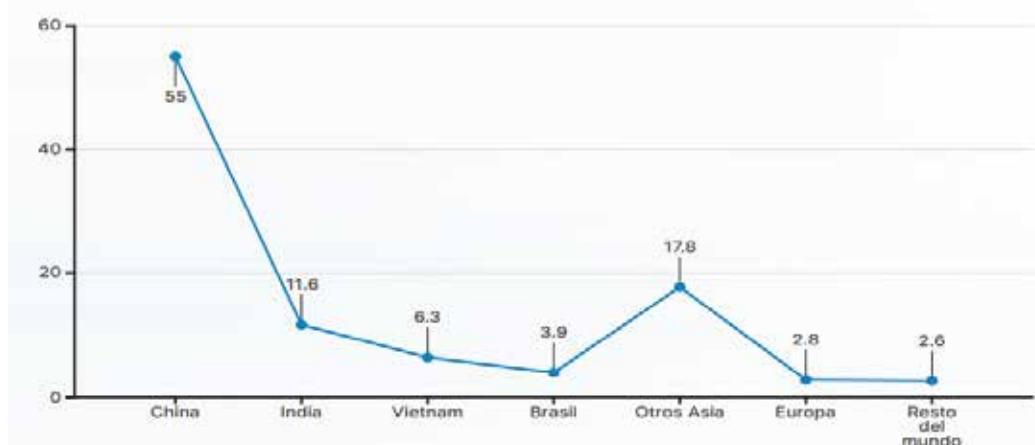
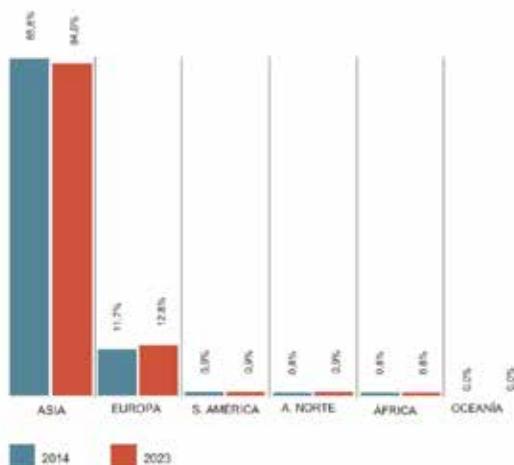


Figura 17. Producción Mundial de calzado

Respecto a la exportación, a nivel mundial las exportaciones cayeron un 9.1% en 2023. Asia domina las exportaciones globales con el 84.6% del volumen exportado. China es responsable del 63.8% de la exportación global [12, 14, 16].



PAÍS DE RANGO	PARES (MILLONES) PARTICIPACIÓN MUNDIAL	
1 CHINA	8 958	63,8%
2 VIETNAM	1 335	9,5%
3 INDONESIA	445	3,2%
4 ALEMANIA	349	2,5%
5 TURQUÍA	301	2,1%
6 INDIA	257	1,8%
7 BÉLGICA	220	1,6%
8 ITALIA	191	1,4%
9 CAMBOYA	165	1,2%
10 ESPAÑA	156	1,1%

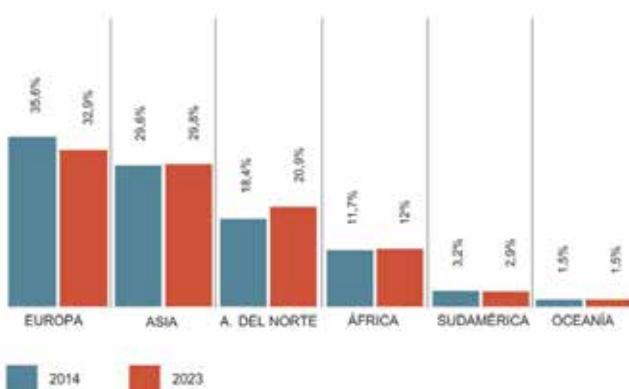
Figura 18 y Tabla 1. Exportaciones de calzado globales

Asia lidera con el 54.7% del consumo mundial a causa de su gran población y rápido crecimiento económico; en concreto, las participaciones de China e India corresponden al 17.1% y 12.4% del consumo mundial de calzado, respectivamente. En el caso de Europa y Norteamérica, representan el 13.9% y 13.4% del consumo, respectivamente, seguidos de África con un 10.3% [12, 14, 16].



Figura 19. Consumo mundial de calzado

En lo que se refiere a la importación, Europa lidera el ranking con un 32.9% de la importación a nivel global, seguido de Asia (29.8%) y Norteamérica (20.9%). No obstante, EE. UU. es el líder indiscutible, alcanzando aproximadamente 1986 millones de pares importados que representan el 16.2% de la importación global [12, 14, 16]. EE. UU. es también el país que más riqueza genera en el sector del calzado, siendo la casa de las mayores empresas multinacionales del mundo, como Nike, Adidas, Puma, etc.



PAÍS DE RANGO	PARES (MILLONES) PARTICIPACIÓN MUNDIAL	
1 ESTADOS UNIDOS	1986	16,2%
2 JAPÓN	608	4,9%
3 ALEMANIA	606	4,9%
4 FRANCIA	433	3,6%
5 RUSIA	389	3,2%
6 REINO UNIDO	342	2,8%
7 ITALIA	333	2,7%
8 ESPAÑA	316	2,6%
9 EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	280	2,3%
10 PAÍSES BAJOS	260	2,1%

Figura 20 y Tabla 2. Importaciones globales de calzado

En España, en los últimos años, la industria del calzado ha ido recuperando fuerza, pero sin lograr los niveles previos a los acontecimientos producidos en 2020 con la pandemia del COVID-19, sufriendo una caída del 70% de la producción nacional [13].

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), en el año 2024, la producción de calzado en España creció un 7.6% respecto al año anterior, aunque el índice de cifra de negocios de la industria del cuero y el calzado disminuyó en diciembre de 2024 un 5.9% respecto al mismo mes del año anterior [13].

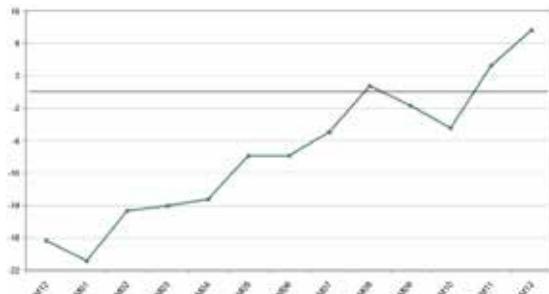


Figura 21. Fabricación de calzado en España en 2024

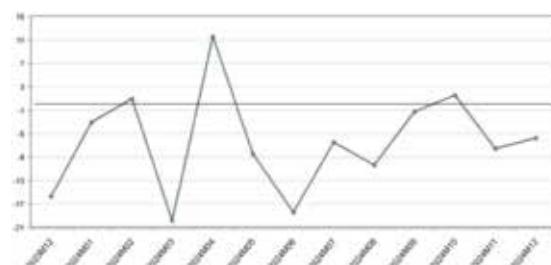


Figura 22. Índice de Cifra de la industria del cuero y calzado en España 2024

Las exportaciones de calzado a nivel nacional en 2024 se han incrementado un 7.8% en volumen exportado y un 6% en valor respecto al año 2023. Se exportaron 170.8 millones de pares por valor de 3455.3 millones de euros. Los principales compradores de calzado español fueron Italia (+36,7%), Francia (-6.9%), Alemania (+3,1%), Portugal (+3.8%) y Polonia (+13.3%), con un precio medio del par vendido en el extranjero de 20.2 euros [13].



Figura 23. Volumen y Valor de Exportación en España desde 2015 hasta 2024

Al igual que en el caso de EE.UU., España en 2024 ha incrementado en un 7.9% la cantidad de pares importados de otros países respecto al año anterior, siendo China el mayor proveedor, seguido de Vietnam, Italia, Indonesia y Bélgica. Se importaron un total aproximado de 342.9 millones de pares por valor de 4889 millones de euros. El precio medio del par comprado al extranjero en 2024 fue de 14.3 euros [13].

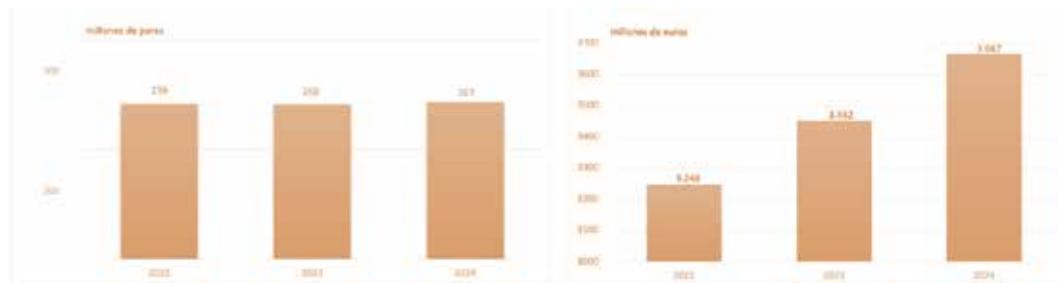


Figura 24. Volumen y Valor de Importación en España desde 2022 hasta 2024

El mercado español del calzado, al igual que el global, se ve influenciado por las tendencias de consumo y producción. La demanda de calzado cómodo y casual, así como la creciente conciencia sobre la sostenibilidad, son factores relevantes que impactan el sector a nivel nacional [13].

2.1.3 Segmentación del mercado

El mercado del calzado puede segmentarse en diversas categorías, como por ejemplo el tipo de producto, rango de edad de los consumidores y método de consumo.

Respecto al tipo de producto, podemos dividir el mercado en calzado deportivo, casual, formal, infantil o especializado (calzado de seguridad, trabajo, etc.). Una estimación aproximada concluye que el **calzado casual y deportivo** lidera el volumen de ventas. Esto se debe a la alta frecuencia de uso de este tipo de calzado y al crecimiento de la producción y comercialización impulsado por las tendencias de la moda urbana y el estilo de vida cada vez más activo de la población [24].

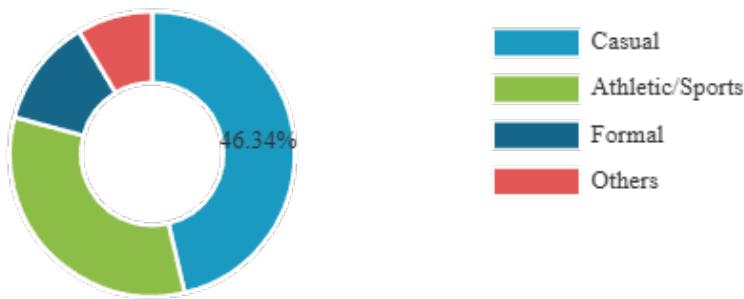


Figura 25. Segmentación del mercado según el tipo de calzado

En lo referente a la edad del consumidor, ciertos patrones generales permiten clasificar al público objetivo de este tipo de productos:

- **Infantil (0-12 años):** Alta demanda. El constante crecimiento físico de los niños se traduce en la necesidad de renovar el calzado frecuentemente.
- **Adolescente/joven (13-30 años):** Segmento más amplio del mercado. Alta sensibilidad a la moda, estética, marcas e innovaciones tecnológicas de producción con el uso de materiales sostenibles o personalización mediante herramientas digitales.
- **Adultos (31-55 años):** Prima la comodidad, calidad y funcionalidad. Aunque también son consumidores de calzado deportivo y casual, priorizan la durabilidad y el confort antes que las tendencias de la moda.
- **Mayores de 55 años:** Prioridad en productos orientados a las necesidades específicas relacionadas con la salud del pie de cada individuo. Búsqueda de comodidad con productos ortopédicos, materiales blandos y sistemas de ajuste fácil. Mercado en crecimiento debido al envejecimiento de la población.

Respecto al medio o canal de consumo, el método de compra de este tipo de productos ha ido evolucionando con el tiempo. Debido a los acontecimientos ocurridos en el 2020 con la pandemia del COVID-19, el consumo de todo tipo de producto de manera digital ha sufrido un crecimiento notable que seguirá aumentando durante los próximos años.

- La adquisición de calzado mediante el **canal físico** (zapaterías, comercios locales, etc.) sigue siendo muy relevante, sobre todo en segmentos de edad más avanzada y en zonas rurales o de menos presencia digital, además impulsada por el valor de poder probarse el calzado antes de la compra.
- El **canal digital o e-comercio** ha experimentado un crecimiento acelerado, convirtiéndose en el método de consumo más utilizado por la población joven y en entornos urbanos. La posibilidad de que el cliente pueda acceder a una mayor cantidad de modelos, comparar precios y poder recibir el producto directamente en su propia casa lo convierte en un método de adquisición muy atractivo para los consumidores. Diversas plataformas lideran este canal, como Amazon, Zalando o tiendas específicas de marcas como Adidas, Nike, New Balance, Converse, etc.

En conclusión, después de la perspectiva obtenida después de realizar esta segmentación del mercado del calzado, se puede situar la propuesta de este proyecto en una posición muy favorable, alineándose coherentemente con las demandas reales del mercado actual.

La tendencia global al consumo de calzado deportivo y casual es cada vez más popular en la población joven (13-30 años), lo que permite introducir nuevas tecnologías en el método de producción, como la inclusión de la impresión 3D y el uso de materiales sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Además, la creciente tendencia del uso de plataformas digitales destinadas a la compra de este tipo de productos permite un alcance sin límite, impulsado por el uso de las redes sociales como método de promoción.

Por último, al tratarse de un producto personalizado para cada usuario y gracias a las posibilidades que ofrece la fabricación aditiva, se puede hacer un calzado ortopédico que se adapte al pie de cualquier persona, cómodo y de ajuste fácil, atractivo para casi cualquier sector de la población.

2.1.4 Principales actores del sector

NIKE Inc.

Fundada en 1964 por Bill Bowerman y Phil Knight, inicialmente llamada Blue Ribbon Sports, convirtiéndose oficialmente en NIKE Inc. en 1971. Su primer producto fue la zapatilla Nike Cortez, con el característico logo 'swoosh' de la marca [27].

Su producto fue haciendo cada vez más popular entre los atletas, pero no fue hasta 1979, con el lanzamiento del modelo Tailwind, primera zapatilla en incorporar la tecnología de amortiguación con aire, que catapultó a la compañía a la vanguardia del sector del calzado deportivo [27].

En 1984 firmaron un acuerdo con Michael Jordan, lanzando la línea de zapatillas Air Jordan, convirtiéndose en un fenómeno cultural que sigue hasta el día de hoy. Bajo el eslogan 'Just Do It', la marca se consolidó como una de las marcas más influyentes y diversificó su oferta de producto a todo tipo de equipamiento deportivo, convirtiéndose en una de las 50 empresas más valiosas del mundo [27].

La compañía se ha convertido en la marca deportiva más popular del mundo, con una cuota de mercado total del 38,23% en 2022, una capitalización del mercado de 197.800 millones de dólares estadounidenses y unos ingresos anuales de 46.710 millones de dólares [27].



Figura 26. Logos usados por la compañía desde su creación hasta la actualidad



Figura 27. Phil Knight sosteniendo en su mano dos zapatillas de la marca

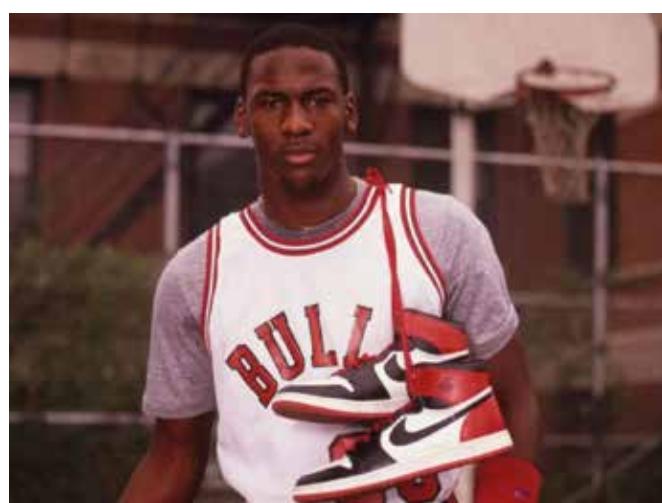


Figura 28. Michael Jordan con las míticas Air Jordan 1 "Black Toe"

Nike es líder en el sector del calzado mundial y se encuentra a la vanguardia del sector del calzado mundial por su implicación en la innovación de nuevas tecnologías, digitalización y sostenibilidad. A lo largo de su historia, la marca ha revolucionado el mercado con el lanzamiento de diversos productos como:

Nike Air Force 1

Lanzadas en 1982, se han convertido en el producto más vendido de la marca, alcanzando un número de 150 millones de unidades a nivel mundial. Populares tanto en el mundo deportivo como en la moda urbana.



Figura 29. Nike Air Force 1

Nike Air Jordan 1

Lanzadas en 1985, revolucionaron el calzado destinado al baloncesto. Bajo la imagen de Michael Jordan, se han establecido como un clásico en la cultura sneaker.

PVP: 119,99 €



Figura 30. Nike Air Jordan 1 "Chicago"

Nike Air Max

Lanzadas en 1987 y posteriormente reeditadas en 1990, 1997 y 2018. Se convirtieron en uno de los best-sellers de la marca con su distintiva válvula de aire visible.



Figura 31. Nike Air Max 97

Nike Vaporfly

Lanzadas en 2023. Calzado más avanzado desarrollado por la marca destinado al running. Con mediasuela de espuma ZoomX de Vaporfly y la distintiva placa de carbono para mejorar el impulso, el diseño del upper Flyknit es transpirable, ajustado y superligero.



Figura 32. Nike Vaporfly

ADIDAS

Fundada en 1949 por Adolf "Adi" Dassler, fabricante de calzado alemán que después de la Segunda Guerra Mundial se separó de su socio y hermano Rudolf Dassler, fundando dos de las más grandes compañías de calzado de la actualidad: Adidas y Puma [26].

Durante las primeras décadas después de su fundación, Adidas desarrolló múltiples avances tecnológicos para la fabricación de calzado especializado para diferentes deportes, desarrollando zapatillas de baloncesto, béisbol, atletismo y fútbol, entre otros, como las famosas Adidas Samba, aún demandadas en la actualidad como parte de la moda diaria urbana [26].

Adi rápidamente entendió la importancia del marketing y los patrocinios, y bajo la imagen de las tres rayas se consolidó como una de las marcas más relevantes de su país. Desarrolló calzado en colaboración con diversos atletas en los Juegos Olímpicos y con la selección de fútbol alemana en 1954, la cual ganó la copa del mundo, impulsando aún más la marca a nivel internacional y consolidándola como una de las marcas más famosas [26].

La compañía continuó patrocinando equipos y deportistas y desarrollando nuevas tecnologías y materiales hasta la actualidad, expandiendo su mercado y convirtiéndose en un ícono de la cultura popular y en una parte esencial del streetwear [26].

En términos económicos, Adidas se ha fortalecido con la adquisición de Reebok en 2005, otra marca líder en el sector deportivo, y ha experimentado un crecimiento constante a lo largo de los años con la venta de todo tipo de productos deportivos y de moda. Se ha consolidado como la segunda marca mundial en equipamiento deportivo con unos ingresos en 2024 de 23.680 millones de dólares [26].



Figura 33. Logos usados en la actualidad por la compañía



Figura 34. Adolf "Adi" Dassler sosteniendo una zapatilla con tacos



Figura 35. Zapatillas con las que la Selección Alemana de Fútbol ganó el Mundial en 1954



Figura 36. Edición limitada de la colaboración de Adidas con la famosa serie de animación Dragon Ball Z

Además, ha desarrollado nuevas tecnologías innovadoras como Boost de Adidas, que ha revolucionado la industria del calzado deportivo con una combinación de confort, amortiguación y retorno de energía, estableciendo un nuevo estándar en la industria y posicionándose como una de las tecnologías más avanzadas del mercado. Entre sus productos más vendidos podemos destacar:

Adidas Stan Smith

Lanzadas en 1971. Es el modelo más vendido de la marca, con 40 millones de pares vendidos alrededor del mundo. Su modelo icónico minimalista, originalmente destinado al tenis, es el producto más demandado por los consumidores.



Figura 37. Adidas Stan Smith

Adidas Samba

Lanzadas en 1949, enfocadas al fútbol sala. Segundo modelo más vendido de la marca, con 35 millones de pares vendidos. Su demanda se ha visto impulsada por diversas colaboraciones.



Figura 38. Adidas Samba

Adidas Ultraboost

Lanzadas en 2015. Pioneras en el uso de la tecnología Boost, anteriormente mencionadas, con Upper Primeknit y suela Continental. Destacan por su comodidad, respuesta energética y versatilidad entre runners y uso diario.



Figura 39. Adidas Ultraboost

Adidas Yeezy Boost

Lanzadas originalmente en 2015. Se trata de una colección limitada en colaboración con el artista internacional Kanye West. Su exclusividad potenció la demanda de este producto, convirtiéndose en uno de los protagonistas de la cultura del footwear y revalorizándose por encima de su precio original.



Figura 40. Adidas Yeezy Boost

PUMA

Fundada en 1948 por Rudolf Dassler, hermano y exsocio de Adolf Dassler. Su historia está estrechamente relacionada con la de Adidas. Su marca, bajo la imagen de un felino estilizado, rápidamente se convirtió en una marca fácilmente distinguible y famosa en todo el mundo [28].

Desde el momento de su fundación, Puma desarrolló calzado para los mejores deportistas, productos que triunfaron en estadios deportivos que posteriormente influenciaron en el diseño y estilo de las siguientes generaciones. Las primeras zapatillas exitosas desarrolladas por la marca fueron las Puma Super Atom, en 1952, siendo las primeras zapatillas con tacos intercambiables que proporcionaban mayor tracción a los jugadores de fútbol y pronto empezaron a ser imitadas por otras marcas [28].

Gracias a la colaboración de grandes futbolistas de la época como fueron Eusebio, Pelé y Diego Armando Maradona, la marca fue impulsada como una de las mejores marcas de zapatillas para el desempeño deportivo [28].

Un momento crucial para este calzado fue durante los Juegos Olímpicos de México de 1968, cuando el atleta estadounidense Tommie Smith ganó la medalla de oro en los 200 metros, subiendo al podio con un par de zapatillas Puma Suede en la mano, haciendo el que se convertiría en el saludo del Black Power, comentándolo con el movimiento de los derechos civiles y la lucha contra la discriminación racial [28].

Durante los siguientes años, la marca ganó más y más importancia en la cultura popular y del hip hop y breakdance, introduciéndose poco a poco en la moda urbana hasta llegar hasta la actualidad y consolidándose como una de las empresas líderes del mercado. Puma ha establecido estrategias colaboraciones que han contribuido significativamente a la imagen de la marca, generando un impacto positivo en la promoción de sus productos [28].



Figura 41. Logos usados por la marca desde su fundación hasta la actualidad



Figura 42. Rudolf Dassler con un ejemplar de las Puma Super Atom

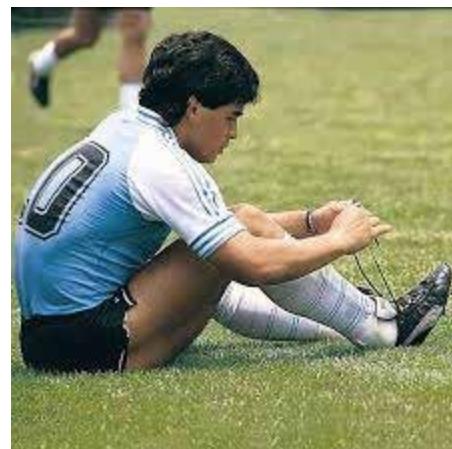


Figura 43. Diego Armando Maradona atándose sus zapatillas Puma



Figura 44. Tommie Smith en el podio haciendo el saludo de "Black Power"

En 2024, la marca alcanzó ventas de 8817 millones de dólares, de los cuales más de la mitad son procedentes exclusivamente de la venta de calzado. La marca logra un crecimiento constante, enfocándose en la rentabilidad a través del branding, apostando por diseños retro con tendencias nostálgicas y manteniendo la relevancia a nivel mundial de sus diseños originales, de los que se puede destacar:

Puma Suede

Lanzadas originalmente en 1968, siendo la primera zapatilla desarrollada por la compañía. Recientemente se lanzó la versión XL, con una suela más gruesa.



Figura 45. Puma Suede

Puma Clyde

Lanzadas en 1973. Diseño que derivó de sus predecesoras y personalizado por el jugador de baloncesto Walt "Clyde" Frazier. En la actualidad, se mantiene como un clásico en el mundo futbolístico, del baloncesto y de la moda urbana.



Figura 46. Puma Clyde

Puma Speedcat

Originalmente lanzadas en 1999, con un relanzamiento en 2024 con las versiones Leather y Ballet.



Figura 47. Puma Speedcat Leather y Ballet

Puma Cali Varsity

Variante moderna de las Cali originales lanzadas en los años 80. Apreciadas por su precio asequible y su diseño relajado. Puma Speedcat



Figura 48. Puma Cali Varsity

2.1.5 Fabricación de calzado tradicional y a medida

La mayoría de las empresas dedicadas a la fabricación de calzado a gran escala, como las mencionadas anteriormente, tienen un sistema de fabricación tradicional, heredado de la Revolución Industrial, que combina técnicas manuales y automatizadas en una línea de producción que busca fabricar grandes volúmenes con tiempos y costes reducidos.

Este método de fabricación se caracteriza por el uso de hormas de tallas estandarizadas basadas en rangos de medidas del pie de la población, facilitando la producción en masa. Una vez decidido el diseño final del calzado a producir, se somete a numerosas fases secuenciales de fabricación en una cadena de montaje. Ejemplos de dichas fases son el corte de los materiales, costura, montaje en la horma, adhesión de la suela, etc., pasando por las manos de numerosos operarios especializados y máquinas automatizadas.

Durante todas estas fases, es necesaria la implementación de distintos materiales, como son EVAs, cauchos moldeados, cueros, telas, plásticos... El uso de tantos materiales ofrece unas propiedades mecánicas óptimas para el calzado fabricado y reduce costes de fabricación, pero produce residuos y limita la personalización del diseño y la adaptabilidad al usuario.



Figura 51. Fabricación de la horma para pies deformados



Figura 52. Ejemplo de zapatado ortopédico



Figura 49. Línea de producción de Nike



Figura 50. Hormas estandarizadas

En términos de personalización y adaptabilidad, todavía es común recurrir a artesanos que fabrican calzado a partir de una horma de madera o plástico con la forma exacta del usuario. Esta horma se talla a partir de medidas del largo, ancho, perímetro, arco, etc., y en algunos casos se hace un molde con escayola o yeso reproduciendo exactamente la forma del pie del cliente.

Actualmente, existen nuevas tecnologías que facilitan el proceso de fabricación de la horma personalizada, principalmente en el sector ortopédico, ya que hay personas que desgraciadamente tienen deformaciones en sus pies muy complejas de reproducir mediante el tallado tradicional de la horma. Mediante escáneres tridimensionales, yesos, espuma y geles reactivos que se adaptan a la forma del pie, se consigue conformar una horma personalizada para cada persona.

La fabricación de calzado a medida es aún vigente en la producción de calzado de alta gama u ortopédico, adaptándose a la perfección al pie del usuario. No obstante, se trata de un proceso notoriamente laborioso que requiere de una mano de obra experta, y más tiempo y coste que la fabricación en cadena.

2.2 Tecnologías de impresión 3D orientadas a la fabricación de calzado

2.2.1 Innovaciones del calzado impreso en 3D

Después de haber explorado los principales actores del sector del mercado de calzado a nivel mundial y de sus productos más populares fabricados a partir de métodos tradicionales, es importante mencionar que estas empresas han desarrollado nuevas tecnologías de producción.

En particular y en relación con el objetivo de este proyecto, se estudiarán las distintas tecnologías aplicadas por estas empresas a la fabricación de calzado impreso en 3D, que ha emergido como una herramienta clave en el diseño y desarrollo de calzado funcional y sostenible.

2.2.1.1 Empresas líderes en impresión 3D de calzado

FLYPRINT de NIKE

Nike Inc. es una de las empresas líderes en innovación de tecnologías de producción de calzado, desarrollando diversas tecnologías para la fabricación de calzado deportivo, como por ejemplo Flywire, Flyknit y Hyperfuse. En 2018 sorprendió al mundo con un nuevo sistema de fabricación aditiva con el que confeccionar calzado adaptado al pie del atleta [7].

Flyprint fue presentada como la primera parte superior textil o upper en ser completamente impresa en 3D mediante la tecnología Fused Deposition Modeling o FDM, desarrollándose el nuevo modelo de zapatillas Zoom Vaporfly Elite Flyprint. El proceso comienza recogiendo los datos de la geometría del pie del atleta, para después ser computarizados mediante herramientas de diseño [35].

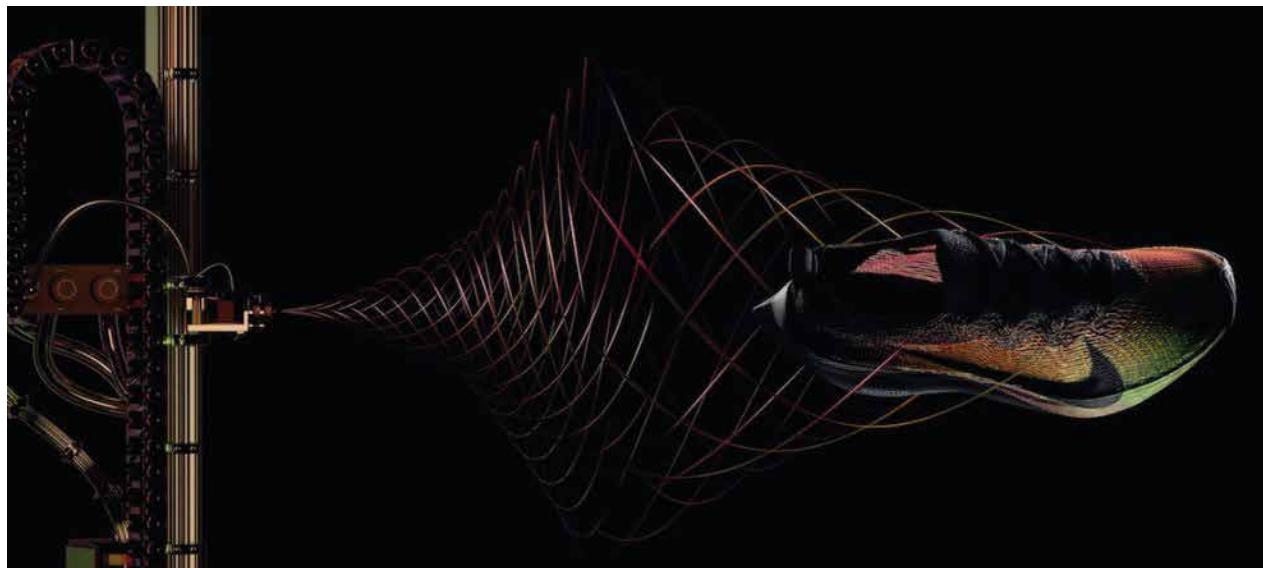


Figura 53. Modelo Zoom Vaporfly Elite Flyprint fabricado con tecnología FMD

La información obtenida es usada para concretar la composición ideal del material y finalmente producir el tejido final del upper, mediante la deposición de filamento de TPU fundido y depositado en capas. Además, es posible implementar esta tecnología a otras anteriores, como Flyknit, eliminando la necesidad de utilizar pegamentos o costuras. Este nuevo método de fabricación permite a la compañía producir prototipos 16 veces más rápido que con métodos de fabricación anteriores, requiriendo también menor tiempo de diseño [35].

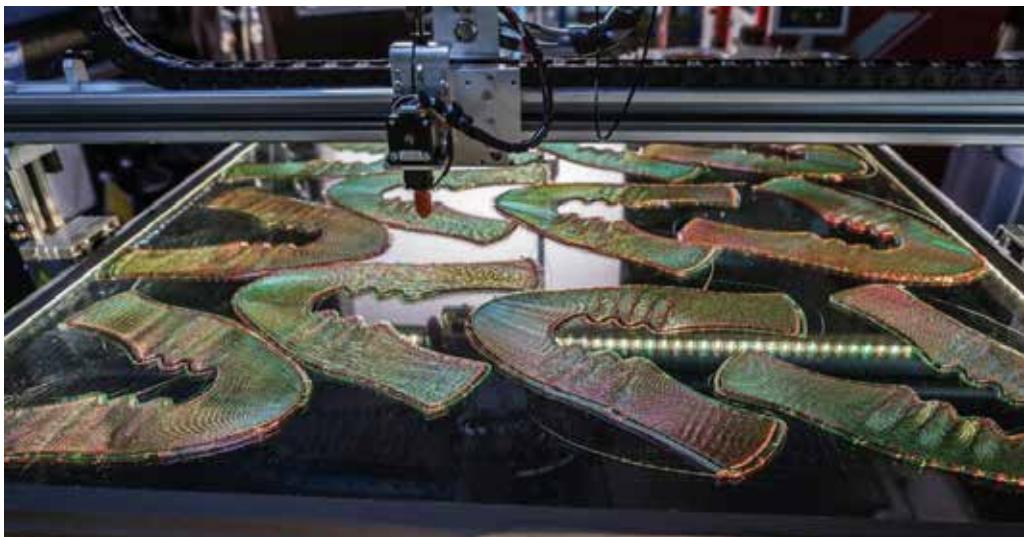


Figura 54. Deposición de TPU fundido para la fabricación del Upper Flyprint

El tejido desarrollado por esta tecnología ofrece ventajas frente al clásico tejido de hilos entrelazados, ofreciendo mayor flexibilidad, resistencia, transpirabilidad y siendo un 6% más ligera que su predecesora, que maximizan el desempeño deportivo de quien las usa [37]. El primer atleta conocido en usar estas nuevas zapatillas fue Eliud Kipchoge, maratoniano que también fue partícipe en el desarrollo de este calzado al dar especificaciones deseadas, como un menor peso y una menor retención de líquido [22].



Figura 55 y 56. Eliud Kipchoge corriendo calzando las Zoom Vaporfly Elite Flyprint

FUTURECRAFT 4D de ADIDAS

Las zapatillas Futurecraft 4D de Adidas son las primeras zapatillas de alto rendimiento fabricadas a partir de la nueva tecnología desarrollada por la compañía Carbon, especializada en impresión 3D, denominada Digital Light Systhesis o DLS. Esta nueva tecnología nace como resultado de 17 años de recopilación de datos de atletas para desarrollar un producto que se ajuste al movimiento natural del pie [4, 19].

Esta tecnología permite adaptar las suelas a cada cliente según los parámetros biomecánicos particulares de cada persona. Consiste en una impresión 3D mediante la proyección de un haz de luz ultravioleta a través de una óptica permeable al oxígeno, solidificando una resina líquida fotosensible capa por capa, acelerando la producción respecto a los métodos de fabricación tradicional [4, 19].



Figura 57. Mediasuela fabricada con tecnología DLS

El proceso de fabricación mencionado sirve para producir la suela y entresuela de la zapatilla, con una geometría de celosía o panal de abeja, proporcionando gran durabilidad y amortiguación, que absorbe la presión del talón en dirección al suelo sin expandirse por los lados. Por otro lado, la parte superior de la zapatilla o upper es confeccionada en tejido Primeknit, a partir de una sola pieza fabricada a partir de un hilo de termoplástico fundido, proporcionando una mayor transpiración, adaptación a la forma del pie y ofreciendo un equilibrio perfecto entre flexibilidad y resistencia [4, 19].



Figura 58. Zapatilla FutureCraft 4D de Adidas

MOSTRO 3D de PUMA

Además de todas las colaboraciones con diversos deportistas desde el momento de su fundación hasta llegar a la actualidad, Puma también ha colaborado con todo tipo de celebridades, entre los que podemos destacar al rapero ASAP Rocky, que junto a la empresa Carbon, lanzaron las nuevas Mostro 3D en 2024, reedición impresa completamente en 3D de las Mostro presentadas por primera vez en la semana de la moda de Nueva York en 1999 [1, 40].

A diferencia de sus competidores Nike y Adidas, con sus diseños funcionales y destinados a maximizar el rendimiento deportivo, Puma ha optado con estas nuevas zapatillas por un diseño más extravagante y destinado a la moda y el streetwear. Su estética espinosa da la impresión de formar parte del exoesqueleto de una bestia, o como indica su nombre, de un monstruo [1, 40].



Figura 59. Zapatilla Mostro 3D de Puma impresa con tecnología DLS

Desarrolladas a partir de tecnología Digital Light Synthesis o DLS de Carbon, al igual que las Futurecraft 4D de Adidas. Su diseño espinoso, aparte de tener un sentido estético, es una manera de demostrar la libertad geométrica que permite este método de impresión, ya que, a diferencia de su competidor, tanto la suela, la entresuela y el upper están completamente impresos mediante DLS, siendo todas las partes una única pieza sin necesidad de ensamblajes adicionales [40].

Tras un proceso de postprocesado, aplicando un tratamiento superficial de tipo aerosol que da a la zapatilla su acabado característico, la pieza resultante es un calzado ligero, flexible, poroso y extravagante, sin necesidad de cordones para ajustarse al pie y fáciles de poner. Aunque es un producto conceptual y limitado, marca un camino por el que seguir explorando modelos con gran diferenciación y personalización [40].



Figura 60. Zapatilla Mostro 3D de Puma

2.2.1.2 Empresas emergentes de calzado impreso en 3D

ZELLERFELD SHOE COMPANY Inc.

Zellerfeld es una empresa emergente o startup pionera en la producción y comercialización de calzado completamente impreso en 3D. Con una inversión inicial de 15 millones de dólares estadounidenses, esta empresa fue fundada en 2020 por ingenieros de EE. UU. y Alemania que, mediante la fabricación automatizada de calzado impreso en 3D, ofrecen un cambio del estatus quo y la poca ética de la industria del calzado actual [2, 49].

Comprometida con cambiar la situación de la industria actual del calzado y de la moda en general, conocida por el uso de fábricas en países terceromundistas con el objetivo de abaratar costes de producción. La gran demanda de productos de moda ha llevado a estos países a sufrir un aumento de la explotación laboral de sus trabajadores [49].



Figura 61. Cornelius Schmitt, CEO de Zellerfeld, junto a Heron Preston con el prototipo HERON01

La fabricación de estos productos se realiza mediante fabricación aditiva, con el uso de la tecnología FDM y materiales completamente reciclables, como es el poliuretano termoplástico o TPU. Zellerfeld dispone de una gran cantidad de impresoras, llegando a más de 200 en el año 2023, y gracias a prescindir de fábricas en el extranjero y a su compromiso con el uso de materiales sostenibles y no nocivos para el medio ambiente, han basado su empresa en un modelo de economía circular, pudiendo fabricar nuevos calzados a partir de piezas recicladas previamente fabricadas por ellos [50, 51].

Validated by icons



Figura 62. Sección de una zapatilla de Zellerfeld en la que se puede apreciar el relleno de impresión

Para desarrollar cada zapato, los usuarios escanean sus pies mediante una aplicación móvil para recibir un calzado totalmente personalizado, sostenible y monomaterial, sin necesidad de costuras ni adhesivos. Además, esta compañía se caracteriza por desarrollar calzado enviado por diversos diseñadores alrededor del mundo a través de una plataforma en línea, dando la oportunidad a dichos diseñadores de fabricar y vender sus diseños a cualquier persona dispuesta a expresarse a través de zapatillas personalizadas impresas en 3D [2, 49].

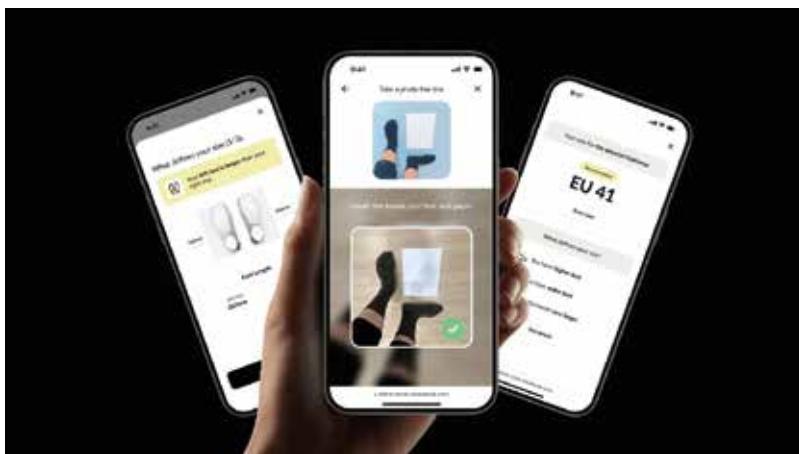
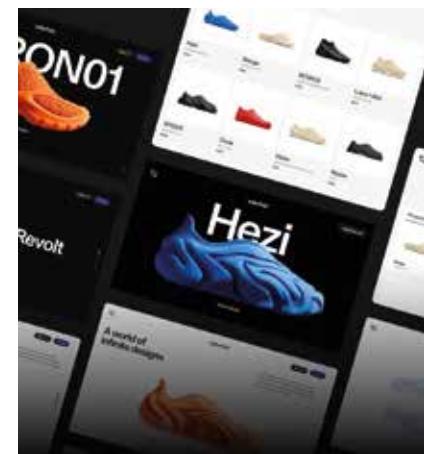


Figura 63. Muestra de como sacar las medidas de tu pie para realizar un pedido en la página de Zellerfeld

Figura 64. Diversas zapatillas adquiribles en la tienda vía Web de Zellerfeld



ZELLERFELD x NIKE

Nike, en colaboración con Zellerfeld, ha desarrollado las zapatillas Air Max 1000. Estas nuevas zapatillas de la marca toman inspiración de las icónicas Air Max 1 de 1987 (primer modelo de la marca con la cámara de aire visible) de Tinker Hatfield, pero actualizadas a una época más moderna [25].

A excepción de la característica válvula de aire que llevan estos modelos, el resto de la zapatilla está completamente impreso mediante tecnología FMD íntegramente de poliuretano termoplástico [25].

Especificamente este modelo tiene un precio de compra de 179\$, en la página oficial. El resto de calzados de la marca van desde 99\$ hasta los 379\$, con una excepción exclusiva que cuesta 999\$.



Figura 65. Nike AirMax 1000 en colaboración con Zellerfeld

KOOBZ

Fundada en 2023 con sede en Ventura, California, EE. UU. Empresa dedicada a la fabricación y comercialización de calzado impreso completamente en 3D destinado a uso casual y urbano. Mediante este método de fabricación reduce las emisiones de carbono a la atmósfera y desarrolla calzado compuesto de materiales sostenibles, reciclables y no nocivos para el medio ambiente [48].



Figura 66. Impresoras 3D de Prusa imprimiendo calzado de Koobz

Al igual que Zellenfeld, producen zapatillas fabricadas a partir de poliuretano termoplástico o TPU, material reciclable, lavable y elástico que se adapta al pie de cada usuario. El proceso de diseño es completamente digital, permitiendo la creación de prototipos en pocos días, utilizando la tecnología de FMD. Koobz utiliza un proceso automatizado en dos fases para la producción de calzado, basado en un diseño monolítico. Este método elimina la necesidad de fabricar herramientas y moldes tradicionales, lo que reduce tiempos y costos de desarrollo. La producción inmediata permite lanzar nuevos modelos sin retrasos, favoreciendo la flexibilidad y la personalización [48].



Figura 67 y 68. Zapatillas impresas por Koobz

2.2.2 Tecnologías de impresión 3D

A continuación, se estudiarán los distintos métodos de impresión utilizados por empresas actuales con relación a la fabricación de calzado, como es el caso de Futurecraft4D de Adidas, el Flyprint de NIKE o el calzado fabricado por Zellerfeld.

FDM (Fused Deposition Modeling / Modelado por Deposición Fundida)

La impresión 3D por FDM fue desarrollada por Scott Crump en 1989, quien buscó una manera fácil y eficiente de fabricar prototipos, imprimiendo por primera vez una rana de juguete mediante la deposición de plástico fundido a través de una pistola de cola. Debido a la patente de la empresa Stratasys del nombre FDM, otras empresas denominan a esta práctica como FFF (Fused Filament Fabrication). Durante los años 2000, este tipo de fabricación comenzó a ganar popularidad por las empresas, convirtiéndose en la tecnología más utilizada para el desarrollo y fabricación de prototipos [18].



Figura 69. Scott Crump sosteniendo piezas impresas mediante FMD

Este tipo de impresión consiste en la fabricación de piezas mediante extrusión de material. Una bobina de filamento de un material termoplástico alimenta un extrusor que calienta, funde y extruye el material a través de una boquilla fina (generalmente de 0.4 milímetros, pero puede variar según el caso). La boquilla se va moviendo a lo largo y ancho de una placa de construcción caliente o cama para ir dibujando la pieza capa por capa. El dibujo que realiza en cada capa es guiado por unas instrucciones de un archivo GCODE, que transforma la geometría tridimensional de la pieza a fabricar y la divide en sucesivas capas o lonchas. Cuanto más alto sea el objeto, más capas tendrá, lo que supondrá tiempos de impresión más largos. Cuando el filamento fundido se deposita sobre la capa anterior, esta se solidifica uniendo ambas, y así sucesivamente [18].



Figura 70. Impresión con tecnología FMD

En relación con la industria del calzado, la fabricación aditiva mediante FDM ofrece notables ventajas frente a los métodos de fabricación convencional. Permite reducir los costes de producción y tiempos de entrega, agilizando la comercialización. Además, debido a la amplia gama de materiales disponibles para este tipo de impresión, existe un gran espectro de aplicaciones, desde el prototipado hasta la fabricación de piezas de uso final [45].

No obstante, las piezas impresas mediante FMD pueden ser anisotrópicas, es decir, que presenten propiedades diferentes en distintas direcciones. Además, estas piezas tienden a ser menos precisas que piezas impresas por otro tipo de impresión 3D [18].

Debido a la deposición de material capa por capa, las uniones de cada loncha pueden verse a simple vista, teniendo unos acabados superficiales poco pulidos, que requerirán procesos de posprocesamiento para obtener el acabado deseado. Siguiendo con el postprocesamiento, en algunas ocasiones es imprescindible el uso de soportes para la impresión de partes en voladizos, aunque en impresiones con doble extrusor, es posible imprimir dichos soportes con un material soluble, reduciendo considerablemente el tipo de este proceso [18].

De entre todos los materiales utilizados en la impresión 3D mediante FDM, solo unos pocos son indicados para la fabricación de calzado que responda a las necesidades mecánicas pertinentes, como la flexibilidad, durabilidad y comodidad. Uno de estos materiales es el TPU o poliuretano termoplástico.

El TPU o poliuretano termoplástico es un elastómero muy versátil que combina flexibilidad y resistencia, ideal para la fabricación de suelas, plantillas o incluso zapatos completos. Es un material que destaca por:

- Elasticidad y flexibilidad.
- Resistencia a la abrasión.
- Absorción de impactos.
- Resistencia a aceites (o sudor).
- Impermeabilidad.

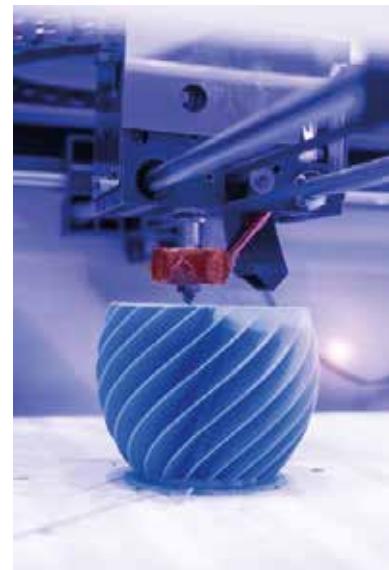


Figura 71. Impresión con tecnología FMD



Figura 72. Prueba de flexibilidad de una suela fabricada con TPU

DLS (Digital Light Synthesis / Síntesis Digital de Luz)

La impresión 3D por DLS, comúnmente denominada Carbon DLS, es una tecnología de impresión desarrollada por la empresa CARBON3D. Se trata de un tipo de fabricación aditiva que consiste en la proyección de un haz de luz ultravioleta (UV) para curar resinas plásticas líquidas y convertirlas en piezas sólidas [9, 38].

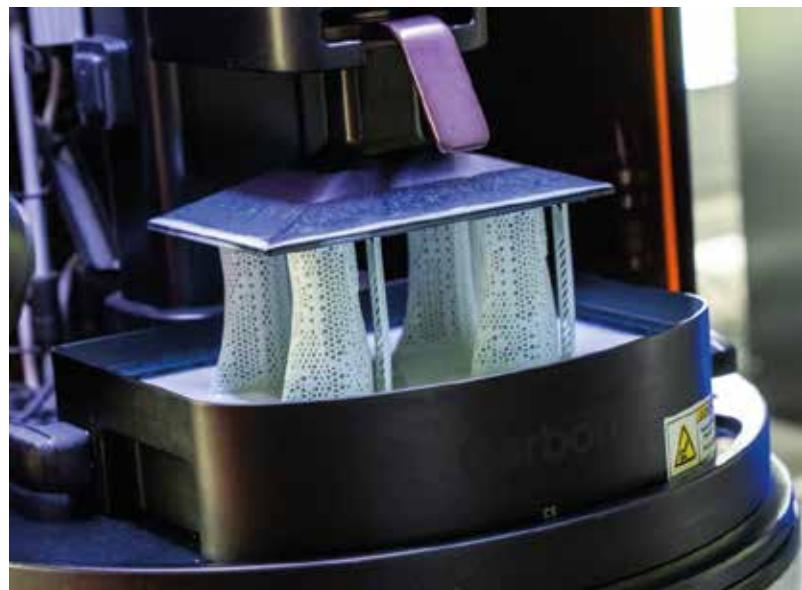


Figura 73. Impresión 3D con la tecnología DLS

La luz UV situada en la parte inferior se proyecta a un depósito de resina atravesando una ventana permeable al oxígeno. Las imágenes UV se proyectan en la resina en capas y la pieza adquiere una forma sólida a medida que la plataforma de construcción se eleva, dando como resultado piezas con acabados superficiales suaves y completamente isótropos, es decir, que presentan propiedades idénticas en todas las direcciones [9, 38].

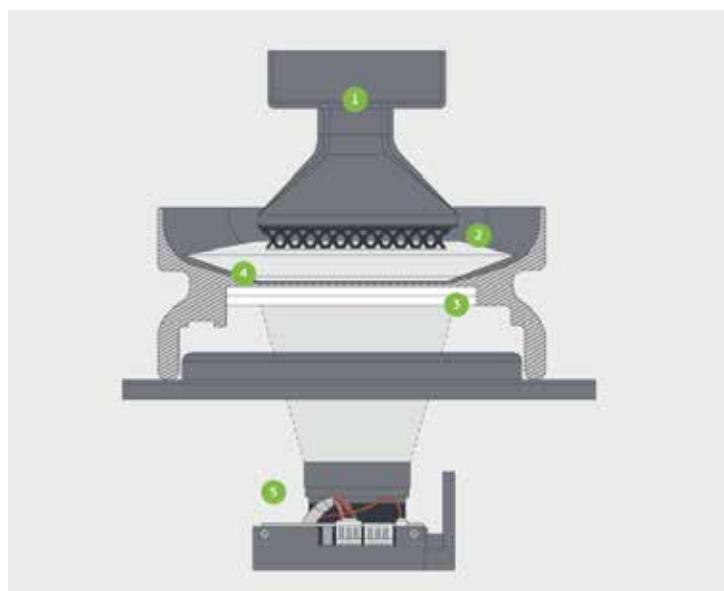


Figura 74. Partes que conforman una impresora DLS: plataforma de construcción (1), resina (2), ventana permeable al oxígeno (3), zona muerta (4) y motor de luz (5).

No obstante, el elevado coste de estas impresoras no está al alcance de todo el mundo y la dependencia de las resinas patentadas compatibles con este tipo de impresión solo es proporcionada por la misma empresa Carbon [17]:

- DLS Poliuretano Rígido-RPU 70
- Poliuretano flexible DLS-FPU 50
- Poliuretano elastomérico DLS-EPU 40
- DLS Silicona-SIL 30

Además, después de la impresión, la pieza requiere de un posprocesamiento térmico para alcanzar las propiedades finales deseadas, requiriendo de más tiempo, energía y equipos especializados. Por otro lado, la alta sensibilidad del material utilizado y el complejo mantenimiento requerido por este tipo de maquinaria hacen de este tipo de impresión una opción menos viable para producciones a gran escala o entornos con recursos limitados, limitándose para aplicaciones especializadas o de alta precisión [9, 17, 38].



Figura 75. Impresora DLS de Carbon 3D

Comparativa entre FMD y DLS

	DLS	FMD
Tecnología de impresión	Fotopolimerización continua con luz (CLIP)	Extrusión de filamento fundido
Material utilizado	Resinas líquidas comercializadas por Carbon3D	Termoplásticos (PLA, TPU, ABS, PETG, etc.)
Velocidad de impresión	Muy Alta	Depende del filamento. Puede ser moderada para PLA y lenta para TPU
Precisión	Muy Alta	Depende de la boquilla. Cuanto más precisa, más lenta
Acabado superficial	Liso. Curado continuo sin capas visibles	Rugoso. Necesario postprocesado para mejores acabados superficiales
Sopores	Necesario	Necesario
Resistencia mecánica	Alta	Variable. Depende del material
Post-procesado	Lavado químico y curado térmico. Sustracción de sopores	Lijado de bordes. Aplicación de calor para eliminar hilos. Sustracción de sopores.
Coste del equipo	Muy Alto	Bajo / moderado
Coste del material	Alto	Bajo
Coste de mantenimiento	Alto	Bajo / medio
Ventajas clave	Alta calidad superficial y estructural. Ideal para piezas con gran demanda mecánica	Bajo coste, versatil y facil acceso para personas no familiarizadas con impresión 3D
Limitaciones clave	Coste elevado, tanto de equipo, material, mantenimiento y postprocesado.	Calidad, resistencia y precisión limitadas.

Tabla 3. Comparación entre tecnologías de impresión 3D DLS y FMD

Actualmente, las tecnologías de impresión más utilizadas y prometedoras en el sector de la industria del calzado son la impresión por FDM y DLS:

- FDM destaca por su accesibilidad, bajo costo de producción y facilidad de impresión, lo que es ideal para la fabricación de prototipos funcionales y pruebas de diseño, incluso para la impresión de los productos preparados para el uso final.
- DLS, se trata de un método de fabricación más avanzado que permite la impresión de piezas con mayores propiedades mecánicas, mejores acabados superficiales y alta precisión de impresión, siendo la opción predilecta para la producción de calzado de alto rendimiento.

Otros métodos de impresión 3D

SLA - Estereolitografía

Consiste en la impresión de piezas en 3D mediante la proyección de un láser UV que solidifica una resina líquida fotosensible de manera controlada, trazando punto por punto la geometría del objeto deseado. Esta tecnología de impresión ofrece una precisión micrométrica, ideal para estructuras complejas, y produce acabados superficiales muy lisos y definidos. Aunque, entre sus limitaciones más notables, se pueden destacar la limitada escala y fragilidad de las piezas impresas, no funcionales para pruebas mecánicas, que requieren del uso de soportes y de procesos especiales de postproducción.

DLP – Procesamiento Digital de Luz

Proceso de impresión similar al SLA, con la principal diferencia de que en vez de proyectar un láser que solidifica una resina fotosensible punto por punto, se proyecta una luz digital que solidifica cada capa de una sola vez. Se trata de una tecnología de impresión 3D significativamente más rápida que el SLA, aunque con acabados superficiales de calidad inferior. La calidad final de la impresión irá estrechamente relacionada con la calidad de resolución del proyector.

SLS – Sintetizado Selectivo por Láser

Se trata de una de las tecnologías más avanzadas en impresión 3D. Consiste en la proyección de un láser de alta potencia que fusiona gránulos de un polvo termoplástico, capa por capa, sin necesidad del uso de soportes. Como resultado se obtienen piezas resistentes completamente funcionales, ideales para impresiones personalizadas de geometrías complejas, ya que no es necesario usar soportes. Por otro lado, se trata de una tecnología muy costosa, no accesible para todas las empresas, requiriendo además periódicos mantenimientos y protocolos de seguridad estrictos. Las piezas impresas tendrán un acabado superficial rugoso, haciendo necesario implementar procesos de postproducción para conseguir acabados suaves estéticos.

2.2.3 Ventajas y limitaciones de la impresión 3D de calzado

A continuación, se presentará un listado de las principales ventajas y limitaciones de la impresión 3D destinada a la fabricación de calzado:

Ventajas

Personalización total y adaptabilidad.

La impresión 3D permite diseños adaptados a la morfología específica de cada usuario. Los datos morfológicos se obtendrán mediante escáneres 3D de alta precisión o incluso con aplicaciones móviles que te escanean el pie con la cámara del teléfono. Este tipo de fabricación ofrece soluciones individuales para cada usuario, incluyendo personas con patologías podológicas particulares, como fascitis plantar, juanetes, dedos en garra, pie plano o cavo, desigualdades en la longitud de las piernas, deformidades congénitas o adquiridas, etc.

Además, se puede ajustar el diseño para controlar la pisada, con control de pronación o supinación, distribución precisa de las cargas o correcciones de defectos posturales, adaptándose a la pisada de cada usuario, mejorando la eficiencia del movimiento y reduciendo el riesgo de lesiones.

Innovación en diseño y materiales

La impresión 3D permite diseñar calzado con geometrías distintas, con diseños innovadores, o simplemente fabricar calzado dependiendo de su finalidad sin tener que ceñirse a un único tipo de calzado, ya que cada par puede ser distinto sin alterar el coste de fabricación. Desde estructuras en forma de malla hasta formas orgánicas, este tipo de tecnología permite la fabricación de calzado sin necesidad de uso de moldes.

Además, al tratarse de una técnica aditiva, se reduce el desperdicio de material de la fabricación tradicional. Permite integrar todas las partes de una zapatilla en una única pieza funcional, eliminando la necesidad de costuras, adhesivos y reduciendo costes de ensamblaje, así como compuestos orgánicos volátiles perjudiciales para el medio ambiente. Permite fabricar calzado de un único material, flexible, resistente y reciclable, que puede ser triturado y volver a ser impreso nuevamente, generando un modelo de economía circular.

Producción eficiente.

La impresión 3D de calzado permite imprimir sus productos bajo demanda, eliminando la sobreproducción, fabricando únicamente cuando se necesita. Al reducir la necesidad de stock, se reducen también los costes logísticos y de almacenamiento. Permite la fabricación de calzado en pequeños talleres, sin necesidad de grandes líneas de producción en fábricas.

Limitaciones

Limitaciones técnicas

La impresión 3D de calzado actualmente sigue siendo lenta en comparación con la fabricación tradicional. Imprimir un único par de zapatillas puede llevar entre 2 a 3 días, dependiendo del tamaño del pie del usuario. Además, existe la posibilidad de que algo no salga como se espera durante la impresión, obligando a volver a empezar desde cero, desperdiando material.

Aunque los materiales como el TPU han avanzado mucho en los últimos años, todavía hay algunos aspectos en cuanto a durabilidad, resistencia al desgaste, continua flexión, que son inferiores a materiales usados en la fabricación tradicional. Además, estos materiales pueden ser caros y requerir condiciones específicas de almacenamiento.

Limitaciones en producción

La impresión 3D de zapatillas actualmente no es nada competitiva en términos de producción a gran escala, ya que producir un solo par de zapatillas puede llevar un tiempo de máquina de 24 a 48 horas, dependiendo del tamaño del pie del usuario. En el sector del calzado, la fabricación mediante ensamblaje en cadena o por inyección es más rentable ahora mismo que la fabricación aditiva.

Por otro lado, el mantenimiento, manipulación, manejo y calibración de los equipos necesarios requiere de una formación y experiencia previa que supone una barrera de entrada para pequeñas empresas emergentes que no cuentan con técnicos especializados.

Limitaciones materiales

Aunque la tecnología de los materiales empleados en impresión 3D de calzado ha mejorado durante los últimos años, aún no son comparables a los materiales usados en la fabricación tradicional en términos de durabilidad, desgaste y flexibilidad.

Además, dependiendo de la tecnología de impresión utilizada, estos materiales pueden ser muy costosos y requerir de condiciones especiales de almacenamiento (como es el caso de la resina fotosensible empleada en DLS).

2.2.4 Fabricación tradicional VS Impresión 3D de calzado

	Fabricación tradicional	Impresión 3D
Producción	Múltiples fases: Diseño, patronaje, corte, costura, ensamblado, etc.	Producción directa desde el modelo digital, de una sola pieza.
Moldes y Utillaje	Moldes caros y específicos por modelo y talla. El calzado a medida requiere hormas personalizadas.	No se necesitan moldes, todo generado digitalmente. Horma del pie escaneada en 3D.
Flexibilidad de diseño	Limitada por herramientas físicas y técnicas de unión y corte.	Total libertad de formas, geometrías, volúmenes y estructuras internas.
Tiempo de desarrollo	Lento. Semanas para lanzar un nuevo modelo partiendo desde la fase de concepción.	Rápido. Prototipos fabricados en horas y los cambios de diseño son inmediatos.
Personalización	Costosa y elaborada. Se necesita una gran habilidad para fabricar calzado a medida.	Totalmente viable. Calzado a medida mucho más fácil mediante escáneres tridimensionales.
Adaptación anatómica	Generalmente se trabaja con hormas normalizadas. ajuste decente pero no perfecto.	Adaptación perfecta a la geometría específica del pie del usuario.
Estética	Diversa, pero condicionada por los métodos de fabricación y materiales utilizados.	Diversa: texturas, perforaciones, geometrías únicas, etc.
Coste inicial (moldes)	Alto o muy alto. Ya sea para moldes de calzado fabricado por inyección o por patrones de corte	Bajo o nulo. Solo se necesita de un diseño digital y un archivo imprimible para iniciar la producción
Coste unitario	Coste bajo en grandes volúmenes fabricados. Alto en productos personalizados a un cliente.	Alto. Mucho tiempo de impresión para un único par de zapatillas.
Producción en masa	Producción en masa eficiente en fábricas con grandes cadenas de montaje.	Inviabile. Tiempos de impresión muy altos. Producción más enfocada a calzado a medida.
Residuos generados	Altos. Residuos resultantes de cortes, sobrantes, adhesivos, costuras, etc.	Bajos. Posibles residuos producidos por purgas de material y/o fallos de impresión.
Huella de carbono	Elevada. Contaminación por transportes y fábricas centralizadas,	Bajo. Producción local y menor necesidad de transporte
Stock y almacenamiento	Necesario para producciones masivas. Requiere de personal que gestione el inventario.	Producción bajo demanda. Stock en condiciones específicas necesario para bobinas de material.
Durabilidad	Alta, aunque depende de los materiales y métodos de fabricación.	Aún por explorar. Depende del material y la calidad de la impresión.
Acabado superficial	Muy pulido.	Requiere de procesos de postprocesado para conseguir calidades superficiales óptimas.
Ajuste y confort	Ajuste decente. Basado en tallas estandarizadas. En calzado a medida el ajuste será perfecto.	Máxima personalización. Ajuste perfecto al pie del usuario.
Innovación en materiales	Se introducen nuevos materiales, como plásticos. En calzado a medida suele usarse cuero o piel.	Alta. Materiales que pueden mezclarse en una misma impresión, zonas multidensidad, etc.
Iteración de productos	Lenta y costosa.	Rápida y económica.
Distribución de producción	Concentrada en Asia, principalmente. Existe fábricas en otros países de Europa y América.	Posibilidad de fabricación local en tiendas o clínicas especializadas en salud podológica.

Tabla 4. Comparativa de la fabricación tradicional de calzado y la impresión 3D

3 Fundamentos del diseño de calzado

En este punto llevaremos a cabo un análisis para comprender cómo se comporta el pie humano durante el movimiento, para poder así diseñar un calzado funcional y ergonómico, destinado al uso diario.

3.1 Estructura básica del calzado

Antes de abordar los aspectos biomecánicos y ergonómicos del pie humano, es importante conocer las partes que conforman un zapato para establecer correctamente una base para la toma de decisiones funcionales, estéticas y técnicas del diseño del calzado. Podemos dividir el calzado en sus diferentes partes: Horma, plantilla, entresuela, suela, corte superior y contrafuerte.

La horma es el negativo del pie desde el que se construye cualquier tipo de calzado. Determina las dimensiones del pie para adaptarse a la fisionomía de cada usuario, ofreciendo el máximo confort posible. Es además una guía para el diseño del upper o corte superior [10].



Figura 76. Hormas estandarizadas para diseñar dsitinto tipo de calzado

El upper o corte superior es la parte del zapato que cubre la parte superior del pie. Determina la forma estética del zapato y proporciona la ventilación y transpirabilidad del pie. Es donde se encuentran otros componentes del calzado como la lengüeta, cordones, ojales, etc. El sistema de cordaje se encuentra situado siempre encima del empeine, y es destinado a ajustar correctamente el calzado al pie y evitar que se mueva o baile, para evitar que se salga o lesiones de tobillo [10].



Figura 77. Upper Flyknit diseñado por Nike. Se puede apreciar la malla, cordones y lengüeta

El contrafuerte es la parte que se sitúa en la parte trasera del zapato. Compuesta de materiales rígidos o semirrígidos que proporcionan gran estabilidad al pie [10].



Figura 78. Sección de una zapatilla en la que se aprecia el contrafuerte

La plantilla se encuentra en la parte inferior del pie. Tiene gran influencia en el confort térmico y mecánico, ya que determina cómo se distribuyen las presiones en las diferentes zonas de la planta del pie y amortigua el impacto contra el suelo. Además, es la encargada de minimizar la fricción debajo del pie, acomodando las fuerzas del movimiento vertical, lateral y de torsión, evitando la aparición de llagas, ampollas o callosidades. El espesor y el material escogido para la plantilla deben colaborar con la entresuela para maximizar la amortiguación de los impactos sufridos en la zona del talón. Es aconsejable, en plantillas destinadas al uso deportivo, incluir pequeñas perforaciones para mejorar la transpirabilidad del pie y materiales viscoelásticos para mejorar la amortiguación en el talón y debajo de las cabezas de los metatarsianos para evitar lesiones al saltar o correr [10].



Figura 79. Plantillas de espuma

La entresuela o mediasuela es la capa situada entre la suela y la parte baja de la horma o la plantilla. Ofrece estabilidad general al pie y amortiguación a los impactos siempre que superen un espesor mínimo de entre 15 a 25 milímetros. Dependiendo del tipo del calzado, estará compuesta de distintos materiales sintéticos como EVAS, poliuretanos o espumados de caucho. Cuanto más ligero y espumado sea el material, antes perderá sus propiedades de amortiguación, por lo que es ideal buscar una densidad suficiente para proporcionar confort y durabilidad a esta parte del zapato. En deportes en los que es necesario realizar bruscos cambios de dirección, es recomendable el uso de entresuelas duras y finas complementadas con buenos contrafuertes y cazoletas para albergar el tejido blando del talón y una selección de plantillas compuestas de materiales viscoelásticos para maximizar la amortiguación de impactos [10].



Figura 80 y 81. Mediasuela fabricados con materiales plásticos

La suela es la parte inferior del calzado, continuamente en contacto con el suelo. La función principal de la suela es la adherencia a diferentes terrenos y proporciona estabilidad al pie. Compuesta normalmente de materiales duros y flexibles, como el caucho o la goma, que proporciona gran tracción y durabilidad durante el movimiento. El diseño de la suela es esencial para maximizar estas propiedades y en ocasiones incorporan componentes funcionales complementarias que mejoran el agarre y la amortiguación, como por ejemplo tacos de goma [10].



Figura 82. Distintos diseños de suelas

En lo referente a la impresión 3D, todas las partes que conforman el calzado estarán fabricadas a partir del mismo material y no será necesario el uso de adhesivos ni costuras para unirlas entre sí. Además, es posible despreciar algunas de estas partes, como por ejemplo el sistema de cordaje, ya que el upper se ajustará perfectamente a la geometría del pie del usuario.

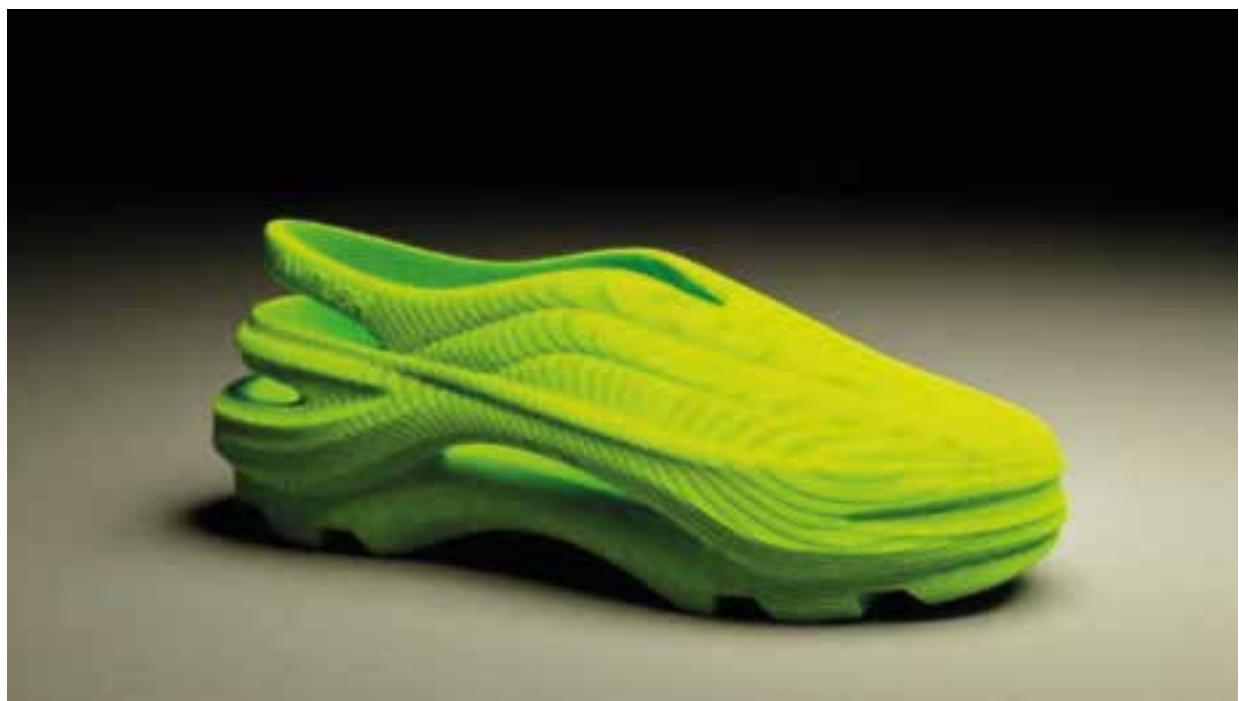


Figura 83. Zapatilla impresa en 3D por Zellerfeld

3.2 Fundamentos anatómicos del pie humano

El pie y el tobillo humano son la base de sustentación del aparato locomotor del organismo y tienen un papel fundamental en la postura y el movimiento corporal humano. Podemos dividir este sistema en distintas partes [32]:

- Tobillo: Región del miembro inferior que corresponde topográficamente a la articulación entre la pierna y el pie. Una de las articulaciones más estables del cuerpo humano debido a su configuración anatómica. Indispensable para realizar los movimientos de flexión y extensión del pie [32]. Compuesto por:

- Tróclea astragalina o astrágalo: Tiene forma de segmento cilíndrico, en forma de cuña (más ancha por delante que por detrás) y con las caras laterales asimétricas, siendo más desarrollada y curva la cara externa. Posee una parte superior ligeramente acanalada que mejora la estabilidad. Permite el movimiento de flexotensión sagital y aducción-abducción transversal [47].
- Mortaja tibio-peronea: Formada por la parte distal de la tibia y el peroné. La superficie articular inferior de la tibia y el maléolo medial se articulan con el astrágalo. Por otro lado, el maleolo lateral del peroné se articula con una carilla del astrágalo. La geometría en forma de cuña de estas dos superficies articulares proporciona encaje y congruencia [47].

La tróclea encaja dentro de la mortaja y proporciona estabilidad mecánica, como la de un engranaje, y se mueve hasta llegar a un tope definido por el maléolo lateral del peroné. Todo este sistema está reforzado por una serie de estructuras ligamentosas y elásticas que mantienen el astrágalo fijo y alineado [47].

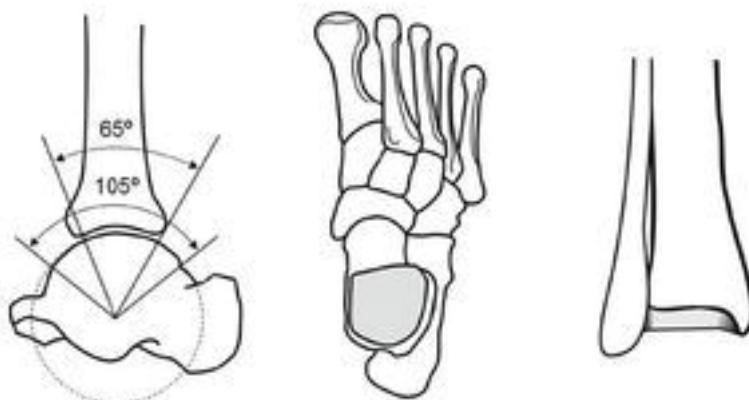


Figura 84. Anatomía ósea del tobillo. Se puede observar la tróclea astragalina a la izquierda y la mortaja tibioperonea a la derecha

- Pie: Parte más distal del cuerpo humano. Se define según VILADOT como una estructura tridimensional variable, base del servomecanismo atigravitatorio, que constituye una pieza fundamental para la posición bipodal y la marcha humana [32].

El pie está formado por tres secciones principales: el tarso (que incluye el talón y el mediopié), el metatarso (parte media del pie) y los dedos (falanges). Los huesos del pie están diseñados para absorber impactos y soportar el peso corporal durante la marcha y el movimiento [47].

Una red compleja de músculos intrínsecos y extrínsecos del pie, junto con sus tendones, controla los movimientos y proporciona estabilidad dinámica. Los músculos intrínsecos se encuentran dentro del pie mismo, mientras que los músculos extrínsecos se originan fuera del pie, pero actúan sobre él para controlar el movimiento [47].

- Talón: Región posterior y plantar del pie. Compuesto de material graso que rodea al calcáneo. Junto a la bóveda plantar, constituye la planta del pie [47].

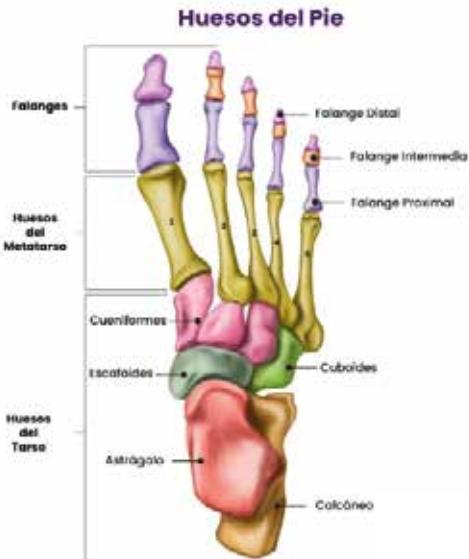


Figura 85. Vista superior de la estructura ósea del pie humano. Se aprecian las tres partes del pie

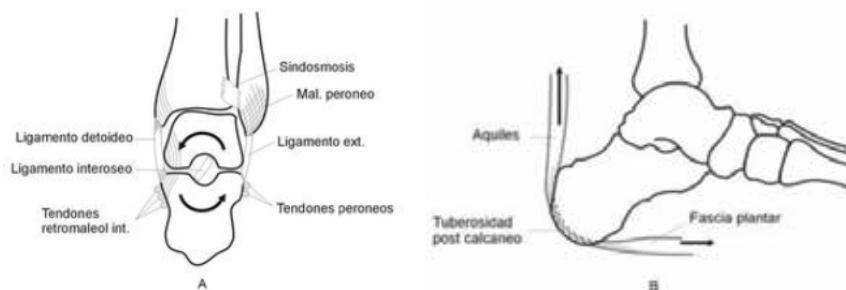


Figura 86. Plano frontal (A) y plano sagital (B) de la estructura ósea del talón

- Bóveda plantar: Excavación tarsometatarsiana o concavidad plantar. Compuesta de un sistema viscoelástico a merced de sus componentes musculotendinosos. Capaz de adaptarse a cargas externas e internas y confiere la rigidez necesaria para soportar las solicitudes mecánicas pertinentes [47]. Se puede dividir en:
 - Arco longitudinal medial: Recorre desde el talón hasta la base del primer metatarsiano. Soportado por el ligamento calcaneonavicular y la fascia plantar. Se trata del arco más elevado y elástico. Destinado a la absorción de impactos y la adaptación a superficies irregulares [32].



Figura 87. Arco longitudinal medial (resaltado en rojo)

- Arco longitudinal lateral: Va desde el talón hasta la base del quinto metatarsiano. Se trata del arco más bajo y rígido que proporciona estabilidad estructural [32].



Figura 88. Arco longitudinal lateral (resaltado en rojo)

- Arco transversal: Se extiende lateralmente a través de todas las cabezas metatarsianas. Distribuye la presión en la parte anterior del pie [32].



Figura 89. Arco transversal (resaltado en rojo)

- Empeine: Parte dorsal del pie que corresponde con la transición entre la región mediotarsiana y astragalina [32].



Figura 90. Representación de la estructura ósea del empeine

El tobillo y el pie forman una unidad funcional constituida por una agrupación de elementos articulares que conforman las articulaciones[32]:

- Tibioperoneoastragalina: unión entre la extremidad inferior de la tibia y el peroné con el hueso astrágalo del pie (hueso del tobillo) [32].



Figura 91. Vista lateral del pie. La articulación tibioperoneoastragalina está resaltada en verde

- Subastragalina: Articulación que une el astrágalo con el calcáneo (hueso del talón). Responsable de los movimientos de inversión y eversión del pie [32].



Figura 92. Vista lateral del pie. La articulación subastragalina está realtada en verde

- Mediotarsiana: Articulación compuesta que une el tarso posterior (calcáneo y astrágalo) con el tarso medio (escafoideos y cuboides) [32].



Figura 93. Vista lateral del pie. La articulación mediotarsiana está resaltada en verde

Dicha agrupación articular es la responsable de repartir las cargas corporales entre sus diferentes elementos articulares durante el movimiento, todas ellas movilizadas mediante la musculatura larga del pie, que permite el movimiento [32]:

- Flexo-extensión en la articulación tibioperoneo-astragalina [32]:

- Flexión dorsal (dorsiflexión): El pie se eleva hacia la tibia. Amplitud de movimiento entre 20º y 30º respecto al plano horizontal del suelo.
- Flexión plantar: El pie se aleja de la tibia. Amplitud de movimiento entre 30º y 50º respecto al plano horizontal del suelo.

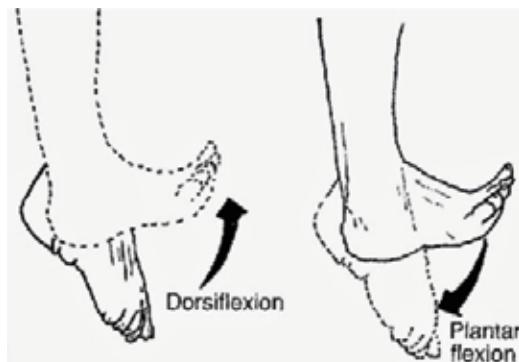


Figura 94. Flexo-extensión de la articulación tibioperoneo-astragalina

- Inversión y eversión en la articulación subastragalina: Inclinación lateral del pie en el eje longitudinal del pie [32].



Figura 95. Inversión y eversión de la articulación subastragalina

- Abducción y aducción: Rotación del pie que aleja o acerca los dedos y metatarsianos al eje central del cuerpo [32].



Figura 96. Abducción y aducción del tobillo

- Rotación en pronación y supinación en la articulación mediotarsiana: Movimientos combinados de inversión, aducción y flexión plantar, y eversión, abducción y flexión dorsal. Movimiento clave para la marcha y la carrera [32].
- Articulaciones metatarsofalángicas e interfalángicas: Movimientos realizados por los dedos de los pies respecto a la planta del pie (flexión, extensión, abducción y aducción) y movimientos independientes como los de los dedos de la mano [32].

Desde el punto de vista cinético, el astrágalo distribuye el peso corporal: un 60% va al calcáneo y un 40% al antepié. El primer metatarsiano soporta el mayor peso, clave en el equilibrio y la propulsión.

3.3 Biomecánica del pie humano

La biomecánica es la disciplina que estudia las fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano y cómo estas afectan a su movimiento y estructura. Respecto a la biomecánica del pie, se hablará de los 3 movimientos locomotores esenciales para el movimiento: marcha, carrera y salto. En este apartado se estudiarán la distribución de fuerzas, eficiencia del desplazamiento y la implicación de los músculos internos y externos del pie humano [20].

La marcha o zancada es un movimiento cíclico en el cual el cuerpo humano se mueve hacia delante en posición erguida, siempre con un pie en contacto con el suelo, soportando el peso alternadamente por ambas piernas. Se puede dividir este movimiento en dos fases fundamentales: Fase de apoyo y de oscilación [20]:

- La fase de apoyo es aquella en la que el pie se encuentra en contacto con el suelo. Empieza con el contacto inicial (usualmente con el talón) y termina con el despegue del antepié. Comprende el 60% del ciclo de movimiento [20].

El contacto inicial comienza con la dorsiflexión del tobillo, activándose los flexores dorsales (principalmente el tibial anterior), en sincronía con las articulaciones de la rodilla (cuádriceps e isquiotibial) y la cadera (glúteo mayor y medio). Seguidamente comienza la fase de respuesta de carga, en la que se amortigua el peso del cuerpo mediante el control de la flexión de rodilla y tobillo [20].

El apoyo inicial tiene lugar en la parte posteroexterna del talón para después seguir apoyando el quinto metatarsiano y posteriormente el primero mientras el peso del cuerpo se transfiere de un pie a otro [20].

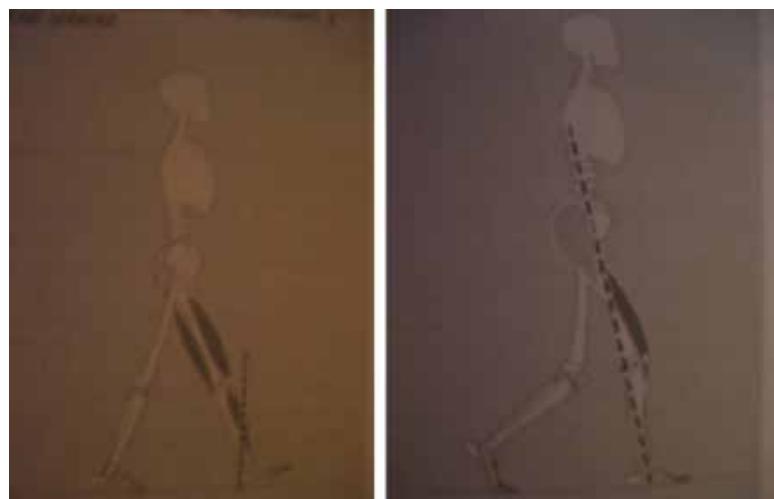


Figura 97 y 98. Contacto inicial y fase inicial de apoyo de la marcha

Luego, en la fase media del apoyo, el cuerpo avanza sobre el pie estacionario, mientras que los dedos del otro pie comienzan a despegarse del suelo, comenzando así un apoyo monopodal. Los 3 arcos plantares comienzan a sufrir las mayores deformaciones [20].

En esta fase se estabilizan el tobillo, la rodilla y la cadera; gracias al sóleo y a la intervención de la musculatura de la tibia y peroné y la musculatura intrínseca del pie, se produce el equilibrio del cuerpo [20].



Figura 99. Fase media del apoyo de la marcha

La fase final del apoyo tiene como objetivo propulsar y acelerar el movimiento y asegurar una longitud de zancada adecuada. Comienza cuando el cuerpo pasa la línea vertical del cuerpo. Un trabajo conjunto entre el soleo y los gemelos (tríceps sural) controla la flexión plantar del tobillo y se contraen con potencia para despegar el talón del suelo. Por último, comienza la fase previa a la oscilación y comienza cuando se produce el contacto inicial del otro pie. Los flectores de la cadera impulsan el muslo hacia adelante, que induce a la flexión de la rodilla y se produce una flexión dorsal de las falanges de los dedos [20].



Figura 100 y 101. Fase final del apoyo y fase previa a la oscilación de la marcha

- La fase de oscilación es aquella en la que el pie no está en contacto directo con el suelo. Comienza cuando se despega completamente el pie del suelo y termina con el contacto inicial de la fase de apoyo. Comprende el 40% del ciclo de movimiento de la marcha o zancada [20].

La primera fase de la oscilación tiene como objetivo la separación del pie del suelo. Dicha separación se consigue con la actividad concéntrica del flexor del primer dedo y se mantiene gracias a la musculatura pretibial (principalmente el tibial anterior) durante la fase media de la oscilación [20].

Finalmente, en la fase final de la oscilación, se produce una deceleración de la pierna y la correcta posición del pie para establecer otra vez el contacto con el suelo. Durante esta fase es necesaria una extensión completa de la rodilla y una dorsiflexión para así comenzar el apoyo con el talón [20].



Figura 102, 103 y 104. Fase primera, media y final de la oscilación de la marcha

La carrera es similar al movimiento efectuado durante la marcha, con la diferencia de que durante este movimiento hay una fase de vuelo en la cual ninguno de los dos pies está en contacto con el suelo. En esta fase se asocia la acción combinada de las articulaciones de la cadera, la rodilla y del tobillo; permite el desplazamiento de la masa corporal sin cambios abruptos en la elevación alcanzada por el centro de masas del cuerpo [20].

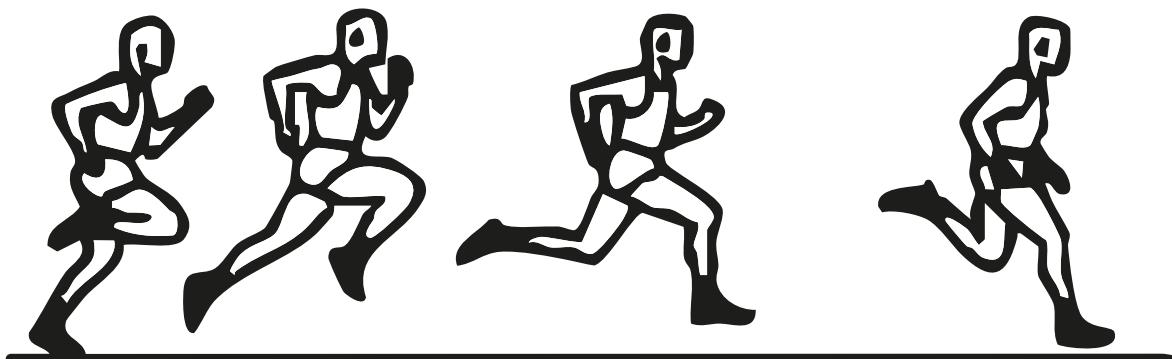


Figura 105. Representación de la fase de vuelo durante la carrera

Por tanto, la marcha será una sucesión de apoyos unipodales y bipodales, mientras que la carrera será una sucesión de apoyos unipodales y de vuelos bipodales. Durante la carrera, las fuerzas originadas cuando el talón choca con el suelo son muy superiores a las generadas durante la marcha, siendo de dos a tres veces mayores. La elevada carga soportada por el esqueleto durante este movimiento hace que los aspectos relacionados con la amortiguación sean de gran importancia para el calzado deportivo [20].

Por último, se estudiará el movimiento de salto. Durante el salto intervienen las fuerzas musculares, la reacción del suelo y la fuerza de la gravedad, la cual hay que superar para despegar los pies del suelo. Este movimiento se caracteriza por tener 2 fases principales: La fase de impulso y la fase de aterrizaje:

- La fase de despegue o impulso se caracteriza por la flexión de las articulaciones del tobillo, rodilla y cadera, que almacena energía elástica, para después contraer los músculos de manera explosiva para así superar la fuerza de la gravedad y despegar los pies del suelo. Cuanto más reactivo (o duro) sea el suelo, mayor será el salto.
- La fase de aterrizaje consiste en una absorción controlada del impacto al volver a entrar en contacto con el suelo. Durante el aterrizaje, el tobillo, la rodilla y la cadera se flexionan para disipar la energía procedente del impacto contra el suelo. En deportes donde saltar es una parte fundamental, como el baloncesto, es importante escoger un calzado adecuado con gran capacidad de amortiguación de impactos y de estabilización de tobillo para evitar lesiones y mejorar el rendimiento de los saltos.



Figura 106. Representación de la fase de impulso y despegue, fase de vuelo y fase de aterrizaje en un salto vertical

4.4 Aspecto biomecánicos relacionados con el calzado

Desde el punto de vista de la ergonomía, rendimiento, confort, protección y la adaptación del calzado a la actividad a realizar, depende de una serie de factores o aspectos biomecánicos o demandas fundamentales que hay que tener en cuenta para el correcto diseño de un calzado óptimo: amortiguación, agarre y adaptación a los movimientos naturales del pie y la distribución de las presiones en la planta del pie [10].

La amortiguación de impactos fue el primer concepto biomecánico aplicado al calzado que se difundió de forma generalizada desde sus primeras aplicaciones en el calzado deportivo. Durante la marcha, la carrera y los saltos, las articulaciones inferiores absorben impactos significativos al entrar en contacto con el suelo. Como ya se ha mencionado con anterioridad, durante la carrera, el impacto sufrido por los pies es de dos a tres veces superior al generado durante la marcha y, en saltos verticales, el impacto generado por el peso del cuerpo es hasta ocho veces mayor [10].

Se define amortiguación de impactos como la capacidad de un material, estructura o sistema para disminuir la magnitud de las fuerzas generadas en el impacto del pie contra el suelo durante las actividades deportivas o cotidianas. El cuerpo humano ha desarrollado de manera natural protecciones contra dichas fuerzas. El tejido blando del talón, en colaboración con la flexión de rodilla, tobillo y del pie, es capaz de amortiguar más del 90% de las fuerzas de impacto [10].

Para ayudar a mejorar la amortiguación del pie, es importante diseñar un calzado de un material o con una estructura adecuada, con una entresuela de un grosor suficiente para absorber los impactos y que no altere la movilidad del usuario o el uso de plantillas fabricadas a partir de material viscoelástico, principalmente en la zona a la altura de los metatarsos y del talón [10].

El agarre entre el calzado y el suelo es lo que permite generar las fuerzas necesarias para la impulsión, frenada y estabilización del pie sobre el suelo sin deslizarse sobre él durante la marcha, carrera o el salto. Es importante distinguir entre fricción y tracción en lo referente al calzado [10]:

- La fricción es la fuerza generada por el contacto entre las superficies de la suela y el pavimento. Estas fuerzas pueden ser longitudinales o rotacionales [10].
- La tracción es la fuerza de frenada o impulso generado por la deformación de los materiales de la suela al penetrar en el terreno de superficies naturales (como los tacos de las zapatillas de fútbol que penetran sobre el césped) [10].

El agarre depende de varios factores referentes al diseño del calzado, como el material escogido para la fabricación de la suela, el diseño de la suela y la huella o dibujo de esta. El uso de materiales blandos aumentará la fuerza de fricción sobre la superficie, pero aumentará el desgaste con el tiempo. Las suelas de perfil plano aumentarán la superficie de contacto, ya que la totalidad de la planta está en contacto con el suelo. Por último, un dibujo de la suela liso aumentará el deslizamiento de la suela, mientras que los dibujos pronunciados permitirán un mejor agarre [10].

Dependiendo del uso destinado del calzado a diseñar, existen algunos movimientos que son convenientes de controlar y otros sobre los que el calzado no debería interferir en absoluto. De esta manera diferenciaremos entre movimientos lesivos y movimientos de ejecución. Entre los movimientos de ejecución podemos destacar la dorsiflexión y flexión plantar, supinación y pronación y la flexo-extensión de las falanges [10].

Para la efectiva flexo-extensión de los dedos, la suela del calzado debe ser lo suficientemente flexible como para acompañar al movimiento del pie sin despegarse de él, estando el zapato bien sujeto sobre el empeine y en la parte inferior del tobillo, sobre el tendón de Aquiles. Durante la fase de despegue en la carrera, el material utilizado en la entresuela debe facilitar el movimiento de flexo-extensión, proporcionando confort y protección al antepié ante repetidas flexiones durante el desempeño deportivo. Algunos calzados poseen cortes transversales a la altura de los metatarsos que facilitan el movimiento, pero son más susceptibles a roturas.

Respecto a la pronación y supinación del pie, una hiperpronación incrementa el estrés en las articulaciones, músculos o tendones y el riesgo de sufrir alguna lesión, como un esguince de tobillo. El uso de una entresuela con un espesor excesivo o de materiales excesivamente blandos provoca una mayor pronación. Para evitar lesiones, es recomendable el uso de contrafuertes de materiales rígidos en la zona del talón para mejorar la estabilidad del pie [10].

Las presiones plantares son fuerzas en el eje vertical, registradas en superficies concretas de la planta del pie. Si se suman todas estas fuerzas recogidas en diferentes partes de la planta del pie apoyadas en un determinado instante, su valor será igual a la fuerza vertical de reacción del suelo en ese momento [10].

Durante la marcha, se puede observar cómo el centro de presiones se inicia en la parte postero-externa del talón, recorriendo la distancia hasta el quinto metatarsiano siguiendo la curvatura del arco lateral. Luego, llega hasta la cabeza del segundo y primer metatarsiano para abandonar el pie por la yema del primer dedo o hallux [10].

Durante la carrera, el centro de presiones comienza por la zona externa de la huella. Dependiendo de la disciplina realizada, el registro de presiones plantares cambiará de uno a otro. Al aumentar la velocidad de carrera, aumentan significativamente las presiones plantares [10].

Una vez estudiados todos estos aspectos biomecánicos relacionados con el diseño del calzado, podemos hacernos una idea de cómo empezar a diseñar un calzado óptimo para el uso cotidiano o deportivo. Las principales claves de diseño son:

- Adaptabilidad a la forma de los pies durante la marcha, la carrera o los saltos, sin oprimirlos, evitando rozaduras y previniendo deformidades en los dedos.
- Adaptabilidad a los movimientos del pie, sin entorpecerlos y proporcionando un movimiento estable y sin necesidad de ejercer más esfuerzo del necesario.
- Capacidad de amortiguación de los impactos generados al caminar, correr y saltar, principalmente en el choque del talón y metatarsianos contra el suelo. Además de proteger las articulaciones frente a lesiones y aumentando la sensación de confort.
- Distribución adecuada de las presiones que se soportan en la planta de los pies, evitando puntos dolorosos y presiones continuadas.
- Acabado correcto en la horma del zapato para evitar lesiones en la piel, eliminando costuras burdas, gruesas o mal localizadas. Además de un correcto acabado superficial para evitar que el pie se deslice dentro del zapato.
- Buena capacidad de transpiración de los materiales y adecuado confort térmico para evitar sudor excesivo que reblanzece la piel y favorezca la aparición de infecciones u hongos.
- Capacidad de agarre al suelo para evitar así resbalones, caídas y lesiones provocadas por una mala adherencia al suelo.

4. Desarrollo técnico de diseño del calzado deportivo-casual.

4.1 Inspiración estética

El concepto inicial de la zapatilla parte de la intención de reproducir un calzado con un estilo similar al desarrollado por la empresa Zellerfeld, pionera en la impresión 3D de calzado. El objetivo era diseñar un modelo deportivo-casual dirigido a un público joven, combinando comodidad, funcionalidad y una estética innovadora.

A continuación, se presentan algunos diseños de Zellerfeld que sirvieron como referencia visual e inspiración para el desarrollo del producto, con el fin de ilustrar el estilo, formas y principios que se intentaron integrar en la propuesta final:



Figura 107. Variedad de zapatillas impresas en 3D de Zellerfeld

Al observar los diseños de la marca y compararlos con el prototipo desarrollado en este proyecto, se pueden apreciar similitudes conceptuales que evidencian la influencia directa de la marca en el proceso creativo.

Los diseños parten de una estética orgánica y moderna, donde predominan las líneas curvas y superficies continuas, en las que se tiende a unificar todos los componentes en una sola pieza sin costuras ni uniones visibles. Las zapatillas de Zellerfeld son indistinguibles por la exposición intencionada del patrón de relleno en algunas zonas que aportan ligereza y transpirabilidad al producto. Además, suelen incorporar suelas gruesas de densidad homogénea con las que se logra mayor amortiguación, aunque en este proyecto se estudiarán las posibilidades de incorporar un relleno heterogéneo que ofrezca mayor protección y tracción al suelo.

4.2 Bocetos e ideas iniciales

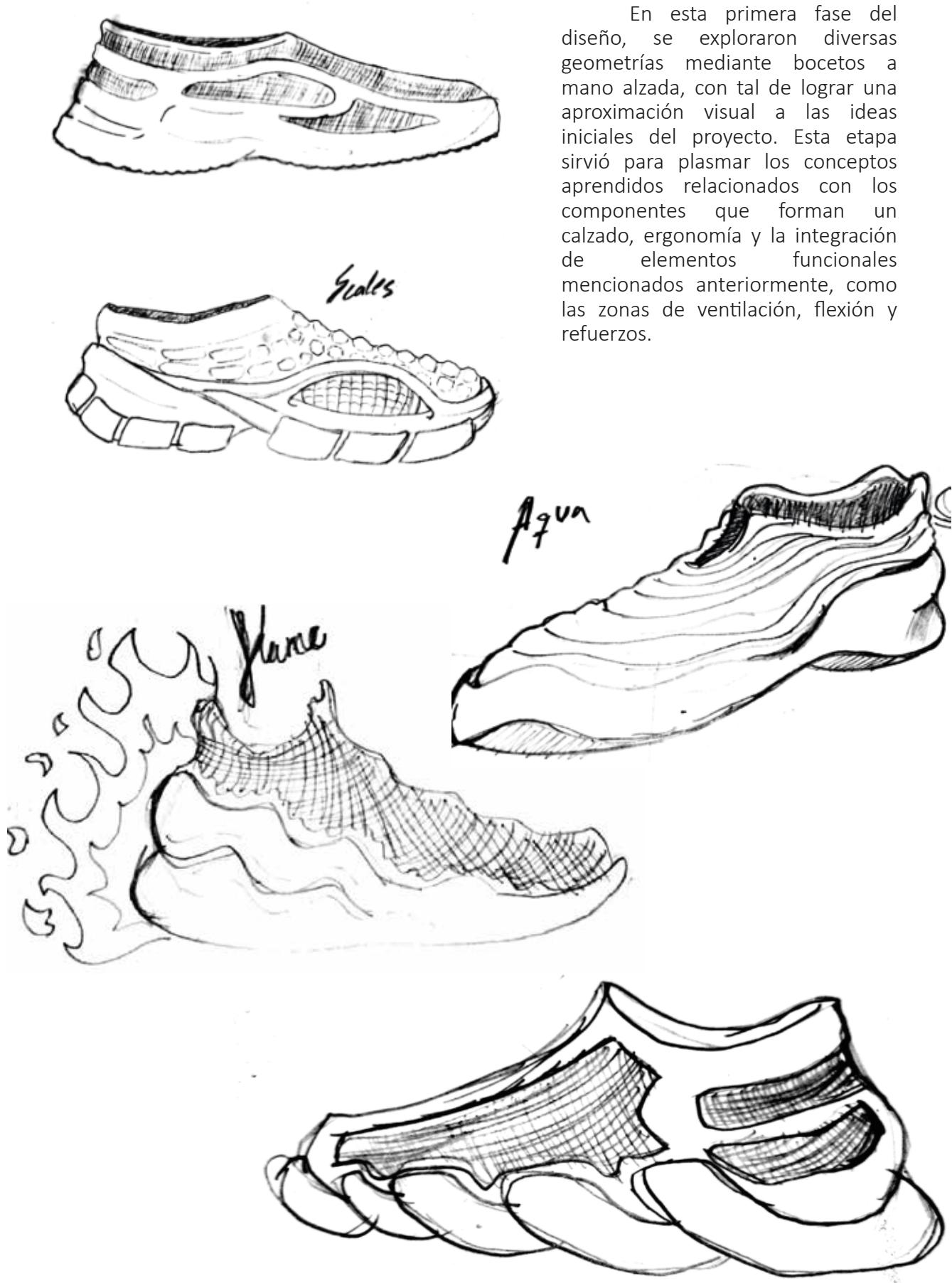


Figura 108. Bocetos iniciales

En esta primera fase del diseño, se exploraron diversas geometrías mediante bocetos a mano alzada, con tal de lograr una aproximación visual a las ideas iniciales del proyecto. Esta etapa sirvió para plasmar los conceptos aprendidos relacionados con los componentes que forman un calzado, ergonomía y la integración de elementos funcionales mencionados anteriormente, como las zonas de ventilación, flexión y refuerzos.

El bocetado permitió también analizar la posible división del calzado en sus distintas áreas (upper, mediasuela y suela) y cómo plantearlas para producirlas mediante la impresión 3D y detectar qué configuraciones presentaban mayor potencial, tanto estético como funcional, para sentar las bases del posterior modelado digital.

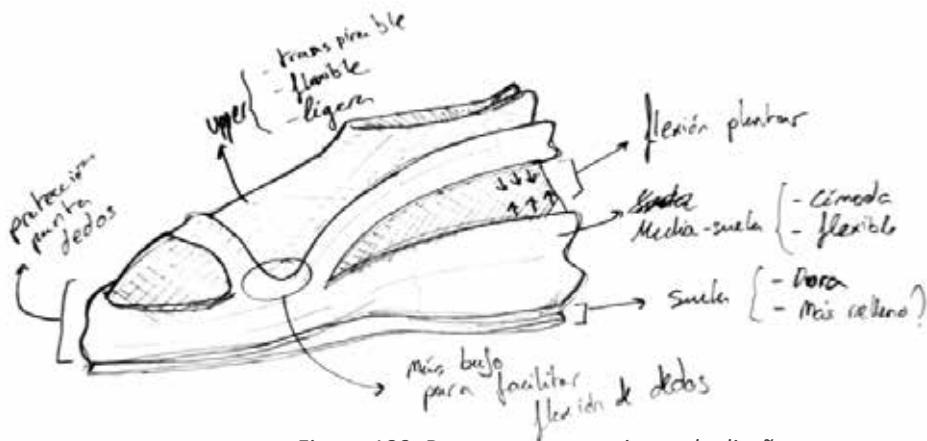


Figura 109. Boceto con anotaciones de diseño

De manera paralela, también se exploraban las posibilidades del software CAD utilizado, en este caso se trata del Rhino 8 de Rhinoceros 3D, lo que supuso una de las principales barreras de entrada para este proyecto. Se comenzó a familiarizar con el entorno de trabajo y las herramientas disponibles para el modelado, ya que, al tratarse de un programa de diseño avanzado, era preciso un periodo de aprendizaje inicial para poder traducir de forma eficaz los bocetos conceptuales en un modelo digital preciso.

Se desarrollaron múltiples diseños en los que se plasmaba lo aprendido durante el periodo de aprendizaje, permitiendo consolidar el manejo de las herramientas proporcionadas por Rhino 8. Estos primeros modelos funcionaron como ensayos conceptuales que permitieron explorar al máximo las posibilidades del diseño generativo y la fabricación aditiva. A través de estas pruebas se fue afinando la geometría hasta llegar a una solución funcional y coherente con los objetivos estéticos y ergonómicos del proyecto:

4.2.1 Proyecto Aqua

Esta zapatilla se inspiró principalmente en el elemento acuático, concretamente en las ondas concéntricas del agua cuando lanzamos una piedra sobre el agua calmada. La idea era capturar el momento de ruptura de la tensión superficial y plasmarlo en una geometría dinámica y fluida. Como he mencionado antes, estos primeros diseños no estaban destinados a un producto final, sino para explorar las posibilidades del programa de diseño para generar formas complejas. También fueron utilizados para hacer pruebas de impresión con TPU, evaluando el comportamiento del material a este tipo de geometrías.

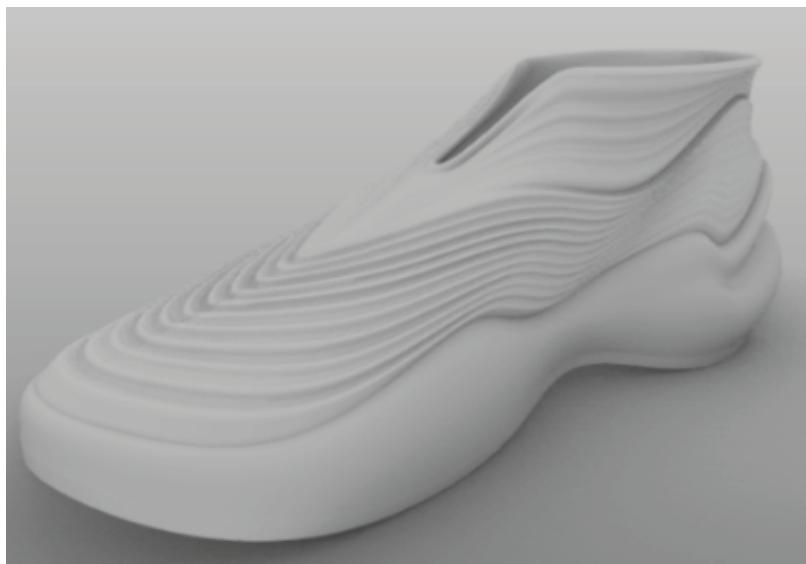


Figura 110. Renderizado de la zapatilla "Aqua"



Figura 111. Ondas formadas en el agua



Figura 112. Prototipos de "Aqua"

4.2.2 Proyecto “Croc”

Este diseño fue concebido principalmente para hacer una prueba de impresión de una zapatilla dividida en diferentes partes, aplicando parámetros de impresión únicos a cada una de ellas. De esta manera se lograba tener una parte más sólida y rígida, y otra más flexible y transpirable. Inspirada en las clásicas Crocs, zapatillas de plástico que se caracterizan por su ligera estructura, su capacidad de ventilación y una pieza móvil que sujeta y ajusta el calzado al pie sobre el tendón de Aquiles.

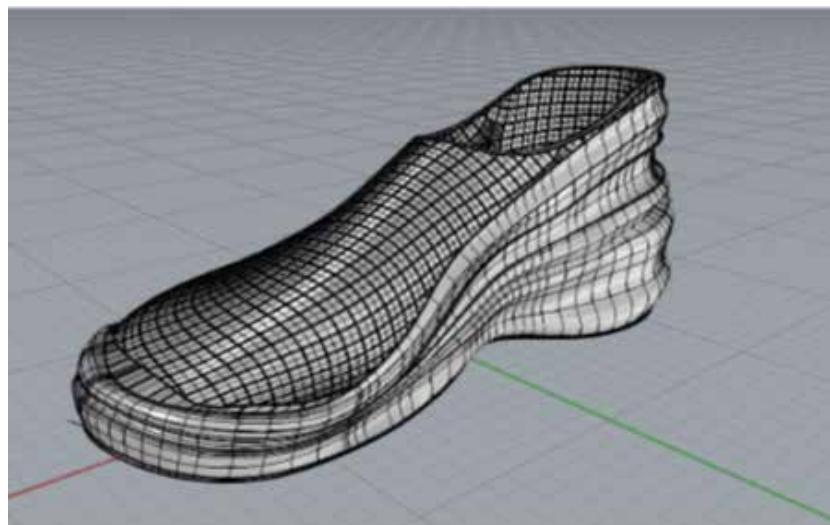


Figura 113. Renderizado del proyecto “Croc”



Figura 114. Sandalias Crocs



Figura 115. Prototipo de zapatilla



Figura 116. Prototipo de zapatilla

4.2.3 Proyecto Humo

Una vez dominado el uso de superficies en Rhino 8, se buscó un diseño más complejo que consolidase lo aprendido en etapas anteriores. El diseño está inspirado en las fluctuaciones formadas por el humo cuando asciende, siguiendo con la línea estética de las formas orgánicas. Otra fuente de inspiración de este diseño, y por el que principalmente se desarrolló, es la zapatilla Hezi de Zellerfeld, diseñada por Khamis Studio, con la que comparte ciertas similitudes formales.

Este último diseño es la base de la que se partió para el desarrollo del diseño final. Se añadieron nuevos elementos y se cambió levemente la geometría, reduciendo los relieves para facilitar la impresión; se redujo el espesor de la suela y se añadieron nuevos elementos que mejoran el diseño final, como por ejemplo, una apertura en la zona del empeine para facilitar la entrada del pie y una hendidura para apoyar el tendón de Aquiles, entre otras.



Figura 118. Zapatilla Hezi, de Khamis Studio



Figura 117. Prototipo de proyecto "Humo v.1"



Figura 119. Renderizado de Proyecto "Humo v2"



Figura 119. Renderizado de Proyecto "Humo v2"

4.3 Diseño final: Estética orgánica, ergonómica y sostenible

El diseño de la zapatilla parte de la premisa de lograr una geometría estética y funcional. Inspirado en elementos naturales, el calzado se adapta a una estética orgánica, alejada de líneas rectas y volúmenes rígidos, centrada en curvas suaves, fluidas y superficies continuas. Esta elección estética responde a la búsqueda de armonía entre el producto y el cuerpo humano, favoreciendo la ergonomía y el movimiento natural del pie, aprovechando las libertades geométricas que ofrece la impresión 3D.



Figura 120. Renderizado del diseño final

Esta zapatilla está diseñada a partir de una horma personalizada únicamente para mí. Gracias a esto se conseguirá un ajuste perfecto, ya que el interior de la zapatilla es un negativo de la geometría de mi pie. La parte de abajo de la horma, conduciendo el proyecto al diseño de un calzado ortopédico, está diseñada teniendo en cuenta la forma de la bóveda plantar (arcos longitudinales y arco transversal) y el talón del pie, lo que ofrecerá aún mayor confort que las plantillas planas de la mayoría de calzado comercial.

Además, la zona del talón está 5 milímetros más elevada que la zona frontal de la plantilla, otorgando una ligera inclinación plantar y consiguiendo:

- Una postura más ergonómica.
- Liberar tensión en los tendones (especialmente el tendón de Aquiles).
- Distribución equitativa del peso.
- Mayor estabilidad.
- Facilitar la fase de apoyo de la marcha.
- Mejora de amortiguación e impulso.

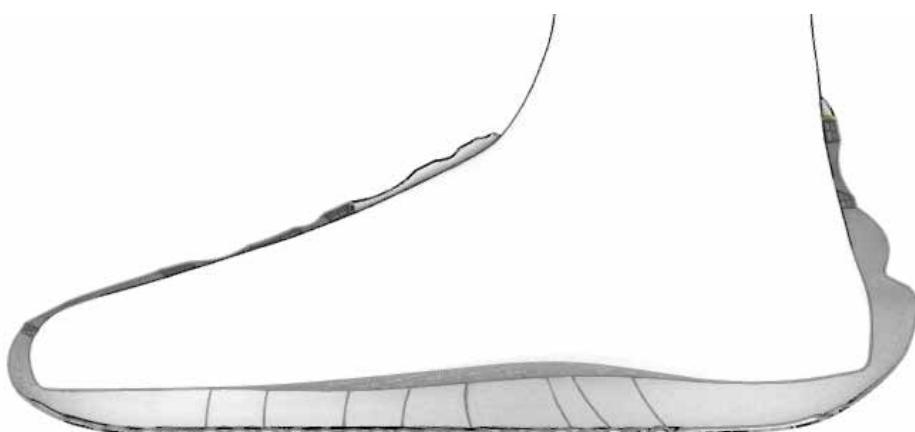


Figura 121. Vista lateral cortada de la zapatilla y la horma

El calzado está diseñado para ser producido con fabricación aditiva, específicamente por impresión 3D por FDM. Por esta razón, durante el diseño de la zapatilla, se ha evitado en la medida de lo posible que existan partes de la misma en voladizos con ángulos menores de 45º respecto al plano horizontal, cuando la zapatilla se encuentra en posición vertical, para reducir así el uso de soportes durante la impresión y desperdiciar la menor cantidad de material posible.

Este diseño y la posterior fabricación abordan el problema de la sostenibilidad. La fabricación en cadena de calzado genera gran cantidad de residuos generados a partir de materiales no reciclables. La impresión 3D reduce drásticamente estos desperdicios y, debido a la naturaleza de la fabricación aditiva y a las propiedades del material escogido, como es el TPU, es posible reciclarlo mediante procesos de trituración para poder volver a ser usado e imprimir otros productos.



Figura 122 y 123. Vista superior y lateral de la zapatilla

El modelo ha sido diseñado en 4 partes funcionales diferentes, a las que llamaremos Upper, Mediasuela, Suela y Cuello. Esta segmentación permite modificar cada una por separado, respondiendo a las necesidades específicas a las que están dirigidas, obteniendo áreas de diferentes grados de flexibilidad y rigidez:

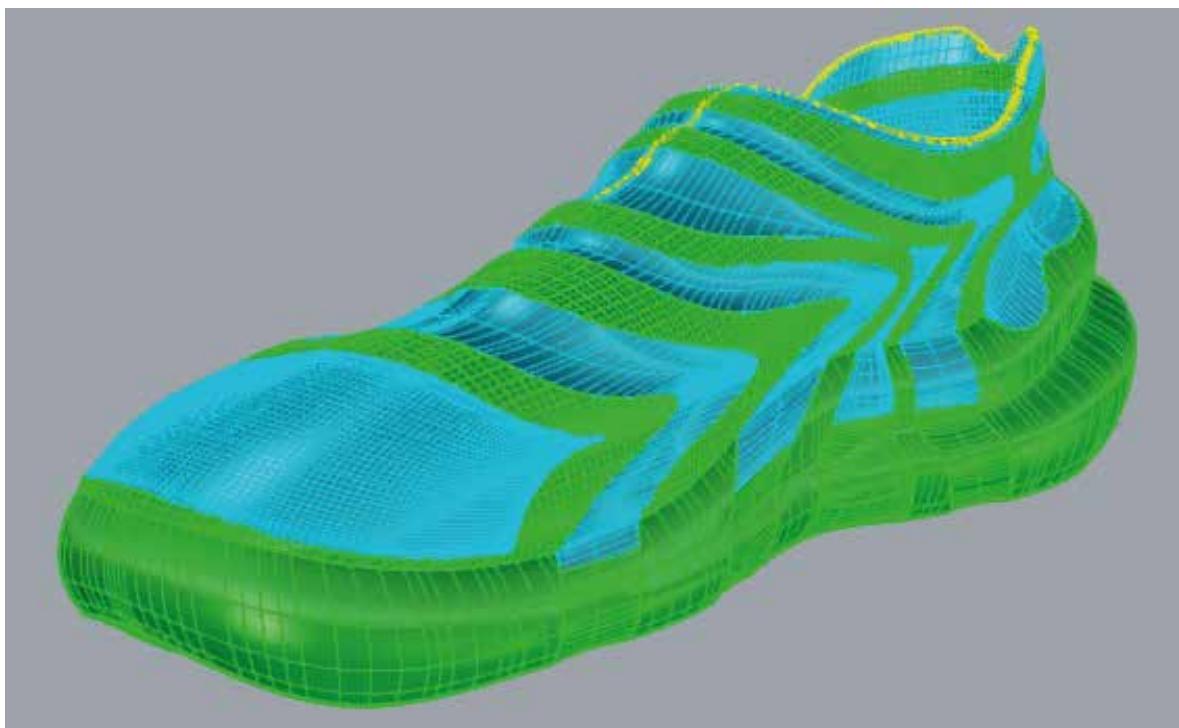


Figura 124. Partes funcionales de la zapatilla: Upper(Azul), Mediasuela y Suela (Verde), y Cuello (Amarillo)

4.3.1 Upper

El upper es la parte de la zapatilla que ofrecerá mayor transpirabilidad y flexibilidad al conjunto. Dichos efectos se conseguirán al dejar expuesto el patrón de relleno una vez se imprima la pieza.

Se trata de la parte de la zapatilla con mayor superficie; de esta manera se conseguirá maximizar la ventilación del pie sin comprometer la rigidez estructural de la zapatilla y reducir notoriamente el peso total del conjunto. Para evitar la rotura o separación del upper durante el uso, se decidió dividir el mismo en varias partes para mejorar así la adhesión con la mediasuela. La unión se llevará a cabo mediante el sueldo del material durante la impresión, prescindiendo totalmente de adhesivos o costuras.

La geometría y localización de las distintas partes del upper no se han dejado al azar, ya que están colocadas estratégicamente para facilitar y no interferir en los movimientos naturales del pie.



Figura 125. Vista lateral del Upper

Tanto la parte más posterior del upper como la segunda de ellas, empezando por la punta, están situadas sobre las articulaciones tibioperoneoastragalina y metatarsofalángica respectivamente, facilitando los movimientos de dorsiflexión del tobillo y la flexión de las falanges, necesarios durante la marcha, la carrera y el salto.

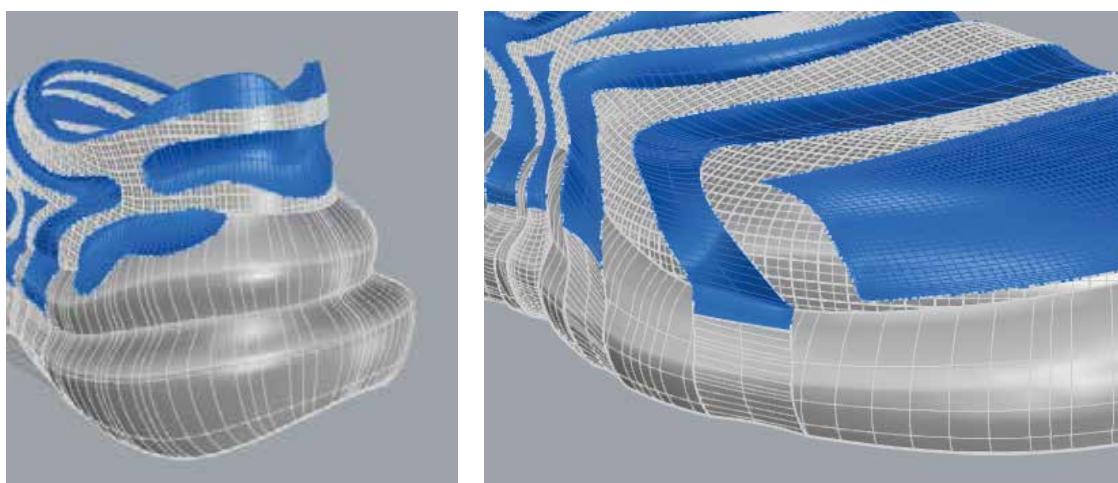


Figura 126 y 127. Upper resaltado en azul

4.3.2 Mediasuela

La mediasuela es la parte de la zapatilla que proporcionará amortiguación, comodidad, estabilidad al pie y rigidez estructural al conjunto. Al contrario que en el caso del upper, la mediasuela sí tendrá paredes de impresión, dejando un acabado superficial más suave.

La mediasuela tendrá un grosor de 17.5 mm, que junto con la densidad de relleno proporcionará una amortiguación óptima para que el pie no reciba daños durante la marcha, la carrera y el salto.

La mediasuela está diseñada para ofrecer rigidez al conjunto. Todas las partes del upper estarán soldadas a la mediasuela, evitando que se rompan durante el uso debido a su mayor fragilidad al no tener paredes y dejar el patrón de relleno desnudo.

Dichas uniones, como se ha mencionado con anterioridad, se llevarán a cabo prescindiendo totalmente de adhesivos o costuras, evitando así incomodidades o zonas de presión que puedan afectar al confort general de la zapatilla.



Figura 128. Vista lateral de la mediasuela

La mayoría de zapatillas deportivas del mercado, cuyas mediasuelas se encuentran debajo del pie y están fabricadas a partir de materiales blandos, con el uso diario y prolongado producirán deformaciones en la pieza, provocando sobrepronaciones o sobrepronaciones y, como consecuencia, posibles lesiones durante la marcha.

Por esa razón, la mediasuela diseñada en este proyecto rodeará al talón, proporcionando mayor estabilidad al pie. Aunque todavía es pronto para afirmar que los efectos mencionados no ocurrirán con el paso del tiempo, es una solución que puede ayudar a evitar las deformaciones por el uso prolongado.

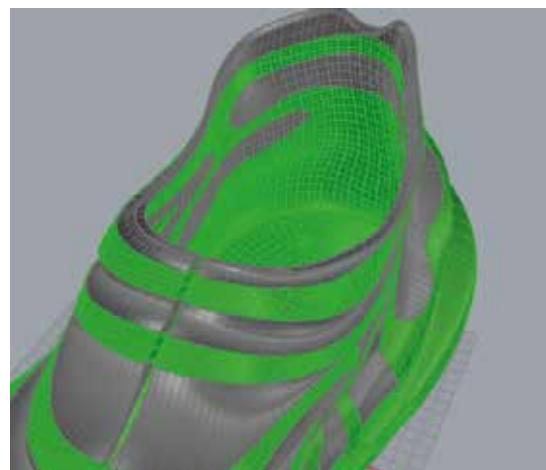


Figura 129. Mediasuela resaltado en verde

4.3.3 Suela

La suela es la parte de la zapatilla que ofrecerá fricción y agarre al suelo, además de protección a la planta del pie contra elementos cortantes o punzantes durante el uso diario. El diseño de la suela sigue la misma línea estética del resto de la pieza.

Las curvas forman en la parte central de la suela una hilera de crestas que ofrecerán mayor fricción y agarre contra el suelo, mientras que en los laterales, al carecer de dichas crestas, facilitará el giro del pie y ofrecerá mayor amortiguación en las zonas que mayor impacto reciben, como son la primera y quinta cabeza metatarsiana.

En la zona del talón, la parte central con forma de elipse está ligeramente más elevada del suelo del resto de la suela, ofreciendo mayor protección al hueso del talón a los impactos derivados durante el movimiento.

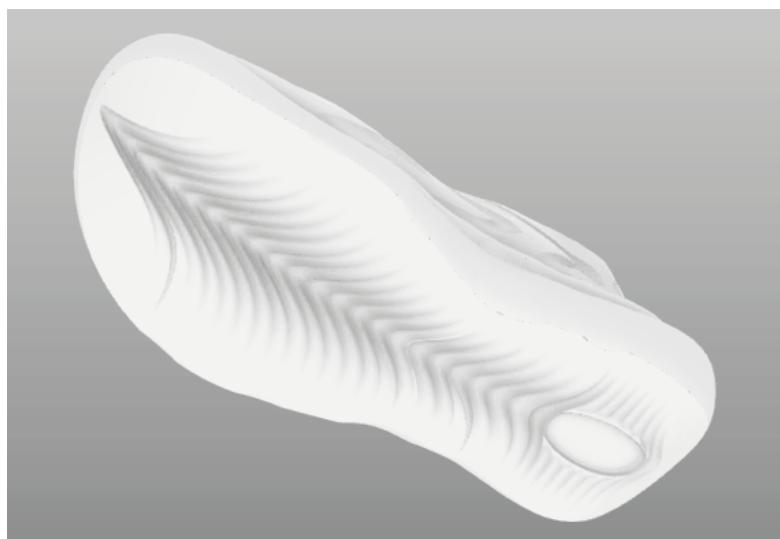


Figura 130. Suela

4.3.4 Cuello

La zona superior de la zapatilla presenta una apertura, donde se encuentra el empeine. Esta apertura facilitará la entrada del pie dentro de la zapatilla sin comprometer el ajuste y la sujeción de la zapatilla.

Además, se incorporó una nueva parte respecto a la versión anterior, denominada cuello, que evitará el roce del relleno desnudo con la piel, mejorando el confort y la rotura del mismo durante el uso.

Por último, mencionar que en la parte posterior del cuello, existe una pequeña hendidura, con forma de "U", diseñada para que apoye el tendón de Aquiles justo en esa región, aumentando la sensación de confort y evitando incomodidades al realizar los movimientos naturales del pie.

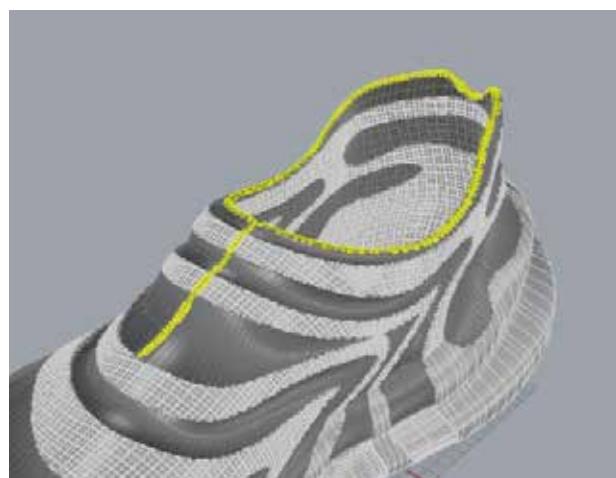


Figura 131. Cuello resaltado en amarillo

4.3.5 Proceso de modelado 3D de la zapatilla mediante software CAD

4.3.5.1 Diseño de la horma

Uno de los mayores problemas en la producción en cadena de calzado es que los zapatos con hormas estandarizadas no se adaptan de manera adecuada a la forma única del pie de cada usuario, lo que puede ocasionar incomodidad, presiones indeseadas y lesiones derivadas de un mal ajuste del calzado. Para abordar este problema, se ha realizado un escaneo tridimensional de mi propio pie, para obtener un modelo exacto de la geometría de este, generando una horma única y personalizada, favoreciendo la adaptación de la zapatilla y un ajuste perfecto, prescindiendo totalmente del uso de cordones.

Para realizar el escaneo, existen numerosas herramientas disponibles, desde aplicaciones móviles libres, como Polycam, hasta herramientas más sofisticadas, como es el caso del escáner 3D de mano Einstar de Shining 3D. Para el escaneo de mi pie se han usado ambas herramientas para comparar los resultados.

En el caso de la aplicación móvil Polycam, el escaneo se hace mediante una ráfaga de fotografías obtenidas a través de un video rodeando el objeto que se quiere escanear, en este caso mi pie. Tanto el escaneo de la parte superior como la planta de mi pie se hace siguiendo el mismo procedimiento.

Para obtener mejores resultados de escaneo, es necesaria una superficie sin reflejos, limpia y lisa, con una buena iluminación homogénea que no forme sombras. Como resultado, al no hacer el escaneo en las mejores condiciones, se ha obtenido un modelo algo tosco y sin detalle de mi pie.

Por otro lado, mediante el escáner Einstar de Shining 3D, se obtiene un modelo más fiable de mi pie mediante proyección de luz estructurada infrarroja. Las deformaciones de la luz infrarroja proyectada se registran dentro del EinStar Software, donde se muestra el escaneo en tiempo real y se pueden hacer correcciones de errores de alineación, limpiar, suavizar y cerrar la malla generada, aunque dichas acciones también pueden realizarse desde un programa externo, como es en este caso.



Figura 132 y 133. Escaneados del pie mediante Polycam



Figura 134 y 135. Escaner Einstar y escaneado 3d del pie

Una vez generada la forma mediante el escaneo en 3D, se exportará el modelo en formato .ply y se introducirá dentro de Autodesk Meshmixer. Dentro de este programa, se procederá a realizar una limpieza del modelo, eliminando partes que no interesan y suavizando el modelo para posteriores procesos.

De la misma manera que para la parte superior del pie, se ha realizado un escaneo 3D de la huella que ha dejado el mismo en una espuma fenólica, de la cual se ha generado una plantilla personalizada. Una vez obtenido un modelo limpio y suavizado de las dos partes que conformarán la horma, es momento de unirlas dentro de Rhino 8.

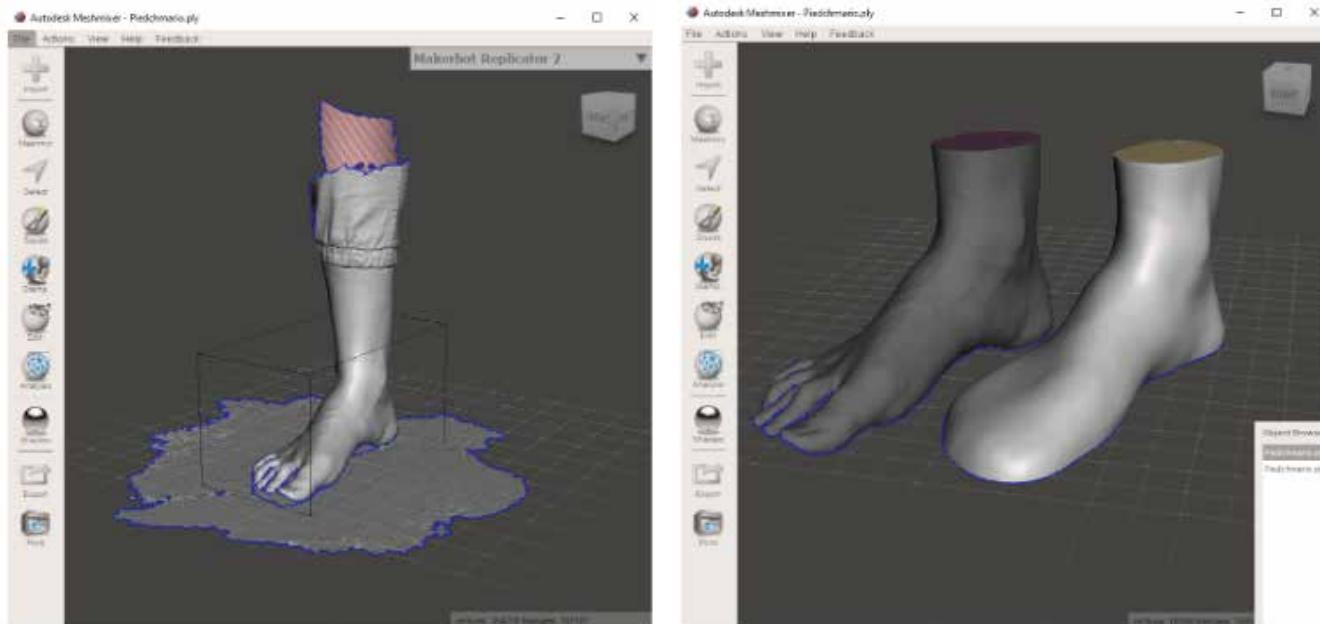


Figura 136 y 137. Modelo del pie y horma superior en Autodesk Meshmixer

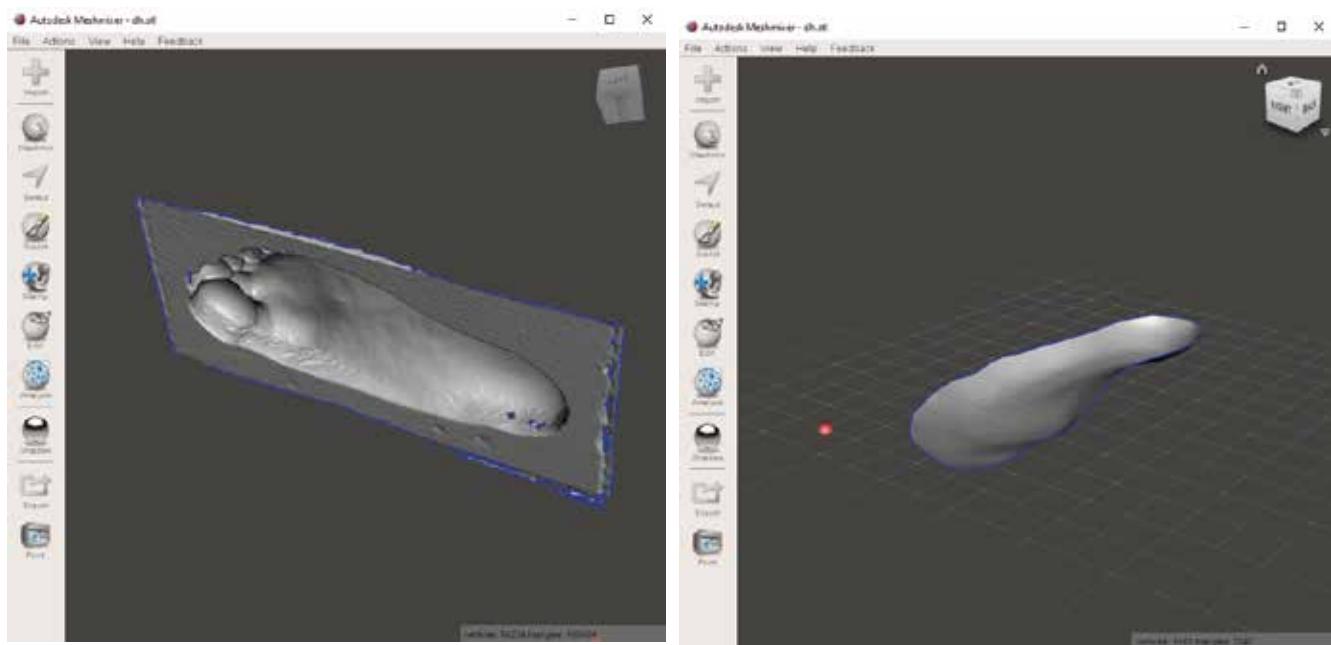


Figura 138 y 139. Modelo de la huella del pie y horma inferior en Autodesk Meshmixer

Existen varias formas de unir las dos partes que conformarán la horma de la zapatilla. En este caso se ha optado por realizar ediciones suaves a una superficie, adaptándose con la forma de la horma, y después, mediante la creación de superficies en barrido, se han unido ambas partes, dando como resultado una horma personalizada específicamente para mi pie, que ofrecerá mayores niveles de confort que las que ofrecen las plantillas planas de otras zapatillas del mercado.

Usando este mismo método, es posible diseñar hormas personalizadas para cualquier persona, independientemente del tamaño y forma del pie del usuario, o de posibles deformaciones o amputaciones que pueda tener.

Una vez creada la horma con la geometría exacta de mi pie, ha sido posible diseñar un calzado más eficiente, sin componentes ni estructuras superfluas ni exceso de material.



Figura 140. Horma superior e inferior en Rhino 8

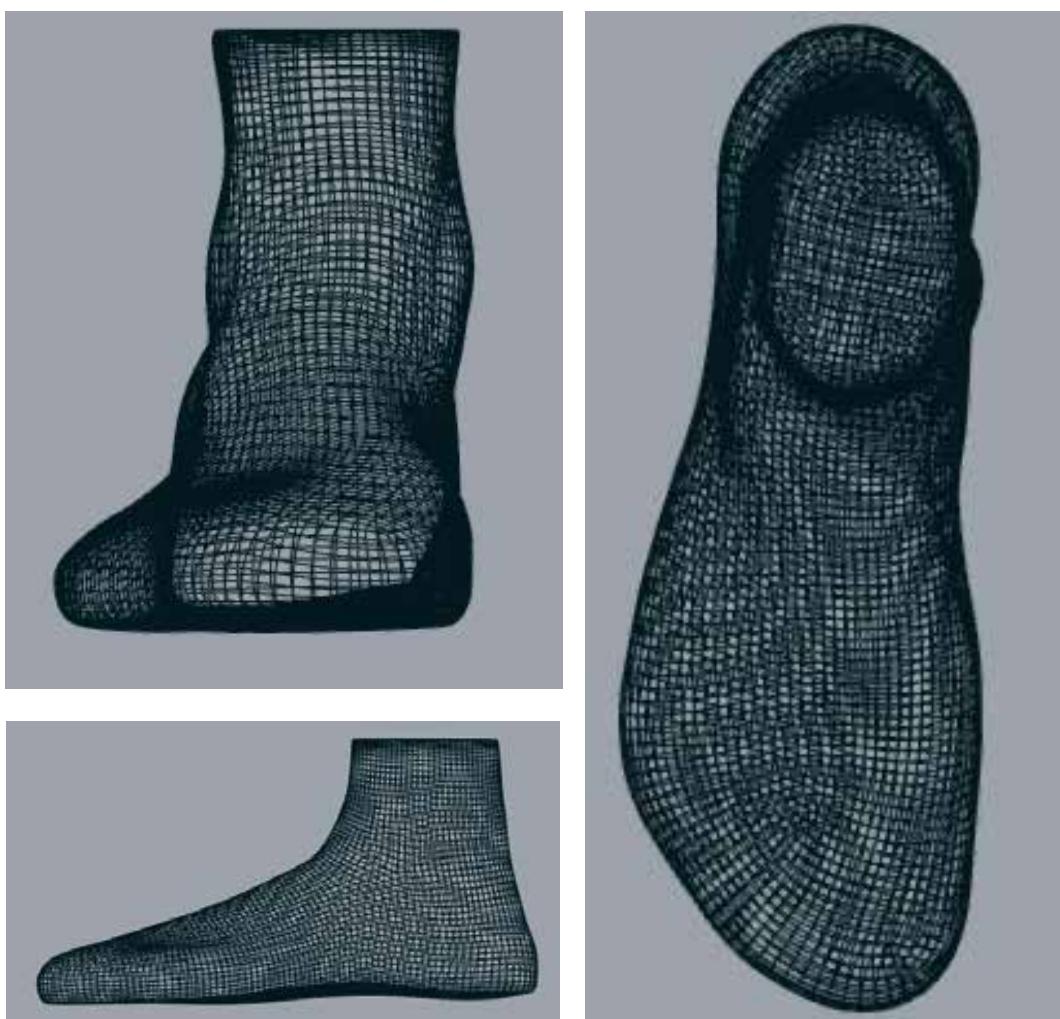


Figura 141. Vistas del modelo final de la horma

4.3.5.2 Modelado de la zapatilla

El modelado tridimensional de este proyecto se ha realizado con Rhino 8 de Rhinoceros 3D, un software CAD ampliamente utilizado en diseño industrial. Partiendo de la horma personalizada de la que se ha hablado con anterioridad y las ideas estéticas exploradas durante la primera etapa del diseño, se ha desarrollado una geometría detallada y lista para fabricarse mediante FDM.

El software mencionado ofrece diversas herramientas de diseño con las que es posible diseñar cualquier objeto. Principalmente, para este proyecto se han utilizado las herramientas relacionadas con superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline), partiendo inicialmente desde curvas.

Inicialmente, se ha generado un desfase de la horma, definiendo la parte exterior de la zapatilla. De esta manera, la geometría externa de la zapatilla será lo más parecida posible a la forma de mi pie, prescindiendo así de estructuras que puedan aumentar el peso del producto final. El desfase mencionado es de 6 mm en el eje X y el eje Y, y de 3 mm en el eje Z. De esta manera se obtiene una zapatilla más gruesa por los lados que por la parte superior, derivando en una mayor estabilidad del pie.

Con el desfase que define la superficie exterior de la zapatilla se ha obtenido el punto de partida para el diseño de la parte inferior de la mediasuela. Se dibujarán 2 curvas planas, una curva cerrada en el plano XY que definirá la vista superior del rail inferior de la mediasuela y una curva abierta en el plano XZ que definirá la vista lateral del mismo rail. Mediante la herramienta “Curva desde 2 vistas” se generará una curva cerrada tridimensional que formará parte de la superficie final. Se dibujará también otra curva abierta en el plano XZ, que al proyectarla sobre la superficie externa de la zapatilla, definirá el rail superior de la mediasuela inferior. Para la definición de la superficie final mediante la herramienta “Barrido por 2 railes” será necesario dibujar las líneas de barrido, que conducirán la superficie.

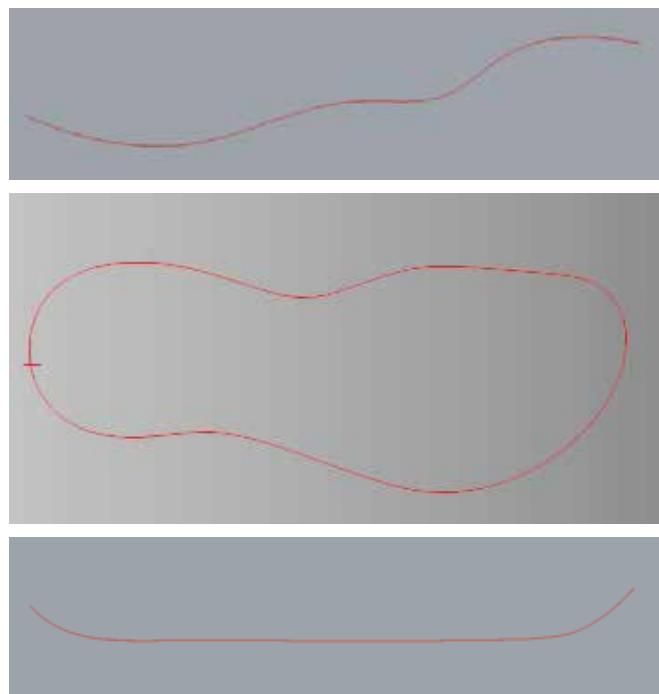


Figura 142. Curvas planas

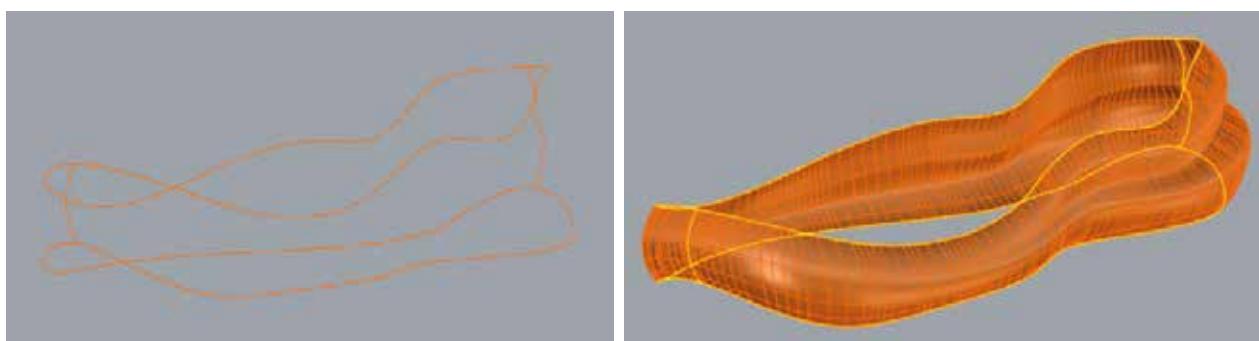


Figura 143 y 144. Curvas y definición de la mediasuela inferior

Una vez obtenida la geometría externa de la zapatilla y la superficie de la mediasuela inferior, se dibujaron en un plano las curvas que conformarán la forma de la mediasuela superior. Después, se extruirán en línea recta las curvas dibujadas, y mediante la herramienta de corte se obtendrán las formas finales. Para que en el interior de la zapatilla no existan relieves que puedan afectar al confort final del calzado, se harán los mismos cortes en dos superficies idénticas de la horma, que después formarán parte del interior del upper y el interior de la mediasuela.

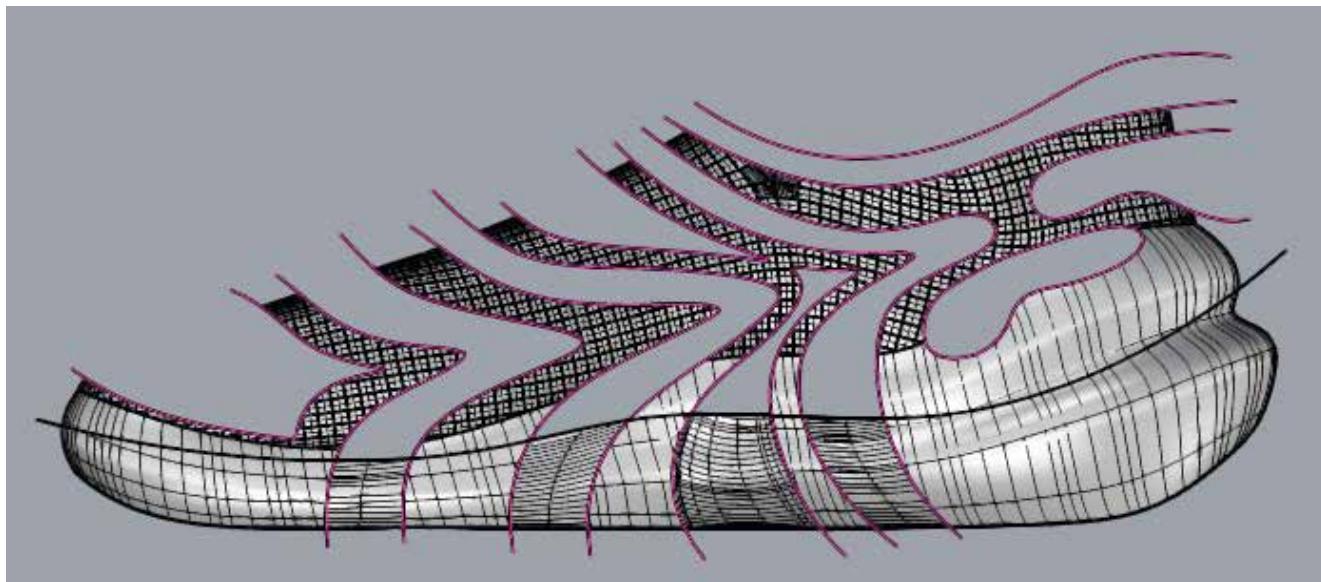


Figura 145. Vista lateral de la mediasuela completa (líneas de corte extruidas resaltadas en rosa)

Para terminar con el modelado de la mediasuela, se crearán curvas a partir de los bordes desnudos de la superficie superior e interior de la mediasuela obtenidas con anterioridad. A partir de la herramienta de “barrido por 2 raíl”, se crearán las superficies de unión del interior y del exterior, terminando así con la mediasuela.

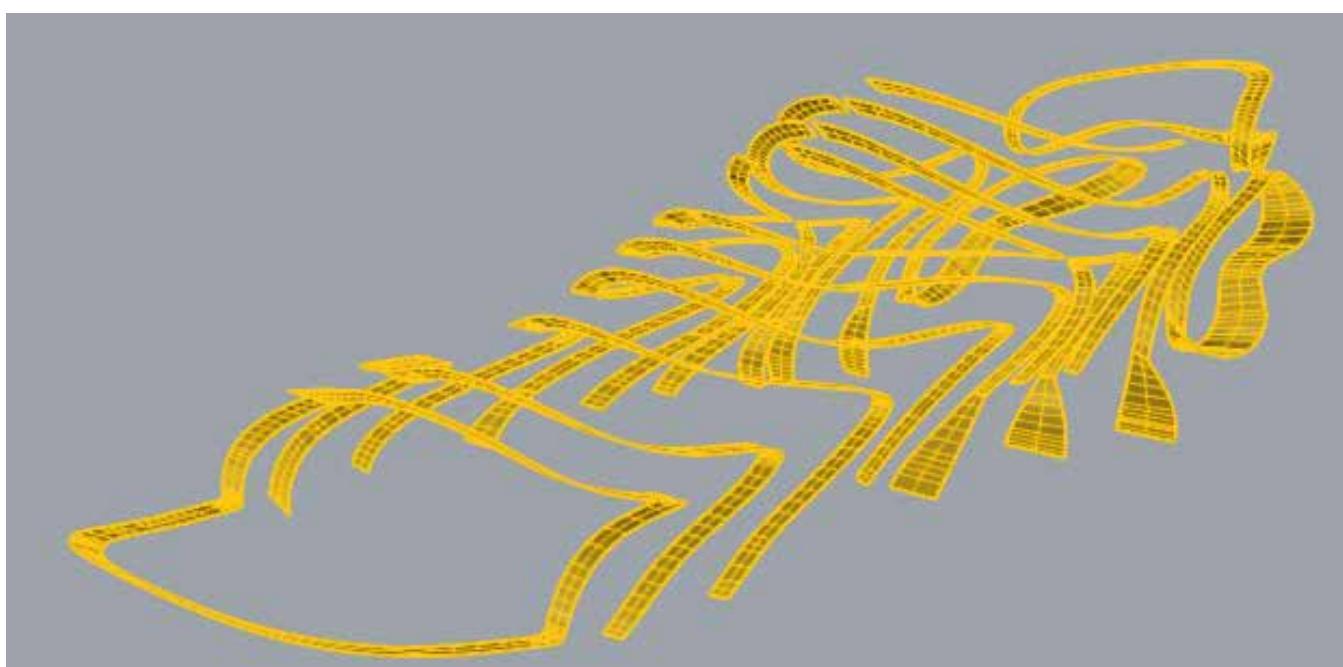


Figura 146. Superficies de unión de la mediasuela

Utilizando las curvas generadas de los bordes desnudos de la superficie exterior de la mediasuela, se procederá a la obtención de la geometría externa del upper. Al tratarse de curvas cerradas, no se puede aplicar la herramienta “barrido por 2 railes”. Para poder utilizarla, se partirán dichas curvas por 2 puntos, obteniéndose así 2 curvas abiertas que funcionarán como los railes de las superficies. Se dibujará una curva de barrido para cada una de las superficies a generar y se obtendrán así las superficies externas del upper. Posteriormente, se utilizarán las mismas superficies de unión que se usaron en la creación de la mediasuela, para así unir las superficies exteriores e interiores del upper, finalizando así con el modelado del upper.

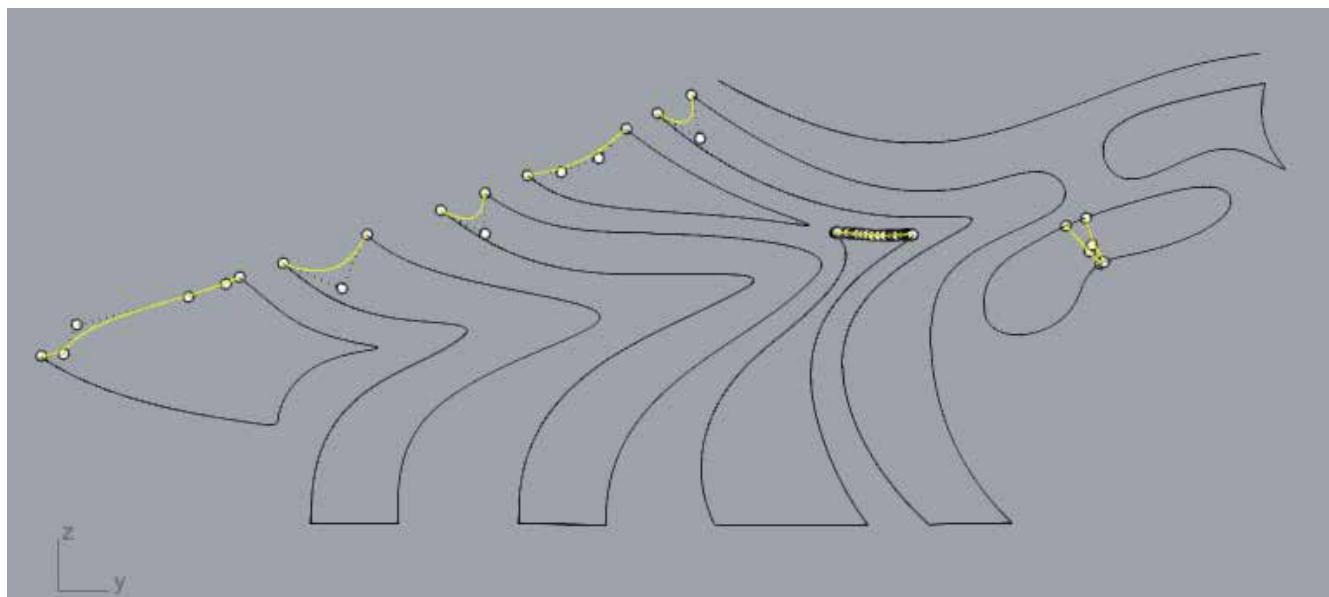


Figura 147. Bordes desnudos de la mediasuela y curvas de barrido

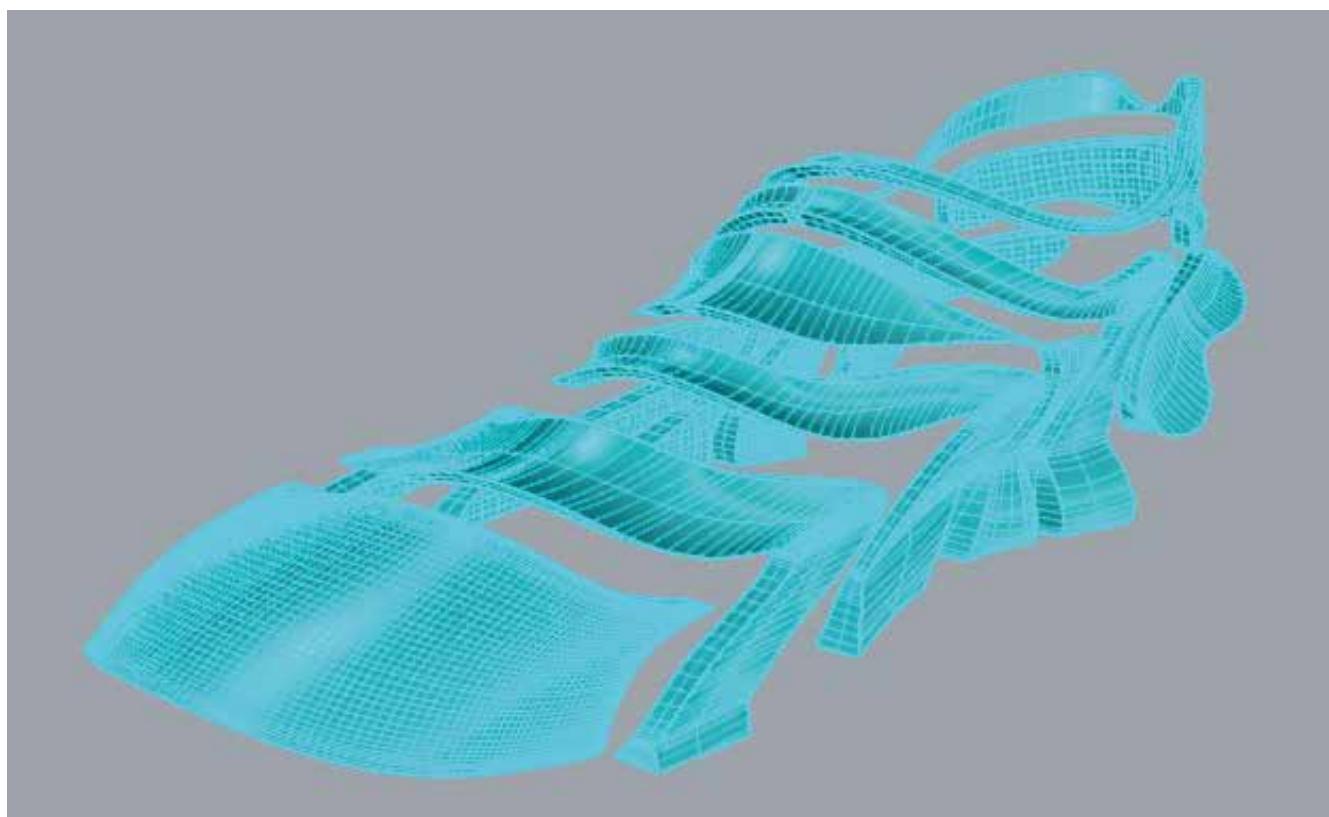


Figura 148. Modelo del upper completo

Para el modelado de la suela se ha realizado un procedimiento similar al de las otras partes que conforman la zapatilla. Se ha proyectado el borde desnudo inferior de la mediasuela en un plano horizontal, y dentro de la curva generada se ha dibujado el patrón de dibujo de la suela. Se han dibujado 2 curvas siguiendo con la línea estética del conjunto y, mediante la herramienta “unión entre dos curvas”, se han generado las curvas intermedias entre las dos dibujadas, y por último, añadiendo una elipse en la zona de la suela que correspondería con el talón del pie.

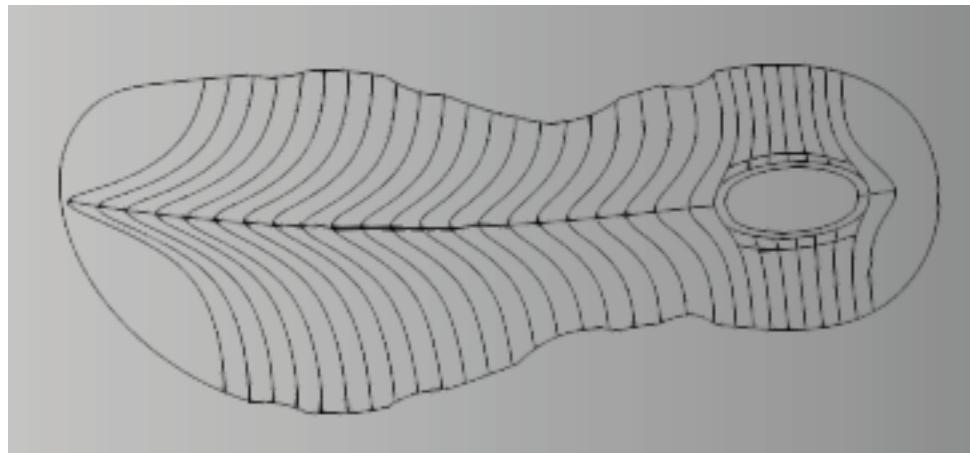


Figura 149. Dibujo de la suela

Posteriormente, se ha proyectado el dibujo en la parte inferior de la mediasuela (que actualmente es completamente lisa) y, mediante herramientas de barrido y cortes, se ha construido la suela final de la zapatilla.

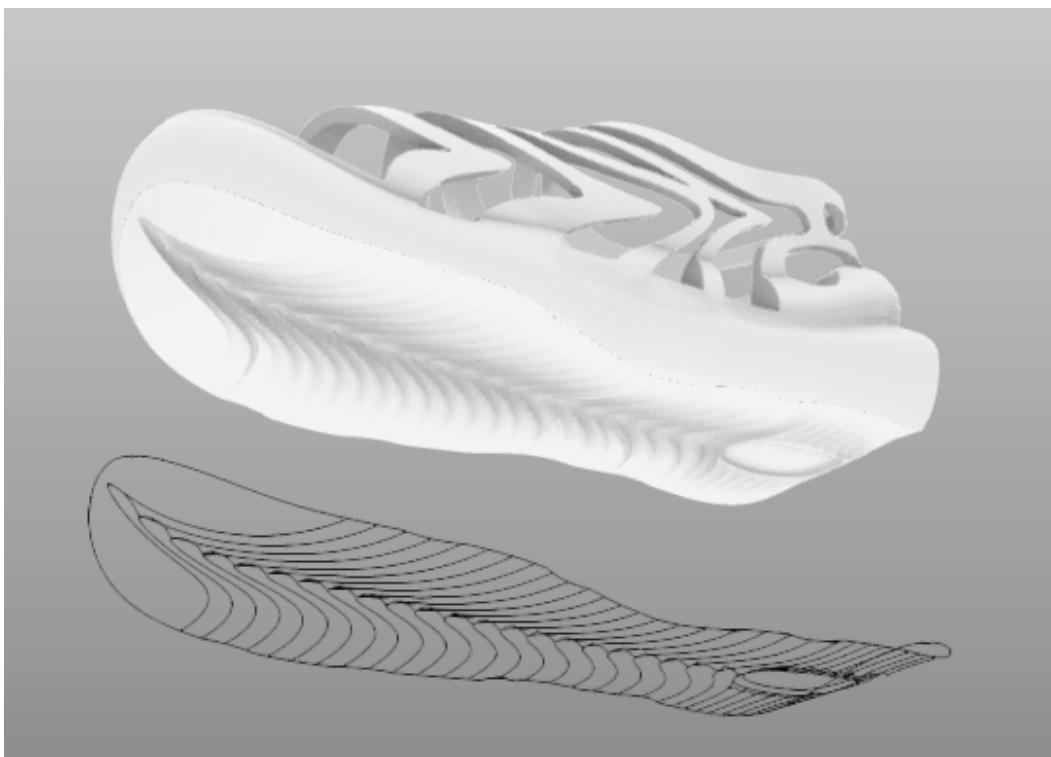


Figura 150. Proyección del dibujo y definición de la suela unida a la mediasuela

5. Prototipado y fabricación

5.1 Equipo utilizado

Para la fabricación de los prototipos se emplearon distintas impresoras 3D basadas en tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), adaptándose a diferentes exigencias de tamaño y disponibilidad. Las impresoras utilizadas fueron:

Hellbot Magna SE 300:

- Tecnología: FDM
- Volumen de impresión: 300 mm x 300 mm x 400 mm
- Velocidad de impresión: 100mm/s máximo.
Recomendado 50mm/s
- Altura de capa: 0,1-0,4 mm
- Precisión: +- 0,1 mm
- Extrusor: Directo Dual Drive
- Diámetro del material: 1.75 mm (0.069 in)
- Cantidad de extrusores: 1
- Cama: Vidrio
- Nivelación de cama: Manual, asistida de 5 puntos
- Peso: 16 KG
- Archivos soportados: gcode (CuraUltimaker)
- Material soportado: PLA, ABS, Flex, Wood, Nylon, etc
- Temperatura máxima de impresión (extrusora): 260°C
- Temperatura máxima de la plataforma: 90°C

Precio: 419 €



Figura 151. Hellbot Magna SE 300

Original Prusa XL:

- Tecnología: FDM
- Volumen de impresión: 360 mm x 360 mm x 360 mm
- Velocidad de impresión: 50-100 mm/s máximo
- Altura de capa: 0,05- 0,4 mm
- Precisión: +- 0,1 mm
- Extrusor: Directo Drive.
- Diámetro del material: 1.75 mm (0.069 in)
- Cantidad de extrusores: 5 extrusores independientes de cambio rápido
- Cama: Base magnética con lámina de acero PEI
- Nivelación de cama: Automática (Load Cell Sensor)
- Peso: 24 KG
- Archivos soportados: .gcode (PrusaSlicer)
- Material soportado: TPU, PLA, PETG, ASA, PC, PA, PVA, HIPS, entre otros
- Temperatura máxima de impresión (extrusora): 300°C
- Temperatura máxima de la plataforma: 120°C
- Precio: 2099 €



Figura 152. Original Prusa XL

5.2 Material escogido

Para la fabricación de los prototipos se utilizó poliuretano termoplástico TPU con una dureza Shore 95A. El filamento de TPU 95A es muy versátil para aplicaciones industriales y es la opción idónea para una amplia gama de proyectos de fabricación que requieren tanto las cualidades del caucho como las del plástico. El TPU 95A se ha diseñado para ofrecer homogeneidad en la impresión 3D y es un filamento semiflexible y resistente a los productos químicos con una fuerte adhesión entre capas. Además, es más fácil y rápido de imprimir que otros filamentos de TPU.

Este tipo de material ofrece una excelente elasticidad, ideal para la producción de calzado mediante fabricación aditiva. A pesar de su flexibilidad, es también resistente al desgarro; mantiene su estructura firme, pudiéndose flexionar continuamente sin comprometer la integridad de su estructura. Además, es la opción ideal para la fabricación de un producto que va a estar continuamente rozando contra superficies duras y abrasivas, como puede ser el asfalto o el hormigón.

Como se ha mencionado con anterioridad, se trata de un material altamente resistente al desgaste y a la fatiga mecánica, pero además posee gran resistencia a la corrosión causada por muchos productos químicos y aceites naturales e industriales habituales.

El TPU 95A está disponible en diversos colores y es ideal para aplicaciones relacionadas con el prototipado rápido funcional, como es el caso de este proyecto. A continuación, se estudiarán las propiedades técnicas de este material (según Ultimaker):

Propiedades mecánicas

	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	26,0 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la deformación	8,6 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la rotura	39,0 MPa	ASTM D638
Alargamiento a la deformación	55,0 %	ASTM D638
Alargamiento a la rotura	580 %	ASTM D638
Resistencia a la flexión	4,3 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	78,7 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto IZOD, con mella (23°C)	34,4 kJ/m ²	ISO 178
Dureza	95 (Shore A)	ASTM D2240
Resistencia a la abrasión	0,06 g	ASTM D4060

Propiedades térmicas

	Valor típico	Método de ensayo
Índice de fluidez	15,9 g/10 min	ISO 1133 (225 °C 1,2Kg)
Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa	74 °C	ASTM D648
Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa	49 °C	ASTM D648
Transición vítrea	-24 °C	DSC
Coeficiente de expansión térmica	100·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	ASTM E693
Temperatura de fusión	220 °C	DSC

Tabla 5 y 6. Propiedades mecánicas y térmicas de TPU 95A (según Ultimaker)

Concretamente, se ha utilizado una bobina de filamento Filaflex TPU 95A de 1.75 mm de diámetro de Recreus. A continuación, se presentarán los parámetros básicos de impresión proporcionados por la compañía para la impresión con una boquilla de 0,4 mm.

Nozzle	Layer Height	Line Width	Volumetric Speed	Temperature
0.4mm	0.2mm	0.38mm	4.5 mm ³ /s	245°C
0.6mm	0.3mm	0.58mm	10.1 mm ³ /s	245°C
0.8mm	0.4mm	0.78mm	18.0 mm ³ /s	248°C
1.0mm	0.5mm	0.98mm	28.1 mm ³ /s	250°C

0.4mm Nozzle (Volumetric Speed: 4.5 mm³/s)

Line Type	Percentage	Speed
External Perimeter	50%	29.61 mm/s
Internal Perimeters	75%	44.41 mm/s
Infill	100%	59.21 mm/s
Top/Bottom	60%	35.53 mm/s
First Layer	30%	17.76 mm/s

Tabla 7. Parámetros recomendados del Filaflex TPU 95A de Recreus

Teniendo en cuenta estos datos, podemos especificar los parámetros de impresión dentro de un software de laminado.



Figura 153. Bobina de TPU 95A de Filaflex. Disponible en varios colores.

5.3 Parámetros clave de impresión

Una vez conseguido cerrar las diferentes polisuperficies en Rhino 8 y exportarlas en formato .stl, es momento de introducirlas en un programa de laminado para impresión 3D. Aunque en las impresoras de Prusa utiliza su propio programa, llamado PrusaSlicer, para generar el archivo .gcode, usualmente se utiliza el programa de laminado de Ultimaker; concretamente, se ha utilizado la última versión disponible: Cura Ultimaker 5.10.0.

Para empezar, se abrirá un nuevo proyecto en CuraUltimaker y se introducirán los distintos .stl generados mediante Rhino8. Los archivos introducidos serán el Upper, la mediasuela y la suela. Se juntarán y orientarán en posición vertical respecto a la cama de impresión, para así desperdiciar el mínimo de material en la generación de los soportes.



Figura 154. Modelo de la zapatilla introducido en Cura Ultimaker

Con el fin de utilizar la mínima cantidad de soportes, se introducirá un cubo con unos parámetros específicos de malla (Per Model Settings > Don't support overlaps), para que, en las zonas dentro del mismo, no se generen soportes. Esto se puede aplicar gracias a la geometría de la propia zapatilla y de la orientación aplicada. De esta manera, solo se generarán soportes en la base de impresión.

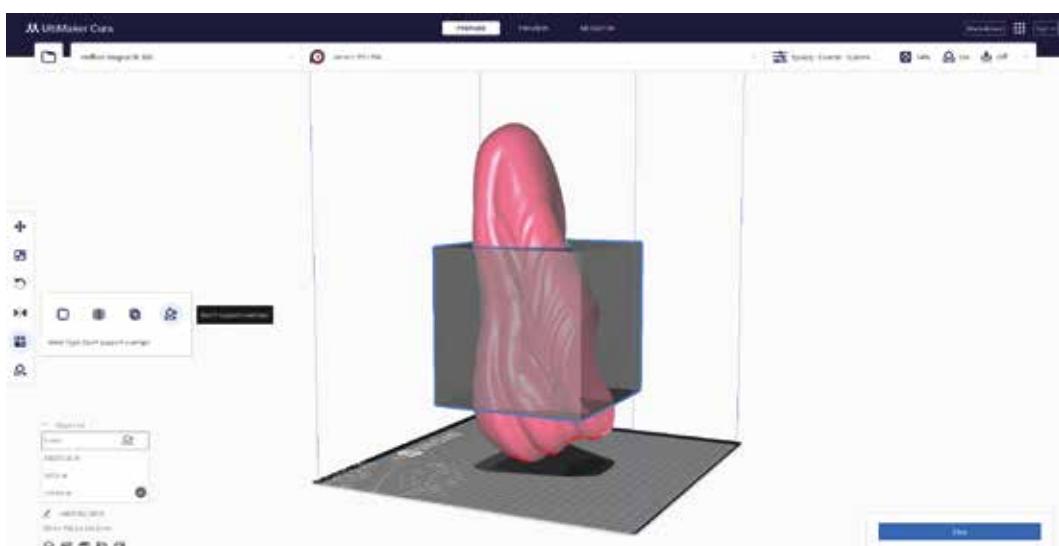


Figura 155. Modelo de la zapatilla introducido en Cura Ultimaker

Como ya se mencionó anteriormente, el upper de la zapatilla tendrá el relleno completamente expuesto o desnudo, mientras que el resto de las partes tendrá paredes lisas. Para conseguir este efecto se aplicarán parámetros específicos mediante la opción Per Model Settings:

- En el caso del upper, se busca tener el relleno al descubierto, otorgando a la zapatilla capacidad de ventilación y transpiración del pie. Para ello, mediante el tipo de malla “Normal Model”, se eliminarán por completo el número de líneas de pared y las capas superiores e inferiores. Se elegirá un patrón de relleno en zigzag con una densidad del 30%, cuyas direcciones de línea serán [45,-45].
- En el caso de la suela, se busca que tenga una mayor densidad que la mediaduela, que ofrezca mayor protección al pie. Para ello, se superpondrán las geometrías de la suela fusionada con la mediasuela y la suela únicamente, y mediante el tipo de malla “Modify settings for overlaps”, se conseguirá modificar la densidad del patrón de relleno solo en la zona en la que coinciden ambas geometrías.



Figura 156. Parámetros del upper

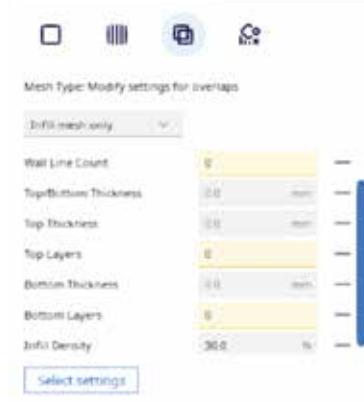


Figura 157. Parámetros de la suela

Los parámetros principales de impresión elegidos para la fabricación del prototipo, que serán aplicados para la impresión de la mediasuela, son los siguientes:

- Altura de capa: 0.25 mm
- Altura de capa inicial: 0.3 mm
- Ancho de línea (paredes, relleno y soporte): 0.4 mm
- Número de líneas de pared: 2
- Orden de pared: De dentro hacia afuera
- Capas superiores: 3
- Capas inferiores: 3
- Patrón de relleno: Giroide
- Densidad de relleno: 14%
- Temperatura de impresión: 235.0 °C
- Temperatura de la cama: 60 °C
- Velocidad de impresión: 20.0 mm/s
- Velocidad de relleno: 25.0 mm/s
- Velocidad pared: 22.0 mm/s
- Velocidad de soporte: 22.0 mm/s
- Velocidad capa inicial: 12.0 mm/s
- Distancia de retracción: 3.5 mm
- Velocidad de retracción: 40 mm/s
- Patrón de soporte: Zig Zag
- Densidad de soporte: 15%
- Adhesión a la cama: Brim
- Líneas de Brim: 30

Los parámetros de impresión especificados, tanto los generales como los específicos, están optimizados para lograr el mejor acabado posible, previniendo dificultades durante la fabricación del prototipo. En las siguientes imágenes se puede observar una tabla de colores que representa la velocidad y el flujo de material durante la impresión. Concretamente, el flujo es de 2.16 mm/s³, notablemente más bajo que los 4.5 mm/s³ que se mostraban en la tabla de parámetros máximos recomendados facilitados por Filaflex, ya que, aunque existe un valor recomendado para cada material, siempre es aconsejable mantenerse por debajo del umbral especificado para asegurar una extrusión continua, evitar atascos y mejorar la calidad final del producto, especialmente en geometrías complejas o con detalles finos.

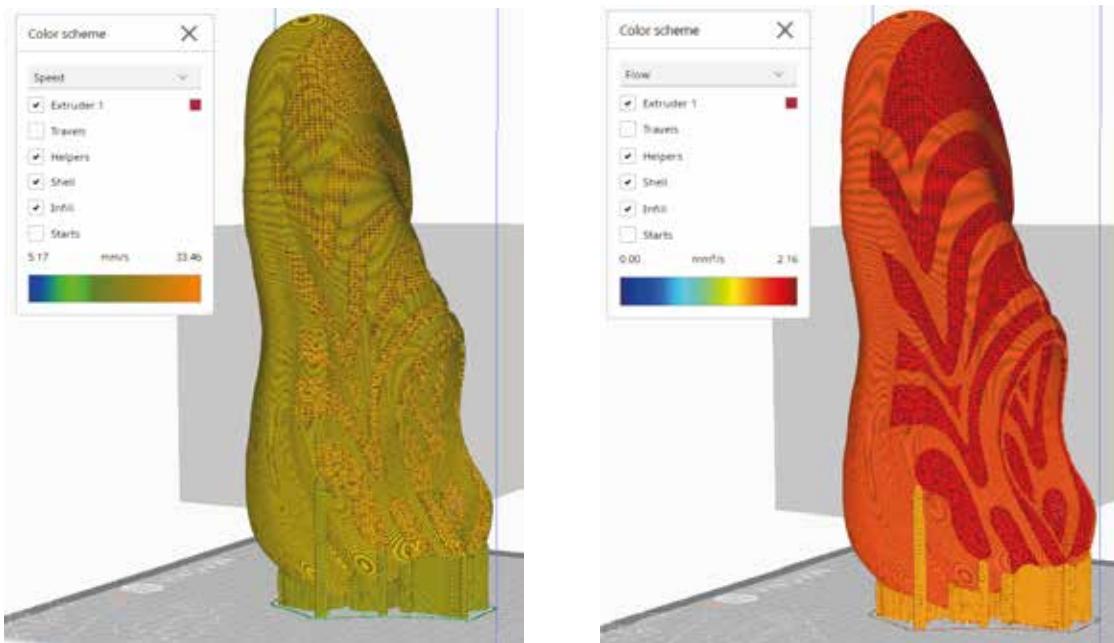


Figura 158 y 159. Tabla de colores de velocidades y flujo de impresión.

Como resultado de la laminación mediante Cura Ultimaker, obtendremos una representación aproximada de la impresión dividida en colores. El color rojo representa la pared o carcasa, el color naranja representa el relleno desnudo y el color celeste representa el soporte.

El prototipo impreso, con los parámetros concretados y las especificaciones explicadas a lo largo de este apartado, supondrá un gasto de material de 346 g de TPU 95A y un tiempo de impresión aproximado de 48 horas y 11 minutos.

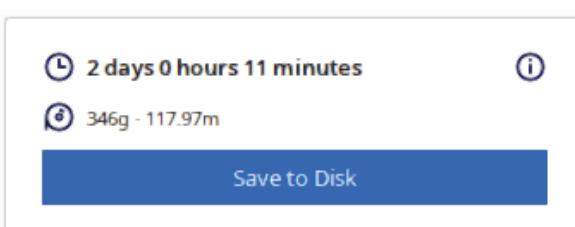


Figura 160. Tiempo y gasto de material estimado

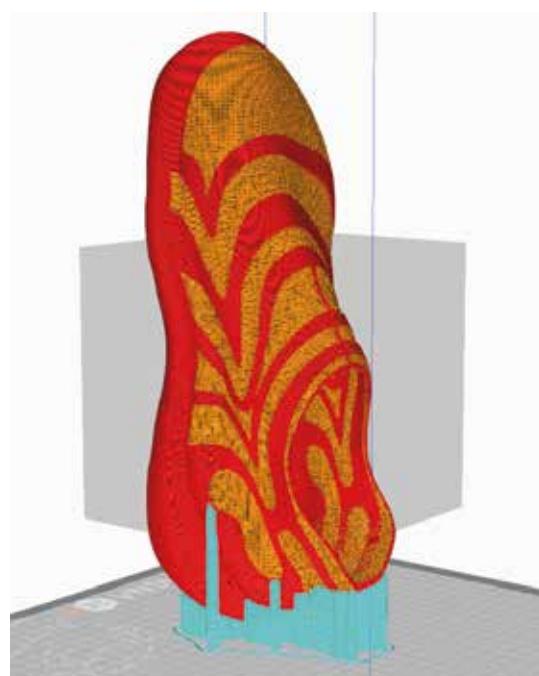


Figura 161. Representación según tipo de línea

5.4 Postprocesado

Una vez obtenido el prototipo impreso, es hora de comenzar con la etapa de postproducción, crucial para obtener resultados superficialmente limpios y que no provoquen incomodidad al usuario. Se eliminarán imperfecciones inherentes al proceso de fabricación aditiva y se afinarán detalles que mejorarán la presentación final del producto.

El primer paso es la eliminación de soportes de impresión, necesarios durante la impresión para sostener las geometrías en voladizo con ángulos menores a 45º respecto al plano horizontal. El método de eliminación de soportes dependerá de la tecnología utilizada:

- En impresoras monoextrusoras, como es el caso de la Hellbot Magna SE 300, los soportes se imprimirán del mismo material que el cuerpo del modelo impreso (en este caso TPU 95A). Esto requerirá una retirada manual del soporte, que puede resultar laboriosa y producir daños en partes delicadas del diseño si no se realiza con cuidado, como es el caso del upper de la zapatilla.
- En impresoras multiextrusor, como es el caso de la Original Prusa XL, es posible imprimir los soportes de un material como el PVA (alcohol polivinílico). Dicho material es soluble en agua, permitiendo una retirada limpia y segura del soporte sin dañar la pieza impresa. Se eliminarán las partes más voluminosas a mano y posteriormente se sumergirá el prototipo en un recipiente con agua templada hasta que los restos del material desaparezcan por completo.

Una vez retirados los soportes, se procederá al limado de los bordes. Las impresoras FDM, debido a la deposición de material fundido capa por capa, pueden dejar rebabas o imperfecciones en los bordes y aristas de la pieza. Mediante el uso de una herramienta rotativa tipo Dremel, equipada con un cabezal abrasivo fino, como puede ser una lija, permitirá suavizar dichas imperfecciones. Esta operación debe realizarse con precisión para evitar un exceso de desgaste que afecte a la estética de la pieza.

La última fase del postprocesado consiste en corregir un defecto común en la impresión 3D mediante FDM, principalmente con la impresión de materiales flexibles: la formación de hilos finos de material, conocidos como “stringing”. Este fenómeno afecta al acabado visual de la pieza y, para eliminarlos, se aplicará calor controlado con una pistola de aire caliente. La temperatura del aire debe ajustarse para que sea lo suficientemente alta como para producir la contracción de los hilos hasta que no sean apreciables, pero sin alcanzar el punto de reblandecimiento del TPU (aproximadamente 230 °C). Este procedimiento deja una superficie más limpia, uniforme y visualmente atractiva.



Figura 162. Limado de bordes



Figura 163. Pistola de calor

Una vez completado el postprocesado, se obtiene un prototipo con mejores prestaciones estéticas, listo para realizar una valoración general del prototipo a nivel funcional, ergonómico y estético. Este proceso es fundamental para garantizar que el modelo impreso alcance los estándares mínimos de calidad. De esta manera, no debe considerarse el postprocesado como un proceso secundario o prescindible, sino como una fase crítica en el desarrollo de productos.

5.5 Evaluación del prototipo

En este apartado se evaluará la calidad del prototipo fabricado. Este prototipo es una primera aproximación funcional que permitirá analizar el comportamiento bajo condiciones de uso. La evaluación del prototipo se centra en aspectos clave propios del calzado impreso en 3D: funcionalidad, calidad de impresión, ajuste anatómico, estética y durabilidad, con el objetivo de identificar las áreas de mejora para futuras impresiones del producto.

Fortalezas

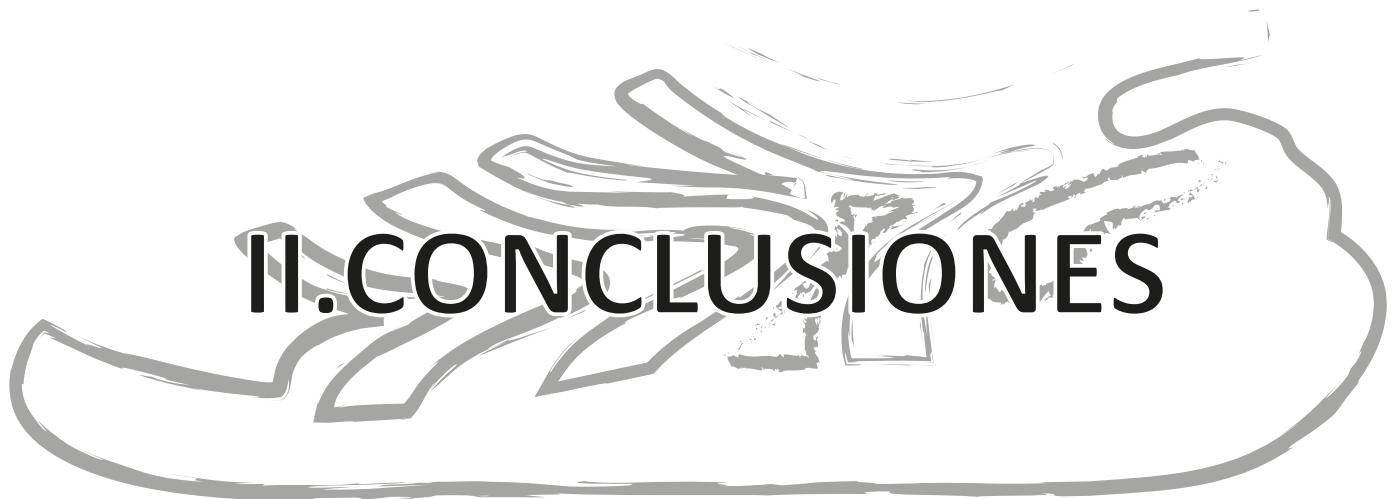
- El prototipo tiene un grado de flexibilidad aceptable, adaptándose a los movimientos naturales del pie, sin entorpecerlos, y mantiene su estructura durante el uso.
- Se ajusta correctamente al pie, lo que permite un calce cómodo y fácil de poner y quitar.
- Durante el uso, proporciona buen agarre al suelo y una buena estabilidad del pie durante la marcha.
- Desde el punto de vista del confort, la plantilla resulta cómoda y no genera puntos de presión indeseables, lo que es un indicio favorable en términos de diseño ergonómico.
- Buena adherencia entre capas y partes funcionales diferenciadas (upper y mediasuela). La calidad superficial del exterior es aceptable.
- La mediasuela proporciona una buena amortiguación. El diseño y relleno de la suela ayuda a los movimientos del pie y proporciona buena protección a la bóveda plantar y al talón.
- El aspecto visual es atractivo, aunque mejoraría usando filamento de colores y no el color translúcido que se ha utilizado.
- El prototipo es considerablemente más ligero que la mayoría de las zapatillas casuales del mercado destinadas al uso diario.



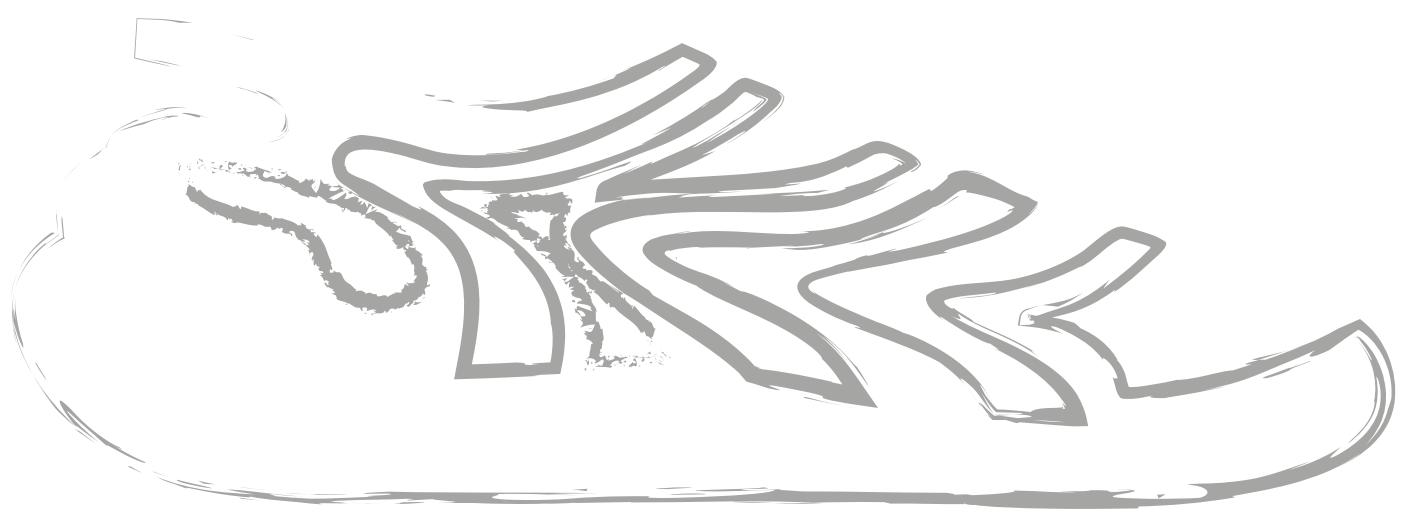
Figura 164. Fases de la marcha calzando el prototipo impreso

Debilidades

- El acabado interior no es óptimo. Aunque mediante el postprocesado se han eliminado la mayoría de los defectos durante la impresión, el interior de la zapatilla es algo áspero y, con el roce, es posible la aparición de lesiones en la piel. Para evitar esto, es recomendable el uso de calcetines durante su uso.
- La tráspirabilidad es un punto a favor en esta zapatilla, pero la parte inferior de la horma, la zona de la plantilla, no posee aperturas que favorezcan una correcta ventilación de la planta del pie, lo que puede producir sudor durante el uso. Esto, sumado a la poca rugosidad de esa zona, provoca que la zapatilla se deslice levemente durante la marcha.
- La inserción del pie se facilita mucho gracias a la apertura del empeine, pero es verdad que esta característica compromete ligeramente el ajuste de la zapatilla durante la marcha. El empeine del pie hace presión en esa zona durante la marcha, provocando su apertura y que el pie salga ligeramente de la zapatilla. No es algo molesto durante la marcha, porque el pie está bien ajustado, pero puede ser incómodo durante la carrera.
- Aunque la flexibilidad de la suela es óptima, cuando la zapatilla es calzada, si que se siente algo duro cuando se intenta flexionar la zapatilla con las manos, por lo que a lo mejor sería necesario utilizar algún material menos rígido, como puede ser un TPU 93A.



Diseño y prototipado de calzado personalizado
por impresión 3D en un modelo de economía circular



Conclusiones

En líneas generales, el proyecto presentado para este Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo el desarrollo de un calzado impreso en 3D, explorando los aspectos estéticos, ergonómicos y técnicos que intervienen en el proceso de diseño y fabricación. Los resultados obtenidos han servido para comprobar de manera favorable la viabilidad de un método de producción paralelo a la fabricación en cadena tradicional de calzado a medida, respondiendo a las necesidades de personalización y sostenibilidad demandadas actualmente en este sector de la industria.

Se ha realizado un estudio exhaustivo y detallado del recorrido del calzado a lo largo de la historia, abordando las ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva respecto de las opciones existentes en el mercado. Abordando el proyecto como un calzado ortopédico a medida, completamente personalizable, con posibilidades de diseño sin limitaciones, se ha propuesto una solución innovadora a las demandas en confort demandadas en la actualidad. Aunque, analizándolo en términos de producción en masa, la fabricación de calzado mediante impresión 3D no es aún una alternativa viable que sustituya a los procesos de fabricación en cadena tradicionales.

Desde la fase inicial de conceptualización inspirada en una estética orgánica basada en la línea de diseño de actuales zapatillas impresas en 3D en el mercado, como es el ejemplo de Zellerfeld, hasta la fabricación de prototipos funcionales y estéticamente atractivos, se han integrado con éxito las capacidades del diseño paramétrico y modelado tridimensional, la toma de datos morfológicos mediante escáneres 3D y la fabricación aditiva por FDM, logrando un calzado adaptado a la morfología del pie del usuario y a los principios biomecánicos del movimiento del pie humano.

Las posibilidades que ofrece la fabricación aditiva en este tipo de productos han permitido la concepción de un calzado monomaterial que carece por completo de elementos adicionales, costuras o adhesivos que afecten negativamente el confort y la durabilidad del producto final. Se ha fabricado un prototipo de calzado notablemente más ligero que la mayoría de zapatillas casuales tipo sneaker del mercado, aunque algo más pesado que las zapatillas destinadas completamente al uso deportivo.

Aunque no ha sido posible evaluar el comportamiento a largo plazo del TPU 95A, se puede asegurar que ha sido una elección acertada por sus propiedades, que ofrecen el rendimiento necesario para el uso diario y la capacidad de reciclabilidad, para poder usarse en refundirse en nuevas impresiones, cerrando el ciclo de vida del producto y ajustándose a un modelo de economía circular. El material escogido es altamente resistente a la flexión y demás esfuerzos sufridos durante su uso, como no es el caso de materiales textiles que sufren daños a lo largo del tiempo. Además, gracias a la impermeabilidad del material, el calzado impreso puede lavarse en una lavadora, aunque hay que revisar la estanqueidad del prototipo, ya que puede llenarse de agua, limitando el confort y aumentando el peso.

Concluyendo con este proyecto, se ha demostrado la viabilidad del diseño y producción de un calzado a medida completamente personalizado, ergonómico, estéticamente atractivo y respetuoso con el medio ambiente mediante fabricación aditiva, planteando una alternativa real a los métodos de fabricación tradicionales. Aun así, este proceso de fabricación aún está en fase exploratoria, y el consumo energético y los prolongados tiempos de producción plantean desventajas frente a la fabricación tradicional en masa. No obstante, dichos inconvenientes son oportunidades clave para una mejora continua de este tipo de fabricación.

Futuras mejoras

Validación funcional en condiciones reales de uso

El prototipo ha sido impreso y evaluado de manera preliminar, pero aún no ha sido sometido a pruebas en situaciones reales. Sería recomendable realizar ensayos de tracción, compresión, fatiga y abrasión para cuantificar el rendimiento real del prototipo frente a las exigencias del uso diario prolongado. Además, sería fundamental llevar a cabo una fase de prueba con usuarios reales para la correcta validación de la ergonomía, confort, desgaste y resistencia estructural del calzado durante el uso.

Optimización de tiempos y costes

La impresión 3D, si bien reduce la cantidad de residuos y permite una completa personalización y cambios rápidos de diseño, presenta un problema fundamental frente a la fabricación tradicional, que son los prolongados tiempos de producción y, por ende, el coste de fabricación. Una correcta optimización de los parámetros de impresión y del modelo 3D para reducir volúmenes inútiles podría reducir dichos inconvenientes para futuras impresiones.

Utilización de equipo y materiales más avanzados

Se propone la utilización de tecnologías de impresión más avanzadas, como el DLS de Carbon3D, para obtener mejores acabados estéticos y rigidez estructural mediante el uso de resinas de impresión de mayores prestaciones técnicas y un producto de mayor calidad.

Mejora en el ajuste biomecánico multiusuario

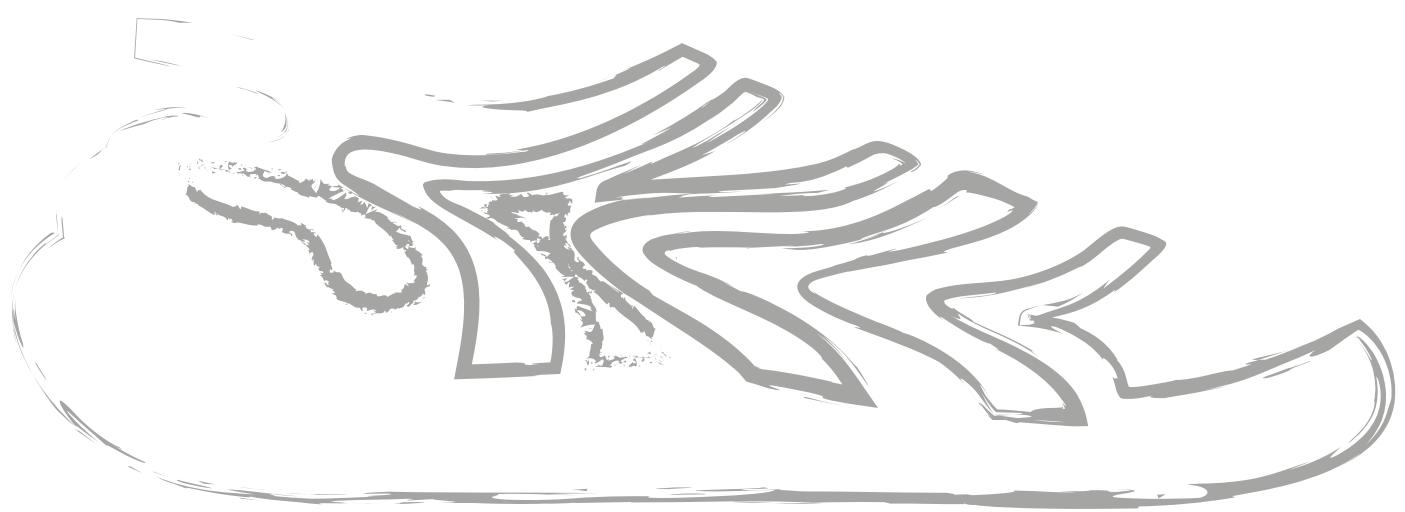
Aunque el escaneo del pie permitió el modelado de una forma personalizada que desembocó en un ajuste óptimo del calzado, el modelo desarrollado está adaptado únicamente para una morfología específica. Mediante el uso de herramientas de diseño como Grasshopper de Rhinoceros3D, podría automatizarse la adaptación del modelo de la zapatilla a diferentes formas de pie escaneadas, permitiendo además modificaciones más ágiles sin tener que rediseñar el calzado desde cero. Esto también abarataría los costes relacionados con la mano de obra directa, obteniendo un producto más asequible para toda la población.

Refinamiento estético y acabados

Si bien la estética orgánica de este proyecto ha sido un pilar fundamental en el diseño, es posible refining el lenguaje formal y los detalles estéticos para lograr que el producto sea atractivo y llamativo para todos los sectores de la población, y no únicamente destinado para la población más joven.



Diseño y prototipado de calzado personalizado
por impresión 3D en un modelo de economía circular



Bibliografía

- [1] 3Dnatives. (2024, 20 de febrero). Puma Mostro NY Fashion Week impresión 3D. <https://www.3dnatives.com/es/puma-mostro-ny-fashion-week-impresion-3d-200220242/>
- [2] 3Dnatives. (2024, 28 de febrero). Impresión 3D en calzado. <https://www.3dnatives.com/es/top-proyectos-calzado-impreso-3d-280420202/>
- [3] ABC. (2021, 11 de junio). Moda: Zapatos puntiagudos en la Edad Media multiplicaron juanetes. https://www.abc.es/cultura/abci-moda-zapatos-puntiagudos-edad-media-multiplico-juanetes-202106111135_noticia.html
- [4] Adidas Group. (2017, 7 de abril). Adidas unveils industry's first application of digital light synthesis with Futurecraft 4D. <https://www.adidas-group.com/en/media/press-releases/adidas-unveils-industrys-first-application-of-digital-light-synthesis-with-futurecraft-4d>
- [5] Additive Manufacturing Research. (2019). 3D printing in footwear. SmarTech. https://additivemanufacturingresearch.com/wp-content/uploads/2019/05/SmarTech_WP_Footwear.pdf
- [6] ASMC. (s.f.). La fascinante historia de la fabricación de calzado y el calzado. <https://asmc-us.com/es/the-fascinating-history-of-shoemaking-and-footwear/>
- [7] Basket4Ballers. (s.f.). Flyknit technology. <https://www.basket4ballers.com/es/content/44-flyknit>
- [8] BBC News Mundo. (2010, 10 de junio). Descubren el zapato más viejo del mundo. https://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2010/06/100610_zapato_viejo_men
- [9] Carbon3D. (s.f.). Carbon DLS 3D printing. <https://www.carbon3d.com/carbon-dls-technology>
- [10] Casamichana, D. (s.f.). Biomecánica del calzado [Apuntes de clase, archivo PDF no publicado].
- [11] Componentes Calzado. (2017, 17 de marzo). AEC informe sectorial 2024-2025. <https://componentescalzado.com/aec-informe-sectorial-2024-2025/>
- [12] Componentes Calzado. (2019). Análisis del sector del calzado 2023-2024. <https://componentescalzado.com/wp-content/uploads/2019/12/Analisis-del-Sector-del-Calzado-2023-2024-2.pdf>
- [13] Componentes Calzado. (2022). Informe AEC 2024-2025. <https://componentescalzado.com/wp-content/uploads/2022/10/Informe-AEC-2024-2025.pdf>
- [14] Componentes Calzado. (2022). Memoria anual de AEC 2024. <https://componentescalzado.com/wp-content/uploads/2022/10/Memoria-Anual-de-AEC2024.pdf>
- [15] Componentes Calzado. (2022). Tendencias y pronósticos del sector calzado 2022-2027. <https://componentescalzado.com/wp-content/uploads/2022/10/Tendencias-y-Pronosticos-del-Sector-Calzado-2022-2027.pdf>
- [16] Componentes Calzado. (2025, 19 de mayo). AEC informe tendencias y pronósticos 2022-2027. [https://componentescalzado.com/aec-informe-tendencias-y-pronosticos-2022-2027/#:~:text=En%202024%20la%20producción%20mundial,y%20Europa%20\(-5%25\)](https://componentescalzado.com/aec-informe-tendencias-y-pronosticos-2022-2027/#:~:text=En%202024%20la%20producción%20mundial,y%20Europa%20(-5%25))

- [17] Dassault Systèmes. (s.f.). DLS Impresión 3D por Carbon. 3ds.com.
<https://www.3ds.com/es/make/guide/process/dls-3d-printing-carbon>
- [18] Dassault Systèmes. (s.f.). FDM (Fused Deposition Modeling). 3ds.com.
<https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>
- [19] Debate Artesanía. (2018, 30 de noviembre). Adidas Futurecraft 4D impresión 3D gran escala.
<https://www.debateartesania.com/es/adidas-futurecraft-4d-impresion-3d-gran-escala>
- [20] De la Cruz, B. (2009). Biomecánica de la marcha y la carrera. Munideporte.
https://www.munideporte.com/imagenes/documentacion/ficheros/20091229110320blanca_de_la_cruz2.pdf
- [21] Ecco. (2024, 27 de abril). La influencia del arte en la moda de calzado: Un viaje por las colaboraciones más icónicas.
<https://ecco.pe/articulos/post/la-influencia-del-arte-en-la-moda-de-calzado-un-viaje-por-las-colaboraciones-mas-iconicas.html>
- [22] Fleek. (s.f.). Descubre qué es Nike Flyprint.
<https://fleek.25gramos.com/descubre-que-es-nike-flyprint/>
- [23] Forbes. (2024, 25 junio). Zellerfeld launches revolutionary 3D printing footwear platform.
<https://www.forbes.com/sites/cassellferere/2024/06/25/zellerfeld-launches-revolutionary-3d-printing-footwear-platform/>
- [24] Fortune Business Insights. (s.f.). Footwear market.
<https://www.fortunebusinessinsights.com/es/footwear-market-112088>
- [25] González, M. (2024). Nike Air Max 1000 impresas en 3D [Fotografía]. Neo2.
<https://www.neo2.com/nuevas-zapatillas-nike-air-max-1000-impresas-en-3d/>
- [26] Impulsyn. (s.f.). La historia de Adidas. <https://www.impulsyn.com/blog/la-historia-de-adidas/>
- [27] Impulsyn. (s.f.). La historia de Nike. <https://www.impulsyn.com/blog/la-historia-de-nike/>
- [28] Impulsyn. (s.f.). La historia de Puma. <https://www.impulsyn.com/blog/la-historia-de-puma/>
- [29] Informe de Expertos. (s.f.). Mercado de calzado.
<https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-calzado>
- [30] Informe SIS International. (s.f.). Estudio de mercado del calzado.
<https://www.sisinternational.com/es/pericia/industrias/estudio-de-mercado-del-calzado/>
- [31] InOne Fisioterapia en Marbella. (2024, 17 de mayo). Biomecánica del pie: importancia en la postura y el movimiento corporal.
<https://inonefisioterapia.com/biomecanica-del-pie-importancia-en-la-postura-y-el-movimiento-corporal/>
- [32] Llanos Alcázar, L. F., Fernández Fairén, M., & Núñez-Samper Pizarro, M. (1988). Anatomía funcional del pie (biomorfología y biomecánica). Revista del Pie y Tobillo, 2(2), 17-23.
<https://fondoscience.com/sites/default/files/articles/pdf/rpt.0202.fs8812003-anatomia-funcional-del-pie.pdf>
- [33] LinkedIn. (s.f.). Zellerfeld Inc. About. <https://www.linkedin.com/company/zellerfeld-inc/about/>

- [34] Museo del Calzado. (2019, 11 de septiembre). Historia del calzado: Egipto y su gran legado. <https://www.museocalzado.com/es/blog/historia-del-calzado-egipto-y-su-gran-legado-415.html>
- [35] Mundo Deportivo. (2018, 17 abril). Nike descubre nueva tecnología 3D Flyprint. <https://www.mundodeportivo.com/running/20180417/1002142488/nike-descubre-nueva-tecnologia-3d-flyprint.html>
- [36] Neo2. (2024, 7 de noviembre). Las Nike Air Max 1000 son las sneakers del futuro (y pronto llegarán). <https://www.neo2.com/nuevas-zapatillas-nike-air-max-1000-impresas-en-3d/>
- [37] Nike. (s.f.). Vaporfly elite flyprint future 3D. <https://www.nike.com/launch/t/vaporfly-elite-flyprint-future-3d>
- [38] Protolabs. (s.f.). Carbon DLS 3D printing service. <https://www.protolabs.com/es-es/servicios/impresion-3d/carbon-dls/>
- [39] Prusa Research. (s.f.). Original Prusa XL [Impresora 3D]. <https://www.prusa3d.com/es/producto/impresora-3d-original-prusa-xl-3/>
- [40] PUMA. (s.f.). Zapatillas A\$AP Rocky x PUMA Mostro 3.D Slip-On Unisex. <https://eu.puma.com/es/es/pd/zapatillas-a%24ap-rocky-x-puma-mostro-3.d-slip-on-unisex/404187.html>
- [41] Recreus. (s.f.). Filaflex 95A [TPU semirrígido para impresión 3D]. <https://recreus.com/en-en/products/filaflex-95a>
- [42] Regina Romero. (2024, 24 de agosto). El calzado a través de las eras. https://reginaromero.com/blogs/reginaromero/el-calzado-a-traves-de-las-eras?srsltid=AfmBOooFPmJP9KL0ku6c3OH3-4xYXqFfT-gClZFq_g3wWI9HAG4gKh5Y
- [43] Sarroca Podólogos. (s.f.). Historia y evolución del calzado. <https://www.sarrocacapodologos.es/historia-y-evolucion-del-calzado-podologo/>
- [44] Servitec3D. (s.f.). Impresora 3D Hellbot Magna SE 300 [Ficha técnica]. <https://servitec3d.com/impresoras-3d-hellbot/impresora-3d-hellbot-magna-se-300/>
- [45] Stratasys. (s.f.). Guide to 3D printing: Technologies and materials – FDM technology. <https://www.stratasys.com/es/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/>
- [46] Ultimaker. (2017, 16 de mayo). Ficha de datos técnicos TPU 95A (v3.010). <https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/TPU-95A/TDS%20TPU%2095A%20v3.010%20ES.pdf>
- [47] Viladot Voegeli, A. (2003). Anatomía funcional y biomecánica del tobillo y el pie. Revista Española de Reumatología, 30(9), 469–477. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-reumatologia-29-articulo-anatomia-funcional-biomecanica-del-tobillo-13055077>
- [48] VoxelMatters. (2025, 30 de junio). Koobz cierra su ronda de financiación inicial y logra recaudar un total de 7,2 millones de dólares. <https://www.voxelmatters.com/es/koobz-cierra-su-ronda-de-financiacion-inicial-y-logra-recaudar-un-total-de-72-millones-de-dolares/>
- [49] Zellerfeld. (s.f.). Colección de productos [Página web de tienda]. <https://www.zellerfeld.com/collections/shop>

[50] Zellerfeld. (s.f.). FAQ about 3D printed footwear. <https://www.zellerfeld.com/pages/faq>

[51] Zellerfeld News. (2023, 29 de marzo). Zellerfeld lanza zapatillas impresas en 3D. <https://www.3dnatives.com/es/zellerfeld-lanza-zapatillas-impresas-en-3d-290320232/>

