

custom-on-body

MEMORIA

Definición de una metodología de diseño para la personalización de productos adaptados a la variabilidad morfológica de la población, que sean fabricados mediante tecnologías de producción flexible

PT4. Definición de una metodología de diseño para la personalización de productos

Entregable: E4.1

Paquete de trabajo: PT4

Responsable: IBV



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

Una manera de hacer Europa



IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVO	5
3. IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE PRODUCTO A CUBRIR	6
4. DEFINICIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PRODUCTO PERSONALIZADO	12
4.1. DEMOSTRADOR DE PLANTILLAS	13
4.2. DEMOSTRADOR DE SUELA	16
4.3. DEMOSTRADOR DE ORTESIS	24
5. PROTOCOLO DE OPTIMIZACIÓN DE DISEÑO DE PRODUCTOS	32
5.1. GEOMETRÍA INICIAL	35
5.2. REPARACIÓN DEL MODELO	36
5.3. PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA	38
5.4. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN	40
5.5. OPTIMIZACIÓN	42
5.6. ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA OPTIMIZADA	43
5.7. GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA FINAL Y COMPROBACIÓN	43

1. INTRODUCCIÓN

En este informe se recoge la identificación de las familias de productos a cubrir en el proyecto, y la definición del proceso de diseño de producto personalizado, donde se detallan los distintos procesos de la metodología para cada uno de los demostradores. Asimismo, el informe contiene el protocolo de optimización de diseño de productos, con el que se puede reducir material de ciertas zonas que no tienen que soportar cargas o que no forman parte del funcionamiento de dicho producto, obteniendo diseños optimizados adaptados a la funcionalidad del producto.

2. OBJETIVO

El principal objetivo de este paquete de trabajo es la definición de una metodología de diseño para productos personalizados en el que se integren el protocolo de registro 3D de la morfología del cuerpo, las técnicas de registro de las preferencias emocionales del usuario, el protocolo para el empleo de tecnologías de fabricación flexible, y el procedimiento de diseño. Al desarrollar esta metodología se pretende definir cómo emplear las herramientas desarrolladas en los PTs anteriores, qué tipo de información se espera obtener de cada una de ellas, y de qué modo van a aportar valor al producto y van a contribuir a la creación del producto personalizado. Para alcanzar este objetivo ha sido necesaria la identificación de las familias de producto a cubrir (T4.1), la definición del procedimiento de diseño de un producto personalizado (T4.2), y el desarrollo de un protocolo de optimización del diseño de productos (T4.3).

Este entregable pretende describir la metodología de diseño para productos personalizados, aplicada a los demostradores objetivo del proyecto seleccionados en la Tarea 5.1.

3. IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE PRODUCTO A CUBRIR

En esta tarea se ha realizado una búsqueda industrial y de mercado para definir los productos susceptibles de personalización en los sectores analizados en el proyecto.

Se han revisado productos y servicios que ya están en el mercado y que utilizan información antropométrica del usuario para su diseño o comercialización. La mayoría de estos servicios utilizan en la actualidad una metodología de toma de datos o muy costosa o poco precisa. En estos casos la introducción de un sistema de captura basado en tecnología de bajo coste incrementaría notablemente la rentabilidad del negocio y sus posibilidades de crecimiento. También se han analizado los productos que se ofrecen en tallas y concentran un gran número de quejas y devoluciones por parte de los consumidores por problemas de ajuste y adaptación al usuario.

Como resultado, se han priorizado una serie de productos por zona corporal –tanto para cuerpo completo, como para las extremidades (pies, manos y cabeza/cara)¹–, que se han relacionado con la información antropométrica que se utiliza para su personalización.

Cuerpo completo

Para cuerpo completo se han priorizado una serie de productos del sector ortoprotésico. En este sector, el principal problema derivado de un mal ajuste es que se pueden llegar a producir úlceras y rozaduras, y, por otro lado, un producto con un tamaño demasiado grande puede producir un rechazo y abandono por parte de los usuarios.

Entre los valores y demandas globales de los usuarios de cualquier tipo de ortesis, los principales serían los siguientes:

Invisibilidad: las ayudas no deben ser aparatosas y no deberían percibirse ni sentirse, sino que deberían poderse disimular bien y ser extremadamente cómodas para resultar imperceptibles sensorialmente.

Moda: los diseños que se demandan deben ser actuales, con colores de moda, aunque cuando la dolencia es grave lo que más se exige es discreción. Si es una ortesis que debe notarse entonces que el diseño al menos sea agradable y bonito.

Tecnología: se demanda el empleo de la tecnología para la personalización y adaptación a cada cuerpo, y que además se incorpore el uso de materiales de última generación que protejan al medio ambiente pero sobre todo que sean más personalizados, más baratos y con múltiples funcionalidades.

Ortesis de calidad: uno de los problemas fundamentales que demandan los usuarios es que se resuelva el problema de la transpiración, y los daños provocados por la

¹ La resolución y precisión de la metodología de reconstrucción basada en datos que se propone en el presente proyecto, dependerá de la resolución que tengan las bases de datos de entrenamiento utilizadas. El desarrollo óptimo consistiría en utilizar las bases de datos de cuerpo completo y segmentarlo por zonas en función del producto. Sin embargo, la falta de detalle de los escaneados 3D de cuerpo completo en algunas zonas corporales como la cara, pies y manos, obliga a utilizar bases de datos específicas de estas partes del cuerpo en productos que requieren un buen ajuste en estas zonas. Por este motivo, se han estructurado los productos agrupándolos por zona corporal.

incapacidad de la libre movilidad. Por tanto, se busca que las ortesis del futuro sean de calidad, inmovilicen lo justo, sean cómodas, y que empleen materiales vivos para evitar rozaduras, heridas y olores indeseables.

La familia de productos seleccionada cubre diferentes partes del cuerpo: las rodillas, el tronco y el brazo. A continuación se muestran dichos productos junto con la información antropométrica que se utiliza para su personalización (Figura 1):

- Para poder personalizar rodilleras es necesario conocer las medidas de los perímetros de muslo y pierna a diferentes distancias de la articulación de la rodilla, el perímetro de la propia rodilla, así como la forma 3D de la pierna.
- Para poder personalizar corsés, es necesario conocer las medidas de los anchos, largos y perímetros de distintos puntos del tronco, así como la forma 3D del tronco.
- Para poder personalizar ortesis de miembro superior, es necesario conocer las medidas de los largos y perímetros de distintos puntos del brazo, aunque la forma 3D del mismo proporciona mucha más información.

Producto	Mercado	Dimensiones Antropométricas
Rodilleras 	Ortésis aplicadas en el ámbito de la salud y el deporte	<ul style="list-style-type: none"> • Perímetro de muslo a 5, 15 y 20 cm de la articulación de la rodilla. • Perímetro de rodilla • Perímetro de la pierna a 5, 15 y 20 cm de la articulación de la rodilla. 
Corsés 		Forma 3D del tronco.
Ortesis de miembro superior 		Forma 3D del brazo

Figura 1. Productos personalizados orto-protésicos.

Extremidades: pies

Para el caso de pies se ha priorizado el calzado y las plantillas.

La personalización del calzado es precisamente uno de los nichos donde las empresas de menor tamaño están consiguiendo hacerse hueco y ser competitivos. La personalización de calzado puede plantearse desde tres enfoques complementarios: la personalización estética, la dimensional y la funcional.

Son estos dos últimos los que afectan en mayor medida al confort final del usuario, ya que consideran la información objetiva y subjetiva obtenida de los usuarios (características personales, preferencias y medidas del pie) y se apoyan en un profundo conocimiento de la biomecánica de la marcha humana. La consideración de los tres tipos de enfoques puede ser definida como la personalización completa del calzado.

Con todo, entre el calzado diseñado específicamente para cada persona y el calzado en serie también existen otras soluciones intermedias como el desarrollo de varias hormas, plantillas, etc., por talla, que aseguran una mejora considerable en el ajuste del calzado. A este tipo de alternativas se les ha dado en denominar soluciones de *best fitting*.

En el desarrollo de productos personalizados cada usuario es la fuente de los objetivos de diseño. La personalización de las características funcionales del calzado supone un evidente valor añadido, especialmente para aquellas personas cuyas necesidades están lejos de los requerimientos medios [2].

La personalización funcional del calzado viene determinada por el entorno de uso (tipo de pavimento, perfil del terreno, condiciones climáticas, etc.) y las características específicas de cada usuario: morfología del pie y perfil biomecánico (Figura 2 y Figura 3). Sin embargo, la tecnología actual para la caracterización del perfil biomecánico del usuario es, en su mayoría, de laboratorio y no está adaptada para su uso en el punto de venta. La adaptación funcional completa del calzado se realiza todavía de forma muy artesanal y, en consecuencia, tiene un precio muy elevado. Además, se precisan nuevos materiales que cubran las exigencias ergonómicas y funcionales de los usuarios [3].

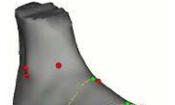
Producto	Mercado	Dimensiones Antropométricas	
Calzado	Calzado	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud total • Anchura del antepié • Forma 3D del pie. • En algunos casos, es necesaria la captura 3D del pie con altura de tacón. 	 
Plantillas	Ortopedia Deporte	Anatomía plantar 3D	

Figura 2. Productos personalizados relacionados con medidas antropométricas del pie.

² <http://gestion.ibv.org/gestoribv/index.php/productos/descargables/120-i-d-i-dirigida-a-la-industria-del-calzado-y-sus-componentes/file>

³ http://gestion.ibv.org/gestoribv/index.php?option=com_docman&view=download&alias=417-personalizacion-de-calzado-en-el-punto-de-venta&category_slug=productos&Itemid=142

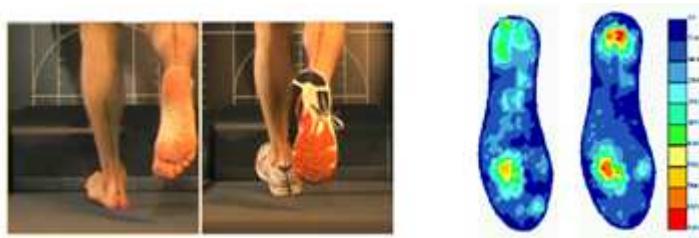


Figura 3. Perfil biomecánico en marcha y carrera.

Aparte del propio calzado, otra categoría de producto que juega un papel importante en el cuidado de la salud de los pies y que, al mismo tiempo, está experimentando un considerable desarrollo gracias a las posibilidades de la personalización masiva, es el de las plantillas para calzado.

Más del 80% de la población experimenta dolencias no específicas como consecuencia de utilizar posturas incorrectas en reposo, al caminar, en su trabajo, al hacer deporte o en su propia vida diaria [4]. Entre otros, la pronación y la supinación suponen un problema para una gran parte de la población, especialmente para aquellos que tienen más agudizadas estas patologías: el 70% de los individuos son sobrepronadores y el 10% son infrasupinadores [5,6]. Ambas situaciones suponen, por ejemplo, buena parte de lesiones deportivas que provocan la interrupción temporal de la práctica deportiva correspondiente. A este respecto, aunque el calzado adaptado es un elemento que normalmente contribuye a reducir las problemáticas generadas por dolencias en el pie, son las plantillas personalizadas el factor que mejor suele resolver estos inconvenientes como, por ejemplo, actuando a modo de solución preventiva para la pronación excesiva [7].

Por otro lado, el uso de plantillas confort reducen las molestias y fatiga que acusan los pies en el día a día, ayudando a mantener los pies sanos por más tiempo, así como ofreciendo mayor estabilidad, soporte y amortiguación. Sin embargo, hasta ahora los usuarios normalmente sólo podían acceder a plantillas confort estándar que, por lo general, son completamente planas o presentan una anatomía que no se adapta a la mayoría de los pies.

Así, la customización en el ámbito de las plantillas es una línea de negocio en plena expansión, dadas las ventajas que ofrece al usuario.

Extremidades: manos

Para el caso de las manos se ha priorizado el producto guantes dentro del sector de la indumentaria, deporte y de los equipos de protección individual (Figura 4).

⁴ <http://www.plantillaspersonalizadas.com/>

⁵ Clement, D. B., Taunton, J. E., & Smart, G. W. (1984). Achilles tendinitis and peritendinitis: etiology and treatment. *The American Journal of Sports Medicine*, 12(3), 179-184.

⁶ Cook, S. D., Brinker, M. R., & Poche, M. (1990). Running shoes. *Sports Medicine*, 10(1), 1-8.

⁷ Kilmartin, T.E., & Wallace, W.A. (1994). The scientific basis for the use of biomechanical foot orthoses in the treatment of lower limb sports injuries--a review of the literature. *British Journal of Sports Medicine*, 28(3), 180-184 and O'Toole, M. L. (1992). Prevention and treatment of injuries to runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(9 Suppl), S360-3

Los consumidores de este sector se muestran cada vez más atraídos por factores como el confort o la moda. Adicionalmente, el ajuste correcto a las características físicas del usuario (que asegura la protección y las adaptaciones individualizadas a cada trabajador) se propone como una gran oportunidad para las compañías fabricantes de EPI para mejorar su competitividad.

Se empieza a observar cierto movimiento por parte de empresas demandantes de soluciones personalizadas de EPI, asegurando precisamente estas adaptaciones requeridas a nivel individual para los usuarios. Prueba de ello es la iniciativa que se ha llevado a cabo dentro de un proyecto piloto en una planta de montaje de la firma de automóviles BMW en Munich, en la que la compañía ha desarrollado una solución ergonómica diseñada para proteger a los trabajadores en sus articulaciones del pulgar. Se ha diseñado un “dedal flexible” de poliuretano termoplástico que se coloca sobre el dedo pulgar como una segunda piel, y que se personaliza para que coincida con la forma y el tamaño de la mano de cada trabajador. Por tanto, un EPI hecho a medida de la morfología del operario, elástico y resistente que se ha valorado de forma muy positiva por parte de los empleados [8].

Producto	Mercado	Dimensiones Antropométricas
Guantes	Indumentaria Deporte Equipos de protección (EPIS)	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la mano • Anchura de la mano

Figura 4. Productos personalizados relacionados con medidas antropométricas de la mano.

Extremidades: cabeza

Para el caso de la cabeza y cara se han priorizado los siguientes productos dentro de los sectores de los equipos de protección individual, deporte, y óptica (Figura 5).

- Para poder personalizar cascos es necesario conocer las 3 principales medidas de la cabeza (longitud, anchura y perímetro).
 - Para poder personalizar monturas para gafas, se han definido hasta 14 medidas de la cara que permiten dimensionar la montura, que se pueden ver en la imagen correspondiente de la Figura 5.
 - Para poder personalizar mascarillas, se han definido unas 12 medidas de la cara y cabeza; éstas pueden verse en la imagen correspondiente de la Figura 5.

⁸ Realidad virtual, impresión 3D y robótica, los tres pilares del futuro de la PRL. Boletín de Actualidad Jurídica Sociolaboral nº 84. Aranzadi. 2015.

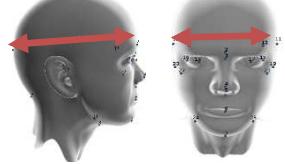
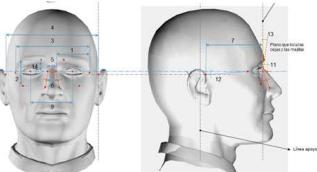
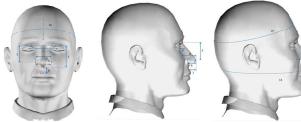
Producto	Mercado	Dimensiones Antropométricas	
Cascos 	Equipos de protección (EPIS) Deporte	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la cabeza • Anchura de la cabeza • Perímetro de la cabeza 	
Gafas de buceo 	Deporte	<ul style="list-style-type: none"> • Anchura ectocantus • Distancia Gabella-subnasale • Distancia entre ojos 	
Gafas 	Óptica	<ul style="list-style-type: none"> • Anchura temporal de la cabeza • Anchura superior de la nariz. • Distancia inter-pupilar 	
Mascarillas 	Equipos de protección (EPIS)	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la nariz • Apoyo nasal superior • Forma del a cara • Altura subnasal – labio superior • Perímetro de la frente 	

Figura 5. Productos personalizados relacionados con medidas antropométricas de cara y cabeza.

Dentro de las familias de productos priorizadas, se han seleccionado los siguientes productos como los más representativos, y que constituirán los demostradores con los que validar la metodología desarrollada (para más información ver Entregable 5.1):

DEMOSTRADORES		
Producto	Mercado	Zona corporal
Plantillas	Deporte	Pies
Suela de sandalia	Calzado	Pies
Ortesis – Corsé de sujeción	Orto-protésico	Tronco
Ortesis – Rodillera para osteoartritis	Orto-protésico	Pierna

4. DEFINICIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PRODUCTO PERSONALIZADO

Se ha establecido el eje central de una metodología de diseño específica para productos personalizados, donde se gestiona toda la información y todos los protocolos definidos.

A continuación se muestra el esquema de la metodología de diseño desarrollada:

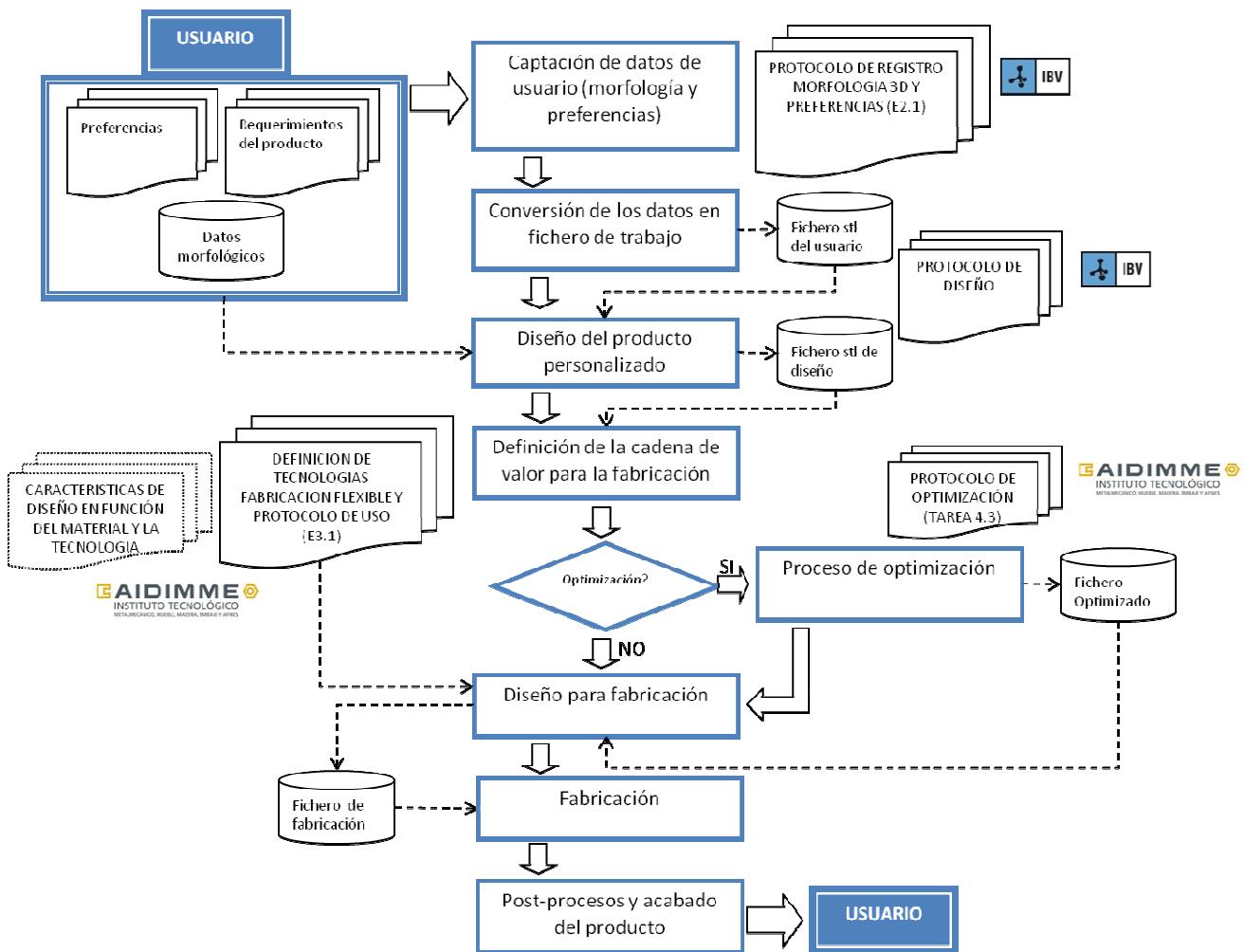


Figura 6. Metodología de diseño

Se ha seguido esta metodología para el desarrollo de los demostradores del proyecto, ubicando los protocolos específicos que se han elaborado en el proyecto relacionados con la captación de datos de la morfología y de los gustos del usuario, así como con los procesos de fabricación flexible. Esta metodología se ha actualizado durante el proceso de desarrollo de los demostradores, donde además se han integrado las necesidades de las empresas. En los siguientes apartados se detallan los distintos procesos de la metodología para cada uno de los demostradores.

4.1. DEMOSTRADOR DE PLANTILLAS

1. **Captación de datos de usuario:** El primer paso del proceso de diseño consiste en captar la información de usuario, tanto antropométrica, como de sus preferencias. En el caso del demostrador de plantillas se ha establecido de la siguiente manera:

Antropometría del usuario

La información antropométrica del pie del usuario se puede obtener, de acuerdo al protocolo establecido en el E2.1, mediante reconstrucción 3D a partir de una aplicación para dispositivos móviles y a partir del DomeScan. La salida de estos sistemas de registro son el archivo del pie en formato STL/PLY/OBJ y un listado de medidas para su uso en personalización.

Tanto el archivo del pie como las medidas calculadas se exportan para ser utilizados en el software de personalización.

Preferencias de usuario

La información de preferencias de usuario se puede obtener, de acuerdo al protocolo establecido en el E2.1, mediante 3 procesos distintos. Para el demostrador de plantillas se ha empleado el co-diseño, en el que el usuario puede:

- Elegir el estilo de la plantilla que más le guste
- Dentro de un estilo, se puede elegir un diseño predefinido y modificar el color de algún elemento o crear su propia plantilla

2. Diseño del producto personalizado

El proceso de diseño de una plantilla personalizada a la morfología de pie y preferencias de usuario está dividido en dos fases.

En primer lugar, se genera un diseño CAD de plantilla genérica adaptada a la morfología del pie. Los criterios de diseño para generar esta plantilla se basan en ecuaciones que definen las curvas clave de la plantilla en función de las medidas del pie en las direcciones transversal y longitudinal.

En esta primera fase, la plantilla CAD genérica está personalizada a la morfología plantar del usuario, pero ésta tiene que poder adaptarse al diseño o estilo escogido por el usuario.

La creación de programas para generar diseños de plantillas en 3D es largo y costoso, porque el programa tiene que tener en cuenta tanto los parámetros de diseño como detalles de bajo nivel como la estructura 3D de la plantilla que se va a generar. Esto implica que, aunque se tenga un método para personalizar plantillas a partir de la morfología, es complicado adaptarlo a nuevos diseños de plantilla. Por ello se ha desarrollado un método genérico, que, dadas dos plantillas, se pueda replicar la forma de una con el diseño de la otra.

En la siguiente figura se puede ver el resultado. El color escogido por el usuario se aplicará en el proceso de fabricación.



Figura 7. Plantilla CAD personalizada

3. Definición de la cadena de valor para la fabricación

Por los requisitos de las plantillas, éstas deben ser de un polímero rígido que permita una cierta recuperación elástica debajo del puente. Las tecnologías de fabricación aditiva más adecuadas para la fabricación de las plantillas son la SLA, SLS y FDM. Todas ellas tienen en común el mismo esquema para la cadena de valor.

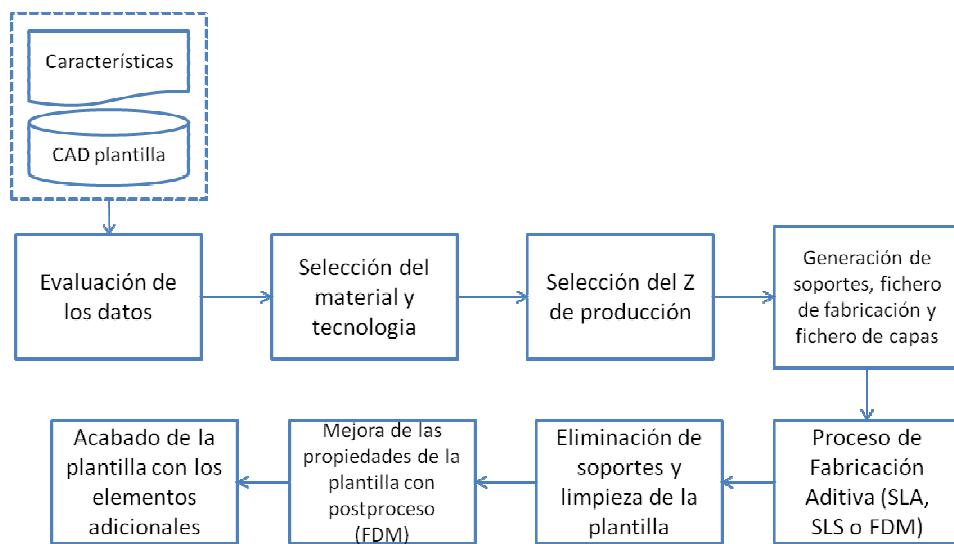


Figura 8. Cadena de valor de la fabricación de una plantilla

La etapa que se modifica en función de la tecnología y material seleccionado es la de selección del Z de producción que es la orientación y la colocación de la plantilla en la bandeja de fabricación, y por lo tanto la necesidad de soportes. Para cada una de las tecnologías se dispone de una orientación óptima de fabricación para reducir tiempo de fabricación, minimizar soportes y obtener una pieza de calidad.

4. Proceso de optimización

Dado el pequeño espesor de las plantillas en principio no tiene sentido realizar una optimización. Los procesos de optimización están encaminados a reducir material y adaptar el material a los esfuerzos que debe soportar. En este caso la plantilla ya está adecuada a la morfología del usuario tal y como se describe en el apartado de diseño de la misma.

5. Diseño para fabricación

Como se ha mencionado anteriormente, existen tres tecnologías de fabricación aditiva adecuadas para la fabricación de plantillas:

- Tecnología Estereolitografía (SLA) y el material resina Next
- Sinterizado láser (SLS) y material Poliamida PA2200
- Deposición por hilo fundido (FDM) y material Bendlay

No hay que realizar ninguna modificación del diseño de la plantilla para su correcta fabricación. Los espesores son adecuados para las tres tecnologías y ajustando la orientación de fabricación es posible obtener piezas de calidad en cada una de las tecnologías.

Durante la última etapa del proyecto se evaluarán las distintas alternativas de fabricación de plantillas con usuarios. En función de los resultados se seleccionará la opción más adecuada para fabricar plantillas teniendo establecido el protocolo de actuación para la fabricación.

6. Proceso de fabricación

En función de la tecnología y material seleccionado para realizar la plantilla, se conoce la mejor orientación de fabricación para garantizar la calidad de las piezas, reducir tiempos de fabricación y aumentar el empaquetamiento (número de plantillas que caben en una bandeja de fabricación). Con la plantilla colocada en la bandeja de fabricación los siguientes pasos son automáticos, se genera el soporte (en caso que se necesite), se generan los ficheros de capa y se inicia la impresión 3D de las piezas que forman una bandeja de fabricación.

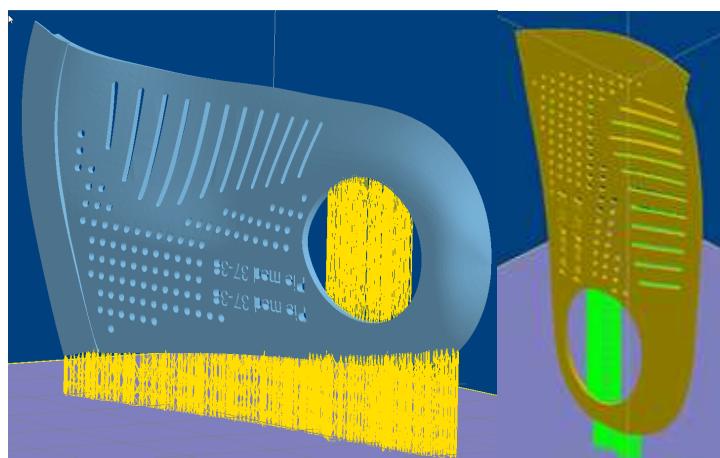


Figura 9. Orientaciones de fabricación plantilla en SLA

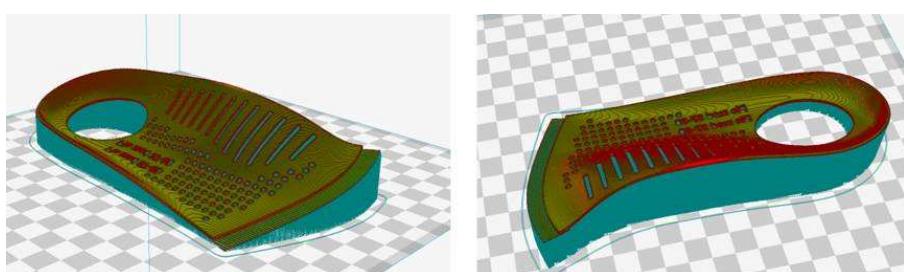


Figura 10. Orientación de fabricación plantilla en FDM

7. Post-proceso y acabado del producto

Una vez finalizada la fabricación, hay que extraer la pieza de la bandeja de la máquina, limpiarla (el proceso de limpieza depende de la tecnología) y eliminar los soportes. Dependiendo de la tecnología de fabricación seleccionada, será necesario realizar un post proceso para mejorar las propiedades resistentes de las plantillas.

Una vez disponible la zona rígida de la plantilla, es necesario acabar el producto con las capas superiores forro y material acolchado que son las que contactan con el pie del usuario.

4.2. DEMOSTRADOR DE SUELA

1. **Captación de datos de usuario:** El primer paso del proceso de diseño consiste en captar la información de usuario; en el caso del demostrador de suela de sandalia se ha establecido de la siguiente manera:

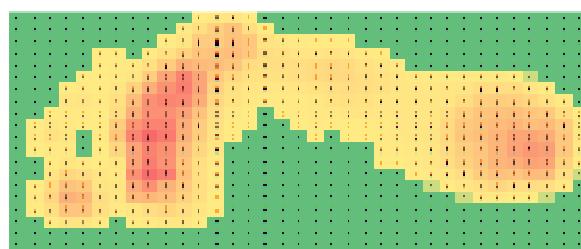
Antropometría del usuario

La información antropométrica del pie del usuario se puede obtener, de acuerdo al protocolo establecido en el E2.1, mediante reconstrucción 3D a partir de una aplicación para dispositivos móviles y a partir del DomeScan. La salida de estos sistemas de registro son el archivo del pie en formato STL/PLY/OBJ y un listado de medidas para su uso en personalización.

Tanto el archivo del pie como las medidas calculadas se exportan para ser utilizados en el software de personalización.

Distribución de presiones

En el caso del demostrador de suela, también se ha tenido en cuenta la información de su mapa de distribución de presiones, para poder optimizar el material de la misma para que esté compuesta por material continuo y material con geometría estructural en función de las presiones ejercidas por el usuario. Esta información se obtiene de una plataforma de presiones, cuya salida es un archivo de datos tipo .CSV con el valor de la presión en cada sensor en un registro de pisada. Esta información se procesa para obtener un único archivo con el valor máximo de cada sensor para todo el registro de pisada (Figura 11). Este archivo se exporta para ser utilizado como información de entrada en el proceso de optimización.



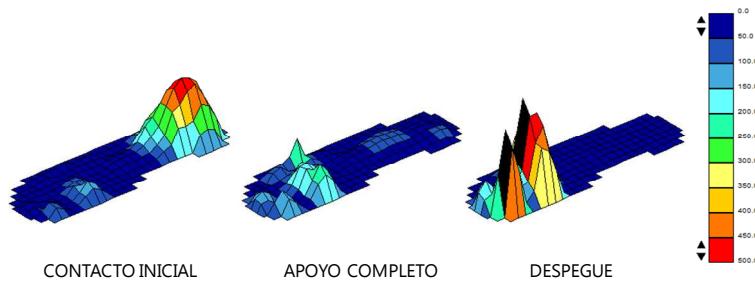


Figura 11. Información procedente de la plataforma de presiones

Preferencias de usuario

La información de preferencias de usuario se puede obtener, de acuerdo al protocolo establecido en el E2.1, mediante 3 procesos distintos. Para el demostrador de suelas se ha empleado el co-diseño, en el que el usuario puede elegir el color de la suela.

2. Diseño del producto personalizado

El diseño de la suela personalizada pasa por adaptarla a la anatomía del pie del usuario, y por optimizar el diseño en función de las presiones ejercidas por el usuario.

Para adaptada a la anatomía del pie, al archivo CAD de la suela de sandalia se aplica el mismo proceso de diseño personalizado que con la plantilla, ya que esta vez es como si la plantilla estuviera integrada en la suela, es decir, la suela presenta una base de apoyo para el pie que incorpora la anatomía plantar del usuario. En este caso, la plantilla con el diseño objetivo será la original de la suela de sandalia.

En la siguiente figura se puede ver el archivo CAD generado como resultado, con una anatomía plantar personalizada a la morfología del pie del usuario.

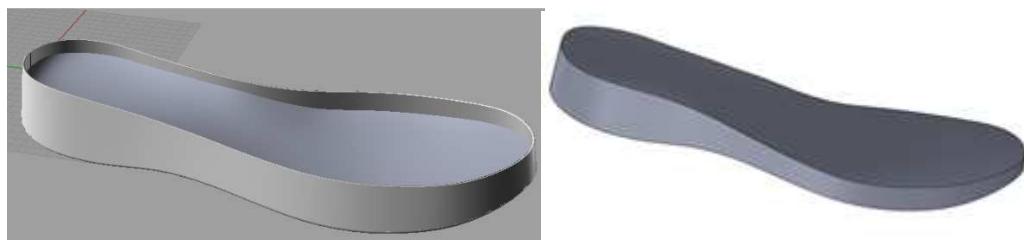


Figura 12. Izquierda: Suela de sandalia CAD personalizada a la anatomía plantar del usuario. Derecha: Zona interior o entresuela

En cuanto al diseño de la suela optimizado en función de las presiones ejercidas por el usuario, éste consiste en incluir en el software de optimización la geometría de la suela y las presiones que ejerce el usuario. El resultado de esta optimización muestra material en aquellas zonas donde es indispensable su presencia para soportar las presiones de un determinado usuario mientras camina.

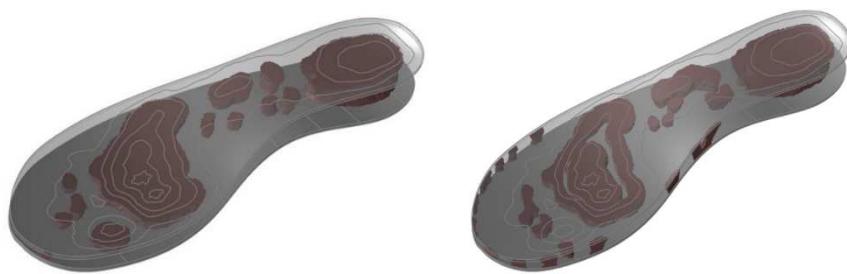


Figura 13. Resultados de la optimización según la distribución de presiones ejercidas por el usuario.

El diseño de la suela consiste en adaptar material en forma de estructuras al resultado de la optimización, combinando la densidad de las estructuras en función de las tensiones que debe soportar una determinada zona de la suela.

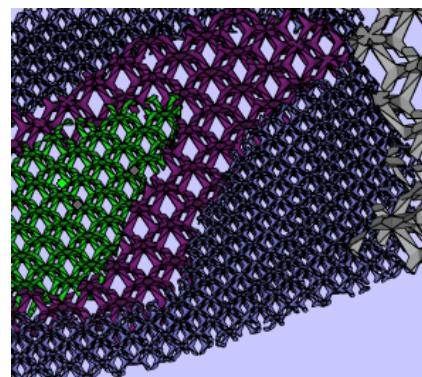


Figura 14. Resultados de la optimización según la distribución de presiones ejercidas por el usuario.

Además es posible combinar material continuo y estructuras modificando el comportamiento de la suela.

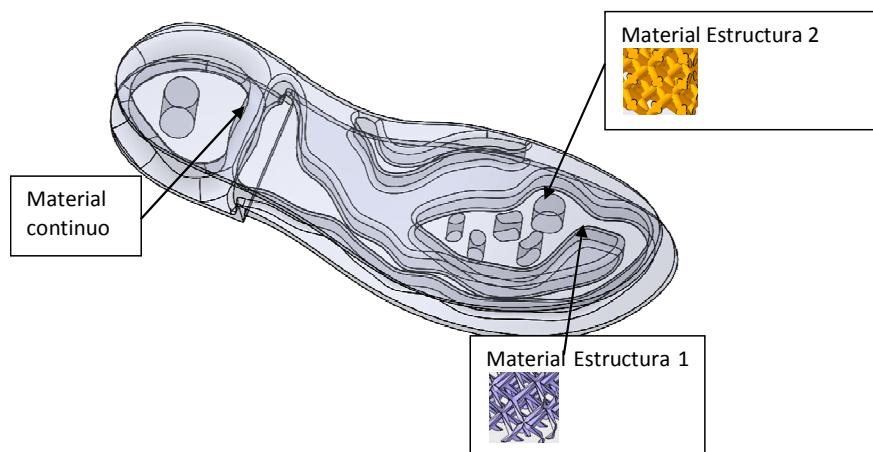


Figura 15. Concepto del diseño optimizado y fabricación de la suela combinando material continuo y estructuras

Un mayor detalle del proceso de optimización se describe en el punto 4.

3. Definición de la cadena de valor para la fabricación

Se fabrica una pieza con dos materiales, una estructura que da rigidez a ciertas zonas como combinación de estructuras con propiedades diferentes en función de las presiones a soportar, y un elastómero para dar flexibilidad y confort. En este caso será necesario fabricar esta estructura mediante la tecnología SLS cuyo material de partida es un lecho de polvo de poliamida y por lo tanto no es necesario incluir soportes, permitiendo la fabricación de este tipo de geometrías. Una vez se dispone de la estructura, ésta quedará inmersa en un material elastómero mediante el uso de la tecnología de colada en vacío (Figura 16).

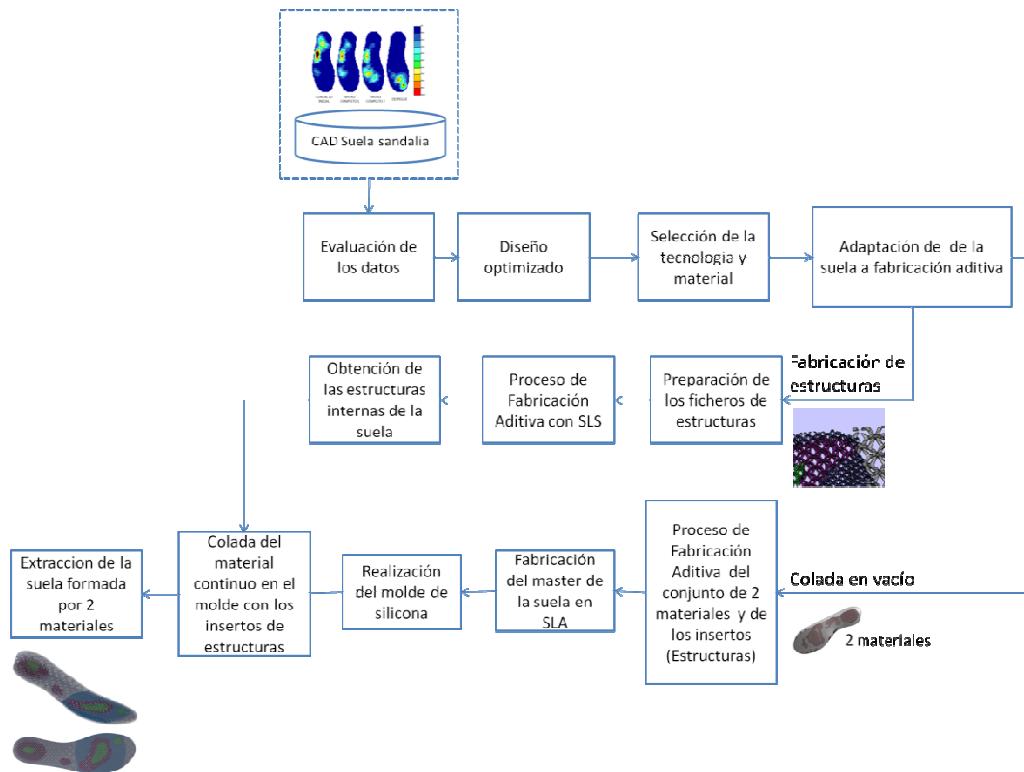


Figura 16. Cadena de valor de la fabricación de una suela

A continuación se muestra un esquema del concepto del diseño de la suela a fabricar con una combinación de tecnologías.

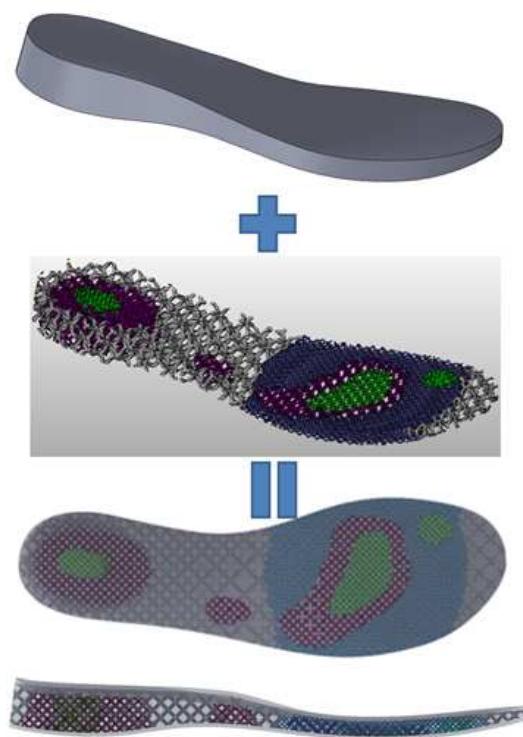


Figura 17. Concepto de fabricación de la suela

4. Proceso de optimización

El proceso de optimización de la suela se realiza mediante el software Inspire. Partiendo de las presiones del usuario y de la geometría de la suela inicial se distribuye el material en la suela en función de las tensiones que debe soportar, obteniendo las siguientes geometrías.

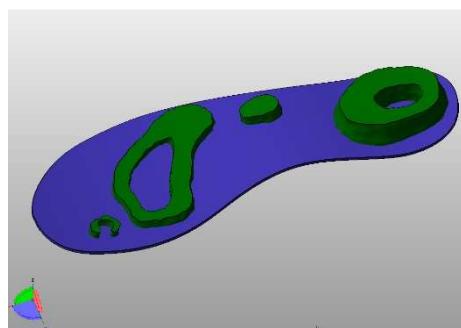


Figura 18. Material mínimo en la suela para soportar presiones de 100 KPa

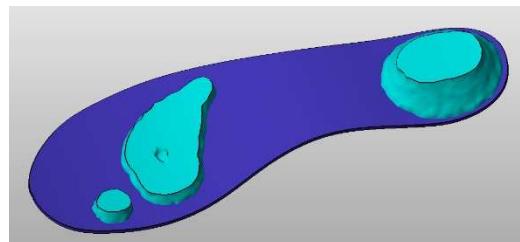


Figura 19. Material mínimo en la suela para soportar presiones de 250 KPa

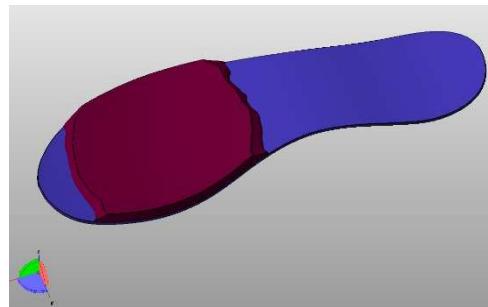


Figura 20. Material mínimo en la suela para soportar presiones de 500 KPa

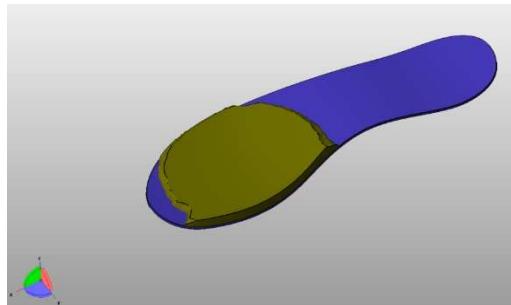


Figura 21. Material mínimo en la suela para soportar presiones de 650 KPa

El software de optimización también es capaz de optimizar incluyendo estructura, tal y como se muestra en la siguiente imagen, pero el tamaño de dicho archivo es enorme, lo cual se hace inviable trabajar con él.

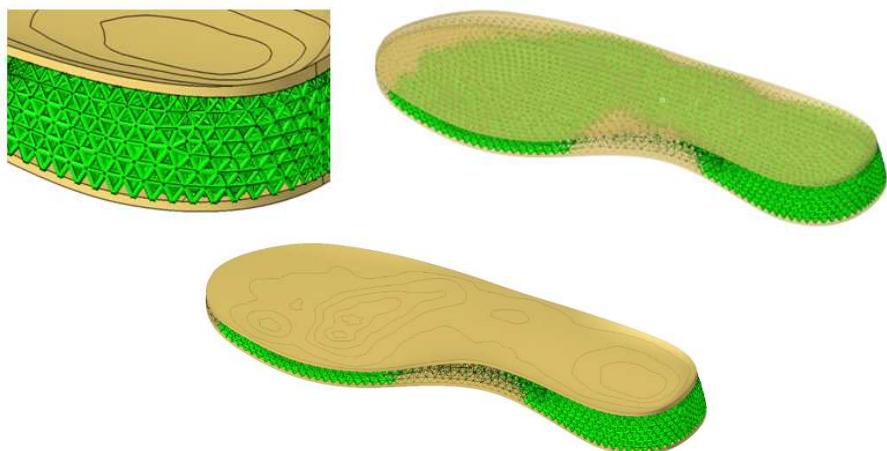


Figura 22. Fichero de estructuras adaptadas a las presiones con Inspire

5. Diseño para fabricación

Diseño zona estructuras

Dado que el fichero de estructuras extraído directamente por el software de optimización Inspire es imposible de manejar, se trabajará directamente con los ficheros que contienen los sólidos resultantes de la optimización, incluyéndolos todos ellos en un mismo fichero (Figura 23).

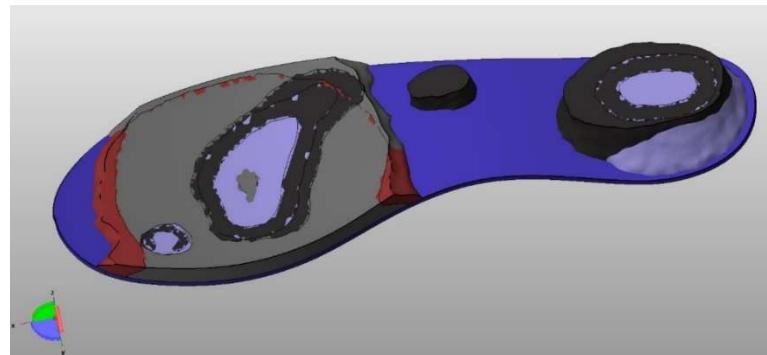


Figura 23. Sólidos resultantes de la optimización superpuestos

Dado que los sólidos resultantes de la carga de 500 y 650 KPa son muy similares, se ha decidido tomar el de 500 KPa porque su geometría es más limpia y así se evitan problemas a la hora de fabricar las piezas.

Para la separación de los sólidos y evitar superposiciones entre ellos es necesario trabajar con el *software Materialise Magics*⁹, específico para trabajar ficheros STL, incluir estructuras y preparar las fabricaciones. Se incluyen todos los sólidos en un único fichero de magics y se realizan operaciones de booleanas para separar las diferentes zonas de la suela en función de las cargas a las que se verá sometida. De este modo se obtiene la siguiente distribución de material.

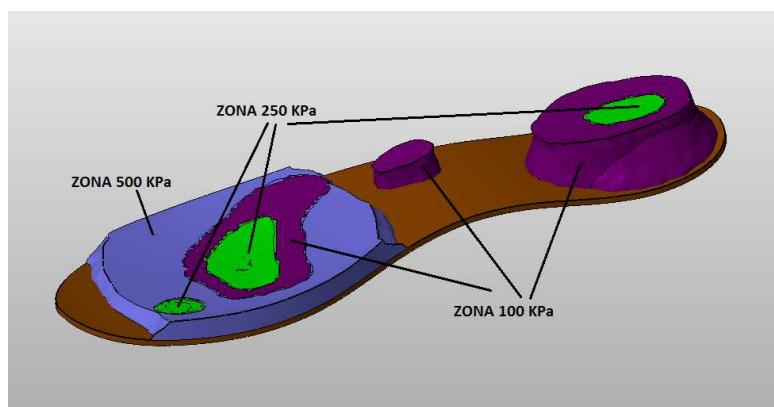


Figura 24. Sólidos resultantes de la optimización superpuestos.

A cada una de las zonas se le asigna una estructura, siendo la misma estructura pero la densidad de la misma se modifica dependiendo de la carga a soportar. Las zonas que deben soportar más carga tienen una estructura más cerrada, es decir celdas más pequeñas.

⁹ <http://www.materialise.com/en/software/magics>

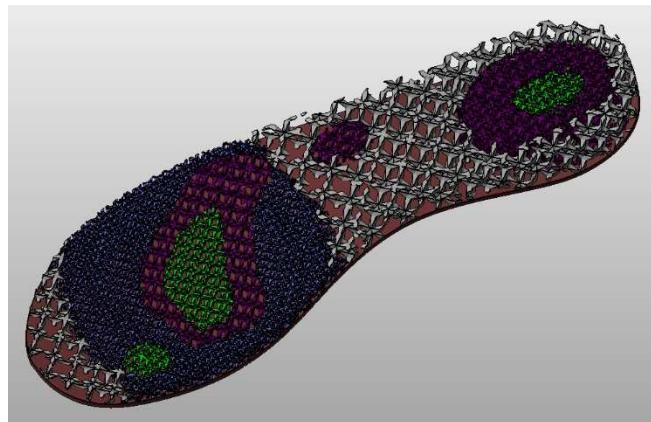


Figura 25. Diseño de la suela con estructuras

Diseño zona elastómero mediante colada en vacío

Para realizar el molde de silicona para la colada en vacío, es necesario fabricar el máster en otra tecnología como es la SLA (Estereolitografía) con la suela completa.



Figura 26. Fichero suela y modelo SLA

Una vez se dispone del máster en resina, éste se utiliza para hacer el molde de silicona que tendrá como cavidad la suela de la figura anterior. Posteriormente se incluye en el molde la zona estructural y se cuela un elastómero que recubrirá toda la suela y le dará carácter elástico.

6. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación consta de varios pasos para la obtención de la zona elastomérica y la estructura que da rigidez adaptada a las presiones del usuario.

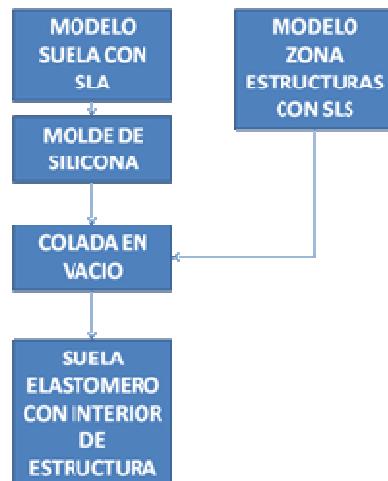


Figura 27. Esquema del proceso de fabricación

Como se ha mencionado antes, la fabricación de este tipo de piezas formadas por estructuras tiene sentido con tecnologías de lecho de polvo que no necesitan soportes; es el propio polvo el que sustenta la pieza durante el proceso de fabricación. La tecnología seleccionada para la fabricación de este demostrador es la SLS y el material PA650. Para la realización del molde de silicona, es necesario disponer de un modelo de suela en SLA. Una vez se dispone de un molde, se introduce la parte estructural de la suela y se cuela un elastómero transparente que embeberá toda la estructura y conformará la zona de arriba y de debajo de la suela, tal y como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 28. Concepto de suela

7. Post-proceso y acabado del producto

Una vez fabricada la zona estructural, se extrae la máquina y debe limpiarse minuciosamente para eliminar todo el polvo suelto que hay entre las estructuras. El máster de SLA debe lijarse y acabarse perfectamente puesto que conforma la cavidad del molde y la calidad final de la suela depende del máster.

4.3. DEMOSTRADOR DE ORTESIS

Se ha decidido abordar dos demostradores de ortesis que implican dos segmentos corporales distintos del cuerpo: un corsé de sujeción (el tronco) y una rodillera para osteoartritis (la pierna). A continuación se describe la metodología de diseño para ambos productos.

1. **Captación de datos de usuario:** El primer paso del proceso de diseño consiste en captar la información antropométrica y patológica del usuario. Este proceso se ha establecido de la siguiente manera:

Antropometría del usuario

La información antropométrica del usuario se puede obtener, de acuerdo al protocolo establecido en el E2.1, mediante empleo de escáneres 3D low cost de barrido existentes en el mercado. En el proceso de escaneado de la rodilla es necesario marcar, como mínimo, los puntos anatómicos que definen el eje de la articulación transversal de la rodilla, para poder colocar correctamente la ortesis en el proceso de diseño.

La salida de estos sistemas de registro son el archivo del avatar 3D en formato STL/PLY/OBJ y un listado de medidas para su uso en personalización.

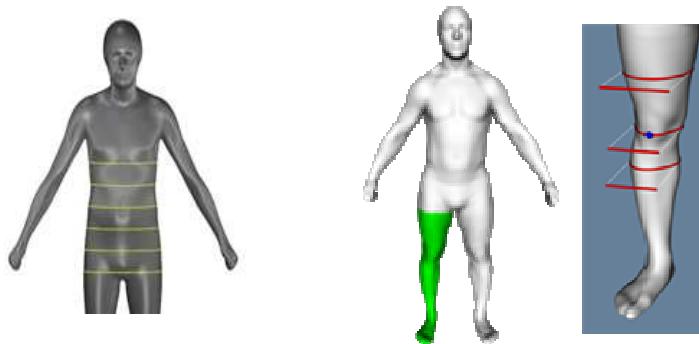


Figura 29. Selección de partes del cuerpo para el diseño de los demostradores de ortesis.

Además de esta información, es necesario conocer información adicional de las patologías del usuario (relacionadas con la espalda, para el corsé, y relacionadas con la osteoartritis, para la rodillera). Por ejemplo, en el caso de la rodillera, es necesario conocer el grado de varo o valgo del usuario.

Tanto el archivo del avatar 3D, las medidas calculadas, y la información correspondiente de la patología se exportan para ser utilizados en el software de personalización.

Es importante tener en cuenta que debido al alcance del proyecto y al propósito de los demostradores, no se han considerado usuarios patológicos, sólo usuarios sanos. Es por ello que no se ha desarrollado la metodología de diseño para los demostradores teniendo en cuenta ese tipo de información; ésta puede abordarse en futuros proyectos tomando como base la metodología actual.

2. Diseño del producto personalizado

Demostrador de rodillera para osteoartritis

Se parte de la malla obtenida del escaneado 3D de la pierna en formato STL. Se trabaja en la superficie obtenida, realizando secciones transversales en la misma, que se utilizarán para crear las superficies interiores principales de la rodillera.

Se refinan dichos contornos de sección modificando sus puntos de control, de tal forma que una vez se efectúe el recubrimiento superficial estos puntos componentes se sucedan en cada plano de manera fluida.

Con la ayuda de los contornos de sección creados y los perfiles a la pierna trazados con anterioridad, se recubre con una superficie el área deseada de la pierna.

Una vez obtenidas las superficies de las dos carcasas de la ortesis, se realiza un offset de las mismas, el cual permitirá alojar el material acomodativo adecuado ortesis-pierna.

A continuación, tras descartar las superficies iniciales, se da espesor a las superficies externas. De esta manera, ya se dispone de las carcasas de la rodillera.

A partir de aquí, se efectúan cortes para eliminar material en la parte posterior de la rodillera, para dejar esa zona de la pierna libre para favorecer la comodidad.

Se redondean las aristas vivas del modelo generado, para suavizar los bordes. Se obtiene el eje de giro del sistema de barras de la articulación a integrar en la rodillera. Se marca el eje de rotación de la rodilla, trazando una línea entre los dos puntos obtenidos a partir de los marcadores que el sujeto llevaba a la hora del escaneo. Se hacen coincidir el eje de la rodilla con los de las articulaciones para poder fijar estas en el espacio a ambos lados de la rodilla 3D.

Una vez colocadas las articulaciones a una distancia adecuada de la rodilla, se procede a colocar las barras o pletinas estándar en el subensamblaje de la articulación. Dado que las pletinas deben ser modificadas, se fabricarán con la geometría adecuada también en fabricación aditiva, pero en metal dada la resistencia que deben soportar.

A continuación se puede ver el resultado del CAD de la rodillera.

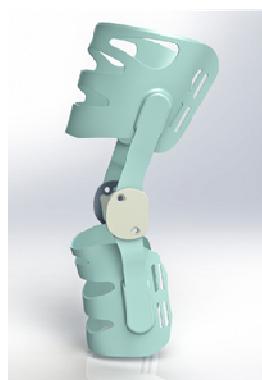


Figura 30. Diseño CAD de la rodillera para osteoartritis.

Demostrador de corsé de sujeción

Para diseñar el demostrador de corsé, se importa el STL del escaneado, y se convierte a una malla. Se realizan varias secciones en el plano transversal desde el perímetro de pecho hasta el perímetro de cadera, y se realiza una sección en el plano sagital.

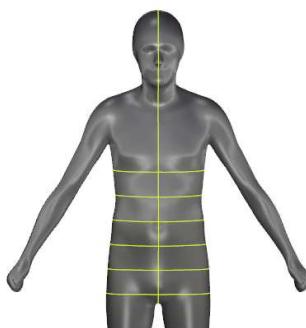


Figura 31. Secciones marcadas sobre el CAD.

Se traza el punto medio de la curvatura vertebral en cada una de las secciones obtenidas (Figura 32-izquierda), y se alinean los puntos de cada sección sobre la misma línea, desde el trocánter hacia arriba (Figura 32-derecha).

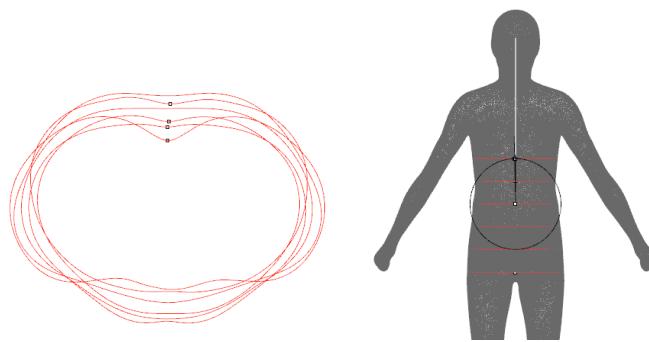


Figura 32. Proceso de alineación.

Se repite el proceso, pero en la posición correcta del avatar 3D, y se crea una superficie con las curvas resultantes mediante la *Red de curvas* (Figura 33).

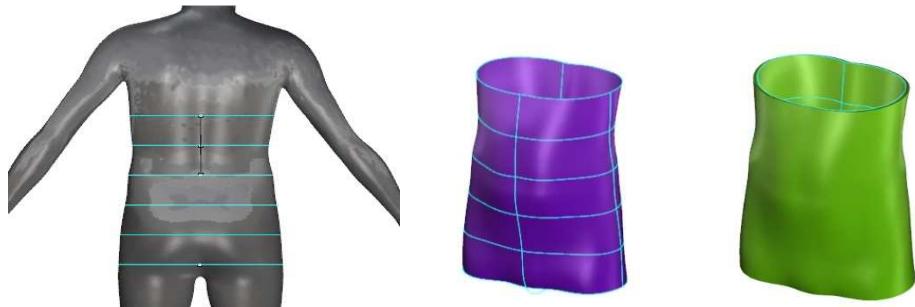


Figura 33. Obtención de la superficie del corsé.

Se aligera la malla y se le dota al corsé de la holgura y espesor necesarios. El resultado puede verse en la siguiente figura, éste será el fichero de partida para la optimización y fabricación.

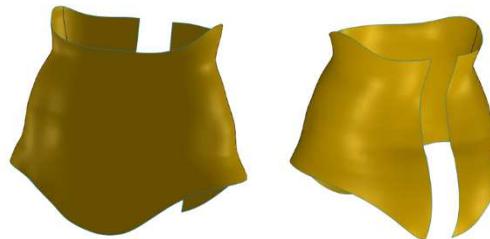


Figura 34. CAD resultante a partir de la morfología del usuario.

3. Definición de la cadena de valor para la fabricación de demostradores de ortesis

Las ortesis serán fabricadas por tecnologías aditivas de forma que sea posible fabricar cada una de ellas en una misma bandeja de fabricación, haciendo un diseño con un alto grado de empaquetamiento en la máquina de fabricación.

Demostrador de rodillera para osteoartritis

La rodillera se fabrica con dos materiales diferentes; la zona en contacto con la pierna del usuario en polímero, y las pletinas que garantizan la correcta alineación son de titanio, por lo tanto, la cadena de valor se divide en dos en función de la tecnología de fabricación aditiva utilizada.

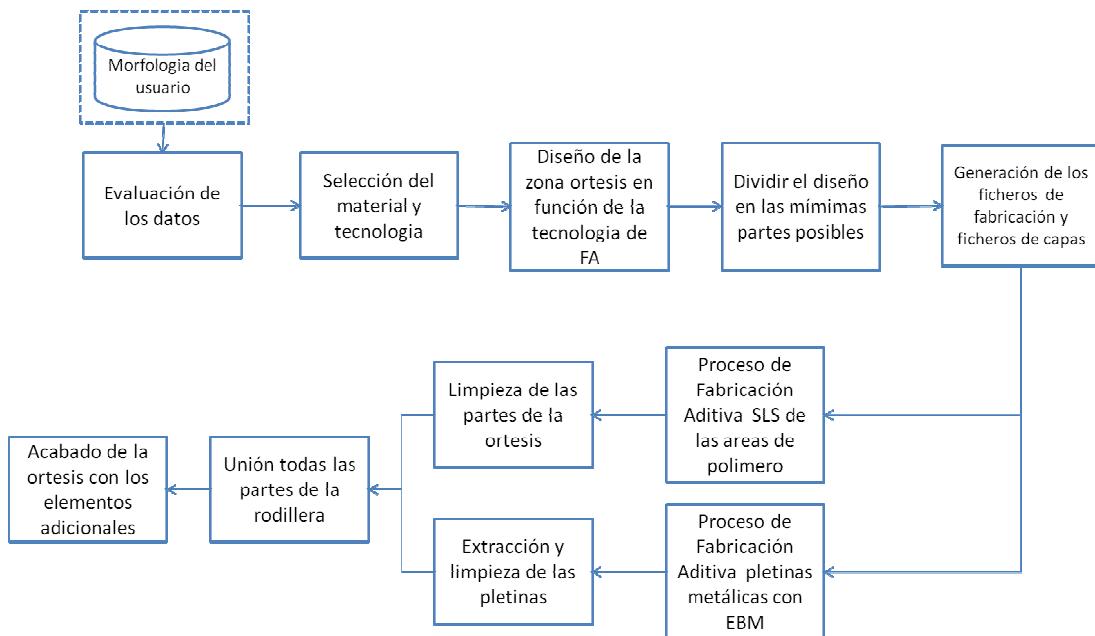


Figura 35. Cadena de valor de la rodillera para osteoartritis

Demostrador de corsé de sujeción

A continuación se muestra la cadena de valor para el corsé, centrada en el uso de la tecnología de fabricación aditiva de SLS en poliamida.

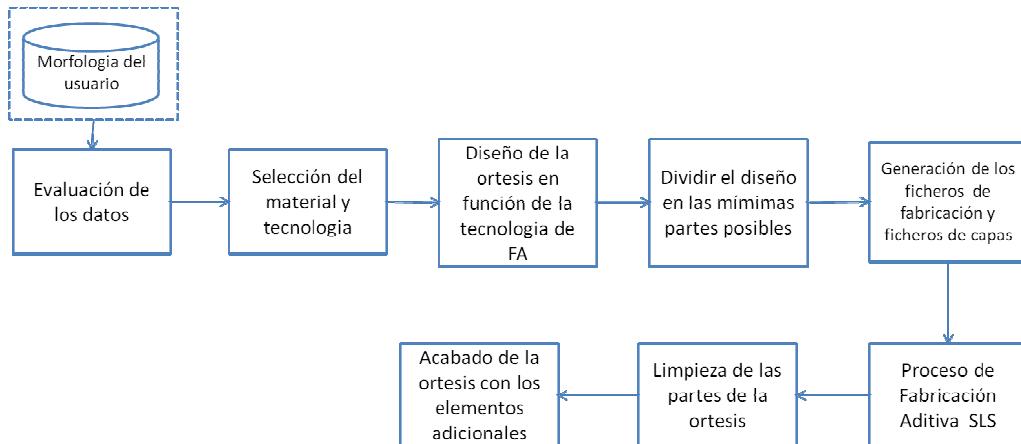


Figura 36. Cadena de valor del demostrador corsé

4. Proceso de optimización

Los espesores de estos productos son tan pequeños que no se ha considerado la realización de la optimización mediante el software Inspire, eso sí la reducción de material se realizará mediante el diseño adaptado al proceso de fabricación que permite una gran eliminación de material.

5. Diseño para fabricación

Demostrador de rodillera para osteoartritis

En el diseño de la rodillera es fundamental mantener la alineación de las pletinas con la articulación (elemento estándar), además hay que destacar que las pletinas y

la articulación son los elementos que sufren los esfuerzos durante el uso de la rodillera. Por ese motivo, las pletinas se fabricarán en Titanio con la tecnología Electron Beam Melting (EBM).

El objetivo del diseño para fabricación aditiva de la rodillera es la integración de las distintas partes que forman la rodillera con el fin de reducir el proceso de fabricación y montaje. De este modo se dispone de 4 partes que forman la rodillera (Figura 37):

- Carcasa superior de la rodillera en contacto con la parte superior de la pierna
- Carcasa inferior de la rodillera en contacto con la parte inferior de la pierna
- Pletinas metálicas
- Articulación estándar

La integración de las pletinas con las carcasa es la clave para darle compactación a la rodillera exponiendo lo mínimo posible el metal. Además el diseño se centra en el empacamiento de las piezas en la máquina de fabricación aditiva para que sean fabricadas todas en una misma bandeja, reduciendo de este modo tiempos y costes de fabricación.

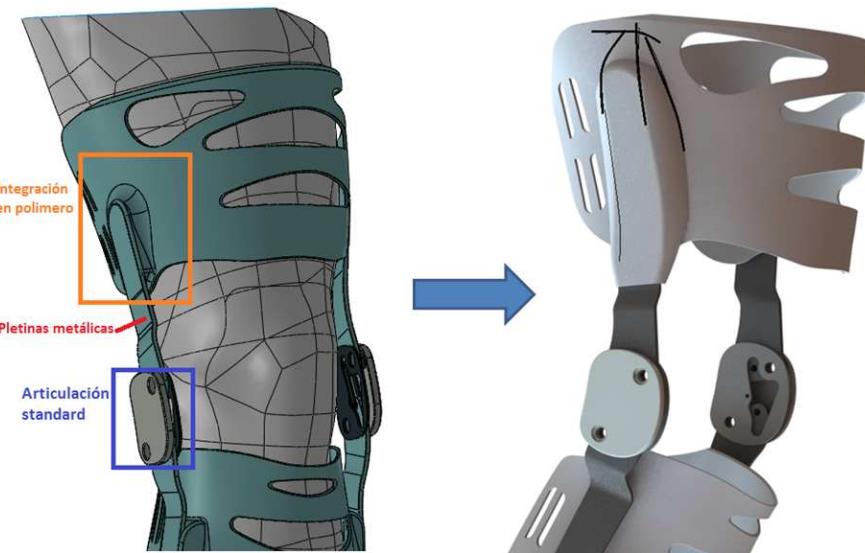


Figura 37. Diseño para fabricación

Demostrador de corsé de sujeción

En el diseño para fabricación se elimina parte del material con el fin de aligerar el corsé dejando siempre un contorno y refuerzos lo suficientemente gruesos para favorecer la comodidad del mismo. Además de ligereza, se busca un diseño que mejore la transpirabilidad.

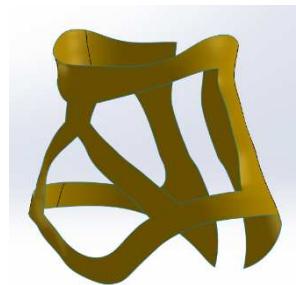


Figura 38. Diseño inicial para fabricación

Una vez definido el diseño inicial con las zonas que contienen material y las que están huecas es necesario dividirlo en partes que quepan en una bandeja de fabricación y aumentar el empaquetamiento de piezas en la máquina, así como diseñar las zonas de unión ya sean rígidas como flexibles.

A continuación se muestra el diseño inicial del corsé dividido en cuatro partes que se ensamblan posteriormente.

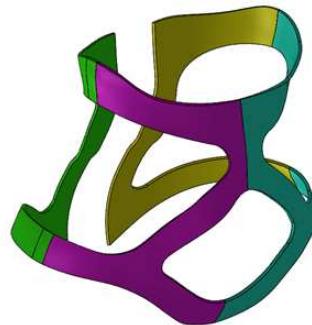


Figura 39. Corsé dividido en 4 partes

Con el fin de obtener el máximo empaque del corsé en la máquina de fabricación, se ha dividido en 12 tramos diferentes siendo el diseño de dichas uniones el rediseño más complicado del producto.



Figura 40. Diseño en detalle del corsé

6. Proceso de fabricación

Demostrador de rodillera para osteoartritis

Las pletinas metálicas de la rodillera se fabrican en la aleación de Titanio, TiAl64V mediante la tecnología Electron Beam Melting (EBM). Las partes poliméricas se fabrican con la tecnología SLS en poliamida PA650.

Demostrador de corsé de sujeción

La tecnología seleccionada para la fabricación de estos demostradores es la SLS y el material PA650.

7. Post-proceso y acabado del producto

Demostrador de rodillera para osteoartritis

Las piezas metálicas se extraen de la máquina y se arenan con el propio polvo de titanio para evitar la contaminación, de este modo se elimina el polvo adherido a la superficie. Además, se realiza el pulido de la superficie para suavizar y garantizar su encaje con la articulación estándar.

Las piezas poliméricas se extraen de la máquina y se limpian minuciosamente para eliminar todo el polvo suelto que queda en la superficie, además se introducen las piezas en una arenadora que contiene chips cerámicos para eliminar las partículas de polvo adherido y suavizar la superficie.

Finalmente, se ensamblan todas las partes que conforman la rodillera y se incluyen los tejidos elásticos que permiten la correcta adaptación de la rodillera al usuario.

Demostrador de corsé de sujeción

Una vez fabricadas las piezas que conforman el corsé, se extraen de la máquina y se limpian minuciosamente para eliminar todo el polvo suelto que queda en la superficie, además se introducen las piezas en una arenadora que contiene chips cerámicos para eliminar las partículas de polvo adherido y suavizar la superficie. Finalmente, será necesario ensamblar todas las partes e incluir los tejidos elásticos que permiten la correcta adaptación del corsé al usuario.

5. PROTOCOLO DE OPTIMIZACIÓN DE DISEÑO DE PRODUCTOS

Si durante el diseño se tiene en cuenta el comportamiento del producto junto con las características de los procesos de fabricación, es posible reducir el material de ciertas zonas que no tienen que soportar cargar o que no forman parte del funcionamiento de dicho producto, obteniendo diseños optimizados adaptados a la funcionalidad del producto.

Actualmente están apareciendo nuevos software de ayuda al diseño que permite la optimización de diseños en función del comportamiento del producto, como es el software Optistruct¹⁰ y el software SolidThinking Inspire¹¹. Este tipo de software de optimización es muy adecuado para reducir al máximo el material que conforma un producto garantizando siempre el correcto comportamiento del mismo. La gran evolución que están teniendo ese tipo de softwares se debe fundamentalmente al uso de las tecnologías de fabricación aditiva que dotan de mayor libertad en cuanto a geometrías.

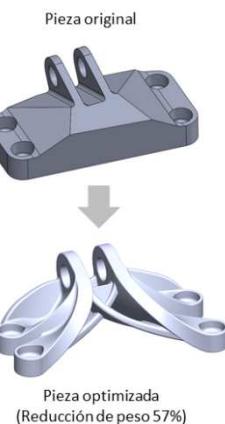


Figura 41. Ejemplo de optimización



Altair's solidThinking Inspire can be used to 1. import or sketch a part, 2. defeature it, 3. assign materials and loads, and 4. then generate an ideal shape with the click of a button using mathematical optimization. Once a shape has been optimized, Inspire can help 5. confirm the part's performance so that the part can be 6. refined in a CAD program.

Figura 42. Ejemplo de optimización realizada con software OptiStruct

¹⁰ <http://www.altairhyperworks.com/product/OptiStruct>

¹¹ <http://www.altairhyperworks.com/product/solidThinking-Inspire>

Tanto el OptiStruct como el Inspire forman parte de una plataforma de software muy especializado denominada Altairhyperworks. La diferencia entre ellos es que el software Inspire es una simplificación del OptiStruct donde es posible optimizar la mayoría de los productos en función de un comportamiento mecánico de cargas más habituales. En el caso de tener que optimizar productos sometidos a unas condiciones severas tanto mecánicas como térmicas sería necesario utilizar el OptiStruct. El software Inspire dispone de 2 modos de optimización y el OptiStruct de 6.

El protocolo de optimización desarrollado se centra en el uso del software Inspire como motor del propio proceso de optimización. A grandes rasgos, la optimización de un producto se basa en cinco grandes actividades:

1. Definir en el fichero 3D de la pieza las zonas que no deben modificarse (zona no editable como son agujeros, zonas en contacto con otros elementos) y la zona de diseño (en esta área se permite eliminar material).
2. Analizar la pieza para conocer exactamente a qué tensiones se ve sometida la pieza durante su vida.
3. Optimizar la pieza en función de un determinado criterio (mínima masa, máxima rigidez) y en función de las cargas.
4. Suavizar la geometría resultante (con otro software como por ejemplo Evolve¹² u otro CAD).
5. Validación de la nueva geometría mediante un cálculo resistente.

A continuación muestra un esquema del protocolo de optimización desarrollado basado en el software de optimización de la plataforma Hyperworks.

¹² <http://www.hyperworks.com.mx/product/solidThinking-Evolve>

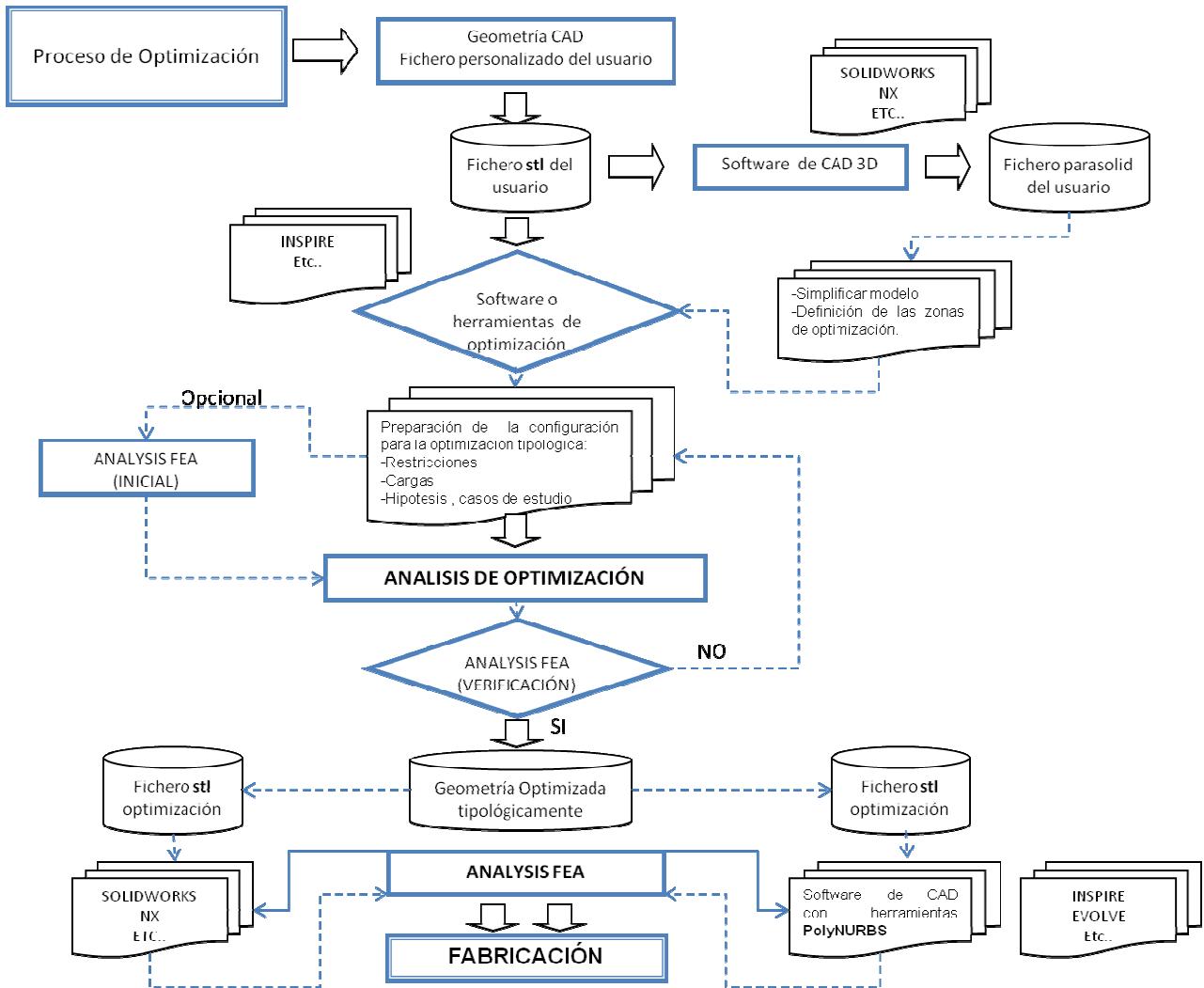


Figura 43. Esquema protocolo de optimización

A continuación se muestran en detalle los pasos generales del protocolo de optimización:

- Geometría inicial (Fichero de partida)
- Tratamiento de simplificación del fichero de partida
- Preparación del modelo para la optimización
- Definición de los parámetros de optimización
- Análisis del diseño optimizado
- Modelado de la geometría final

Se ha generado un protocolo de optimización general de productos. El proceso de optimización se aplica fundamentalmente a productos con mucho volumen con el fin de obtener productos más ligeros donde el material que lo conforma se encuentra colocado en las zonas adecuadas para soportar las cargas a las que se ve sometido.

En función del tipo de producto tendrá más o menos sentido el proceso de optimización.

5.1. GEOMETRÍA INICIAL

La geometría inicial obtenida del usuario se almacena en formato STL. Este formato está basado en definir las superficies mediante triángulos.

Este tipo de formato tiene dos inconvenientes. El número de elementos que necesita tiende a ser elevado para que la superficie quede bien definida. Esto se puede comprobar en la imagen a continuación. Dada una superficie esférica con una transición a una zona cilíndrica se observa cómo influye la cantidad de elementos triangulares de superficie definidos. Además, para una misma calidad de superficie en la zona esférica utiliza muchos más elementos que la zona cilíndrica.

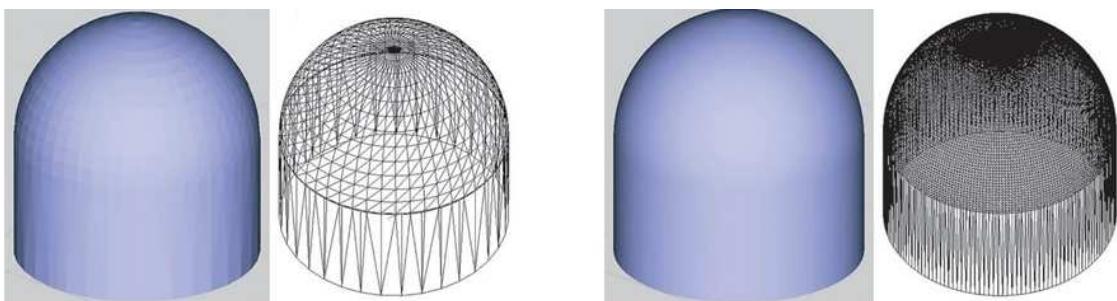


Figura 44. Diferencia de calidad en formato STL. Fuente: <http://www.javelin-tech.com/>

En la siguiente imagen se puede ver la diferencia de calidad con respecto a una esfera. El hecho de tener más elementos mejora la calidad, pero dificultará el procesado del modelo si se trata de un modelo considerablemente grande. Este es uno de los motivos por los que también existe la necesidad de simplificar los modelos en la medida de lo posible.

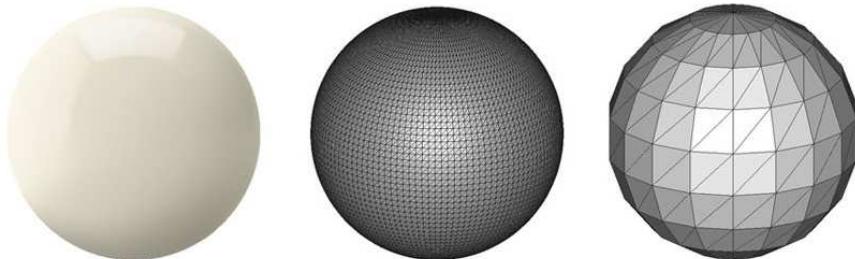


Figura 45. Comparativa esfera con STL. Fuente: <https://i.materialise.com>

Otros problemas asociados al modelo CAD son los errores en la superficie. En ocasiones los modelos son complejos o no son de buena calidad y contienen errores. Como en el caso que se muestra en la imagen pueden aparecer huecos en la superficie exterior lo que impide poder definir un cuerpo completamente cerrado. Es necesario reparar primero el modelo CAD para seguir trabajando con el software de diseño 3D y de optimización.



Figura 46. Errores modelo STL. Fuente: www.meshrepair.org

En el caso de la suela también se parte de un modelo de sólido adaptado a la geometría del pie del usuario que al pasar a formato STL necesita una cantidad de triángulos prohibitiva para la fase de preparación del diseño y la fase de optimización.



Figura 47. Modelo STL suela.

De ahora en adelante se va a especificar el protocolo de optimización para el caso de la suela, puesto que, como se ha mencionado anteriormente, es el único demostrador que requiere de optimización.

5.2. REPARACIÓN DEL MODELO

Como se ha explicado en el apartado anterior, se necesita un modelo sin errores para poder pasar a la fase de preparación de la geometría y a la fase de optimización.

Para ello se puede trabajar en el software de diseño 3D Solidworks. El objetivo es en primer lugar corregir los huecos que pueda existir en la superficie. Por lo general esto no debe ocurrir, pero el software da la opción de generar superficies y convertir la envoltura de caras en un sólido.

En segundo lugar, se persigue el objetivo de disminuir el número de triángulos y mantener la morfología que define la pisada. Este supuesto será habitual y existen distintas formas de abordarlo.

De forma rápida se puede eliminar puntualmente una o varias caras o “triángulos” del modelo. Es una herramienta sencilla y puede ser muy útil para corregir errores sencillos o hacer simplificaciones pero tiene sus inconvenientes.

En el caso de superficies lisas como en el siguiente ejemplo, se pueden eliminar superficies triangulares con facilidad y las superficies resultantes definen la pieza de forma muy similar a las superficies iniciales.

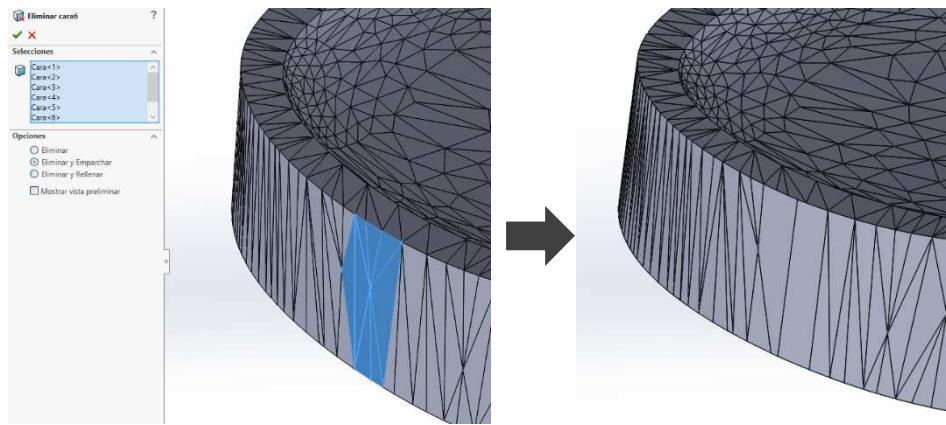


Figura 48. Eliminación de caras zona lisa.

En el caso de superficies más complejas, el resultado no es el óptimo a pesar de que existen dos opciones que permiten adaptar el resultado. La primera opción se trata simplemente de eliminar la cara y cerrar el cuerpo con superficies planas. Con este método se generan esquinas en las aristas y se pierde la curvatura del interior de la superficie.

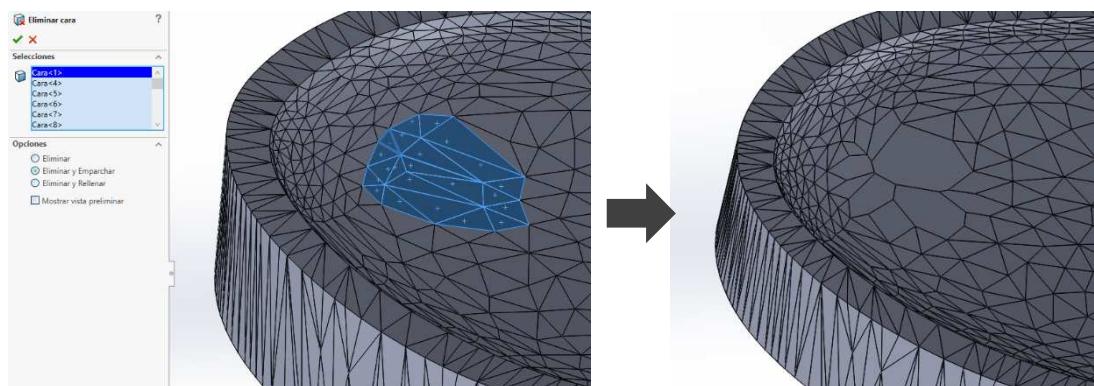


Figura 49. Eliminación caras zona desnivelada.

La segunda opción mantiene la superficie tangente en las aristas límite de la selección, pero como contrapartida modifica la curvatura interior para conseguir dicha continuidad de la tangencia. Esto puede producir deformaciones acusadas en el modelo.

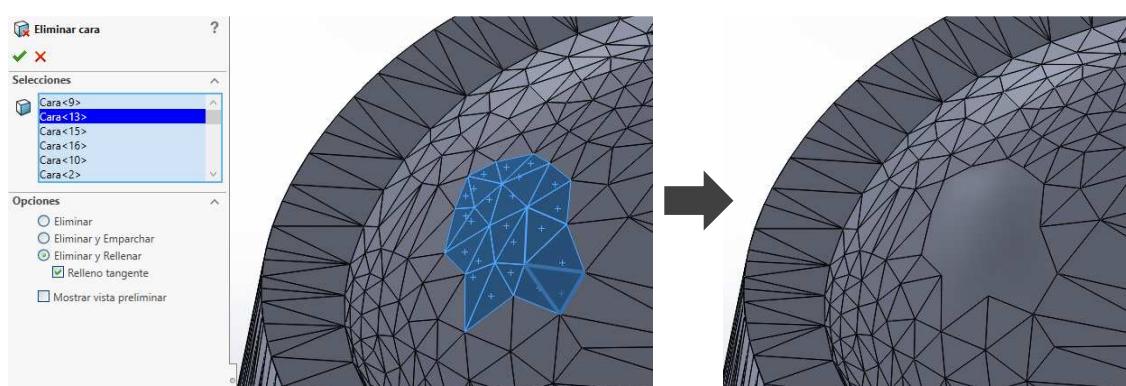


Figura 50. Eliminación caras con relleno tangente en zona desnivelada.

Dado que eliminar las superficies es costoso y los resultados no siempre son los deseados, también existe la posibilidad de realizar una serie de cortes del cuerpo para extraer la silueta y generar la superficie que las envuelve.

Con este proceso se simplifica de una manera generalizada y rápida toda la geometría. El detalle y la representatividad del modelo generado dependen de la cantidad de cortes que se realicen. Esto también está directamente relacionado con el número de superficies y la ligereza del modelo. En este punto hay que llegar a una relación de compromiso entre mantener la forma necesaria del modelo inicial y corregir y simplificar su geometría.

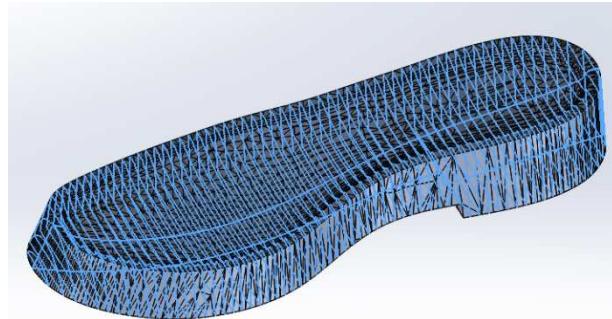


Figura 51. Extracción de siluetas modelo STL

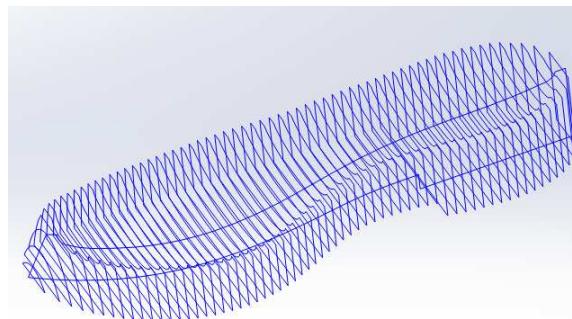


Figura 52. Secciones para generar el modelo simplificado.

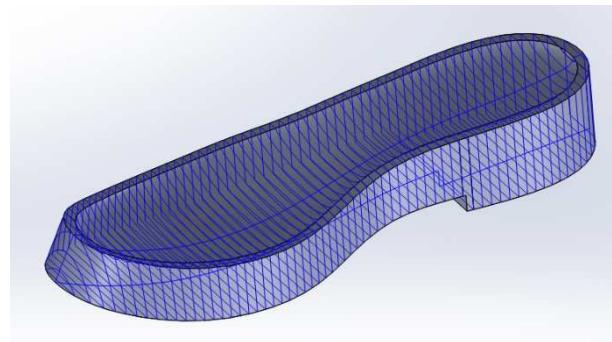


Figura 53. Modelo simplificado.

5.3. PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Se simplifica la geometría para su correcto tratamiento numérico, teniendo en mente la premisa de que toda simplificación ha de ser del lado de la seguridad. Su inclusión

en el modelo no afecta a los resultados en la optimización, y a la par que su eliminación, constituye una aproximación más conservadora.

Las herramientas utilizadas en SolidThinking Inspire para simplificar la geometría se pueden emplear para la eliminación de elementos que, normalmente, impiden que se modifique con facilidad en un espacio de diseño utilizado para la optimización.

La geometría debe conservar los elementos necesarios para aplicar las restricciones y las cargas pero dejar el máximo espacio posible dentro de los límites de diseño para que la optimización tenga libertad total al proponer la geometría optimizada.

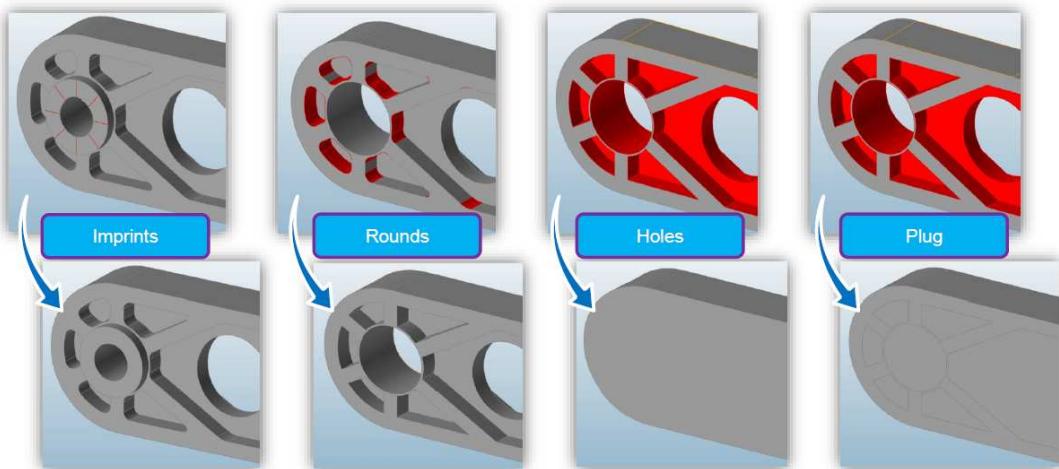


Figura 54. Herramientas para la simplificación

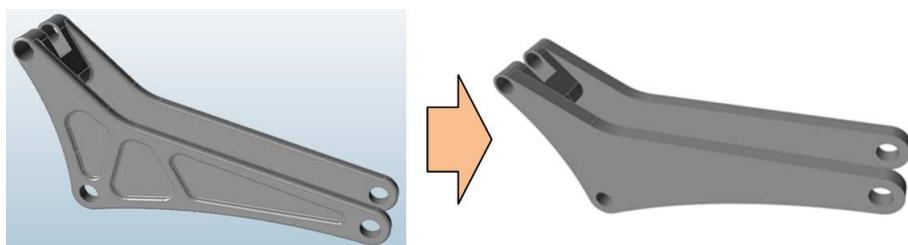


Figura 55. Fase de simplificación

Eliminar aéreas redondeadas y curvas

Del mismo modo que se realiza en las cavidades y los orificios, se pueden eliminar los redondeos de las piezas.

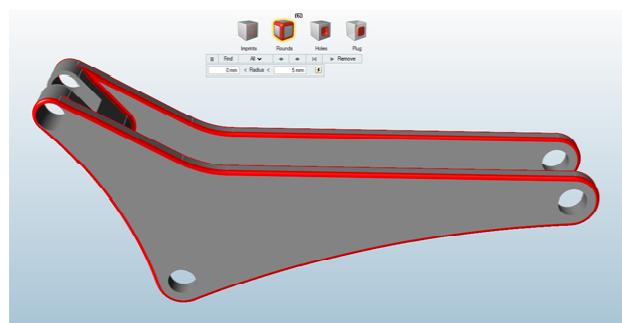


Figura 56. Preselección de redondeos

Simplificar

En general las herramientas comentadas sirven para modificar la geometría con el objetivo final de simplificar el volumen de diseño.

Es conveniente eliminar las formas complejas en la geometría para facilitar el cálculo y la aplicación de cargas y restricciones.

En el caso de una suela se recomienda eliminar el relieve inferior.

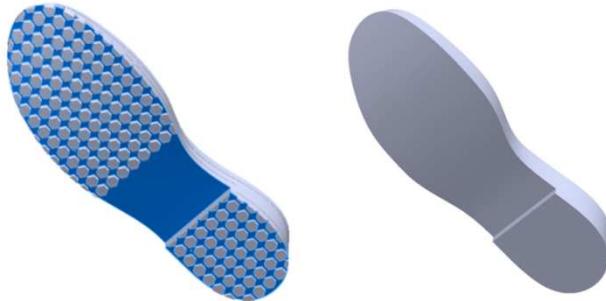


Figura 57. Suela simplificada

5.4. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN

La preparación del cálculo se puede dividir entre la aplicación de cargas y la aplicación de restricciones de distintos tipos. Además pueden existir varios casos con combinaciones diferentes. Por otra parte, en esta fase es necesario preparar la geometría previamente.

Definición del espacio deseñable y no deseñable

Es necesario definir el espacio de diseño para que el software tenga delimitada la geometría que puede modificar. Además para poder aplicar las cargas y restricciones se necesitan zonas no deseñables para garantizar su aplicación.

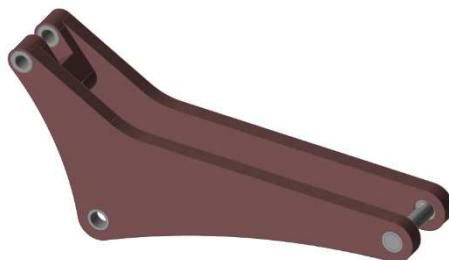


Figura 58. Definición de espacio deseñable

En la imagen se pueden ver las zonas no deseñables en gris y las zonas deseñables en marrón. Es decir, en los agujeros donde se limitará el movimiento o aplicarán las cargas se considera no deseñable y en el resto de la geometría previamente simplificada será el software el que proponga la optimización del producto.



Figura 59. Definición de espacio diseñable en una suela

Aplicación de restricciones

Una vez definidas las zonas no deseables se pueden establecer en ellas las restricciones. Estas deben tratar de reflejar lo mejor posible las condiciones reales de trabajo de la pieza para que el resultado de la optimización y el análisis sean correctos.

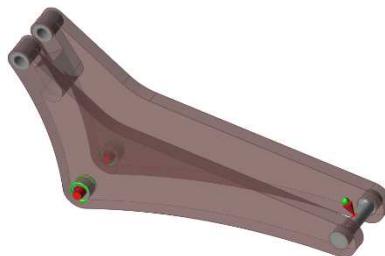


Figura 60. Restricciones aplicadas.



Figura 61. Restricciones aplicadas en la suela

Aplicación de cargas

De igual manera que al aplicar las restricciones se generan las cargas. En el caso del ejemplo se tienen dos casos de carga en los que cambia la dirección de la fuerza pero se pueden tener otros tipos de carga, así como valores distintos de carga o incluso restricciones distintas dependiendo de cada caso.



Figura 62. Aplicación de la fuerza

En el caso de la suela se tiene una distribución de presiones en la superficie superior. Este caso necesita preparar el modelo para delimitar las zonas con distinta presión. Se superpone la distribución de presiones al modelo y se dibujan las líneas que delimitan zonas con el mismo rango de presiones.

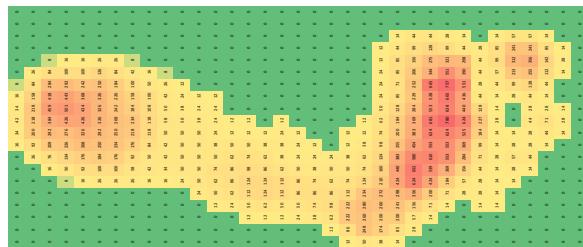


Figura 63. Distribución de presiones

Se dividen las caras con las líneas obtenidas y en las superficies resultantes se aplican las presiones máximas del rango como se puede observar en la siguiente imagen.

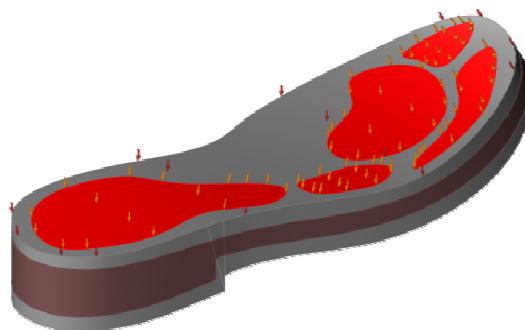


Figura 64. Aplicación de presiones en el modelo.

5.5. OPTIMIZACIÓN

Una vez que se ha preparado el modelo de cálculo se puede optimizar el componente priorizando la reducción de masa o el cumplimiento de un factor de seguridad. La optimización puede generar geometría incompleta, o dependiendo de la tecnología de fabricación, pueden existir incompatibilidades en la fabricación con el diseño. Por tanto, los resultados son indicativos del diseño optimizado y es una guía para que en la fase de generación de la geometría final se tome la forma definitiva.



Figura 65. Aplicación de presiones en el modelo

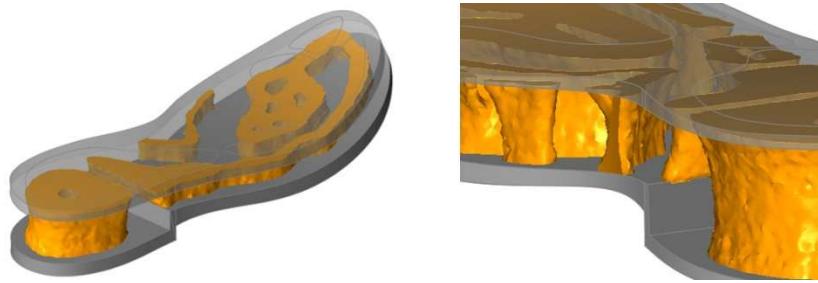


Figura 66. Optimización de la suela

5.6. ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA OPTIMIZADA

Después de la optimización se puede realizar un análisis de la geometría para verificar que se cumplan las necesidades de resistencia o deformación. También sirve para identificar zonas del diseño a mejorar o para proponer cambios en el modelo inicial de cálculo.

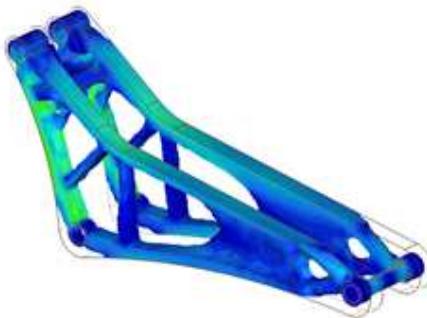


Figura 67. Resultado del análisis de la optimización

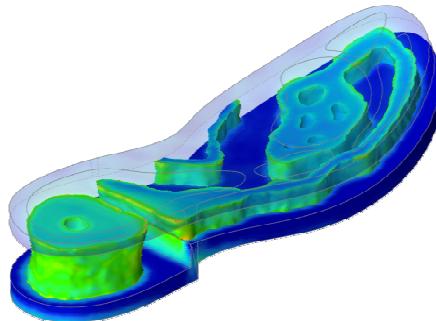


Figura 68. Resultado del análisis de la optimización de una suela

5.7. GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA FINAL Y COMPROBACIÓN

Utilizando las herramientas que ofrece Inspire se puede procesar la geometría resultante de la optimización y generar unos sólidos suavizados. Esta geometría final se realiza acorde con la optimización pero queda sujeta a las restricciones impuestas por el proceso de fabricación o a la interpretación del diseñador. Posteriormente al modelado final se debe comprobar que se cumplen los requisitos de tensiones o deformaciones.

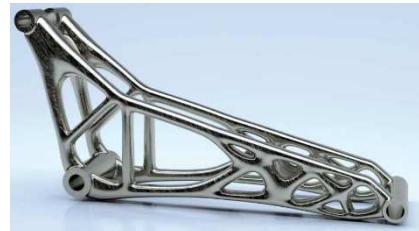


Figura 69. Geometría final optimizada



Figura 70. Geometría final optimizada de la suela

Como ya se ha comentado, después del rediseño queda realizar el cálculo de comprobación y verificar que los resultados cumplen los requisitos esperados.

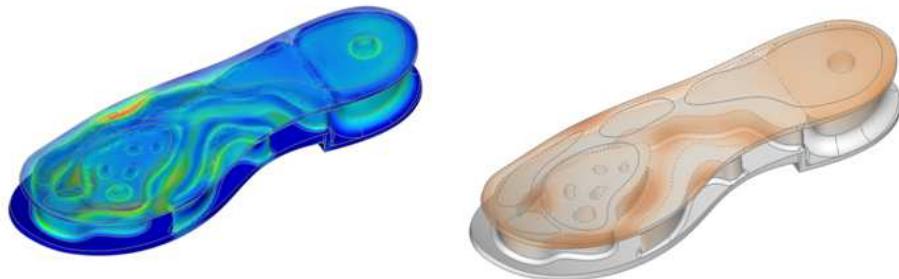


Figura 71. Validación final de la suela optimizada