



## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Metodología para el desarrollo de un producto que permita la Integración de plantillas personalizadas en calzado abierto, a través de la impresión 3D y las estructuras lattices

Methodology for the development of a product that allows the integration of personalized insoles in open footwear, through 3D printing and lattices structures

← Autor →

Eduardo Menacho Miralles

Director

David Ranz Angulo

Codirector

Javier Ordoyo Martin

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del  
Producto

EINA 2022

# Resumen

## Título

Metodología para el desarrollo de un producto que permita la Integración de plantillas personalizadas en calzado abierto, a través de la impresión 3D y las estructuras lattices

Methodology for the development of a product that allows the integration of personalized insoles in open footwear, through 3d printing and lattices structures

## Palabras clave

Calzado, Ortesis plantares, Lattice, Impresión 3D.

## Resumen

Con el presente trabajo de fin de grado se perseguía conseguir un calzado abierto que integrase una órtesis plantar (plantilla ortopédica) en su entresuela. Se utilizó la tecnología de impresión 3D para su fabricación y las estructuras lattices para la entresuela por petición de la empresa colaboradora.

El trabajo consistió primeramente en una investigación principalmente de los siguientes temas: podología, calzado, biomecánica y estructuras lattices. A raíz de esta investigación se pudieron obtener diferentes claves para realizar un diseño útil, viable y funcional para cumplir con el objetivo del proyecto. Después, se planteó realizar un modelo para el caso real de una persona que necesita plantillas. A partir de ahí, se estudió la forma del pie y se reunieron datos del paciente en cuestión. Una vez hecho esto, se realizó un modelo 3D del producto con los programas SolidWorks y Ntopology. Además, a través de simulaciones con SolidWorks se certificó que el producto aguantaría los esfuerzos a los que iba a estar sometido. Finalmente, se preparó un prototipo virtual con su consiguiente archivo listo para fabricar por impresión 3D.

## Abstract

In the present study, the goal was to obtain an open footwear that integrates a foot orthosis (orthopedic insoles) inside the midsole of that shoe. Simultaneously, the use of 3D impression in the manufacture process and the use of lattice structures in the midsole production were request by the collaborating company.

In order to develop the work, first of all, we started an investigation in the following issues: podology, footwear, biomechanical and lattices structures. As a result of this investigation, we could obtain different keys to develop a useful, feasible and functional design to accomplish with the goals of the Project. After that, we decide to build up a model developed over a real situation: a person who needs insoles. As a beginning, the foot shape and the general data of the patient were studied. Once finished this stage, a 3D model was built up using the "Solid Works" and "Ntopology" programs. In addition, using simulations designed by "SolidWorks", we will check the physical endurance against to the efforts that the shoe will be submitted. Finally, a virtual prototype with its computer file was prepared in order to can begin the 3D impression.

# Índice

Resumen .....	2
Título .....	2
Palabras clave .....	2
Resumen.....	2
Abstract.....	2
Índice .....	3
1 Introducción .....	5
1.1 Objeto y alcance .....	5
1.2 Justificación .....	5
1.2.1 Historia del calzado .....	5
1.2.2 Patologías podológicas .....	5
1.2.3 Podología en la sociedad.....	6
1.2.4 Ortesis plantares (plantillas ortopédicas).....	6
1.2.5 Ortesis plantares y calzado abierto.....	6
1.2.6 Importancia del calzado abierto .....	6
1.3 Marco contextual del trabajo de fin de grado .....	6
1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	7
1.5 Metodología que voy a usar .....	7
1.6 Motivación Personal .....	7
2 Fase de investigación.....	8
2.1 Antecedentes .....	8
2.1.1 Antecedentes - historia del calzado .....	8
2.1.2 Antecedentes – Calzado por Impresión 3D .....	8
2.2 Podología .....	10
2.2.1 Podología - Desarrollo del pie.....	10
2.2.2 Podología - Elección del calzado .....	11
2.2.3 Podología – Pie diabético .....	11
2.2.4 Podología – enfermedades neurodegenerativas .....	12
2.2.5 Podología – Caso de África .....	12
2.2.6 Podología – Cadenas musculares .....	12
2.3 Lattices.....	13
2.3.1 Estructuras lattices destacadas .....	14
2.3.2 Respuesta al impacto de las lattices.....	15
2.4 Tipos de zapato abierto .....	17

2.5 Estudio formal .....	18
2.6 Investigación biomecánica.....	19
2.6.1 Tipos de pisada.....	19
2.6.2 Partes de una zapatilla.....	19
2.6.3 Conceptos biomecánicos en el calzado.....	21
2.7 Estudio del workflow .....	24
2.8 Materiales.....	26
3 Generación de Conceptos.....	27
3.1 Especificaciones de diseño .....	27
3.2 Conceptos.....	28
3.3 Selección del concepto.....	29
3.4 Caso particular de una persona .....	29
4 Modelado 3D .....	29
4.1 Estudio de la forma del pie .....	30
4.2 Solid Works.....	32
4.2.1 Modelado .....	32
4.2.1 Simulaciones.....	34
4.4 Ntopology.....	36
4.5 Prototipado y fabricación .....	37
5 Conclusiones y reflexión final.....	38
5.1 Conclusiones .....	38
5.2 El proyecto en el futuro.....	39
5.3 Reflexión final .....	39
5.4 Agradecimientos .....	39
6 Bibliografía.....	39

# 1 Introducción

## 1.1 Objeto y alcance

Una parte significativa de la población tiene patologías relacionadas con la podología y necesitan del uso de plantillas personalizadas para solucionarlas. Actualmente, se encuentran muchas dificultades para incluir estas plantillas en calzado abierto. Este tipo de calzado es el más vendido en el mundo y se utiliza principalmente en las épocas de calor y en los países en los que las temperaturas son altas durante todo el año, como, por ejemplo, los países árabes y tropicales. El objetivo de este trabajo es diseñar, desarrollar y prototipar un calzado abierto que integre plantillas personalizadas en la suela del propio calzado, utilizando la tecnología de impresión 3D y las estructuras lattices.

## 1.2 Justificación

### 1.2.1 Historia del calzado

El nacimiento del concepto “calzado” data de hace 4 millones de años, cuando el ser humano adoptó la posición erguida y comenzó a andar. Dado que se tenían que desplazar por diferentes tipos de suelo y climas, el ser humano comenzó a proteger su cuerpo y pies con pieles y fibras vegetales, con un primer “zapato” que más bien parecía una sandalia. Con el paso del tiempo fue utilizando materiales de mayor calidad como el cuero [1].

A día de hoy, el mundo del calzado es muy amplio, con multitud de diferentes formas, materiales, aplicaciones, colores y estéticas. Las medidas han sido estandarizadas y facilitan la producción en masa, de manera que es uno de los grandes sectores de la industria global. Sin embargo, dado que los pies de cada humano son diferentes en forma, tamaño y proporciones, es habitual que el pie no encaje bien con la forma del espacio interior del zapato. Por esta razón, el calzado se vende por defecto con unas plantillas normalizadas. La principal función que cumplen estas plantillas es ayudar a adaptar el espacio del calzado al pie. Además, ayudan a mejorar el agarre, amortiguar el impacto, repartir el peso y equilibrar la cadera y la espalda. [2]. Aun así, estas plantillas genéricas no dan respuesta a todos los casos de la población y, por tanto, existen personas que acaban padeciendo patologías de diferente índole y que necesitan soluciones más especializadas.

### 1.2.2 Patologías podológicas

Podríamos dividir estas patologías en dos tipos: las de tipo mecánico que afectan a nuestra osamenta y musculatura y las de tipo infecciosas. Respecto a las primeras afectan principalmente las asimetrías del cuerpo humano, el tipo de pisada (hay tres tipos: supinador, pronador y neutro), las dismetrías en la marcha y el desgaste del cuerpo por el paso del tiempo que, por la repetición de la acción de desplazarse generan estas patologías. Y las segundas surgen por el contacto de nuestro pie con hongos, bacterias, parásitos y otros agentes patógenos. [3]

Algunas de las enfermedades mecánicas más comunes son: el pie geriátrico; lesiones, tales como tendinitis, fracturas por estrés, sobrecargas, roturas fibrilares o bursitis; cayos, durezas, helomas, ampollas, uñas encarnadas, etc. Es importante tener en cuenta que un problema en los pies puede repercutir en otras partes del cuerpo, generando dolores, molestias e incluso lesiones en toda la parte posterior de nuestro cuerpo. Esto se debe a que toda la musculatura que va desde el cuello hasta la planta de los pies está relacionada, conformando lo que se conoce como cadena posterior [4].

### **1.2.3 Podología en la sociedad**

Resulta llamativo que se ha llegado a relacionar patologías podales con la diabetes o el Parkinson. Diversos estudios han demostrado que algunos pacientes diabéticos han desarrollado úlceras, gangrenas, amputaciones en las extremidades inferiores y ocasionalmente discapacidad parcial o definitiva [5]. Otros estudios han encontrado conexión entre enfermos de Parkinson y problemas mecánicos en la marcha, que se podrían solucionar a través de la biomecánica. [6]

También se han encontrado factores socioeconómicos que afectan a la salud podal de la población. En un estudio sobre las patologías podológicas más frecuentes en África [7], se ha encontrado relación de las mismas con el bajo desarrollo económico, el uso de calzado abierto o incluso el no uso de calzado. Debido a estas circunstancias el pie está desprotegido frente a enfermedades producidas por parásitos (filariasis linfática, tungiasis u oncocercosis), hongos y bacterias (micetoma) y el contacto con el suelo (podoconiosis).

### **1.2.4 Ortesis plantares (plantillas ortopédicas)**

Con objeto de estudiar y dar respuesta a estas patologías existen expertos en biomecánica y podología. Estos especialistas utilizan a modo de tratamiento o prevención para las patologías mecánicas las plantillas pediátricas o personalizadas. Estas plantillas, a diferencia de las convencionales disminuyen el dolor, mejoran la función física y posiblemente retrasan la progresión de la enfermedad. Para diseñarlas y fabricarlas se necesita realizar un estudio biomecánico para sacar medidas del pie y conocer las deficiencias al andar del paciente. La demanda de estas plantillas ha aumentado drásticamente en los últimos años [8] y por tanto es un producto muy importante para mejorar la salud de la sociedad.

### **1.2.5 Ortesis plantares y calzado abierto**

Existe dificultad para incluir las plantillas personalizadas en zapato abierto (chanclas, sandalias, tacón). Actualmente hay dos soluciones [9], usar adhesivo de doble cara o usar velcro. Pero se necesita buscar un calzado abierto cuya plantilla genérica se pueda extraer. Otro problema de esta solución es que la plantilla no queda fija correctamente pudiendo ocasionar otros problemas al paciente. Además, la solución del adhesivo es temporal porque va perdiendo adherencia. Por todo esto podemos afirmar que las soluciones actuales no son del todo eficientes.

### **1.2.6 Importancia del calzado abierto**

La relevancia que tiene este problema proviene de la importancia del zapato abierto en el sector del calzado, de hecho, las sandalias son el calzado más vendido en el mundo [10]. El zapato abierto se utiliza en épocas de calor y en lugares de clima cálido. En el sur del planeta son el primer contacto con el calzado y en los países desarrollados cada vez es más común su uso diario.

## **1.3 Marco contextual del trabajo de fin de grado**

Otra propuesta que no se ha llevado a cabo hasta la fecha es la integración de la platilla en la suela, de manera que la superficie de la suela en la que se apoya el pie tuviese la forma de la plantilla todo en una sola pieza. Existirían dos posibilidades hasta la fecha para conseguir esto: la fabricación por molde, que no saldría rentable por costes y tiempo, ya que tienes que gastar miles de euros en un molde que solo va a servir para una sola persona haciéndolo inviable; y la fabricación por Impresión 3D que lleva mucho tiempo por la construcción de un modelo 3D desde 0 para cada uno de los pacientes.

En relación a la propuesta de fabricarlas en impresión 3D, la empresa española Orthocast S.L., de nombre comercial Podotec 3D, busca conseguir automatizar el proceso. Para ello, su objetivo

es crear un programa algorítmico capaz de obtener un modelo 3D únicamente introduciendo los datos del estudio biomecánico de la persona. Por todos estos factores y junto a la empresa Orthocast S.L. el objetivo de este trabajo es diseñar, desarrollar y prototipar un producto que permita la integración de plantillas personalizadas en la suela del calzado abierto, utilizando la tecnología de impresión 3D y las estructuras lattices.

## **1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

- ODS 1 Fin de la pobreza Meta 1.4  
Para 2030, garantizar que todos los hombres y mujeres, en particular los pobres y los vulnerables, tengan los mismos derechos a los recursos económicos, así como acceso a los servicios básicos, la propiedad y el control de las tierras y otros bienes, la herencia, los recursos naturales, las nuevas tecnologías apropiadas y los servicios financieros, incluida la microfinanciación.
- ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico Meta 8.2  
Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrando la atención en sectores de mayor valor añadido y uso intensivo de mano de obra.
- ODS 9 Industria, innovación e infraestructuras Meta 9.5  
Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando sustancialmente el número de personas que trabajan en el campo de la investigación y el desarrollo por cada millón de personas, así como aumentando los gastos en investigación y desarrollo de los sectores público y privado para 2013.

## **1.5 Metodología que voy a usar**

Lo primero será, en primer lugar, realizar una fase de investigación que abarcará: búsqueda de antecedentes, benchmark, estudio del workflow, investigación sobre biomecánica y sobre estructuras lattices.

Con las conclusiones de esta primera fase, se elaborarán diferentes propuestas de producto. La empresa decidirá la opción a desarrollar.

Por último, se realizará el modelado 3D, simulaciones antes esfuerzos y el prototipo mediante los programas SolidWorks y Ntopology

## **1.6 Motivación Personal**

Lo primero que hay que explicar para entender los motivos personales para desarrollar este proyecto, es que soy un atleta de alto rendimiento y me dedico semiprofesionalmente al atletismo a la vez que compagino mis estudios universitarios. Por esta razón estoy interesado en desarrollar mis capacidades como diseñador en el campo del material deportivo, donde es muy importante la biomecánica. Tengo la suerte de que, en mi equipo de trabajo como deportista,uento con un biomecánico de renombre internacional, al cual acudí para preguntarle por algún tema o investigación que tuviese en activo para realizar mi TFG. Me presentó varias posibilidades y entre ellas estaba este proyecto que desarrollaba la empresa Orthocast. Esta empresa es la que le fabrica las plantillas de sus pacientes.

## 2 Fase de investigación

En esta fase de investigación, la metodología que vamos a seguir, será en primer lugar, observar algunos de los antecedentes relacionados con el proyecto; más concretamente la historia del calzado y algunos zapatos que utilizan la impresión 3D para su fabricación total o parcial. Con esto conseguiremos introducirnos en esta temática y saber la posible competencia que hay. Después investigaremos sobre el mundo de la podología para conocer los factores por las que surgen las patologías, cómo afectan a las personas y la relación que pueden tener con otros aspectos del cuerpo humano. A continuación, haremos un estudio sobre las lattices, para saber que son, qué propiedades tienen, los diferentes tipos que hay y sus aplicaciones. Luego realizaremos un estudio de los tipos de zapato abierto que hay con sus ventajas y sus inconvenientes, así determinaremos que buscan los clientes a nivel funcional en este producto. Posteriormente pasaremos a un estudio formal para conocer las diferentes estéticas que mejor funcionan en el calzado. Seguiremos con una investigación sobre biomecánica para saber el funcionamiento del pie, a qué esfuerzos está sometido y cuáles son las claves ergonómicas y biomecánicas en el calzado. Por último, investigaremos el comportamiento y características generales, así como las específicas en cuanto a la impresión 3D del material seleccionado por la empresa, que es el poliuretano termoplástico (TPU).

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes - historia del calzado

Hace 4 millones de años, los homínidos comenzaron a andar erguidos de forma bípeda. Este hito, entre otros, provocó la necesidad de proteger y resguardar los pies, tanto de diferentes tipos de suelo como de clima. Con el paso del tiempo, se fueron utilizando materiales como el cuero y las fibras vegetales para sujetar este al pie. Este primer “zapato”, que recordaría a una sandalia, se empleaba meramente para la protección y resguardo del pie. Posteriormente, conforme fue evolucionando el calzado, este adquirió también usos de tipo social y estético.

El calzado más antiguo conocido es una sandalia egipcia fabricada con paja trenzada. Los primeros zapatos se asocian a las cortes francesas de los siglos XIII y XIV y el tacón apareció a finales del siglo XVII. Tras la revolución industrial, el calzado se empezó a numerar por tallas y, a finales del siglo XIX aparecieron las primeras máquinas manuales para trabajar las pieles y formar zapatos. Con la llegada de la electricidad, se modernizaron los mecanismos de fabricación de calzado. A principios del siglo XX, la fabricación artesanal del calzado pasa a incorporar la fabricación en serie, lo cual supuso una revolución en la industria del calzado. En el siglo XX se incorporaron nuevos materiales a la confección del calzado, como la goma de la suela: las primeras zapatillas con suela de goma datan del año 1971. Hoy en día, el calzado ha pasado de emplearse para la protección y seguridad de los pies a formar parte de la indumentaria. Existen diferentes tipos de calzado (zapatos, zapatillas, sandalias, botas o deportivas), que se seleccionan de acuerdo a la función que han de desempeñar: zapatos de baile, deportivos, de vestir, de descanso, de seguridad, de protección, de trabajo, etc. [1].

#### 2.1.2 Antecedentes – Calzado por Impresión 3D

Actualmente ya existe calzado hecho con impresión 3D, cabe destacar que en todos los casos se utilizan lattices, para ahorrar material y generar distinción respecto al calzado fabricado de manera tradicional. El uso de lattices favorece también la amortiguación, consistencia y ventilación. Con esta tecnología de momento no se ha producido en masa. No se encuentra mucha información técnica ya que se encuentra protegida intelectualmente al ser un campo novedoso [11]. A continuación, se muestran algunos ejemplos

## Telic

Es el producto que más se acerca a la intención de este proyecto, ya que utiliza conceptos de biomecánica aplicados a una chancla impresa en 3D.



Figura 1 Sandalia Telic



Figura 2 Modelo Adidas 4DFWD

La suela está impresa al completo en 3D mediante la tecnología Sinterización de luz digital (DLS por sus siglas en inglés), desarrollada por la empresa Carbon. El material utilizado es un elastómero EPU41. El resto está fabricado de la manera habitual. Esto permite que experimenten rápidamente sin tener que crear moldes de inyección con cada prueba.

## Under armour architect

En este modelo podemos distinguir dos partes claramente la primera, la mediasuela en la zona del retropié (pieza roja) que está impresa en 3D y el resto de la zapatilla. La tecnología utilizada para obtener la entresuela es Sinterización Selectiva por Laser (SLS). Ha sido diseñada mediante el software Autodesk Within, en el laboratorio de innovación de Under Armour.



Figura 3 Modelo Under Armour Architect

## New balance

Tan solo la entresuela está impresa en 3D mediante la tecnología SLS. El material utilizado es DuraForm® Flex TPU. El resto está fabricado de la manera habitual. Esto permite que experimenten rápidamente sin tener que crear moldes de inyección con cada prueba. La razón por la que están empezando a imprimir en 3D es para evitar la fabricación de los moldes de inyección con los que realizan normalmente esta pieza, además de aprovechar la posibilidad de experimentar con diferentes conceptos rápidamente.



Figura 4 Modelo New Balance

## Feetz

Utilizan una aplicación propia para la realización de fotos del pie a partir de las cuales tomarán las medidas generales para la impresión del Upper de la zapatilla. La parte de la entresuela y la suela de la zapatilla no se adaptan al pie, aunque también están impresas en 3D por impresoras 3D de tecnología FDM.



Figura 5 Modelo de Feetz

## Shoetopia

Es un proyecto similar a Feetz, pero que todavía no está lanzado, sino que se encuentra en una fase previa. Se desea, a través de una aplicación, desarrollar una zapatilla cuya parte de arriba esté adaptada al pie. En este caso se realizará mediante la impresión de unas piezas de ajuste que se adaptan más o menos a una tela predefinida. Al igual que en el caso anterior, no adaptan la zapatilla a la planta del pie del usuario.



Figura 6 Modelo de Shoetopia

### Conclusiones

Siempre se utilizan las lattices para imprimir la suela del calzado para conseguir mejor amortiguación ventilación y consistencia. Además, esta técnica permite ahorrar material

Las lattices permiten generar zonas más densas y por tanto más rígidas que otras. Es una posible aplicación a nivel biomecánico teniendo en cuenta que el cliente tiene patologías en los pies.

Las lattices quedan a la vista como método distintivo respecto al calzado tradicional.

## 2.2 Podología

Para este proyecto resulta vital adentrarse en el mundo de la podología para entender la forma del pie, los distintos factores que pueden llevar a una patología podológica, algunos tratamientos, como elegir el calzado correctamente, algunas enfermedades concretas de gravedad. Y finalmente conocer el impacto que puede tener estas enfermedades en nuestra vida de manera directa o indirecta.

El 90% de las patologías del pie se deben al uso de un calzado inadecuado o de una mala selección. Esto se observa con mayor frecuencia en mujeres, ya que el calzado con excesivo tacón, hormas demasiado estrechas o puntas adelgazadas, a la larga, puede provocar lesiones como: deformidades irreparables en los dedos (Hallux valgus, dedos en garra y en martillo), hiperqueratosis (en el dorso de los dedos o entre los dígitos), metatarsalgias, sesamoiditis, tendinitis del tendón de Aquiles, dolor en rodillas y en gemelos.

### 2.2.1 Podología - Desarrollo del pie

El pie de una persona adulta se puede definir como “una bóveda sostenida por tres arcos”. El peso del cuerpo se distribuye entre la parte delantera del pie y el talón, sin embargo, en posición erguida, el talón soporta más de la mitad del peso del cuerpo. Cuando se eleva el talón, como sucede al usar tacones, cambia la distribución del peso: cuanto más se eleva el talón (tacones más altos), más se carga la zona delantera del pie.

Durante los primeros años de vida, el pie está en proceso de formación. Inicialmente, es una estructura muy flexible que, una vez se adopta la posición erguida, al soportar el peso del cuerpo

y caminar, se visibilizan los arcos del pie. Hasta entonces, al carecer de la fuerza necesaria, cualquier tensión no frecuente sobre el pie puede afectar negativamente [1].

## 2.2.2 Podología - Elección del calzado

Los pies son una parte del cuerpo que juega un papel importante en la salud humana y el bienestar: nos proporciona apoyo y equilibrio, nos permite desplazarlos y detenerlos, realizar acciones rítmicas, de propulsión y absorción de choques, etc. Son una parte muy especializada que ha de ser cuidada y, un calzado adecuado, es un aspecto prioritario. Por ello, es importante elegir calzado “con el pie, no con la vista” y, para esto, se ha de seleccionar calzado teniendo en cuenta el tipo de pie:

- Pie griego: el índice es el dedo más largo y el corazón mide prácticamente lo mismo, el anular y el meñique son más pequeños. En este tipo de pie las cargas se distribuyen mejor sobre el antepié, la parte delantera del pie.
- Pie cuadrado: los dedos son casi todos iguales y están a la misma altura.
- Pie egipcio: el pulgar es el dedo más largo y los demás siguen un tamaño decreciente. Es el tipo de pie se sobrecarga más con el calzado y predispone a padecer patologías.

Además, hay personas que requieren zapatos especializados e individualizados, por ejemplo: pacientes diabéticos, artríticos, personas que han sufrido fracturas de pie y tobillo, personas con deformidades congénitas del pie, con pies neuropáticos misceláneos o personas de la tercera edad.

A la hora de comprar zapatos, resulta conveniente tener también en cuenta otras consideraciones: es mejor probárselos al final del día, cuando el pie haya alcanzado su máxima dimensión de longitud y volumen; un calzado adecuado nos debe permitir mover los dedos en su interior, debería tener un dedo de espacio por delante y el talón debe quedar cómodo y no apretado. Es conveniente llevar zapatos de una altura media y, si el calzado es para una persona mayor, conviene un calzado con suelas antideslizantes y con buena sujeción, preferiblemente con cordones [1].

## 2.2.3 Podología – Pie diabético

Las personas con Diabetes Mellitus (DM) pueden sufrir una complicación crónica llamada pie diabético (PD). Puede deberse a múltiples factores y, con frecuencia, causar una discapacidad parcial o definitiva: desde úlceras hasta gangrenas y amputaciones en las extremidades inferiores (de hecho, los pacientes con DM tienen un riesgo de amputación 15 veces mayor que el de personas no diabéticas).

Por ello, los pacientes con DM deben ingresar a un programa permanente que incluya tanto la prevención como el tratamiento del PD. Dentro de este programa multidisciplinar, la Podología ofrece el estudio del calzado como una herramienta clave, ya que el calzado se ha convertido en un factor de riesgo para los pacientes con DM. Los diseños de calzado actuales, muchas veces, en vez de favorecer la ergonomía del pie, causan lesiones e incrementan las deformidades biomecánicas. Esto, sumado a las complicaciones de la DM, hace que vayan apareciendo lesiones en el pie del paciente diabético que pueden, conforme pase el tiempo, limitarle en muchas actividades cotidianas. Para prevenir lesiones en el pie, pueden emplearse plantillas que, pueden liberar tensiones y evitar presiones, previniendo la generación de callos (que pueden llegar a provocar úlceras), la aparición o la complicación de úlceras [12].

La Podología brinda una herramienta muy importante para la prevención de las lesiones en el pie. Esta herramienta es el estudio del calzado que se ha convertido en un factor de para el paciente diabético. Esto es debido a que a pesar de que su objetivo es proteger el pie, los diseños actuales no favorecen la ergonomía. Esto ocasiona lesiones y acrecienta las deformidades

biomecánicas de esta estructura. Todo esto sumado a todas las complicaciones que trae consigo la diabetes, hacen que el pie del paciente diabético poco a poco se vaya deteriorando y mutilando, porque aparecen las lesiones que a la larga lo limitarán en muchas actividades de la vida cotidiana.

## **2.2.4 Podología – enfermedades neurodegenerativas**

Las enfermedades neurodegenerativas, como la Enfermedad de Parkinson (EP), el Accidente Cerebrovascular (ACV) y la Esclerosis Múltiple (EM), han aumentado en los últimos años. Estas enfermedades pueden afectar la deambulación y las actividades básicas cotidianas de los pacientes que las sufren. Por ello, se han realizado estudios sobre los efectos de las plantillas en la marcha de estas personas. Las investigaciones demostraron que el uso continuado de ortesis plantares mejora la sensación plantar y la longitud de la zancada en personas con EP, la asimetría de la marcha mejora en pacientes con ACV y el equilibrio mejora en pacientes con EM, concluyendo que las plantillas pueden ser una forma de tratamiento de bajo coste y de fácil acceso [6].

## **2.2.5 Podología – Caso de África**

La población africana se encuentra en un riesgo constante de enfermedad debido a las características climatológicas de la zona asociadas a una carencia de recursos íntimamente ligada a la pobreza que les rodea.

Hemos revisado un estudio en el que se pretendía hacer un análisis de las patologías más frecuentes que afectan a la población africana estableciendo una relación directa con el origen del agente patógeno. Este estudio consistía en analizar otras investigaciones, en las que se encontró un mayor número de artículos de cinco enfermedades, que se cree que son las más prevalentes en ese continente. Estas enfermedades son: micetoma, filariasis linfática, podoconiosis, tungiasis y oncocercosis. Lo que tienen en común es que aparecen en entornos donde predomina la pobreza y se podrían prevenir mediante medidas simples y de bajo coste.

Según los datos parece que la enfermedad más frecuente es la filariasis linfática, seguida de la oncocercosis y la podoconiosis. El micetoma y la tungiasis parecen que son muy frecuentes, aunque no hay datos que lo corroboren. En todas ellas el origen de los agentes patógenos está relacionado con las características de su localización geográfica. Debido a la carencia de recursos del territorio, resultaría interesante fomentar la educación de la población para que desarrollen medidas preventivas, porque una vez adquirida la enfermedad resulta mucho más complicada curarla, por la escasez de recursos y la necesidad de tratamientos quirúrgicos que normalmente agravan el proceso.

En estos casos, la prevención es lo más importante, ya que una vez instaurada la enfermedad es mucho más difícil de tratar por la complejidad de los tratamientos y la falta de estos en zonas endémicas [7].

Como conclusión podemos decir que en algunos hay factores que provocan enfermedades podales que son de origen socioeconómicos, principalmente en el continente africano entre otras razones por la falta de calzado y la escasez de recursos. Igualmente, estas enfermedades son de tipo infecciosas y no mecánicas.

## **2.2.6 Podología – Cadenas musculares**

Para entender la importante relación que tienen nuestros pies con el resto del cuerpo hay que informarse sobre las cadenas musculares. Actualmente el concepto de cadenas musculares se está asentando de forma sólida en la comunidad científica relacionada con las ciencias de la salud, aunque todavía se centra en la descripción anatómica más tradicional, basada en un

modelo de movimiento más bien biomecánico. Esto implica que no ofrece la idea de trasmisión o integración ininterrumpida de la globalidad, no tan lineal sino más helicoidal y tridimensional, es decir, integración en todos los planos. Las cadenas musculares globales son un conjunto miofascial que tiene íntima relación con la extremidad inferior gracias a que todas las cadenas musculares pasan y forman parte activa de la misma, además de la extensión del sistema fascial que lo rodea y comunica todo.

Las cadenas musculares representan estructuras estáticas y dinámicas que siguen circuitos en continuidad a través de los cuales se propagan las fuerzas organizadoras del cuerpo. Las fascias son membranas fibrosas de tejido conectivo que tienen una relación íntima con las cadenas ya que las envuelven y ambas forman parte del conjunto miofascial. A partir de este complejo y junto al sistema tónico postural y el sistema nervioso central (SNC), el cuerpo es capaz de crear una respuesta a los estímulos que percibe, ya sean intrínsecos o extrínsecos. En este trabajo se trata la relación de las cadenas musculares con las plantillas posturales, mostrando el vínculo de las cadenas con la extremidad inferior y más en concreto con la musculatura intrínseca del pie, siendo esta musculatura la primera en recibir el estímulo o en proyectar una respuesta.

Se realiza un breve retorno a los orígenes de las cadenas musculares, sus autores, y se desarrolla el concepto de la relación con el sistema postural global a partir del captor podal. De este modo, se explica la relación que mantienen con las plantillas posturales.

La musculatura intrínseca del pie actúa como último eslabón de las cadenas plurimusculares, siendo el primer y/o último enlace. Este objetivo se valida junto con el objetivo anterior viendo: en primer lugar, el recorrido de las cadenas musculares que nacen cranealmente y finalizan en el pie. En segundo lugar, el tono muscular se ve modificado por el arco reflejo o reflejo miotáctico, inducido gracias al conjunto de las cadenas musculares, el SNC como centro regulador, y el sistema tónico postural como encargado de mantener el equilibrio ortostático. Esto permite al cuerpo reaccionar de manera automática a todos los estímulos que recibe en cada momento, siendo el pie la interfaz entre el suelo y el equilibrio, y así el primero en recibir el estímulo o el último en dar una respuesta.

En cuanto a la relación de sensibilidad con el exterior en la zona plantar con la postura corporal global: el pie es un potente captor para enviar o recibir información, compuesto por distintos receptores propioceptivos y exteroceptivos. Así mismo, el mínimo estímulo (menos de 1g de presión) produce una reacción y desencadena una serie de respuestas. El input, por vía ascendente llega al SNC, donde por los automatismos reflejos del sistema nervioso y los efectores musculares, configuran una respuesta de retorno de forma descendente, creando así un sistema de retroalimentación. De este modo, se mantiene la postura global mediante la acción continua de las fibras musculares tónicas y tónico fásicas. Por ello, las plantillas posturales con sus zonas de mínimo grosor, estimulan reflejos posturales que producen cambios posicionales globales sobre el eje vertical del cuerpo y en consecuencia en el plano transverso y horizontal [4].

## 2.3 Lattices

La continua búsqueda de materiales más ligeros y resistentes, y los avances en impresión 3D y fabricación aditiva han propiciado la proliferación de las estructuras Lattices en el ámbito de la ingeniería. Al ser un concepto tan novedoso y desconocido, obtener información, conocer que son, para qué sirven y cómo funcionan es de gran relevancia en este proyecto.

Dejando a un lado la definición matemática de estructura Lattice, se podría definir como una estructura reticular compuesta a partir de la repetición de una celdilla unitaria con una configuración geométrica determinada. Podríamos destacar por su simplicidad, las celdas unitarias formadas por barras, y por su interés matemático, las geometrías Triplemente Periódicas de Superficie Mínima TPMS.

Las estructuras lattices por sus propiedades proporcionan grandes beneficios para la ingeniería, teniendo aplicaciones en ingeniería térmica hasta biomedicina. Las aplicaciones más destacadas son:

- Componentes ligeros
- Aislante térmico
- Aislante acústico
- Intercambiadores de calor
- Absorción de energía de impactos
- Componente bio-compatibles

Respecto a las aplicaciones de este proyecto serán de interés tres: la absorción de energía, la reducción de peso y como componente bio-compatible. Las geometrías que presentan estas celdillas hacen que tengan una resistencia excepcional en todas las direcciones. Además, el hecho de que la celdilla unitaria no sea maciza proporciona mucha ligereza respecto a una maciza. Además, en este caso en el que producto está en contacto directo con un órgano tan importante como los pies, hace que su carácter bio-compatible sea de gran interés.

Las estructuras tipo Lattice se basan en celdillas unitarias de geometrías básicas. Por otro lado, están las estructuras Lattices que incorporan las superficies TPMS. También conocidas como Superficies Mínimas Triplemente Periódicas de sus siglas en inglés Triply Periodic Minimal Surface. La diferencia es que se aporta un espesor a estas superficies para poder realizar una estructura Lattice sólida.

Las primeras superficies TPMS conocidas fueron las superficies mínimas Schwarz, descritas por Hermann Schwarz. Existe una cantidad de tipos de superficies TPMS, a continuación, se proporciona la ecuación y una figura ilustrativa de la superficie que generan en una celdilla unitaria.

### 2.3.1 Estructuras lattices destacadas

- Superficie primitiva o Schwartz P

$$\cos x + \cos y + \cos z = 0$$

- Superficie diamante o Schwartz D

$$\sin x * \sin y * \sin z + \sin x * \cos y * \cos z + \cos x * \sin y * \cos z + \cos x * \cos y * \sin z = 0$$

- Gyroid

$$\cos x * \sin y + \cos y * \sin z + \cos z * \sin x = 0$$

- Neovius

$$3 * (\cos x + \cos y + \cos z) + 4 * \cos x * \cos y * \cos z = 0$$

- Lidinoid

$$3 \cos x * \cos y + \cos y * \cos z + \cos z * \cos x - \cos x * \cos y * \cos z = 0$$

- Split P

$$1.1(\sin 2x \cos y \sin z + \sin 2y \cos z \sin x + \sin 2z \cos x \sin y) - 0.2 (\cos 2x \cos 2y + \cos 2y \cos 2z + \cos 2z \cos 2x) - 0.4(\cos 2x + \cos 2y + \cos 2z) = 0$$

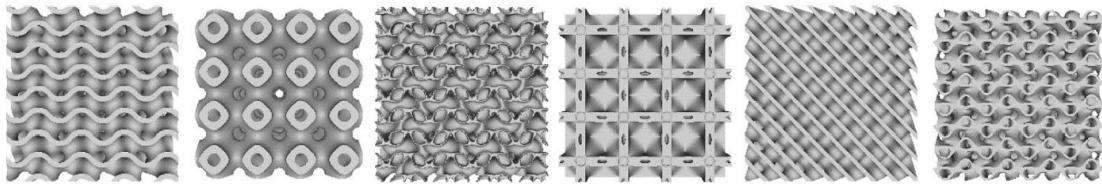


Figura 7 De izquierda a derecha Gyroid, SchwarzP, Lidinoid, Neovius, Achwartz D, Diamon, Split P

### 2.3.2 Respuesta al impacto de las lattices

Se han realizado múltiples investigaciones sobre la respuesta de algunos tipos de estructuras lattices a diferentes esfuerzos para analizar su comportamiento y su respuesta ante estos esfuerzos.

En todos los artículos investigados explican que el comportamiento ante la compresión de las estructuras lattices diferencia varias zonas. Las más relevantes son la zona elástica y la zona “meseta”. En la zona elástica la pieza recupera total o parcialmente su forma inicial, pero en la zona meseta comienzan a fracturarse algunas de las paredes de las lattices cambiando por completo sus características técnicas e imposibilitando la vuelta a su forma original. Alcanzado cierto punto de compresión la probeta llegaría al colapso total.

En uno de ellos [13] se observaba cual era la forma en que rompía la muestra según el tipo de Lattice que es, el resultado final era similar pero la progresión de la fractura no. También observaron la forma resultante a la deformación según el tipo de estructura (Figura 8 A la izquierda dibujo de como evoluciona el colapso de la probeta según el tipo de estructura Lattice, a la derecha la forma resultante de la deformación de forma simplificada.).

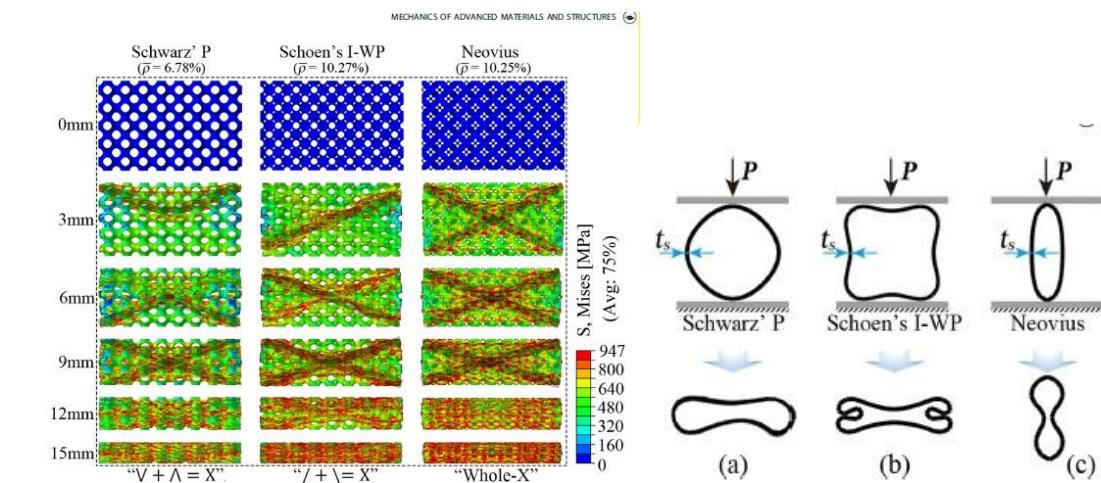


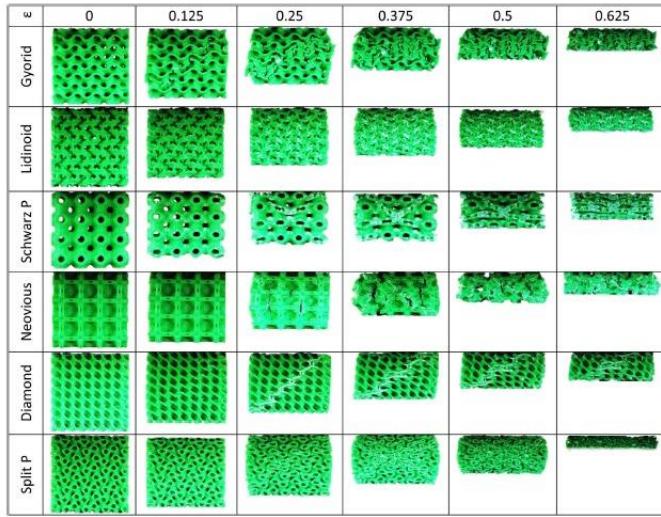
Figura 8 A la izquierda dibujo de como evoluciona el colapso de la probeta según el tipo de estructura Lattice, a la derecha la forma resultante de la deformación de forma simplificada.

En otro de estos artículos [14] estudiaban la respuesta ante esfuerzos de impacto dinámicos de las estructuras lattices. En los ensayos variaban el diseño de las celdillas unitarias, el diámetro de las puntas y la rigidez del material. Con este estudio podían entender mucho mejor el comportamiento de las lattices. También recalcan que tiene mucho potencial de aplicación en campos como: el calzado, packaging, material deportivo, implantes biomecánicos y equipos de protección.

Otro artículo [15] reunía en una tabla multitud de resultados de diferentes pruebas de esfuerzo. Estos ensayos los realizaban con diversos tipos de estructuras lattices para comparar. Se puede

observar la deformación de estas estructuras en la *Figura 9*. Algunos de los datos que obtenían son:

- Tensión máxima en la zona elástica y la zona de densificación
- Modulo de Young elástico y de la “meseta”
- Energía absorbida en cada una de las zonas



*Figura 9 Mecanismo de deformación de las estructuras TPMS*

Por último, otro artículo interesante [16] que investigamos realizaba pruebas de ensayo similares a los anteriores. Pero en este caso variaban el material de las probetas, los grados de linealidad y la fracción de volumen. De cada material elaboraban 4 piezas de ensayo diferentes (*Figura 10*). Entre los materiales usados estaba el TPU, por lo que con este estudio se puede conocer como funciona este material como estructura Lattice.

ABS	$E_c$ (MPa)	$\sigma_p$ (MPa)	$\alpha_{c,p}$	PLA	$E_c$ (MPa)	$\sigma_p$ (MPa)	$\alpha_{c,p}$
	NG15%	78.2	2.52		NG15%	58.6	0.93
NG25%	91.1	2.89	0.68	NG25%	127.7	ND	0.66
LG15%	89.9	2.78	0.63	LG15%	59.0	3.55	0.63
NG15%	94.3	3.4	ND	NG15%	168.1	1.77	0.52

TPU	$E_c$ (MPa)	$\sigma_p$ (MPa)	$\alpha_{c,p}$	PA12	$E_c$ (MPa)	$\sigma_p$ (MPa)	$\alpha_{c,p}$
	NG15%	27.0	0.99		NG15%	36.6	1.24
NG25%	40.3	1.34	0.41	NG25%	62.2	3.55	0.53
LG15%	21.5	0.62	0.73	LG15%	15.1	0.42	0.55
NG15%	ND	ND	0.69	NG15%	ND	ND	ND

*Figura 10 Principales propiedades mecánicas de estructuras lattices con diferentes materiales*

Tras toda esta investigación se puede concluir que la gran mayoría de las estructuras lattices que han sido estudiadas en estos artículos científicos serían válidas para este proyecto, pero la que finalmente ha sido elegida es la estructura Gyroid por sus cualidades mecánicas, su potencial aplicación en las prótesis y sus antecedentes en productos de esta índole.

## 2.4 Tipos de zapato abierto

Ahora procederemos a estudiar los tipos de zapatos abiertos que hay y sus características principales, para conocer qué aspectos son más importantes en este tipo de calzado.

### Zapatos de tacón

Los zapatos de tacón, zapatos de taco o simplemente tacones son un tipo de calzado que se caracteriza por elevar el talón sobre la altura de los dedos de los pies femeninos. Dentro de este tipo de zapato existen mucha variedad según el tipo de tacón que tiene algunos ejemplos son: tacón alto, medio tacón, de aguja. Por otro lado, cuando los dedos de los pies y el talón se elevan por igual se denominan zapatos de plataforma.

Este tipo de zapato se utiliza para estilizar la figura y para ambientes y eventos en los que el protocolo requiere ir más elegante. Este calzado genera tensión en el pie y la musculatura del usuario y si se lleva durante varias horas acaba provocando dolor en pies y piernas.

### Sandalias

Calzado ligero que consiste en una suela que se sujet a al pie con tiras de cuero o cintas quedando parte del pie al descubierto. Es un calzado qu se utiliza principalmente en épocas de calor, aunque en algunos países se utiliza durante todo el año debido al clima. Mucha gente también las utiliza como calzado cuando buscan la comodidad, ya que esta es una característica de este tipo de zapato. A nivel estético hay bastantes diferencias entre las sandalias de mujer y las de hombre. En el caso de las mujeres en ocasiones se utiliza como calzado elegante.

### Chancas

Es un calzado similar a las sandalias que consiste en una suela que se sujet a al pie por una o más tiras cruzadas sobre los dedos o el empeine. El uso habitual es en lugares con agua como piscinas, playas o ríos. Actualmente se le da mucho uso como calzado para ir por casa por su comodidad, incluso para ir por la calle. Al igual que las sandalias se utiliza en época de calor por que el pie queda al descubierto. Las posibilidades estéticas son casi infinitas debido a la sencillez del producto. Existen diferentes tipos de chanclas según el tipo de sujeción del pie.

- De dedo consisten en una suela normalmente plana y dos tiras que salen de la suela separando el pulgar del resto de dedos envolviendo el pie para la sujeción. Se suelen ser antideslizantes y a veces provocan rozaduras entre los dedos o en las zonas de contacto entre el pie y las tiras. Llevarlas durante mucho tiempo puede generar dolor en los pies según la calidad de la suela.
- De pala o tira ancha, se caracterizan por una banda de sujeción que se coloca en el empeine. Son el tipo de chancla más cómoda, aunque es menos estética que las de dedo. La sujeción es peor que las de dedo, pero suficiente para que no se escape la chancla. Las más populares pertenecen a marcas de ropa deportiva (Nike, Adidas, ASICS, FILA, Puma, ...) y colocan su logo en la banda de sujeción.
- Cerrada, están destinadas a actividades sobre que cualquier terreno ya que son las que tienen mejor sujeción ya que agarran el empeine y el tobillo del usuario. Por otro lado, son las menos estéticas pero las más ergonómicas.

### De descanso

Recientemente han aparecido en el mercado unas chanclas de descanso, estás tienen ciertas características que a través de la biomecánica de la marcha consiguen reducir en un alto porcentaje el esfuerzo necesario para caminar y hacer vida diaria.



Figura 11 A la izquierda Chancla de descanso Hoka Ora Recovery Slide 2 y a la derecha Chancla de descanso Oofos Ooriginal

### Crocs

Es una marca de zuecos de goma muy populares que se utilizan para cualquier tipo de uso, aunque su uso principal es similar al de las chanclas.

#### Análisis del calzado abierto

Se realizó una tabla comparativa de los diferentes tipos de calzado abierto para sopesar cual es la mejor opción de calzado para este trabajo. En esta tabla los valores a comparar fueron: características generales, comodidad, uso/finalidad, materiales y que partes tiene. En particular la comodidad se valoraba del 1 al 5 y con una breve explicación.

Las conclusiones obtenidas son:

- Los zapatos abiertos en general son cómodos
- La estética es muy variada y versátil
- Algunos calzados pueden ocasionar dolor, sobrecarga física o rozaduras
- Es un tipo de calzado muy utilizado y cada vez con más frecuencia
- Es un tipo de calzado que cada vez tiene más usos
- La aplicación de conocimientos sobre la biomecánica puede ser muy beneficiosa para el usuario
- Los zapatos más adecuados para este proyecto son las chanclas y los crocs

Para poder ver la información completa acudir a *Anexo I Estudio de Mercado*

## 2.5 Estudio formal

En este estudio formal se realizó una tabla comparativa de varios modelos de chanclas, aunque también se añadieron los crocs y algunas zapatillas deportivas, porque sus relaciones estéticas con este género de calzado.

Las características valoradas son: el tipo de calzado, estética, colores, textura y su apariencia.

Las conclusiones obtenidas son:

- En general son estéticas minimalistas y sport
- Utilizan combinaciones del color blanco o el negro con algún color llamativo (rojo, azul)
- Las texturas suelen ser lisas
- En algunos casos se utilizan líneas orgánicas para mostrar que son de mayor calidad y más ergonómicos
- Varios modelos buscan un aspecto “cool” o “molón”

Para obtener la información completa acudir a *Anexo II Estudio Formal*

## 2.6 Investigación biomecánica

## 2.6.1 Tipos de pisada

El pie se puede situar en tres tipos de posiciones que son: pronado, supinado y neutro, determinado por el ángulo de la articulación del tobillo en la pisada, y puede afectar en muchos aspectos a nuestro modo de caminar, de correr, y hasta de gastar el calzado, y según como pisemos puede suponer un riesgo de lesión en el futuro [17].

El ser supinador, pronador o neutro va a depender del ángulo que se forma al apoyar el pie entre tres puntos localizados entre el pie y la rodilla y que le dan una colocación concreta a la articulación del tobillo. Por neutro, se entiende que no nos desviamos hacia ninguno de los dos lados. Es el modelo más usado para la mayoría de modelos de zapatillas. Para algunos autores entienden que ser supinador o pronador se determina según la rotación sobre el eje del hueso.

Otros autores lo ven desde un punto de vista referente a los ejes y planos anatómicos. En este caso la pronación sería una deformidad estructural en la que se producen alteraciones en los 3 planos del espacio: abducción, dorsiflexión y eversión, mientras que la supinación sería una deformidad estructural en la que se produce una alteración opuesta a la pronación, es decir, la aducción, plantarflexión e inversión, y por último la posición neutra en la que el pie no está ni pronado ni supinado.

Existe un método básico, en el que a través de colocar unos puntos con rotulador en las articulaciones del pie y del tobillo de manera sencilla y rápida se puede determinar el tipo de pisada [18].

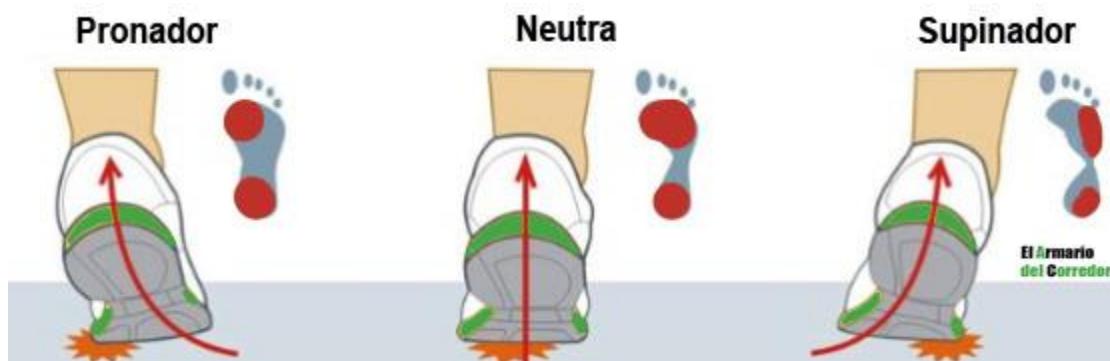


Figura 12 Tipos de pisada

## 2.6.2 Partes de una zapatilla

A continuación, veremos las partes que tiene una zapatilla, así como sus funciones y características.



Figura 13 Partes de una zapatilla

- Upper. Es la zona que está por encima de la planta del pie. Su objetivo es contener al pie y darle el ajuste necesario para que quede fijado, se subdivide en:
  - Mesh. También llamada malla o rejilla. Es la tela que envuelve el pie, tanto interior como exterior. Suele ser fina y favorece la ventilación porque tiene microperforaciones para permitirlo.
  - Nervios o refuerzos superiores. Se encuentran en los laterales, tanto en el interior como en el exterior de la zapatilla. Su función es la fijación de la parte superior de la zapatilla al pie. Están hecho en un material más duro y tensionado que el del Mesh. Pueden estar integrados en la malla o estar como un elemento independiente.
  - Puntera. Es la parte delantera de la zapatilla.
  - Contrafuerte. Zona de mayor rigidez que rodea al talón, protegiéndolo y evitando el movimiento de éste.
  - Lengüeta. Cubre y protege la parte del empeine del pie. Su función es evitar que la presión de los cordones se transmita al empeine. Facilita la introducción del pie en la zapatilla. En ocasiones está cosida solo por la parte delantera y en otras por todo su perímetro.
  - Cuello o collar. Es la obertura a la parte interior de la zapatilla por la que se introduce el pie, rodeando el tobillo y protegiéndolo de rozaduras en el talón.
  - Cordones: Se utilizan para ajustar el apriete de la zapatilla al pie, a su vez refuerzan la acción de los nervios.
  - Interiores. Su objetivo es que el pie este cómodo y quede ajustado.
  - Acolchado: Agrupa todo el añadido interior excepto el que está en contacto con la zona de la planta del pie. No lo encontramos en todos los calzados, por ejemplo, en zapatillas deportivas, ya que dificulta la transpiración.
  - Plantilla: Su función en la zapatilla deportiva es equilibrar la pisada del usuario, aportar estabilidad al pie y encargarse de la repartición de cargas. Puede estar fijada o no.
  - Media suela o entresuela. Se encuentra entre la suela y el upper. Se encarga de la absorción de impactos. Esta amortiguación protege la planta del pie y las articulaciones

involucradas, de la superficie sobre la que esté actuando la zapatilla, así como de las irregularidades, proporcionando estabilidad a la pisada.

- Suela. Se encuentra en contacto directo con el suelo. Su función es proteger la entresuela y proporcionar rozamiento con el suelo para lograr un buen agarre. Dependiendo del terreno al que va destinado tendrá un dibujo más escarpado o menos en función del agarre necesario. La suela suele tener unas estrías, algunas destinadas a reducir la resistencia de ésta a la flexión y otras para guiar el correcto movimiento del pie [11].

### 2.6.3 Conceptos biomecánicos en el calzado

Para conocer mejor la biomecánica que hay detrás del calzado se realizó una entrevista con Luis Enrique Roche (L.E. Roche) un podólogo y biomecánico de referencia en Europa, también es una persona que pide la fabricación de plantillas de sus pacientes a Orthocast y un importante investigador de este campo.

En la entrevista explicó bastantes conceptos, y dio su opinión sobre cómo aplicarlos, además de recalcar que a muchísimos de sus pacientes les vendría muy bien un producto con estas características. A posteriori se corroboraron las conclusiones de la entrevista con artículos científicos.

#### Drop

El Drop es la diferencia de altura que existe entre el talón y el antepié (zona de los dedos). Esta diferencia facilita la marcha al conseguir que los tendones de aquiles y los gemelos trabajen menos, pero un drop excesivo puede causar fascitis plantar. Los modelos de calzado estandar tienen entre 10-12 mm de drop, pero actualmente se está utilizando de manera más habitual un drop de 8mm. Algunas apuestas más arriesgadas utilizan 5-6 mm.



Figura 14 Explicación del Drop

#### Marco Activo

Imaginemos un corte en sección de la suela, el marco activo sería que en vez de ser plana tiene unos bordes que sobresalen. Este margen que sobresale consigue que en el momento del contacto con el suelo si la presión va desviada hacia algún lado, el pie no se salga del calzado consiguiendo dar estabilidad al pie. Por otro lado, evita que el pie se desplace dentro del calzado. Puede evitar torceduras de tobillo

#### Horma

La horma es la forma del zapato en vista de planta. La forma de las hormas varía esencialmente en anchura y rectitud, en cuanto a esta segunda característica podemos diferenciar tres tipos: recta, semicurva y curva. Para saber si es recta o no, se traza una línea del centro del talón y se alarga perpendicularmente hacia el antepié. Debe pasar por el 2º dedo para que sea recta.



Figura 15 Tipos de Horma

### Tipos de zapatillas

Existen 3 tipos Neutra, pronadora y supinadora.

Las zapatillas para pronadores tienen un material más duro en la zona del talón, por la parte interna de la mediasuela. En cambio, las zapatillas para supinadores tienen este material más duro en la zona externa de la mediasuela a la misma altura que en el caso de las zapatillas para pronadores.

### Control a la torsión

Las zapatillas de running tienen una pieza para controlar la torsión, de esta manera se evitan torceduras y que haya más componente de pronación. La suela tiene una pieza de un material, que ayuda a que la zapatilla vuelva a su forma original después de un esfuerzo de torsión

### Contrafuerte

No debe ser blando, ni tampoco muy rígido. Ha de ser firme, es decir un poco duro, pero sin exceso, la función de este es la de estabilizar el retropié.

### Quebrante de puntera y quebrante de talón

El quebrante de puntera es el ángulo que se forma desde la punta del calzado al suelo. Este ángulo ayuda a facilitar el despegue del pie, así como al movimiento de la marcha, de manera que el usuario necesita menos esfuerzo para avanzar. Se aconseja que el quebrante de puntera comience un poco por detrás del metatarso para conseguir que realmente facilite la marcha

El quebrante de talón es lo mismo, pero en este caso el ángulo lo forma el talón con el suelo, la función de este es reducir el impacto con el suelo, para evitar problemas en articulaciones especialmente. El ángulo de impacto de la población es habitualmente de 20º. Se debe evitar que el quebrante de talón ocupe gran parte de la longitud de la zapatilla para que no haga efecto rebote y se pierda efectividad en la pisada [19].



Figura 16 Ángulos del quebrante de puntera y el quebrante de talón

### Toe spring

Al ángulo de la parte superior de la suela, en la zona de los dedos, con la horizontal se le llama Toe Spring. Es un concepto aplicado a zapatillas de running que mejora el rendimiento al activar los músculos de la cadena posterior, aunque genera tensión en los mismos, así que para andar no sería recomendable calzado con esta un Toe Spring alto [20].



Figura 17 Representación del Toe spring

### Conclusiones

Para una zapatilla de andar los conceptos que son positivos serían: quebrante de puntera y de talón y el marco activo.

En los zapatos abiertos no se utilizan contrafuertes así que esta característica no es necesaria.

En cuanto a horma y tipo de zapatilla, lo ideal es una zapatilla ancha y neutra. Ya que, al integrar la plantilla en la suela no es necesario reforzar ciertas zonas en caso de ser pronador o supinador. Además, a través de la tecnología de impresión 3D se podría llegar a conseguir variando la densidad para obtener mayor o menor rigidez en ciertas según interese.

No es necesaria una pieza para controlar la torsión del zapato.

Un Drop de entre 6 y 8 mm sirve para descargar de trabajo a los tendones de aquiles y los gemelos, pero sin llegar a generar fascitis plantar.

El Toe Spring deberá ser el mínimo posible para evitar sobrecargas.

## 2.7 Estudio del workflow

Estudiamos como es el proceso actual de nuestro potencial cliente desde que acude a un experto hasta que obtiene sus plantillas. Para ello contamos con la ayuda de L.E. Roche con el que pudimos realizar en persona como sería el estudio biomecánico y con Orthocast para entender la producción del producto en sí. Se realizó un Customer Journey (Anexo III Customer Journey) que resume todo este proceso que será descrito a continuación.

Lo primero es que la persona detecte que tiene una dolencia, un problema, una lesión o tendencia a lesionarse en un lugar concreto y decida acudir a un experto en la materia. En este caso acudiría a un centro donde le pudieran realizar un examen podológico y biomecánico.

Estos expertos realizarían un estudio biomecánico que consta de varias partes. Hemos podido realizar un Safari para vivir la experiencia en primera persona del estudio.

Lo primero que se realiza es la toma de medidas del cuerpo. Se buscan puntos clave del esqueleto (como articulaciones), y se marcan con un rotulador para después con un metro tomar las medidas pertinentes. Después hay una exploración de la forma del esqueleto para determinar posibles deformaciones o posiciones potencialmente peligrosas del cuerpo, como por ejemplo la tibia vara, rodilla valga o vara, asimetrías en la cadera etc. En este proceso se puede ver si la persona tiene una pisada neutra, pronadora o supinadora.

Después se explora los rangos de movilidad del cuerpo del paciente, para conocer acortamientos o falta de rango de las partes del cuerpo ya que esos factores lesivos se pueden trabajar mediante ejercicios.

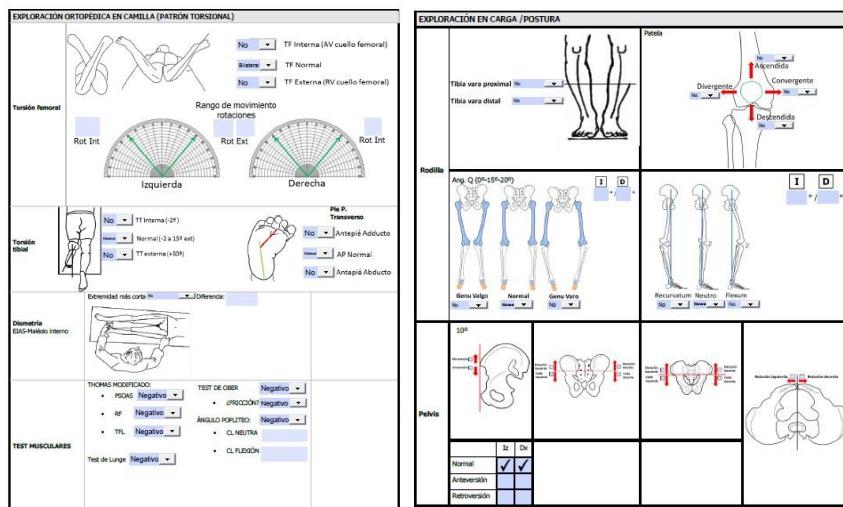


Figura 18 Resultados del estudio del rango de movilidad

Después, se estudia la pisada en la marcha, colocando unas alfombras con sensores de presión, que obtienen la huella de calor del paciente al caminar. El paciente, debe caminar de ida y vuelta en las alfombras, para obtener varias pisadas con cada uno de los pies, de manera que se puedan ver repetidos los patrones. Gracias a esto, obtenemos una huella de calor tanto de forma estática como dinámica, donde podemos ver los puntos de mayor presión en el pie para poder liberarlos de esa tensión con las plantillas.

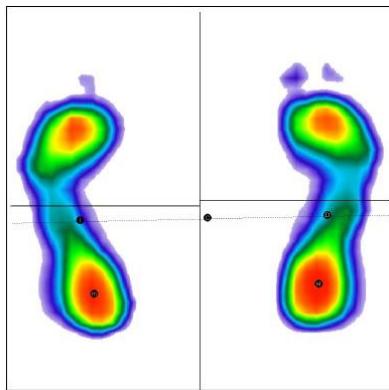


Figura 19 Huella de calor

Lo siguiente sería una grabación caminando en una cinta de correr, para ver los gestos al caminar de manera dinámica. En este caso en concreto, los pacientes que suelen acudir realizan deporte y también se les realiza un estudio cuando corren, con unos sensores pegados en el cuerpo que a través de un conjunto de cámaras recogen datos del comportamiento del esqueleto al correr.

Tras todo esto se analizan los datos y se crea un cuaderno con los resultados y se le da al paciente (*Anexo IV Resultados Estudio Biomecánico*). Acto seguido, si se considera necesario el uso de plantillas se procede a la creación de las mismas. Lo primero es realizar un molde del pie, para ello se utiliza una máquina con una espuma polimérica especial, en la que se sube el usuario y queda la forma del pie inscrita en la espuma. Despues, con la aplicación 3Dsizeme, se realiza un escaneo 3D de la huella y se obtiene un modelo 3D del molde. Por otro lado, se realiza una ficha de petición (*Anexo V de Ficha petición*) en el que se redactan los requerimientos de la plantilla personalizada.

**PodoTec3d**

**Formulario de prescripción de soportes plantares a medida** [pedidos@podotec3d.com](mailto:pedidos@podotec3d.com)

Prescriptor \_\_\_\_\_ colegiado \_\_\_\_\_ cuenta \_\_\_\_\_  
 Dirección, \_\_\_\_\_ Población \_\_\_\_\_ CP \_\_\_\_\_  
 Teléfono \_\_\_\_\_ correo-e \_\_\_\_\_

**Paciente** (\*Datos para la declaración de conformidad RD 1591/2009)

Nombre \_\_\_\_\_ Apellidos \_\_\_\_\_  
 Edad \_\_\_\_\_ Peso \_\_\_\_\_ Altura \_\_\_\_\_  H  M  
 Calzado  Vestir  Casual  Deporte  Otros \_\_\_\_\_  
 Talla \_\_\_\_\_ Anchura \_\_\_\_\_  
 Diagnóstico: \_\_\_\_\_

**Info pedido**

1 par  Hacer \_\_\_\_\_ pares  
 Hacer segundo par del número de fabricación (F. \_\_\_\_\_)  
 Enviar moldes (consultar precio)  
 Enviar paciente (adjuntar dirección)  
 Sólo izquierdo  Sólo derecho

**Características del soporte plantar**

**Tipo de soporte**

**Tipo de dureza**

**Tipo de forro superior**

PE-EVA  Negro 1mm  Marrón 1mm  Azul 1,5mm  Verde 2mm (baja fricción)

**Extra Amortiguación**

**Extensión forro**

Sin forro  Forro 1.5mm  Forro 3mm

**Ortesis especiales**

Zapatos de tacón |  Fútbol |  Esquí  Skating  Ciclismo (Adjuntar plantillas)

PodoTec3d es una marca registrada propiedad de Ortote3D Medical SL. De conformidad con lo dispuesto en Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, informamos que los datos de pacientes que utilizan este sistema serán tratados de forma comercial e incorporados a un fichero de pacientes inscrito en la Agencia Española de Protección de Datos. Dicho fichero es responsabilidad de la empresa Ortote3D Medical SL y su único objetivo es la prestación de servicios de fabricación de dispositivos ortoprotésicos a medida y todo lo que comporta la gestión profesional de los mismos.

Figura 20 Ejemplo Ficha de Petición

Se envían el modelo 3D y la ficha de petición a la empresa Podotec3D para que las fabriquen. Con las especificaciones dadas y partiendo del molde del pie utilizan dos programas de modelaje 3D que son, Grasshopper y Rhino3D y con ello elaboran la plantilla en archivo digital.

Esta empresa fabrica por impresión 3D y según los requerimientos del paciente optan por un material u otro. Los materiales con los que trabajan son: la poliamida, en tres versiones diferentes según la flexibilidad que necesitan y el TPU.

Una vez fabricadas son enviadas por mensajería a L.E. Roche, el cual se las dará al paciente. A partir de este momento, el cliente tendrá un proceso de adaptación a las plantillas, que al principio con alta probabilidad causará molestias, pero a la larga mejorará. Aun así, se realizan revisiones periódicamente o si los problemas persisten, para cambiar la plantilla en caso de que sea necesario, ya sea por el desgaste de la misma o porque no se ha acertado con las medidas correctivas o ha habido un cambio en la pisada. En esta revisión se omitirá la parte de toma de medidas, y se volverá a explorar el rango de movilidad, la huella de calor y la grabación.

Si tras la valoración de la revisión se determina, que hay que hacer nuevas plantillas, el proceso de creación, fabricación y entrega será el mismo que para las ortesis plantares iniciales.

La intención de este proyecto, a diferencia del workflow habitual, es que una vez obtenidos los datos del estudio biomecánico, se introduzcan estos datos en un algoritmo computacional, que genere automáticamente el producto final en un archivo 3D.

## 2.8 Materiales

En todo diseño, la correcta elección del material es importante, y más en este caso en el que el producto va a estar sometido a esfuerzos de compresión repetidamente. Partimos de la base, de que al desarrollar este proyecto en el marco contextual de la empresa Orthocast S.L., tenemos que adaptarnos a los materiales que ellos utilizan. Más concretamente al poliuretano termoplástico o TPU, ya que, es el material que ellos han decidido usar para el producto, por lo cual resulta conveniente conocer las características de este material.

El Poliuretano Termoplástico es una variedad de los poliuretanos. Es un polímero termoplástico, con comportamiento elastómerico, que se caracteriza por [21]:

- Alta resistencia al desgaste y a la abrasión.
- Alta resistencia a la tracción y al desgarre.
- Muy buena capacidad de amortiguación.
- Muy buena flexibilidad a bajas temperaturas.
- Alta resistencia a aceites, grasas, oxígeno y ozono.
- Es tenaz.
- Su capacidad para ser reciclado

### 2.8.1 TPU en impresión 3D

Si comparamos el TPE con el TPU, que los dos son filamentos flexibles, podemos afirmar que el TPU es más fácil de imprimir y mantiene sus propiedades elásticas a temperaturas más bajas. Eso sí, los materiales flexibles son más difíciles de imprimir que otros materiales de filamentos.

El filamento de TPU, a diferencia de alguno termoplásticos más rígidos, tiene una excelente adhesión entre capas y no se riza ni se deslamina durante el proceso de impresión en 3D.

Debido a que los artículos deportivos deben ser flexibles y resistentes, el material TPU es la elección idónea para estos productos. Podemos encontrarlo en material de deportes acuáticos o de material de fitness. Por otro lado, el calzado debe soportar bajas temperaturas, ser flexible y

resistente al agua y a los productos químicos. Con todo esto podemos concluir que el TPU mediante la impresión en 3D es una buena elección para la fabricación de artículos deportivos.

El TPU se ha usado en bastantes proyectos novedosos que utilizaban la impresión 3D para la creación de calzado. [22]

Para la información concreta se puede mirar la ficha técnica del TPU concreto que usa esta empresa en el *Anexo VI Ficha Técnica TPU*.

## 3 Generación de Conceptos

En este apartado, reuniremos las conclusiones útiles para nuestro proyecto, que serán nuestra guía para posteriormente generar conceptos. Además, también se realizará una selección junto a la empresa del concepto con mayor potencial. Y finalmente se cogerá el caso real de una persona que necesita plantillas ortopédicas, para crear un producto que se adapte a sus necesidades específicas.

### 3.1 Especificaciones de diseño (EDP)

Tras toda la fase de información reunimos todas las conclusiones relevantes para nuestro diseño como especificaciones de diseño de manera que serán las claves a cumplir para conseguir un diseño óptimo.

EDPs Críticas:

- El tipo de zapato más común y con uso polivalente es la chancla de “piscina”
- Ya que se realizan en impresión 3D que es una tecnología reciente el diseño ha de incluir señas que muestren este método de fabricación
- Se aplicarán algunos conceptos de la biomecánica para mejorar el rendimiento más allá de la propia plantilla:
  - o Marco activo
  - o Quebrante de puntera y talón
  - o Drop de 6-8 mm
- El material utilizado será el TPU, elegido por la empresa Orthocast.
- La estructura Lattice será de tipo Gyroid
- El producto debe adaptarse ergonómicamente a la forma del pie
- El diseño debe soportar los diferentes esfuerzos que sufrirá durante su uso
- La densidad de las lattices variará según las funciones de cada zona

EDPs deseables:

- El producto debe ser atractivo para el cliente
- La estética a seguir es minimalista, deportiva y distintiva
- Al ser un producto destinado a personas con problemas en el pie y teniendo en cuenta que la población busca en las chanclas la comodidad, este aspecto es clave para nuestro diseño
- El toe spring debe ser el menor posible
- Evitar el sobreuso de paredes en las estructuras lattices
- Buscar la ligereza del producto
- El ángulo del quebrante de talón debe estar en torno a los 20º
- Se pueden colocar líneas de guía en la suela

## 3.2 Conceptos

Lo primero fue buscar una forma del perfil de la entresuela que cumpliese las especificaciones de diseño respectivas a la biomecánica. Este diseño debe contar con quebrante de puntera, quebrante de talón y marco activo, así como con curvas que se adapten a la geometría del pie. Además, al darle esas curvas orgánicas la estética transmite que es ergonómica y más técnica. El comienzo del quebrante de puntera es un poco anterior al metatarsiano. Y el comienzo del quebrante de talón no debe sobrepasar el final del retropié. El ángulo del quebrante de talón será de 20º y el del quebrante de puntera de 12º.



Figura 21 Forma general de la entresuela

Tras esto, se elaboró una lista de ideas en la que se diferenciaron 4 vías de diseño: chancla de pala, chancla de dedo, crocs y personalización de la forma/estética. De cada una de las vías, se plantearon posibles aspectos formales y funcionalidades respecto a la sujeción al pie del calzado. Se puede ver la lista en el *Anexo VII Lista de Ideas*

Se presentó la lista a Javier Ordoyo responsable y titular de la empresa Orthocast, y este eligió la que le parecía con mayor potencial, en este caso era imitar la estética del modelo de calzado deportivo "nike air max", en concreto a la cápsula de aire que tiene en la entresuela. Para imitar se jugará con enseñar o no la estructura Lattice de la entresuela utilizando la forma de la cápsula de aire de estas zapatillas.

Lista ideas	
Chancla de pala	Cinta con forma serpenteante Cinta con velcro Ajedrez de lattices en entresuela Línea diagonal en retropié que tapa lattices <b>Estética estilo níke air max</b>
Chancla de dedo	Cambio de color en los cambios de una suela normal Cambio de color en las zonas hundidas de la entresuela Logotipo de la empresa Mix chancla de pala y chancla de dedo Dibujo del pie en la entresuela Reborde del marco activo de otro color Tira del dedo removible
Crocs	Crocs con implementación biomecánica Crocs deportivos (combinación de colores más agresiva, y formas similares a zapatilla deportiva) Utilizar la forma de la entresuela como patrón
Personalización	Combinación de colores Poner un nombre Poner un dibujo Varios patrones para añadir (flores, sol, luna, círculos, etc)

Figura 22 Lista de ideas

Más adelante se presentaron 3 posibilidades siguiendo esta idea: en la primera se creó un patrón que se repetía en torno a toda la entresuela tapando las lattices, la siguiente opción en vez de repetir el patrón solo se colocaba una vez en la zona del retropié y la última sería el negativo de la anterior opción las lattices estarían totalmente tapadas menos en una pequeña parte del retropié donde se ven.

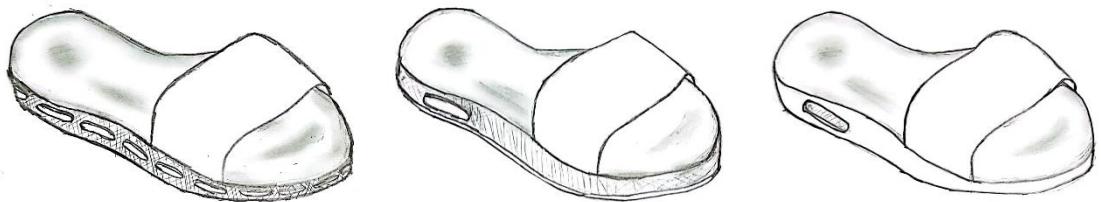


Figura 23 3 conceptos de diseño de la idea elegida

### 3.3 Selección del concepto

Finalmente, la empresa escogió la opción de utilizar el patrón una vez dejando a la vista el resto de las latices.

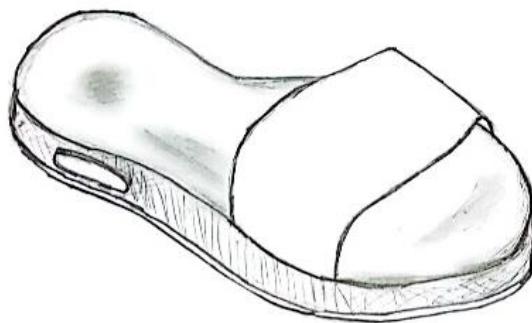


Figura 24 Concepto escogido

### 3.4 Caso particular de una persona

Para realizar el modelo 3D vamos a coger el caso real de un paciente de L.E. Roche. Se trata de una persona de 25 años que tiene una protuberancia en el calcáneo a raíz de un traumatismo, esta protuberancia roza con el tendón de aquiles y acaba generando dolor y disfunción del mismo a lo largo del día. Por ello usa plantillas desde hace varios años y le gusta utilizar chanclas para ir por casa y en verano las utiliza habitualmente.

Algunos datos de partida que pudimos obtener fueron:

- Talla 44
- Pisada de pronador
- Medidas exactas del pie
- Archivo 3D de las plantillas del paciente
- Necesidades específicas del paciente
- Peso 65 kg

## 4 Modelado 3D

El objetivo de este apartado es generar un archivo 3D que será el modelo final. Para ello, primero estudiaremos la forma general de un pie. Esto nos servirá para plantear de manera más eficaz

el desarrollo del producto. Despues, mediante el programa SolidWorks se elaborará el modelo 3D sin estructuras lattices. Al modelo se le aplicarán diferentes materiales, según las propiedades de cada una de las partes del mismo, para seguidamente realizar simulaciones de los esfuerzos que sufrirá, con la finalidad de certificar que el producto los aguantará y nos sufrirá ni deformaciones irreversibles ni rotura. Finalmente, con el programa Ntopology se añadirán las estructuras lattices y se generará un prototipo virtual listo para imprimir en 3D.

## 4.1 Estudio de la forma del pie

Antes de empezar a modelar, era importante explorar la forma del pie para entender las curvas que debía contener la entresuela.

Lo primero es delimitar el contorno del pie. A través, de colocar un “esqueleto de líneas” con medidas tomadas del paciente y experimentar con splines, cuyos puntos de ancla se colocaban en el esqueleto, llegamos a generar una forma que se adaptase correctamente al pie.

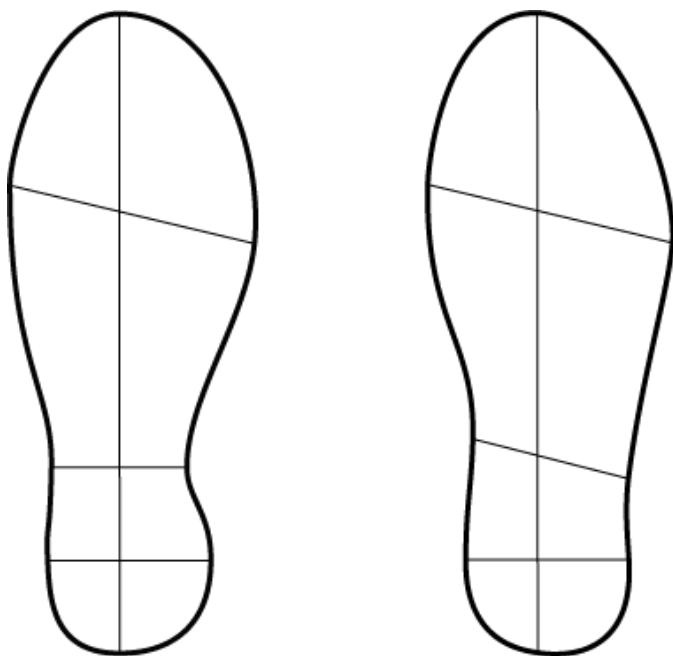


Figura 25 A la izquierda una de las formas primitivas y a la derecha la forma final

Detectamos 3 oquedades principales: una para el talón, otra para el exterior del pie y una última para los dedos del pie. Por otro lado, necesitamos dos elevaciones una para el puente del pie y la otra para apoyar las falanges de los dedos. Con estas premisas se elaboró unos mapas topográficos en vista de planta para imaginar la forma Figura 26.

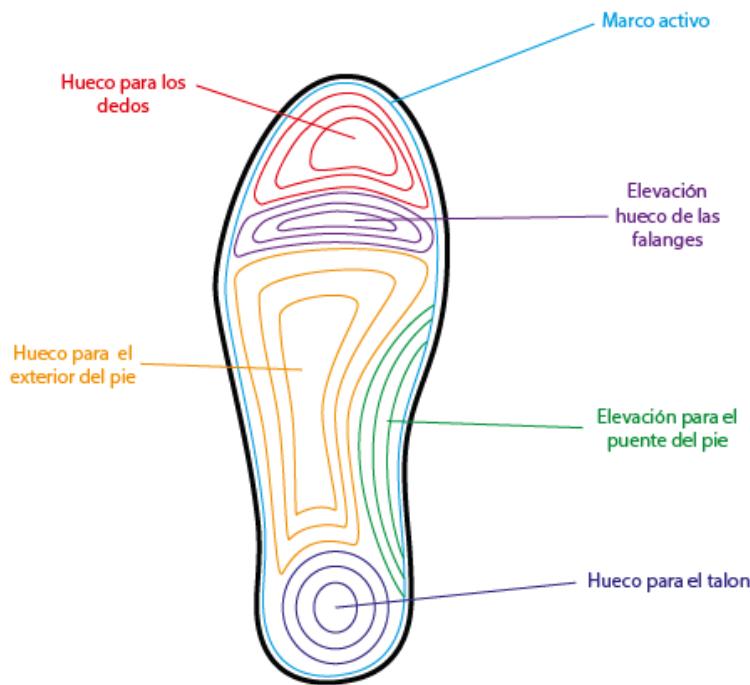


Figura 26 mapa topográfico de la entresuela

En este mapa topográfico se dibujaron 3 tipos de cortes en el perfil y 4 cortes en el alzado con los que hacerse una idea de cómo representar esos huecos y esas elevaciones Figura 27.

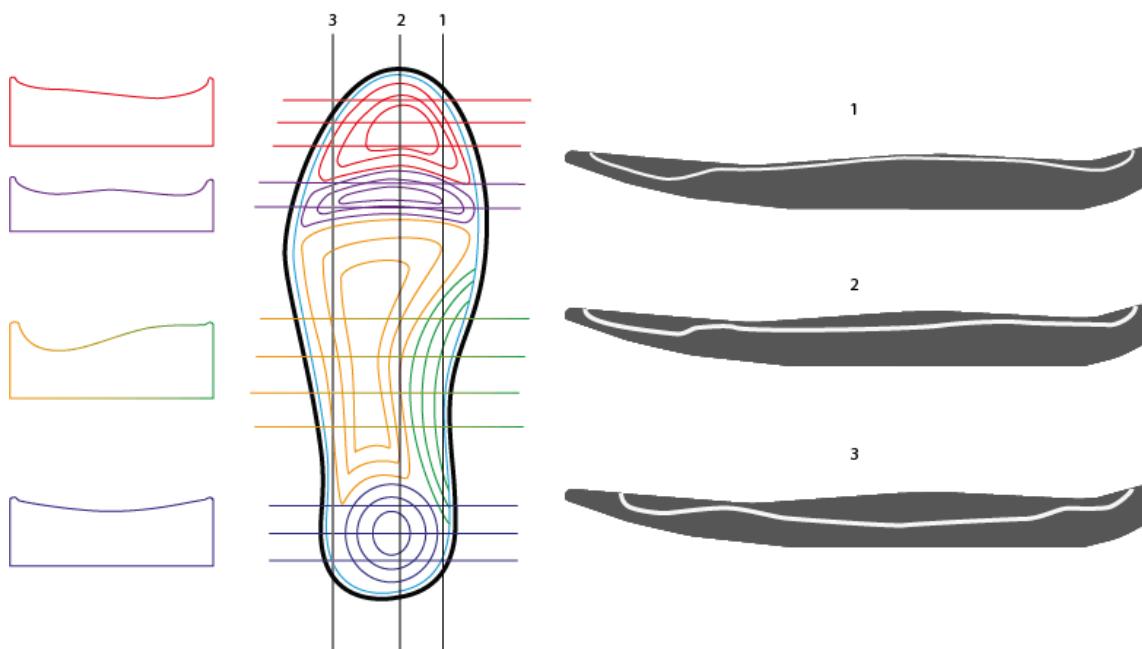


Figura 27 Planos y cortes de perfil y alzado de la entresuela

## 4.2 Solid Works

### 4.2.1 Modelado

Primero se dibujó la forma del pie, lograda al inicio con las medidas exactas del paciente, para extruirla hacia arriba 31 mm. Luego fuimos colocando todos los planos como se había previsto en el anterior punto. Después se realizó el corte del perfil general de la chancla.

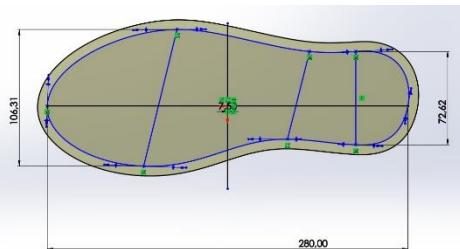


Figura 28 Croquis de la forma del pie

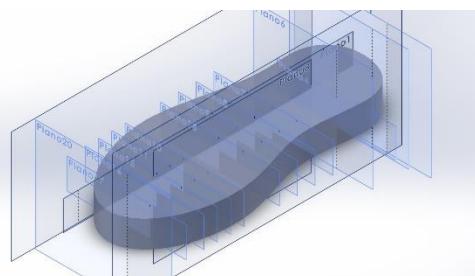


Figura 29 Colocación de los planos necesarios para el modelado

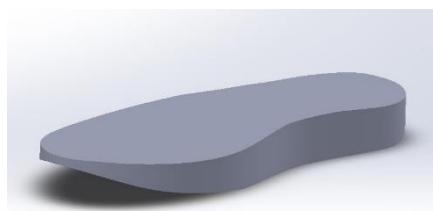


Figura 30 Corte del perfil general del modelo

Luego en cada uno de los planos se dibujaron los croquis, de los alzados generados en el estudio de la forma del pie, para lograr la geometría deseada Figura 31. Después, en los planos de perfil se crearon unas curvas splines, cuyos puntos de ancla perforaban los croquis del alzado, de esta manera pudimos usar estas splines como curvas guía para generar un recubrimiento quitando material.

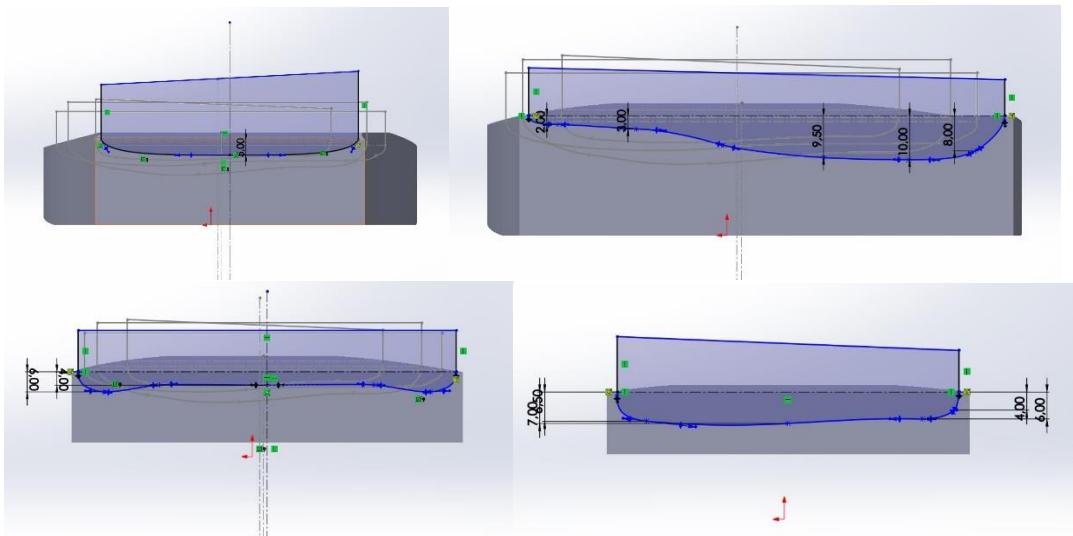


Figura 31 Diferentes croquis de los alzados necesarios para hacer el recubrimiento

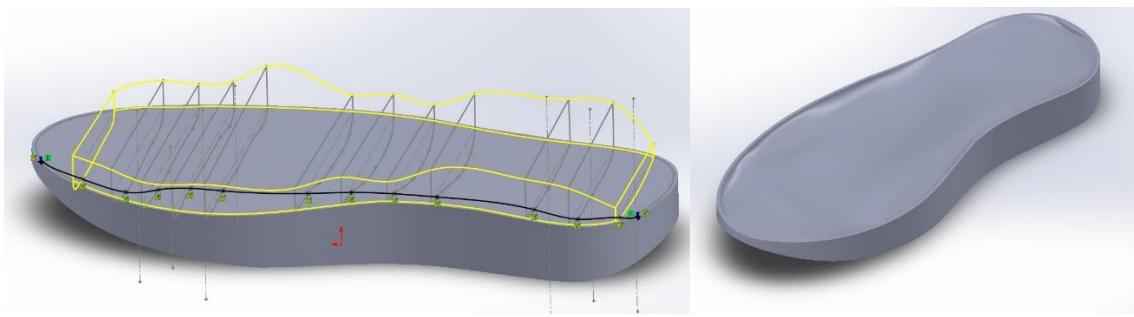


Figura 32 A la izquierda la previsualización del recubrimiento y a la derecha el resultado

A posteriori, estos croquis fueron editados para conseguir un drop de 6 mm y la geometría exacta sobre la que se apoyará el pie. Además de añadir cotas exactas, con las que poder controlar correctamente el comportamiento de las curvas de esta superficie.

El siguiente paso, era generar la cinta de sujeción, para ello tomando medidas del pie en dos de planos, en esos planos creamos dos rectángulos de espesor 2mm por los que pasará la cinta Figura 33. Añadidos a estos, se crearon unas curvas guía que uniesen estos rectángulos al resto del sólido, para generar la cinta con un recubrimiento.

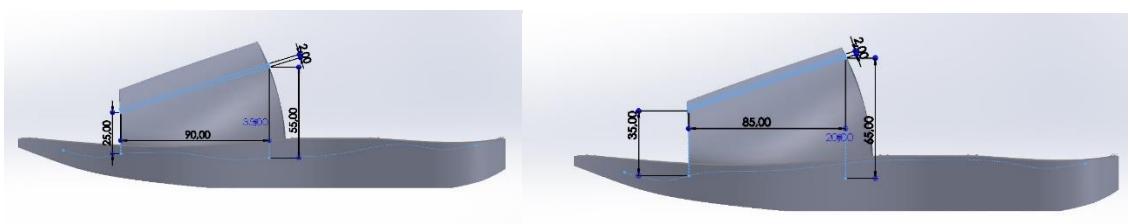


Figura 33 Croquis para el recubrimiento de la cinta de sujeción

Por último, se redondearon algunas zonas, para dar más comodidad y un aspecto más cuidado y orgánico Figura 34.

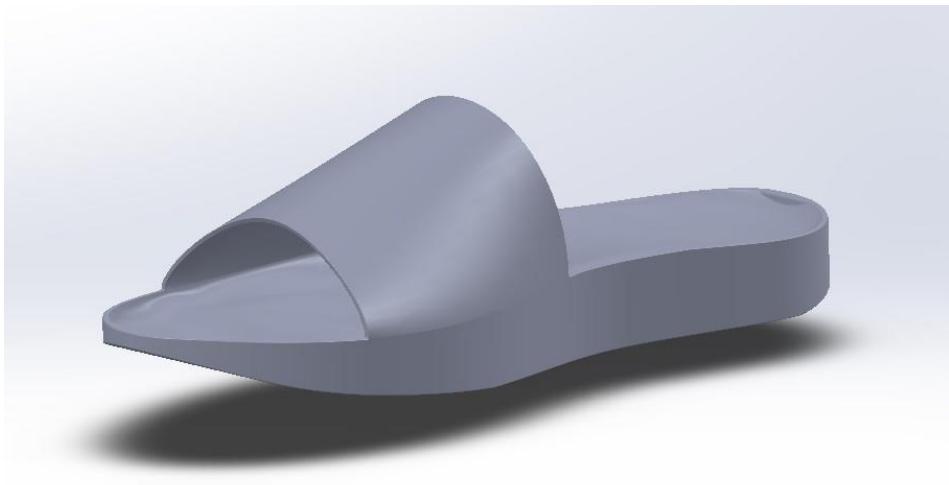


Figura 34 Resultado final

#### 4.2.1 Simulaciones

Una vez conseguido esto, debíamos comprobar que este producto iba a soportar los esfuerzos a los que va a estar sometido. Por esta razón debíamos asignarle el material (TPU) con sus características técnicas específicas. Pero como la idea es conseguir que la entresuela tenga diferentes densidades de lattices para conseguir diferentes comportamientos frente a esfuerzos, debíamos separarla en las 5 partes que tiene una ortesis plantar. Para conseguir esto usamos la herramienta partir 2 veces, la primera para separar la cinta del resto del producto y la otra para dividir la entresuela en 5, siguiendo el modelo de la ficha de petición (*Anexo V Ficha Petición*). Las partes en las que se divide son: la puntera, el exterior, interior delantero, interior trasero y talón.

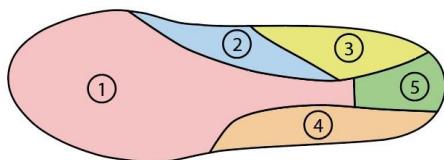


Figura 35 Las 5 secciones en las que dividir la entresuela

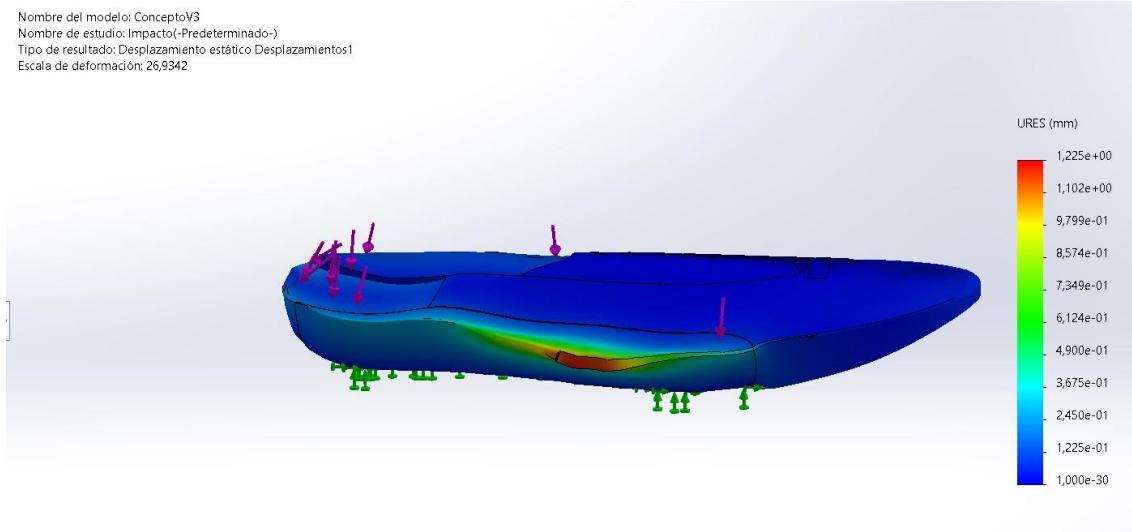
Una vez realizado utilizando los artículos científicos estudiados sobre las lattices, obtuvimos de las tablas de resultados frente a esfuerzos valores como: la elasticidad, el límite elástico, la energía absorbida o la fuerza específica de compresión en la zona elástica para elaborar 3 diferentes estructuras lattices según su densidad. Estas densidades fueron del 15%, del 25% y del 40%. Además, creamos otro material que correspondería el TPU normal destinado a aquellas zonas sin lattices obteniendo su comportamiento de la ficha técnica del TPU que usan en Orthocast (*Anexo VI Ficha Técnica TPU*). A la puntera se le asignó el material de menor densidad que tenía un límite de compresión de 0,62MPa. El material de densidad media se aplicó a las dos zonas interiores y a la zona exterior, este material tenía un límite de compresión de 0,99 MPa. Por último, la zona del talón era la de mayor densidad con un límite de compresión de 1,34MPa.

De esta manera, podemos realizar simulaciones en el programa con SolidWorks sabiendo que la entresuela va a tener un comportamiento estimado en las diferentes situaciones que la pongamos. Se realizaron 4 simulaciones, la primera cuando una persona está de pie quieta, en estático y las otras 3 describen el movimiento normal al caminar. Siendo las fases de impacto con el suelo, la transición en la que rota el calzado y el despegue. Para cada una de ellas asignamos un esfuerzo en relación con el peso de la persona en cuestión, multiplicado por los

G's correspondientes a ese esfuerzo. Este esfuerzo va dividido en porcentaje a cada una de las zonas de la entresuela, según si esa parte se ve más afectada o menos en ese momento. En la *Tabla 1* se puede observar cuánto era cada una de las cargas. Hay que destacar que en la posición estática las cargas se reparten por igual en toda la superficie, que en las fases de impacto y despegue hay zonas que no intervienen, y por tanto no tienen cargas y por último que como es una persona que supina, en el momento del impacto la parte exterior es la zona más afectada. Podemos ver alguna de las simulaciones en Figura 36 y Figura 37, para verlas todas acudir a *Anexo VIII Simulaciones*.

Simulación	Esfuerzo total (N)	Puntera (N)	Interior delantero (N)	Interior Trasero (N)	Exterior (N)	Talón (N)
Estática	650 (1G)	130 (20%)	130(20%)	130(20%)	130 (20%)	130 (20%)
Impacto	1950 (3G)	0 (0%)	0 (0%)	195 (10%)	975 (50%)	780 (40%)
Transición	650 (1G)	292,5 (45%)	65 (10%)	65 (10%)	130 (20%)	97'5 (15%)
Despegue	1300 (2G)	910 (70%)	195 (15%)	0 (0%)	195 (15%)	0 (0%)

*Tabla 1 Reparto de los esfuerzos en cada una de las simulaciones*



*Figura 36 Deformación en la simulación del impacto*

Nombre del modelo: ConceptoV3  
 Nombre de estudio: Despegue(-Predeterminado-)  
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1  
 Escala de deformación: 126,065

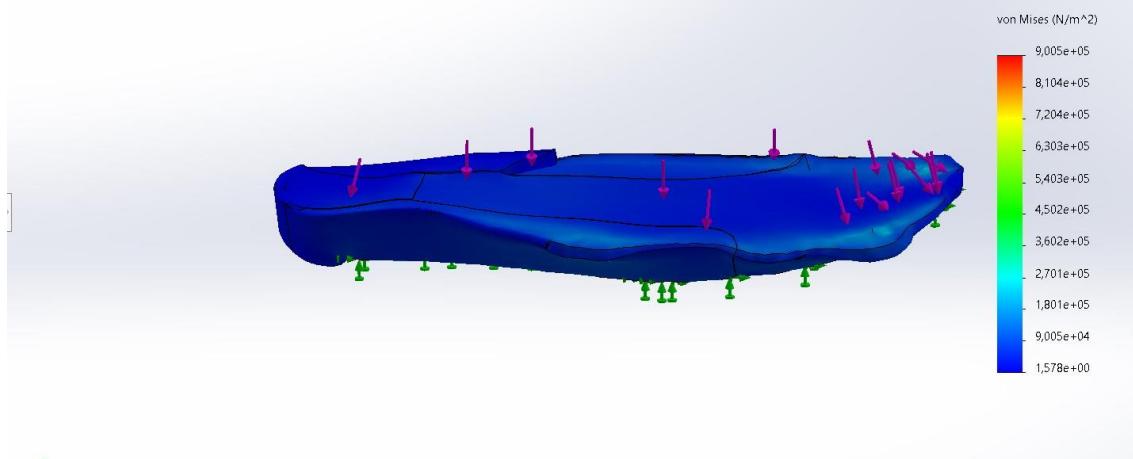


Figura 37 Tensión de Von Misses en la simulación del despegue

Finalmente reunimos en la *Tabla 2* los resultados de la deformación máxima y la tensión máxima. Pudimos observar que la tensión máxima está muy por debajo de los 28 MPa que soporta el material y la deformación más grande es de 1'25 mm que está dentro de los valores admisibles del TPU.

Simulación	Estática	Impacto	Transición	Despegue
Deformación máx. (mm)	0,1443	1,25	0,168	0,2688
Tensión Von Misses máx. (Mpa)	0,3545	0,8961	0,2582	0,9

Tabla 2 Resultados de las simulaciones

## 4.4 Ntopology

Para incluir las lattices a la entresuela necesitamos del programa Ntopology, pero antes de pasar a utilizar este programa, debíamos modificar el modelado para poder obtener el resultado deseado.

Lo primero que se hizo fue colocar dos pequeños resaltos en la zona del antepié que servirían para tapar las lattices siguiendo la idea estética que se había planteado en el concepto inicial. Para conseguirlo se utilizó la operación envolvente. Después los hicimos independientes con la herramienta partir para que al aplicar las lattices a la entresuela estos siguiesen siendo macizos.

Después con vistas a la fabricación por impresión 3D de un prototipo debíamos considerar que iban a ser dos piezas, por un lado, la suela y por otra la sujeción. Esto nos llevó a pensar cómo iba a ser la unión de la cinta a la suela, la decisión final fue con adhesivo. Por ello eliminamos material de la suela a modo de ranura, este mismo material se lo añadimos a la cinta para que entrase en la ranura, de esta manera la forma del modelo no se vería afectada, consiguiendo una superficie amplia en la que poder poner adhesivo. Además, todas estas operaciones no dificultaban la impresión de ninguna de las dos piezas.

Después importamos este modelo a Ntopology y allí creamos un “ImplicitBody” de cada uno de los sólidos, acto seguido utilizamos la herramienta “Infill Gyroid” con los sólidos en los que necesitábamos las lattices. El tamaño de las celdas era de 5x5x5 mm. Los 3 espesores de pared elegidos fueron 1, 1'5 y 2 mm. El de menor densidad se asignó a la zona de la puntera, el de mayor densidad a la zona del talón y los de densidad media al resto.

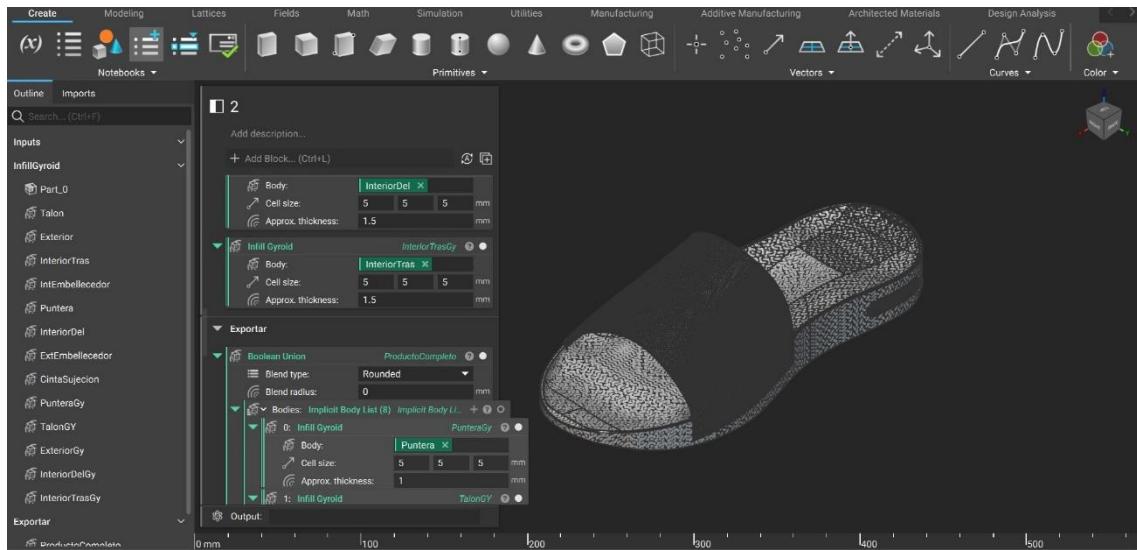


Figura 38 Resultado final del archivo en Ntopology

A continuación, unimos todos los sólidos con la operación “boolean unión”, para generamos una malla del producto. Y finalmente exportamos la malla en las extensiones “.stl” y “.obj”.

## 4. 5 Prototipado y fabricación

Como ya hemos explicado la fabricación será por Impresión 3D, y se imprimirán 2 piezas una la cinta de sujeción y la otra la entresuela. En la entresuela encontramos unas ranuras a cada lado en las que encajar la cinta, de esta manera podemos poner adhesivo en las superficies en contacto y que el producto este acabado.

Con las exportaciones de Ntopology ya teníamos un prototipo virtual listo para imprimir y así tener el prototipo físico.



Figura 39 Render del prototipo

# 5 Conclusiones y reflexión final

## 5.1 Conclusiones

El proyecto en general ha cumplido los objetivos satisfactoriamente, aunque haber podido testear el prototipo con el sujeto en cuestión habría sido una gran aportación al trabajo biomecánica. Si contrastamos los resultados obtenidos con los objetivos iniciales podemos decir que:

- Se ha conseguido diseñar y desarrollar un producto que integre las plantillas ortopédicas en la suela del calzado
- Se ha conseguido un prototipo virtual del diseño en cuestión
- Se ha planteado el diseño con la finalidad de fabricarlo por impresión 3D
- Se ha utilizado los avances tecnológicos de las estructuras lattices en el modelo
- Se ha conseguido una metodología para obtener un producto personalizable a cualquier persona

Desde un punto de vista de las conclusiones obtenidas en la fase de investigación el modelo cumple con todos las EDP's críticas que se redactaron.

En cuanto a la aportación a las metas de los ODS que se habían planteado, podemos decir que:

- Respecto a la Meta 1.4 que dice lo siguiente "Para 2030, garantizar que todos los hombres y mujeres, en particular los pobres y los vulnerables, tengan los mismos derechos a los recursos económicos, así como acceso a los servicios básicos, la propiedad y el control de las tierras y otros bienes, la herencia, los recursos naturales, las nuevas tecnologías apropiadas y los servicios financieros, incluida la microfinanciación." Lo que podemos concluir es que este producto es una solución para cuidar la salud de sus pies, ya que en los países menos desarrollados la gran mayoría de la población utiliza calzado abierto al cuál no le pueden incluir una plantilla ortopédica, pero con este producto sí.
- En relación a la Meta 8.2 que dice "Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrando la atención en sectores de mayor valor añadido y uso intensivo de mano de obra." La aportación que este proyecto realiza es la de fomentar la productividad, al aplicar tecnologías muy innovadoras para generar un producto diferencial y novedoso.
- Por último, en cuanto a la Meta 9.5 que dice "Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando sustancialmente el número de personas que trabajan en el campo de la investigación y el desarrollo por cada millón de personas, así como aumentando los gastos en investigación y desarrollo de los sectores público y privado para 2013." Se puede considerar que este proyecto ha hecho una aportación a la innovación, a través de toda la investigación científica que contiene.

Como autor he realizado la fase de investigación, la generación de conceptos y el desarrollo del modelaje 3D del producto final. Aunque hay que destacar, que en el estudio las lattices mi tutor David Ranz me aporto varios artículos científicos sobre estas estructuras y en la investigación biomecánica y el estudio del workflow recibí ayuda de L.E. Roche y Javier Ordoyo. A la hora de elegir el concepto fue decisión de Javier Ordoyo. Finalmente, la redacción de esta memoria que he realizado ha sido guiada por David Ranz.

## 5.2 El proyecto en el futuro

La aportación al proyecto de Orthocast más que el prototipo, sería el concepto sobre todo desde la perspectiva técnica y estética. Por otro lado, toda la investigación más sus respectivas conclusiones puede aportar mucha más calidad al producto final que Orthocast saque al mercado. La parte de investigación que más puede aportarles sería la de la investigación. En el futuro se podría testear el producto con el paciente para mejorarlo, además de realizar encuestas a usuarios sobre su interés para con un producto de esta índole. Cabe la posibilidad de realizar un artículo científico del trabajo desarrollado que pueda servir a la comunidad científica.

## 5.3 Reflexión final

A nivel personal he podido obtener progresos como diseñador. Al estar implicados de manera directa la biomecánica, la podología y las lattices que eran contenidos poco conocidos para mí y que me interesan para mi futuro profesional, todo lo que he aprendido sobre estos temas es una gran aportación para mí formación.

Cabe destacar que en algunos momentos he encontrado algunas dificultades en la fase de modelado por algunas limitaciones de los programas y por el poco conocimiento de la herramienta Ntopology. Además, este programa es bastante novedoso y no hay mucha información de cómo utilizarlo y en algunos casos he tenido que ser autodidacta.

Como última conclusión estoy satisfecho con el trabajo realizado y las competencias ganadas, ya que en este trabajo he tenido que contactar con diferentes personas profesionales que me ayudasen a realizar el proyecto.

## 5.4 Agradecimientos

La figura de mi tutor David Ranz Angulo ha sido importante porque me ha servido como guía ante las dudas, ha aportado una visión más técnica al proyecto, y me ha ayudado a centrar el objetivo y el resultado del trabajo. Además, tengo que hacer especial agradecimiento a L.E Roche (podólogo y biomecánico) y Javier Ordoyo responsable y titular de Orthocast y codirector de este proyecto, porque he podido contar con dos profesionales, que me han aportado información de calidad que luego he corroborado con artículos científicos e investigación. Otro agradecimiento va dirigido a Ntopology por proporcionarme su software el cuál ha sido imprescindible para el desarrollo del modelo 3D.

# 6 Bibliografía

- [1] M. d. I. L. Montes Castillo, «El uso del calzado ¿Cuándo, por qué? y sus consecuencias,» *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, 2007.
- [2] Ferrán, «Rapid Ferrán,» [En línea]. Available: <https://rapidferran.com/pages/todos-nuestros-productos>.

- [3] L. Rodríguez González, «Clínica Dermatológica Gijonesa,» [En línea]. Available: <https://dermatologogijon.com/1116-dermatologia-general/1132-patologia-del-pie-callosidades-verrugas-plantares.html>.
- [4] L. Bargalló Gómez, «La relación de las cadenas musculares con plantillas posturales,» Barcelona, 2016.
- [5] J. M. Fernández Costales, «Reflexiones acerca del pie diabético y el calzado,» *Revista Cubana de Tecnología de la Salud*, 2012.
- [6] Abrigo - Carrizo - Letelier - Vejares, «¿CUÁLES SON LOS EFECTOS DE UNA PLANTILLA TEXTURIZADA EN LA MARCHA DE PACIENTES NEUROLÓGICOS? REVISIÓN SISTEMÁTICA,» Talca, 2021.
- [7] Z. Romá Rodríguez, «Patologías Podológicas más Frecuentes en África Subsahariana,» Barcelona, 2017.
- [8] M. Mesa Ramos, «Eficacia clínica y coste efectividad de las plantillas ortopédicas, resumen crítico de la evidencia,» *Revista sociedad andaluza traumatología y ortopédia*, 2020.
- [9] M. Baéz, «Cómo llevar plantillas con sandalias,» *unComo*, 2022.
- [10] C. Knowles, *Flip-Flop: A Journey Through Globalisation's Backroads.*, London: Pluto Press, 2014.
- [11] D. Candel Romero, «Diseño de una zapatilla. Impresión 3D y personalización de la entresuela,» Valencia, 2018.
- [12] Neyra - Solís - Castillo - García, «Pie diabético,» *Revista Sociedad Peruana de Medicina Interna*, 2012.
- [13] Wang - Wang - Gao - Shi, «Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading,» *Mechanic of Advanced Materials and Structures*, 2020.
- [14] Jhou - Hsu - Yeh, «The Dynamic Impact Response of 3D-Printed Polymeric Sandwich Structures with Lattice Cores: Numerical Experimental Investigation,» *Polymer*, 2021.
- [15] Miralbes - Ranz - Pascual - Zouzias - Maza, «Characterization of additively manufactured triply periodic minimal surface structures under compressive loading,» *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020.

- [16] Miralbes - Higuera - Ranz - Gomez, «Comparative analysis of mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded and non graded thermoplastic sheet gyroid structures,» *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021.
- [17] B. Rubial, «Mundo Entrenamiento,» 2022. [En línea]. Available: <https://mundoentrenamiento.com/analisis-de-pisada/>.
- [18] Abad - Térmens - Espinosa - Subirá - Arnés, «The foot posture Index. Análisis y Revisión,» 2011.
- [19] M. Bombi Arrieta, «Características de los zapatos de tacón,» Barcelona, 2015.
- [20] Sichting - Holowka - Hansen - Lieberman, «Effect of the upward curvature of toe springs on walking biomechanics in humans,» USA, 2020.
- [21] Química.es, «Química.es,» [En línea]. Available: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Poliuretano\\_termopl%C3%A1stico.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Poliuretano_termopl%C3%A1stico.html).
- [22] Tractus3D, «Tractus 3D,» 2020. [En línea]. Available: <https://tractus3d.com/es/materials/tpu/>.