UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

GENERALITAT VALENCIANA

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

INESCOP
INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL CALZADO Y CONEXAS

EXPEDIENTE	IMDEEA/2017/18
ACRÓNIMO	FUNCGOODS
PROGRAMA	Proyectos de I+D de carácter no económico realizados en cooperación con empresas
TÍTULO DEL PROYECTO	METODOLOGÍA PARA FUNCIONALIZACIÓN DE BIENES DE CONSUMO (CALZADO) MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

Entregable E3.1
INFORME DE CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS PROTOTIPOS FABRICADOS.

ÍNDICE

1. Descripción del entregable 3
2. Diseño, fabricación y caracterización de pisos de calzado funcionalizados en cuanto a propiedades de friccción 4
2.1. Introducción 4
2.2. Algoritmos de creación de texturas 4
2.3. Técnicas de filtrado para texturas 9
2.4. Biblioteca de texturas 12
2.5. Técnicas auxiliares de texturizado 15
2.6. Diseño y fabricación de prototipos de pisos funcionalizados 19
2.7. Caracterización de propiedades de fricción 20

3. Diseño, fabricación y caracterización de pisos de calzado funcionalizados en cuanto a propiedades de amortiguación 25
3.1. Introducción 25
3.2. Estructuras internas generables de manera automatizada 25
3.3. Diseño y fabricación de prototipos pisos funcionalizados 30
3.4. Caracterización de propiedades de amortiguación 35

4. Diseño, fabricación y caracterización de punteras para funcionalizar las propiedades de dureza del zapato 39
4.1. Introducción 39
4.2. Diseño y fabricación de punteras de refuerzo 39
4.3. Caracterización de resistencia de punteras 41

5. Diseño, fabricación y caracterización de tacones de calzado funcionalizados en cuanto a dureza 47
5.1. Introducción 47
5.2. Estructuras de refuerzo generables de manera automatizada 47
5.3. Diseño y fabricación de tacones funcionalizados.. 49
5.4. Caracterización de propiedades de dureza en tacones. 53

6. Directrices de impresión 3D por FDM para elementos funcionalizados 56
6.1. Recomendaciones para la impresión de los elementos funcionalizados 56
6.2. Recomendaciones para evitar problemas comunes de impresión. 64

7. Viabilidad de impresión de prototipos de calzado funcionalizados mediante otras tecnologías de AM 68
7.1. Objetivo. 68
7.2. Problemática de diseño y limitaciones software. 69
7.3. Soluciones adoptadas. 71
7.4. Caso Sneaker. 78
7.5. Caso Zapato Oxford. 81
7.6. Caso Piso Sneaker con SLS. 84

1. Descripción del entregable

Este informe contiene la caracterización de las propiedades anti-resbalamiento, de amortiguación y de dureza adquiridas por los diferentes prototipos de componentes de calzado funcionalizados. Adicionalmente, se ha detallado la secuencia de tareas seguida en cada caso para obtener dichos prototipos, con el objetivo de que la información que refleja este entregable pueda ser utilizada como base de conocimiento que pueda ser utilizable por las empresas interesadas en utilizar la impresión 3D para desarrollar sus productos. En la secuencia de tareas seguida, se incluye la realización la realización de desarrollos algorítmicos destinados a llevar a cabo la funcionalización de los prototipos de manera automatizada, en la medida de lo posible, a partir de un conjunto de parámetros de entrada; así como el diseño de prototipos, reflejando el conjunto de criterios utilizados; y la fabricación a través de impresoras 3D de fusión de filamento (FDM). A través de la experiencia lograda a lo largo de la ejecución de estas tareas, se ha establecido una metodología para imprimir en 3D cada uno de los diferentes tipos de elementos, así como una serie de consideraciones para solucionar las principales dificultades derivadas de la fabricación mediante dicha tecnología.

En un último apartado, se ha analizado la viabilidad de la utilización de la tecnología de fabricación aditiva *polyjet* para la fabricación de prototipos de calzados funcionalizados. Esta tecnología tiene la ventaja de poder combinar en un mismo objeto, materiales con distintas propiedades como color, flexibilidad y dureza; así como trabajar con una paleta de colores prácticamente ilimitada, y a una resolución de 14 micras, muy superior a la que utilizar la impresión por FDM. Por su capacidad para fabricar objetos de forma realista, se ha considerado oportuno su viabilidad para fabricar prototipos completos de calzado, así la forma en la que se pueden adaptar las metodologías de funcionalización desarrolladas a la impresión mediante *polyjet*.

2. Diseño, fabricación y caracterización de pisos de calzado funcionalizados en cuanto a propiedades de fricción.

2.1 Introducción

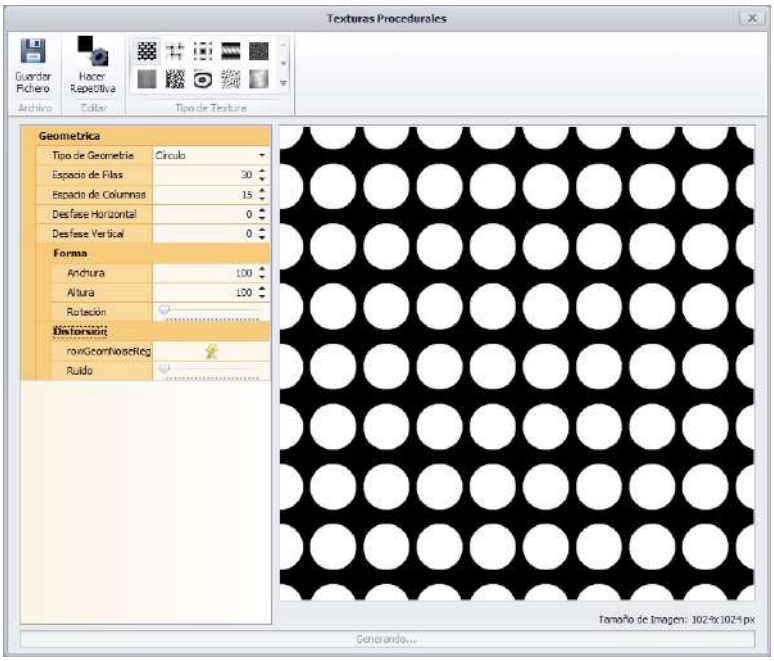
En el apartado 2 del presente entregable se detalla la secuencia de tareas llevadas a cabo que integran la metodología para diseñar y fabricar mediante impresión 3D prototipos de pisos de calzado funcionalizados a través de modificar sus características de fricción, de acuerdo a las especificaciones establecidas a través de la fase de análisis desarrollada en la tarea PT2.1 y reflejada en el entregable E2.1. Este apartado se estructura de la siguiente manera: En la sección 2.2 se describen las técnicas de generación automatizada de texturas 2D que han sido desarrolladas. En la sección 2.3, se describen los filtros implementados para la adecuación de texturas orgánicas para texturizado 3D. En la sección 2.4 se caracteriza la biblioteca de texturas generada. En la sección 2.5, se describen las técnicas auxiliares de texturizado 3D desarrolladas para paliar los casos en los que el texturizado básico no produce un resultado óptimo. En el apartado 2.6, se documenta el proceso de diseño y fabricación de muestras de pisos con texturizado 3D; y finalmente, en el apartado 2.6, se caracterizan los prototipos diseñados y se obtienen conclusiones.

2.2 Algoritmos de creación de texturas.

En una primera instancia, se ha llevado a cabo el desarrollo de los algoritmos necesarios para automatizar la creación de texturas 2D a partir de cuyo dibujo se genera el relieve tridimensional sobre la superficie del piso. Con el objetivo de simplificar la labor generación de las texturas que compondrán la biblioteca, y que se aplicarán a los prototipos diseñados, se han puesto en funcionamiento tres técnicas: la procedural, mediante la cual se crean algorítmicamente patrones gráficos en base a una serie de parámetros de entrada; a partir de líneas 2D, con las que se crean texturas binarias dependiendo de si nos encontramos en el interior o el exterior de la figura, y que además posteriormente puede aplicárseles un filtro de gradiente para dotarlas de cierto relieve; y a partir de figuras 3D, en las que el relieve de la textura ya viene definido por el propio objeto.

a) Texturas procedurales.

Para llevar a cabo la creación de texturas procedurales se ha desarrollado un editor específico, el cual permite seleccionar el tipo de textura, mostrar los parámetros de creación, los cuales varían en función del tipo de textura seleccionada, y visualizar un preview de la textura generada. Cada tipo de textura se corresponde con cada una de las diferentes técnicas algorítmicas que han sido desarrolladas.



Vista general del editor de texturizado.

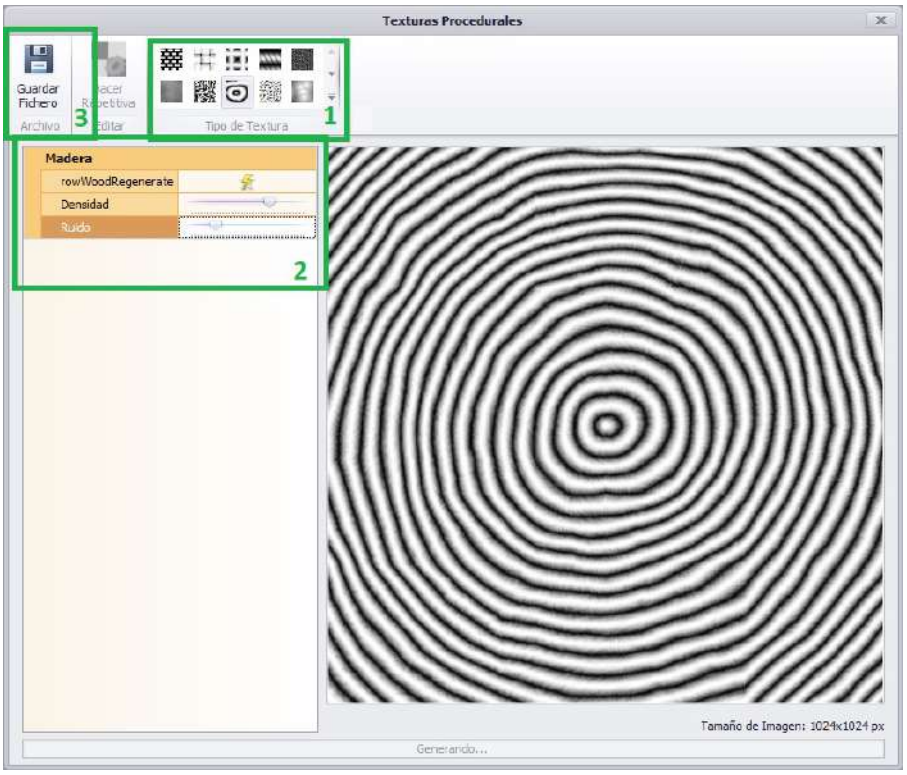
Los diferentes tipos de patrones texturales que han sido finalmente implementados, además del conjunto de parámetros de creación para cada uno de ellos, coinciden íntegramente con los que fueron definidos en la fase de análisis, y reflejados en detalle en el apartado 2.3 del entregable E2.1. Estos son: *Geométrico, Entramado, Tuberías, Fibras, Tela, Ruido, Mármol, Madera, Grietas, Celular redondeado, Celular pirámides, Celular tecnológico y Celular grietas.*

El editor desarrollado permite, de forma sencilla y en únicamente tres pasos, generar una estructura que se ajuste a determinados requisitos. Esta secuencia de uso consiste en:

1. *Selección del tipo de patrón*. En el editor aparece una lista de selección para la que cada botón contiene una previsualización representativa del tipo de patrón que representa para que el usuario pueda determinar cuál necesita sin necesidad de conocer cada uno de los diferentes tipos de antemano.

2. *Selección de parámetros de texturizado*. El siguiente paso consiste en seleccionar los parámetros de creación de la textura. Con cada cambio de parámetro, la previsualización de la textura es refrescada. En los casos que el tipo de textura lo permita, se ofrecerá al usuario la posibilidad de generar una textura que pueda repetirse mediante mosaico sin que se aprecien costuras entre las diferentes instancias de la textura.

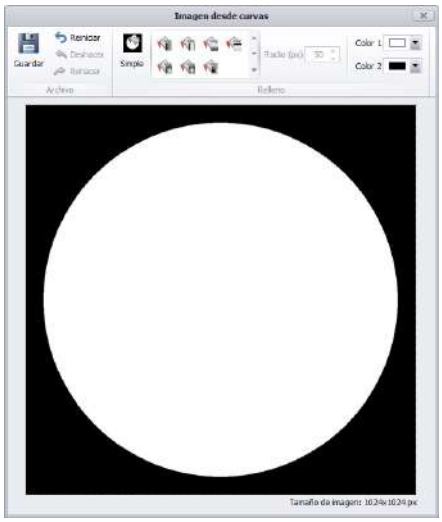
3. *Exportación de textura.* Una vez la textura sea la deseada, ésta se exportará pudiendo elegir entre los formatos gráficos JPG y PNG.



Interfaz donde se indica la secuencia de 3 pasos para generar textura procedural. En el ejemplo, textura de tipo madera con 66% de densidad y 20% de ruido.

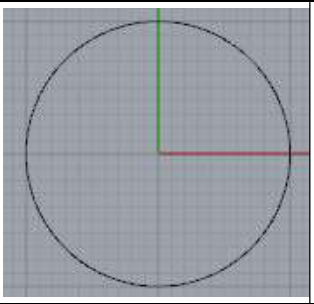
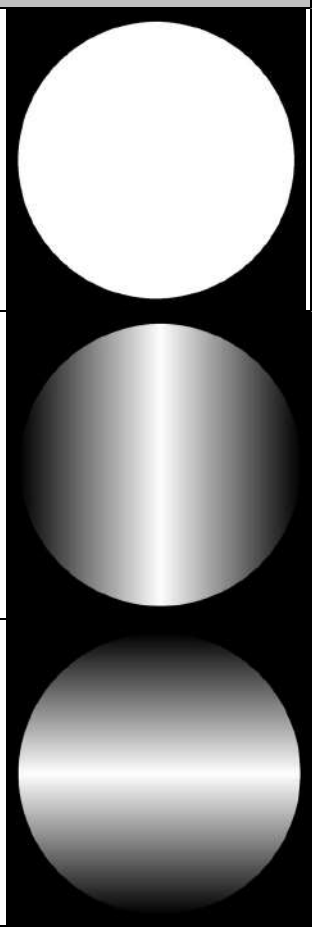
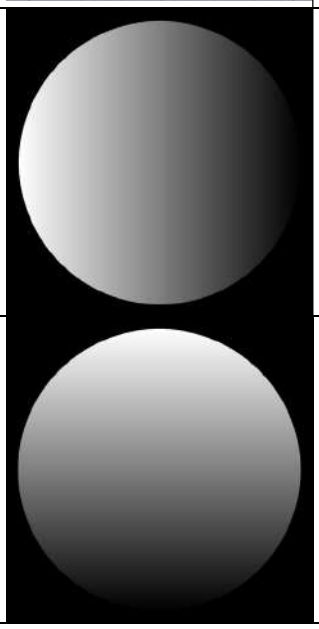
b) Texturas desde curvas 2D.

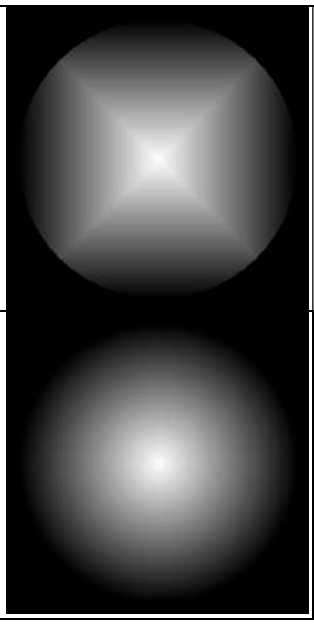
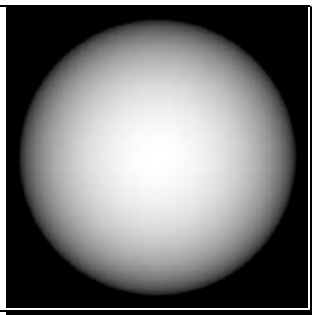
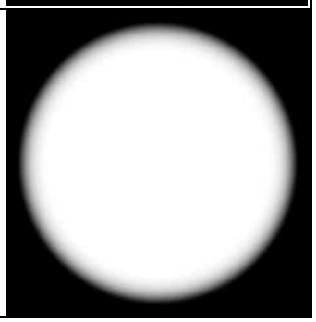
Para la creación de texturas mediante curvas 2D, se parte de la selección de una curva o conjunto de curvas cerradas que ha diseñado previamente el usuario. El procedimiento consiste en crear a partir de ellas una textura base binaria donde la zona interior de las curvas aparece en blanco y la exterior en negro, y además, mostrar al usuario un editor que permite dotar de diferentes tipos de degradado a la textura binaria generada. Además de modificar el tipo de degradado, este editor permite seleccionar el nivel de gris de origen y de destino, y si el degradado se aplica a una curva en particular o a todas. Al igual que en el caso de las texturas procedurales, el resultado obtenido se puede exportar a formato JPG o PNG.



Vista general del editor de degradado para textura generada en base a curva 2D.

En la tabla que se muestra a continuación, se ilustran los diferentes tipos de degradado implementado sobre una sencilla textura de ejemplo generada a partir de un círculo. El tono de degradado aplicado es de blanco total a negro total (255 a 0) en todos los casos.

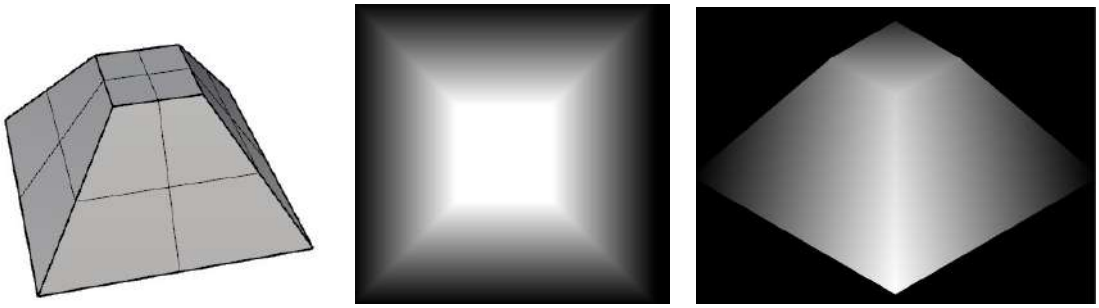
Tipo de degradado	Resultado	Tipo de degradado	Resultado
Curva de origen		Ninguno	
Lineal horizontal		Bilineal horizontal	
Lineal vertical		Bilineal vertical	

Cuadrático		Radial	
Cónico		Contorno (radio 100px)	

Ejemplos de tipos de degradado implementados para textura generadas en base a curva.

c) Texturas desde objetos 3D.

En el caso de la creación de texturas a partir de objetos 3D, se parte de un objeto o conjunto de objetos 3D previamente diseñado por el usuario para crear una textura a partir del mapa de distancias de dicho objeto 3D respecto a la perspectiva del punto de vista activo en Rhinoceros, correspondiendo la distancia máxima con 0 (negro), y la distancia mínima con 1 (blanco). Al ejecutar el comando, se obtiene una previsualización de la textura la cual se puede exportar si se corresponde con el resultado deseado por el usuario. A continuación, se ilustra un ejemplo de un elemento 3D de origen, y la textura resultante obtenida desde un punto de vista cenital e isométrico respectivamente.



Ejemplos de creación de texturas en base a objeto 3D: Objeto de origen, textura desde vista cenital y textura desde vista isométrica.

2.3 Técnicas de filtrado para texturas.

Existen casos en los que no sería deseable utilizar una textura generada algorítmicamente lo que resultaría en un texturizado basado en patrones repetitivos, sino que por el contrario, se desee dotar al elemento diseñado de un texturizado orgánico. En este caso, la textura ha sido obtenida a partir de un material real, y puede ser necesario aplicarle un determinado preprocesado en forma de filtros para ésta sea apta para generar un texturizado 3D correcto.

En este apartado, se muestran las técnicas de filtrado que han sido desarrolladas como parte de la metodología de funcionalización de propiedades de fricción, y que fueron definidas en la fase de análisis. Aunque algunas de estas técnicas están pensadas exclusivamente para texturas orgánicas, como pueden ser la *ecualización de brillos mediante luz dirigida* o la *escayola de escala de grises*; otros como *difuminar con pinceladas,* o *grietas*, pueden utilizados como complemento a texturas generadas mediante las técnicas descritas en el apartado 2.2.

a) *Ecualizar brillo mediante luz dirigida.* Aplica una ecualización de brillo zonalmente, en base a una máscara de degradado. Mediante una serie de parámetros de entrada se varía esta máscara de degradado con el objetivo de poder establecer una ecualización de brillos a medida de cada textura.

   En el ejemplo que a continuación se muestra, se ha llevado a cabo una ecualización de brillo dirigida en dos pasos usando los parámetros que a continuación se detallan.

Ecualización	Resultado
Original	
Eq1: **Tipo**: Vertical **Color origen**: Gris 127 **Color destino**: Gris 191 **Posición intermedia**: 25%	

Eq2: **Tipo**: Oblicuo **Color origen**: Gris 127 **Color destino**: Gris 191 **Posición intermedia**: 66%	

Imagen original, y el resultado de aplicar dos ecualizaciones de manera sucesiva.

b) *Escayola de escala de grises.* Proporciona una apariencia de escayola tridimensional, proporcionando relieve a los elementos que se encuentren en primer plano (más iluminados) aplicando a los píxeles con color superior a un determinado umbral, y ocultando los que se encuentren en el fondo. A continuación se muestra un ejemplo de la aplicación de este filtro, con parámetros *Equilibrio*: 45%, *Suavizado*: 40%, *Luz*: Superior izquierda.

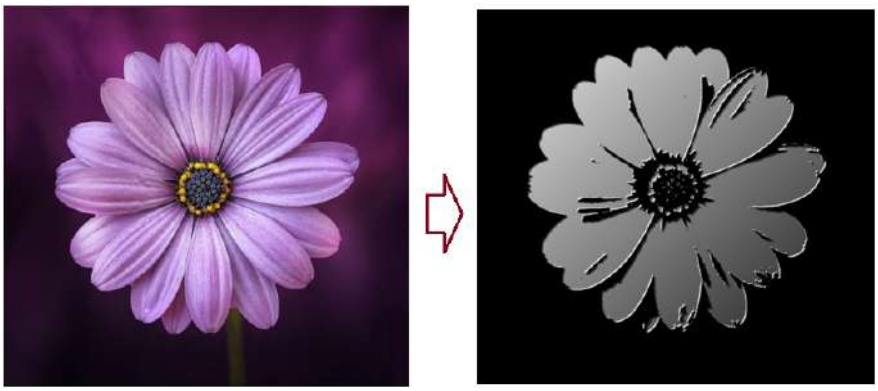


Imagen original, y el resultado de aplicar el filtro de escayola

c) *Difuminar mediante pinceladas.* Detecta los contornos de la textura y los difumina, dando apariencia de dibujados a mano. A continuación se muestra un ejemplo obtenido a partir de aplicar un radio de pincelada de 6 píxels.

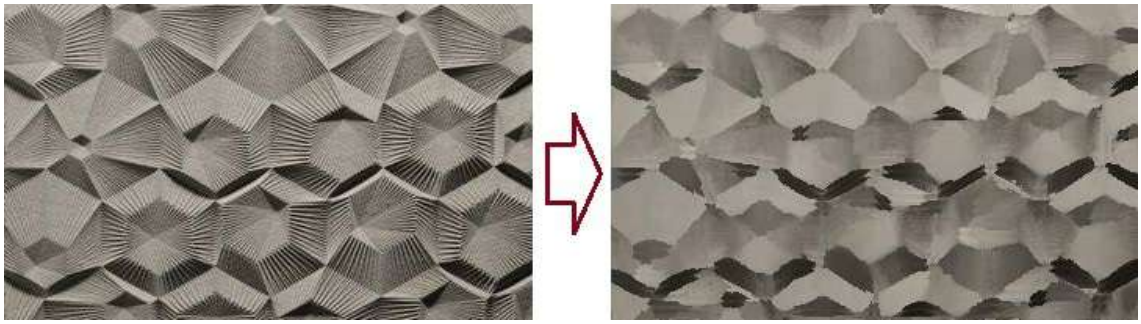


Imagen original, y el resultado de aplicar el filtro de difuminar mediante pinceladas

d) *Tela.* Mediante este filtro, se crea una máscara a partir de los parámetros introducidos al usuario, mediante la cual se varía la tonalidad de la textura para darle la apariencia del relieve de un tejido.

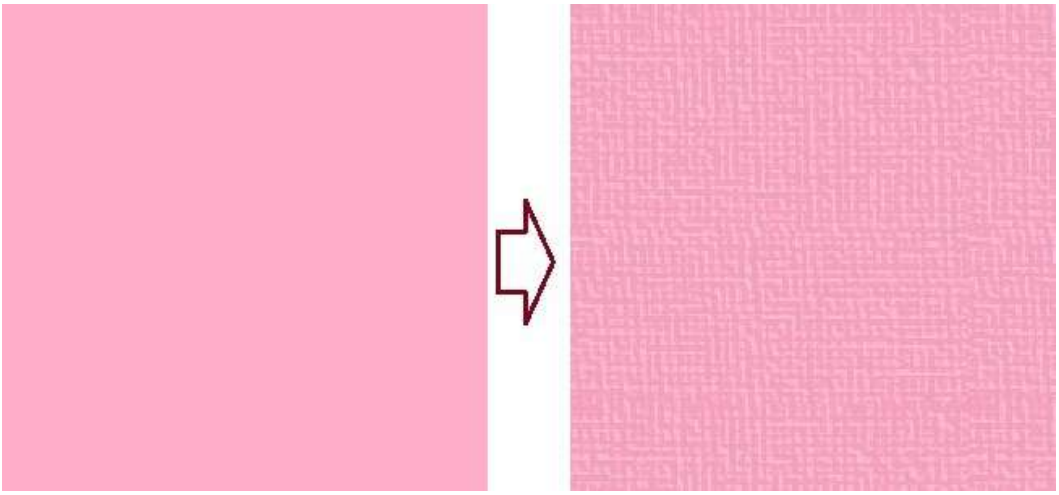


Imagen original, y el resultado de aplicar el filtro tela

e) *Grietas.* De forma similar al anterior filtro, se crea una máscara a partir de los parámetros introducidos al usuario, mediante la cual se varía la tonalidad de la textura para proporcionarle aberturas con forma de grietas.

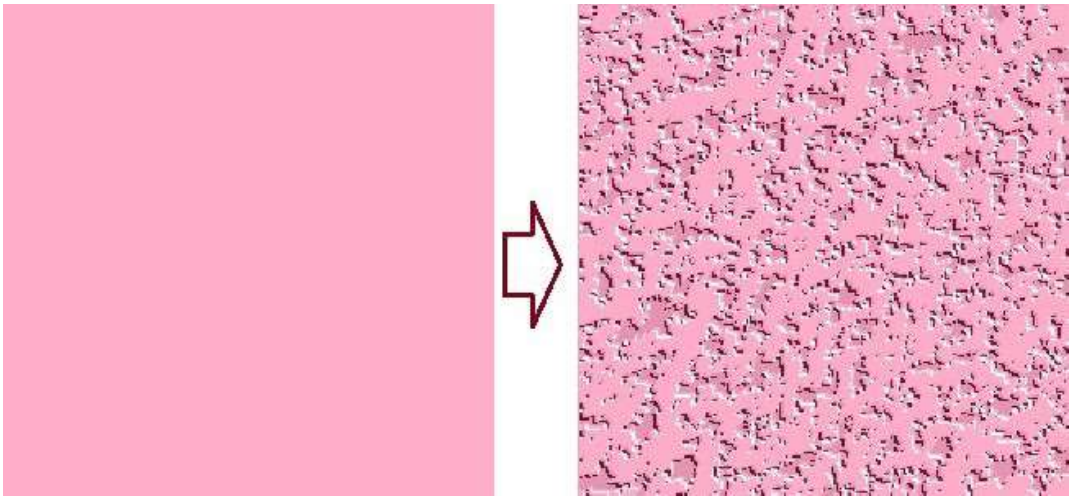


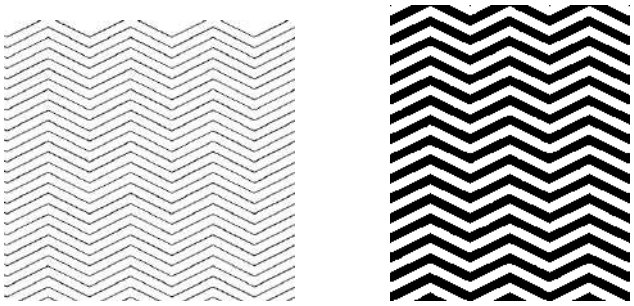
Imagen original, y el resultado de aplicar el filtro tela

2.4 Biblioteca de texturas.

Mediante las técnicas implementadas se ha elaborado una biblioteca de texturas base para emplear en texturizado 3D. Esta biblioteca consta de texturas generadas mediante las técnicas anteriormente descritas, y está formada por:

a) *Texturas Procedurales*: Se han utilizado todos los tipos de texturas procedurales (*fibras*, *tuberías*, *ruido*, etc.) desarrollados, definiendo un mayor número de instancias para los tipos para los que existen más parámetros configurables, como el tipo *geométricas.* Las diferentes texturas generadas de cada tipo pretende ser una muestra representativa de todas las texturas algorítmicas que se podrían crear y serían útiles para texturizado 3D.

b) *Texturas desde curvas 2D.* Se ha diseñado una serie de modelos de curvas 2D que se corresponden con la huella de patrones habituales que es posible encontrar en suelas de calzado. A partir de ellas, se han generado texturas tanto binarias, como con algún filtro de degradado aplicado, a través del cual se les proporciona un aspecto más orgánico y por tanto semejante a los elementos de las suelas de calzado reales.



Patrón de curvas y textura obtenida representando un dibujo habitual en suelas de zapatillas de estilo casual

c) *Texturas desde objetos 3D.* Al igual que con las curvas 2D, se han diseñado un conjunto de objetos 3D simulando una serie de elementos característicos de las suelas de zapatos, como pueden ser diferentes tipos de tacos. A la hora de generar la textura a partir del mapa de distancias, siempre se ha optado por utilizar un punto de vista cenital.

d) *Texturas orgánicas filtradas*. Se ha recopilado un conjunto de texturas con aspecto orgánico, las cuales han sido tanto descargadas de internet, como escaneadas a partir de materiales reales. Sin embargo, en muchos de los casos, estas texturas no son adecuadas para su aplicación directa para texturizado 3D, y en otros, sería conveniente proporcionarles ciertos efectos para enriquecer el relieve generado. Por otra parte, es importante que las texturas sean binarias (blanco-negro), o estén en escala de grises, ya que la información de color es

innecesaria para el texturizado 3D e incluso puede confundir al usuario la hora de elegir la textura pensando en el resultado final que ésta puede ofrecer.

Por todo ello, a las texturas orgánicas que finalmente componen la biblioteca se ha aplicado un conjunto de filtros gráficos, entre los que se incluyen tanto los desarrollados específicamente para el proyecto FUNCGOODS, como otros con los que ya contaban las herramientas de diseño gráfico de INESCOP.

Esta biblioteca de texturas se encuentra registrada en el **Anexo A** del presente documento, junto con, dependiendo del caso, los parámetros que se han usado para generarlas, sus elementos geométricos base, y los filtros que se han aplicado. Cada una de las texturas generadas se ha evaluado a través de su aplicación para texturizado 3D sobre una probeta de 40x40x4mm, y posterior fabricación a través de impresión 3D. Las probetas diseñadas, junto con los parámetros del texturizado aplicado se encuentran registradas en el **Anexo B** del presente documento.

Conjunto de probetas fabricadas con impresión 3D cuya textura aplicada y acabado resultante se han considerado adecuados.

Esta primera evaluación se ha basado únicamente en la inspección visual, sin tener en cuenta aspectos funcionales, y ha servido para descartar aquellas que o bien no producen una rugosidad significativa, o que por tener un nivel de detalle muy elevado, la resolución a la que trabaja la impresora 3D hace imposible su fabricación con una calidad aceptable (ver apartado 6.1). El listado de texturas de la biblioteca que han sido descartadas por estos motivos, es el que se presenta a continuación:

Texturas descartadas	
Procedurales	**Orgánicas filtradas**
CGR_1	Bordado_1
CRE_2	Grano_1
RUI_1	Florespeq_2
RUI_2	PapelArrugado_1
TEL_1	PiedraGris_1
TEL_2	Terciopelo_1
TEL_3	Vinilo_1

Respecto a las texturas obtenidas a partir de curvas 2D y objetos 3D, todas las impresiones han mostrado resultados significativos, y por lo tanto no se ha descartado ninguna de ellas.

2.5 Técnicas auxiliares de texturizado.

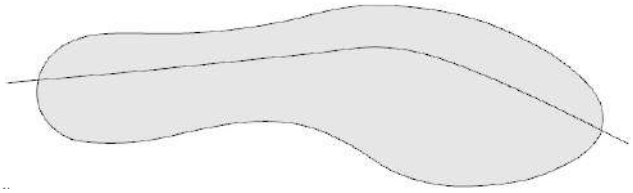
Tal y como se determinó en la fase de análisis, en determinados casos el resultado ofrecido por el algoritmo de texturizado básico no es el adecuado. Por este motivo, se han desarrollado dos técnicas que permiten solucionar estas situaciones:

a) *Texturizado guiado por línea.* Esta técnica está ideada para conseguir que la textura no se aplique de manera uniforme, sino que adopte una determinada forma o siga una línea de diseño. En lugar de asignar para cada punto a texturizar la información del píxel de la imagen que se encuentra inmediatamente encima, el algoritmo diseñado busca el punto correspondiente basándose en la distancia que marca la recta normal a la curva de deformación que pasa por dicho punto. Una vez obtenida la distancia y el punto porcentual sobre la curva, utilizamos esta información para buscar el píxel que se le debe asignar dentro de la textura.

   Además, se ha implementado un algoritmo mediante el cual, es posible crear automáticamente una curva esqueleto del elemento a texturizar, de manera que el texturizado aplicado, a través del uso de la curva esqueleto, siga la tendencia que marca la geometría de dicho elemento.

Interfaz de usuario para activar la deformación basada en curva, crear automáticamente la curva de esqueleto y editarla

   En el ejemplo que a continuación se presenta, se utiliza la curva de deformación para texturizar un logo sobre el piso siguiendo su curva de perfil exterior. En primer lugar se crea la curva de esqueleto del aplanado de la planta, y se modifica para ajustarla a dicho perfil exterior



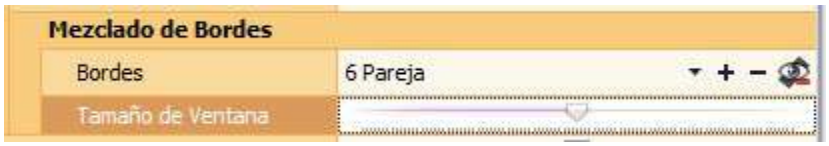
   El siguiente paso, consiste en mostrar la textura y ajustar su posición de manera que el logo se sitúe sobre la parte deseada. Observamos como el logo de la textura sigue la tendencia de la curva editada.

Finalmente, aplicamos texturizado. En la imagen inferior, se visualiza dos pisos, uno al que se ha aplicado el texturizado del logo utilizando la curva de deformación, y otro en el que no se ha utilizado.

En el ejemplo siguiente, se observa como se ha utilizado la curva esqueleto para distribuir los tacos sobre el piso siguiendo su tendencia

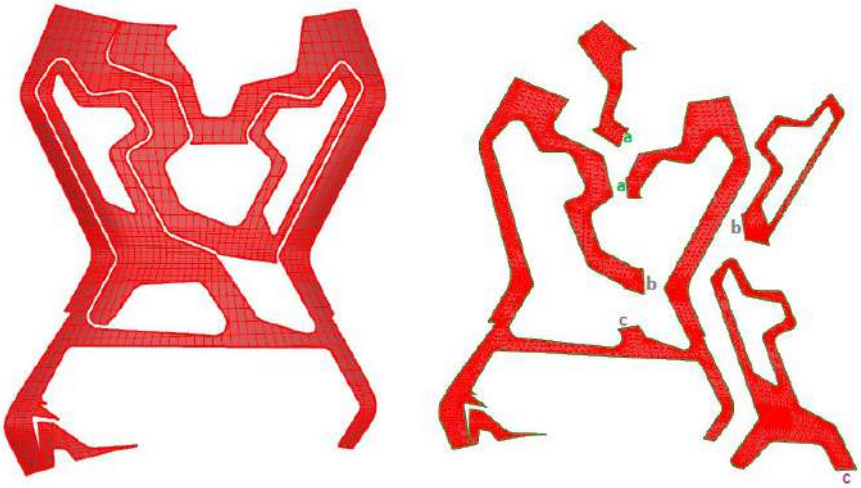
b) *Cosido de extremos 3D del aplanado.* Como ya se explicó en el entregable E2.1 de definición de requisitos, en ocasiones, se requiere texturizar piezas complejas cuyo aplanado resultaría en piezas con zonas solapadas, y por lo tanto no aptas para utilizar el texturizado 3D sobre ellas. Para poder llevar a

cabo el aplanado de este tipo de superficies sin obtener solapamientos, es necesario separarlas en varias partes para volverlas a unir cuando ha terminado todo el proceso. Sin embargo, en los lugares en el que la pieza se ha dividido, aparecen discontinuidades en su relieve, originadas por el hecho de haber texturizado dicha pieza en varias partes por separado. Para solucionar este problema, se ha desarrollado un procedimiento para mezclar estos bordes de manera que tengan apariencia continua.



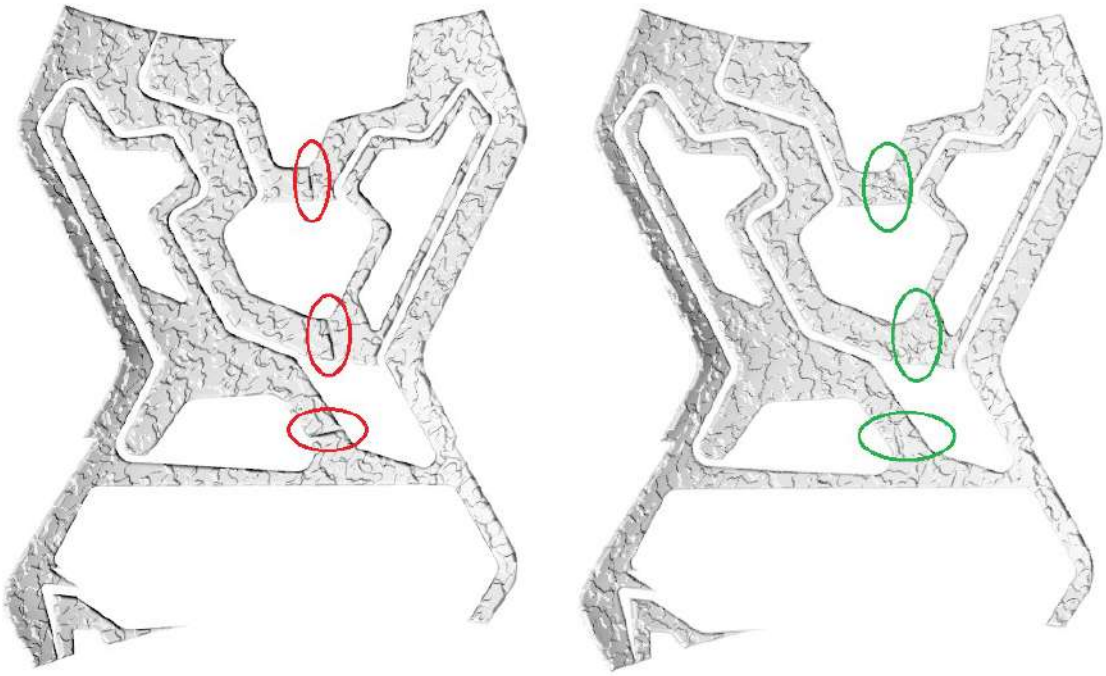
Interfaz de usuario dedicada al procedimiento de mezclado de bordes

Para poder aplicar el mezclado de bordes, es necesario seleccionar, de manera previa a la aplicación del texturizado, cada una de las parejas de aristas a partir de las cuales la pieza se ha dividido. El tamaño de ventana indica la extensión del área de la pieza que se va a utilizar para mezclar el texturizado de ambas mitades. Esta ventana deberá ser más extensa en función de si los patrones que conforman la textura son grandes o reducidos.



Pieza original y pieza aplanada, la cual se ha partido por tres lugares, indicados con a, b, *y* c.

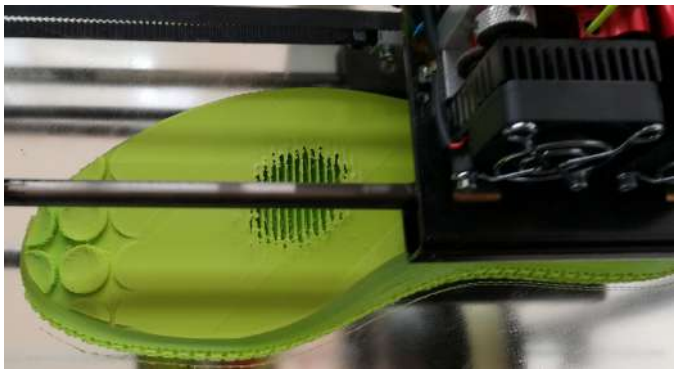
Una vez se han configurado las parejas de bordes y el tamaño de la ventana, se aplica el texturizado sobre el elemento aplanado. Si el mezclado de bordes se ha configurado de manera correcta, al llevar de vuelta la pieza aplanada al 3D, no se debe notar corte entre las que fueron aristas de partición de la pieza, como ocurre en el caso de ejemplo utilizado.



Pieza texturizada sin aplicar el cosido de extremos 3D, y aplicando el cosido de extremos 3D.

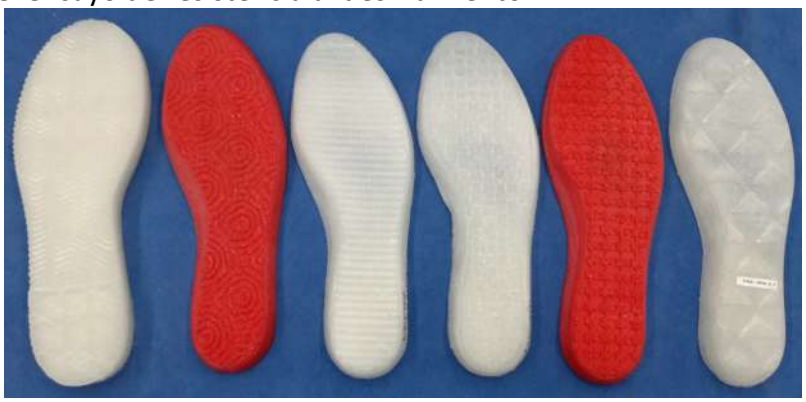
2.6 Diseño y fabricación de prototipos de pisos funcionalizados.

Según se determinó en el flujo de trabajo para funcionalización de características de fricción, el diseño y fabricación de probetas ha servido para establecer las texturas y parámetros de aplicación de texturizado a través de los cuales se han obtenido los texturizados 3D más significativos y aplicables para incorporar a los pisos de calzado. Adicionalmente, mediante la fabricación de las probetas diseñadas se ha determinado los parámetros y directrices de impresión 3D más adecuados para conseguir resultados limpios y precisos (presentados en el apartado 6 del presente documento).



Impresión 3D de piso con texturizado

El proceso de diseño de pisos con texturizado 3D se encuentra reflejado en el **Anexo C** del presente entregable, en el cual se muestra cada uno de los prototipos diseñados junto con las texturas aplicadas y los parámetros de texturizado utilizado. La creación de esta librería de pisos CAD ha servido para cubrir dos propósitos. Por un lado, estudiar la viabilidad del uso de la impresión 3D para fabricar este tipo de elementos con filamento flexible de TPU y cómo es posible lograr resultados óptimos utilizando este tipo de material. Esto se ha conseguido a través de refinar los parámetros de fabricación obtenidos del estudio en probetas, y estableciendo unas directrices específicas para la impresión de pisos que incorporan texturizado tridimensional. Por otro lado, se ha caracterizado las propiedades anti-resbalamiento que aporta cada clase de textura al diseño CAD del piso mediante la utilización de la herramienta de INESCOP que obtiene el CoF (coeficiente de fricción) a través de la simulación del ensayo de resistencia al deslizamiento.



Algunos de los pisos texturizados que se han fabricado mediante impresión 3D

2.7 Caracterización de propiedades de fricción.

En este apartado se registran y analizan los resultados obtenidos tras aplicar la simulación CAE del ensayo de resistencia al deslizamiento (ISO 13287:2012) sobre el conjunto de pisos diseñados.

Se determinó efectuar el análisis del CoF de los prototipos por medio de la herramienta de simulación en lugar del ensayo real, por requerir la primera de menos recursos tanto de personal, ya que no se requiere de personal con conocimiento específico sobre ensayos físicos en componentes de calzado; como temporales y económicos. Esto es debido a que la simulación se puede efectuar directamente sobre el diseño CAD, sin la necesidad de fabricar el componente, lo cual supondría una importante cantidad de horas de dedicación de las impresoras 3D, y la consiguiente utilización de material de impresión. Sin embargo, se detectó que la herramienta de simulación con la que ya contaba INESCOP, no estaba totalmente preparada para analizar pisos con texturizado 3D, ya que con ella únicamente se podrían analizar elementos geométricos de tipo superficie, y no de mallas de polígonos. Fue necesario por tanto adaptar la dicha herramienta para que también pudiera efectuar este análisis sobre mallas poligonales.

Los parámetros con los cual se ha simulado el ensayo son los siguientes:

- *Tipo de uso:* Profesional/casual. Se ha ensayado un tipo de uso y otro de manera independiente.
- *Tipo de ensayo:* Deslizamiento *p*lano. Se analiza la fricción de la suela en su conjunto, en vez de concentrarnos en talón/punta.
- *Tipo de pavimento:* Baldosa cerámica EUROTILE2
- *Material:* TPU (Poliuretano termoplástico). Tipo de filamento flexible que se ha utilizado para imprimir pisos de calzado.
- *Dureza (º Shore A:.* 78. Extraído de la ficha técnica de características del material utilizado.
- *Altura de relieve.* Coincide con la altura máxima del relieve del texturizado aplicado.

En la siguiente tabla, se muestra la relación de pisos que han sido ensayados, junto a la altura de relieve aplicada, el Cof obtenido y la evaluación para uso casual y profesional. El conjunto de pisos utilizado ha sido el que se ha diseñado a lo largo de la tarea 3.1 del proyecto, y cuyos parámetros se han registrado en el documento **Anexo C** del presente entregable. La nomenclatura utilizada para denominar el conjunto de los prototipos, se basa en la utilización del piso base como prefijo (que en la mayoría de los casos ha sido el PTEX1) y en la textura aplicada sobre él como sufijo. Dichos resultados fueron:

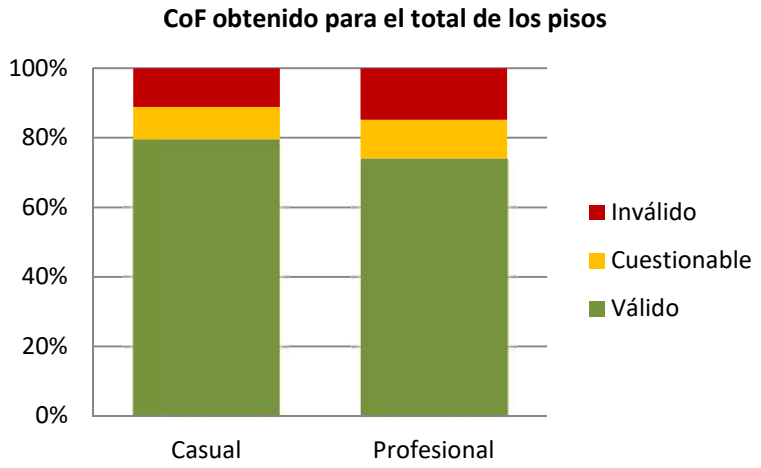
Referencia	Tipo de textura utilzada*	Altura relieve (mm.)	Cof (%?)	Evaluación uso casual**	Evaluación uso profesional
PTEX1_OB3D_1	3D	3	0,2842	I	I
PTEX1_OB3D_1B	3D	2	0,2673	I	I
PTEX1_OB3D_2	3D	2	0,262	I	I
PTEX1_OB3D_3	3D	2	0,329	C	C
PTEX1_OB3D_4	3D	3	0,3005	C	I
PTEX1_OB3D_5+CAMUFLAJE_3	3D + O	2	0,4651	V	V
PTEX1_OB3D_5B+CAMUFLAJE_3	3D + O	5	0,5446	V	V
PTEX1_OB3D_2+FIB_4	3D + P	6	0,4094	V	V
PTEX1_OB3D_4 + RUI_3	3D + P	2	0,2463	I	I
PTEX1_CURVAS_10	C	2	0,4696	V	V
PTEX1_CURVAS_10LINVERT	C	2	0,3814	V	C
PTEX1_CURVAS_11	C	3	0,451	V	V
PTEX1_CURVAS_2	C	2	0,2586	I	I
PTEX1_CURVAS_3	C	2	0,6238	V	V
PTEX1_CURVAS_4	C	2	0,3744	V	C
PTEX1_CURVAS_5	C	2	0,4548	V	V
PTEX1_CURVAS_6	C	3	0,289	I	I
PTEX1_CURVAS_6_LinealHorizVert	C	3	0,4179	V	V
PTEX1_CURVAS_7_CONICO	C	3	0,4632	V	V
PTEX1_CURVAS_8_CONTORNO	C	3	0,4692	V	V
PTEX1_CURVAS_9	C	2	0,4054	V	V
PTEX3 CURVAS3_TALON_CURVAS2_SUELA	C	1,5	0,5534	V	V
PTEX1_ACERO_2	O	3	0,456	V	V
PTEX1_ADOQUIN_1	O	1,5	0,5339	V	V
PTEX1_ARROZ_1	O	3	0,5824	V	V
PTEX1_CAMUFLAJE_3	O	2	0,4766	V	V
PTEX1_CRISTALES_1	O	2	0,3916	V	C
PTEX1_ESCAMAREGULAR_1	O	2	0,4319	V	V
PTEX1_ESTAMPADO_3	O	2	0,4213	V	V
PTEX1_LEOPARDO_2	O	2	0,5211	V	V
PTEX1_MADERA_1	O	2	0,4352	V	V
PTEX1_CRE_1	P	2	0,3317	C	C
PTEX1_CTE_1	P	2	0,3084	C	I
PTEX1_ENT_1	P	1,5	0,4923	V	V
PTEX1_FIB_4	P	1,5	0,3661	C	C
PTEX1_GEOM_1	P	1,5	0,4639	V	V
PTEX1_GEOM_10	P	1,5	0,4916	V	V
PTEX1_GEOM_11	P	1,5	0,4499	V	V

PTEX1_GEOM_3	P	1,5	0,5731	V	V
PTEX1_GEOM_3 + GR_2	P	2	0,5099	V	V
PTEX1_GEOM_5	P	1,5	0,4459	V	V
PTEX1_GEOM_7	P	1,5	0,5256	V	V
PTEX1_GEOM_7 + MAD_2	P	2,5	0,4854	V	V
PTEX1_GEOM_8	P	1,5	0,4858	V	V
PTEX1_GEOM_8 + CPI_2	P	3,5	0,4979	V	V
PTEX1_GEOM_9	P	1,5	0,5652	V	V
PTEX1_GR_1	P	1,5	0,9222	V	V
PTEX1_MAD_1	P	1,5	0,4361	V	V
PTEX1_MAR_1	P	1,5	0,8443	V	V
PTEX1_TUB_1	P	1,5	0,4446	V	V
PTEX1_TUB_2	P	1,5	0,4396	V	V
PTEX1_TUB_3	P	1,5	0,434	V	V
PTEX2_CCU_1	P	5	0,4935	V	V
PTEX1_GEOM_7 + CURVAS_10	P + C	2,5	0,5001	V	V

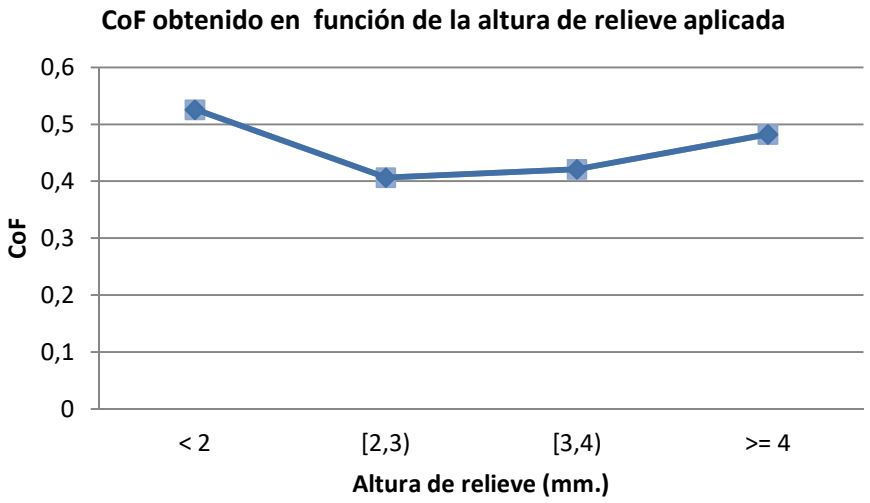
* *3D*: A partir de objetos 3D. *C*: A partir de curvas 2D. *O:* Orgánicas. *P:* Procedurales
** V*:* Válido. C: Cuestionable. I: Inválido

Resultados de la simulación de ensayo de resistencia al deslizamiento sobre el conjunto de pisos diseñados

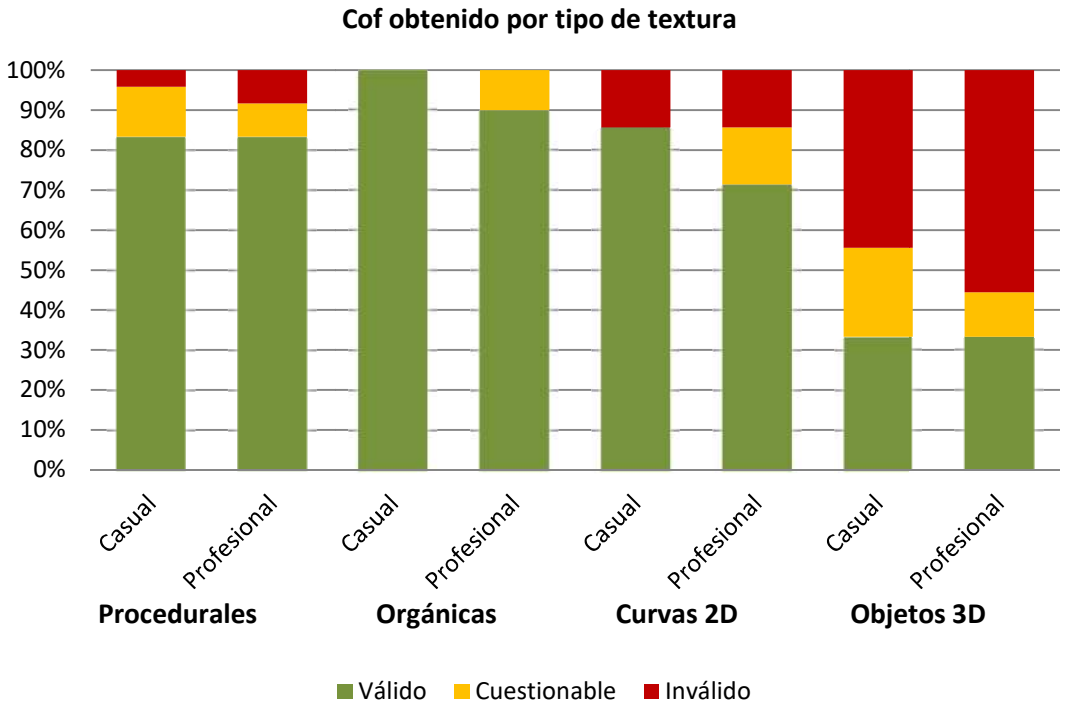
En la tabla de obtenida se observan resultados dispares para los diferentes pisos funcionalizados. Para la mayoría de ellos, el ensayo de resistencia al resbalamiento ha dado resultados válidos, suponiendo un total válido del 80% para uso casual y un 74% para uso profesional. El porcentaje total de pisos cuyo resultado ha sido cuestionable ha sido de un 9% para uso casual y un 11% para uso profesional; mientras que el porcentaje de resultados inválidos han resultado ser de un 11% y 15% para uso casual y profesional respectivamente.



Para determinar cuál es el principal factor que influye en el coeficiente de fricción obtenido en cada caso, en primer lugar se va a analizar en qué medida éste depende del parámetro de altura máxima de relieve utilizado en el texturizado de la superficie del piso. Para ello, se ha clasificado el total de muestras en cuatro grupos distintos: *a)* altura máxima menor a 2mm (18 muestras); *b)* Altura máxima mayor o igual a 2mm. y menor a 3mm. (23 muestras); *c)* Altura máxima mayor o igual a 3mm. y menor a 4mm. (23 muestras); y d) Altura máxima mayor o igual a 10mm. (3 muestras). Los resultados fueron:



Tal y como se aprecia en el gráfico, la variación del CoF según aumenta la altura del relieve, no resulta significativa. Además, en todos los casos, el CoF medio obtenido es superior a 0.4, lo que supone un resultado válido. A partir de esta información, es posible concluir que el CoF resultante no depende de la altura máxima de texturizado aplicada sino del tipo de textura utilizada. Por este motivo, se ha creído necesario establecer una segunda clasificación basada en la técnica que ha sido utilizada para generar la textura.



En este caso, se observa que las texturas a partir de las cuales se ha obtenido un mejor resultado han sido las orgánicas filtradas, con un 100% de validez para uso casual y un 90% válido y 10% cuestionable para uso profesional. Las que peor, las basadas en objetos 3D, ya que únicamente resultó válido un 33%, tanto para uso casual como para uso profesional.

3. Caracterización de propiedades de amortiguación

3.1 Introducción

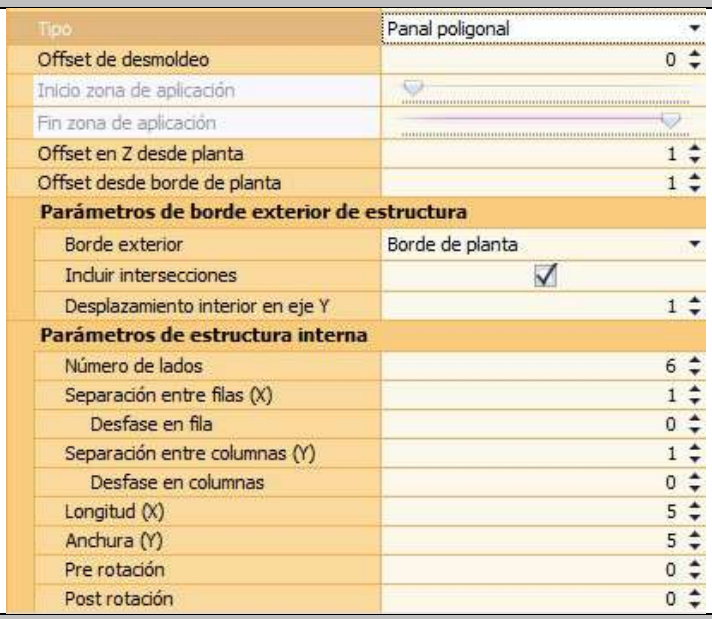
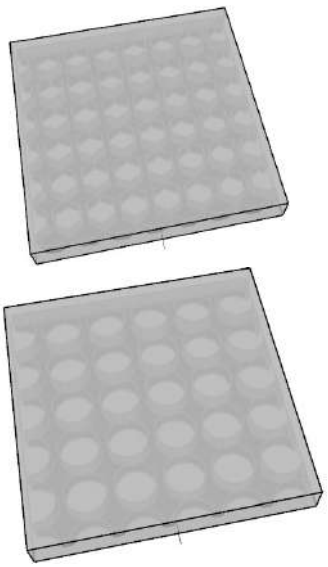
En el apartado 3 del presente entregable se refleja la secuencia de procesos llevadas a cabo para diseñar y fabricar mediante impresión 3D, prototipos de pisos de calzado dotados de propiedades de amortiguación adicionales, gracias a la creación paramétrica y automatizada de estructuras internas. Esta secuencia se ha realizado tal y como fue establecido en las especificaciones resultantes de la fase de análisis correspondiente al PT2.2, y reflejadas en el entregable 3.1. En la sección 3.2 de este documento se detallan los diferentes tipos de estructuras internas generables automáticamente que se han desarrollado a partir de algoritmos de diseño CAD. La sección 3.3 refleja el proceso de diseño y fabricación de prototipos de pisos con estructuras internas, además de que se detallan las muestras diseñadas para estudiar las características de amortiguación que aporta cada estructura. Finalmente, en el apartado 3.4, se muestran y analizan los resultados obtenidos de aplicar el ensayo de impactos sobre los pisos-muestra fabricados.

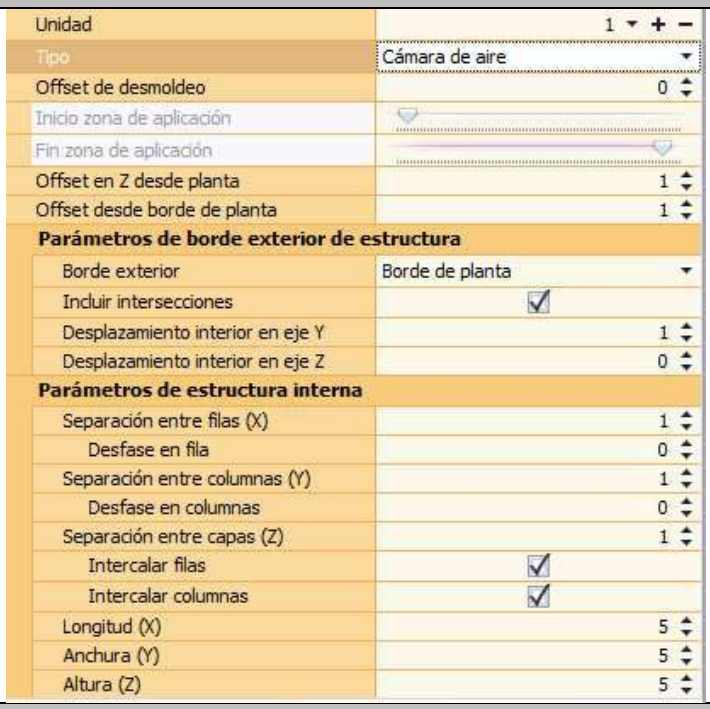
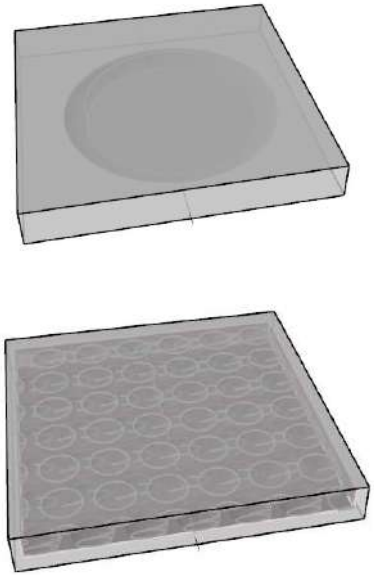
3.2 Estructuras internas generables de manera automatizada.

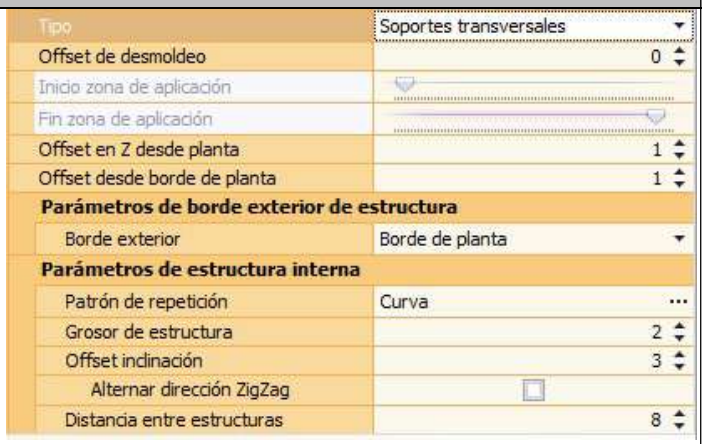
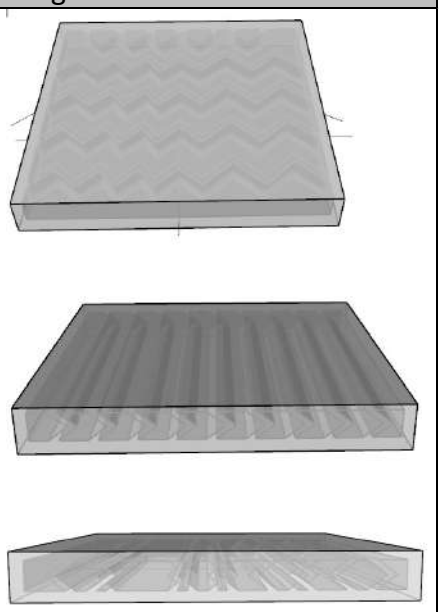
Se ha llevado a cabo el desarrollo de algoritmos CAD que generen de manera automatizada, y a partir de una serie de parámetros de entrada, los tipos estructuras de amortiguación definidas en la fase de análisis con el objetivo de que sirvan para llevar a cabo el diseño de los prototipos a fabricar. Una propiedad común al conjunto de estructuras es que se crean en base a dos elementos característicos del piso: su *superficie superior*, y la *curva que define su quiebre*. De esta forma, la estructura se genera automáticamente en base a la geometría interior utilizable del piso. Además, existen una serie de parámetros comunes a todas las estructuras, como el *ángulo de desmoldeo*, el *offset respecto a la línea de planta* y el *porcentaje longitudinal inicial y final,* que marca el inicio y fin de la zona de amortiguación. Estos parámetros posibilitan un control preciso de la zona donde se desea generar la estructura.

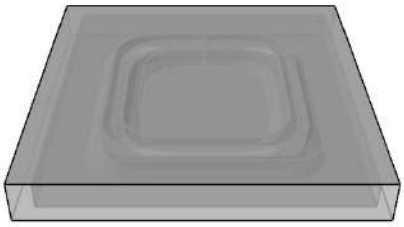
Por otra parte, se ha determinado agrupar varias de las estructuras definidas en la fase de análisis en estructuras básicas, a partir de las cuales se pueden generar las estructuras definidas modificando determinados parámetros de entrada. Por ejemplo, el *panal de prismas* y el *panal cilíndrico*, se pueden generar a partir de la estructura básica *panal poligona*l estableciendo el número de lados a 1. Por otra parte, las estructuras *abiertas,* es decir, aquellas que están abiertas al exterior y no contenidas dentro del piso, requerirían retirar las superficies laterales del piso que las contienen, lo cual al ser un proceso complejo y dependiente de la naturaleza variable del diseño de los pisos, no es automatizable. Se ha optado por tanto por obviarlas y reflejar únicamente la versión cerrada de dichas estructuras.

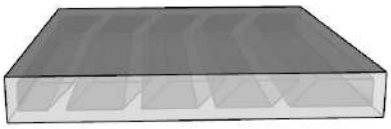
Las siguientes tablas muestran el conjunto de estructuras básicas implementadas. La información que estas reflejan es: a) El conjunto de parámetros de creación, visibles a través una captura de la interfaz de las utilidades desarrolladas. b) Imágenes conteniendo ejemplos de probetas con el tipo de estructuras correspondiente. c) Las estructuras definidas en los requisitos (Entregable E2.1) que son generables a partir de la estructura básica, y qué parámetros es necesario modificar para crearlas.

Estructura Básica	**Panal poligonal**
Parámetros de creación	Imágenes
	
Genera las estructuras requeridas:	- *Panal de prismas.* Estableciendo *Número de lados* > 1. - *Panal cilíndrico* Estableciendo *Número de lados* = 1.

Estructura Básica	**Cámara de aire**
Parámetros de creación	Imágenes
	
Genera las estructuras requeridas:	- *Cámara de aire:* Estableciendo una estructura de dimensiones equivalentes a la geometría donde se sitúa. - *Elipsoide XYZ.* Distribuyendo cámaras de aire de pequeño tamaño en 3 dimensiones. - *Cavidades elípticas:* Creando elipsoides XYZ y proporcionado a la anchura Y muy superior a la anchura de la geometría exterior. - *Elipsoide hueco.* Ubicando una cámara de aire de pequeño tamaño en el centro y estableciendo la separación suficiente

Estructura Básica	**Soportes transversales**
Parámetros de creación	Imágenes
	
Genera las estructuras requeridas:	- *ZigZag con líneas*: Definiendo una línea transversal con forma de ZigZag, y estableciendo inclinación de 0 - *Soporte semizigzag*: Estableciendo inclinación > 0 - *Cavidades triángulos:* Estableciendo inclinación > 0 y reduciendo la distancia para que exista solapamiento entre ellas.

Estructura Básica	**Semizigzag 360º**
Parámetros de creación	Imágenes
Tipo: SemiZigZag 360º Offset de desmoldeo: 0 Inicio zona de aplicación Fin zona de aplicación Offset en Z desde planta: 1 Offset desde borde de planta: 1 **Parámetros de borde exterior de estructura** Borde exterior: Borde de planta **Parámetros de estructura interna** Grosor de estructura: 2 Offset inclinación: 3 Alternar dirección ZigZag: ☑ Distancia entre estructuras: 4	 
Genera las estructuras requeridas:	- *SemiZigZag 360*: No alternando dirección ZigZag. - *SemiZigZag 360 anillos invertidos*: Alternando dirección ZigZag

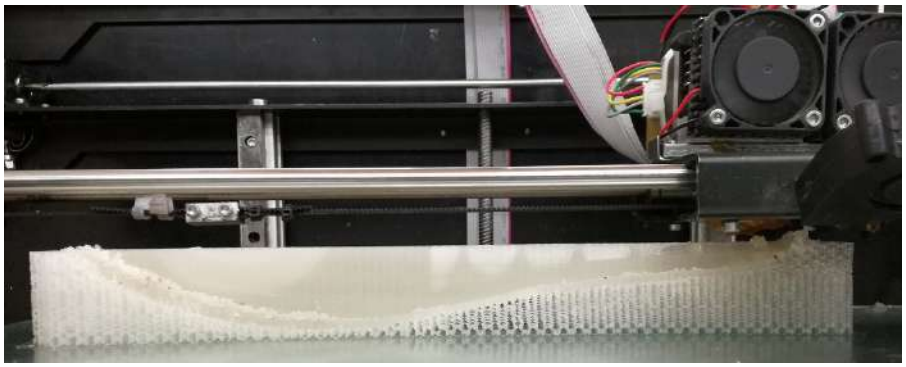
Estructura Básica	**Soportes oblícuos**
Parámetros de creación	Imágenes
Tipo: Soportes oblícuos Offset de desmoldeo: 0 Inicio zona de aplicación Fin zona de aplicación Offset en Z desde planta: 1 Offset desde borde de planta: 1 **Parámetros de borde exterior de estructura** Borde exterior: Borde de planta **Parámetros de estructura interna** Patrón de repetición: Curva ... Grosor de estructura: 2 Offset inclinación: 0 Distancia entre estructuras: 8	
Genera las estructuras requeridas:	- *Soporte oblícuo.* Offset inclinación indica la inclinación de las líneas transversales

Estructura Básica	**Cavidades cúbicas**
Parámetros de creación	Imágenes
Tipo: Cavidades cúbicas Offset de desmoldeo: 0 Inicio zona de aplicación Fin zona de aplicación Offset en Z desde planta: 1 Offset desde borde de planta: 1 **Parámetros de estructura interna** Nº de filas: 1 Nº de columnas: 1 Nº de niveles: 1 Distancia entre filas: 1 Distancia entre columnas: 1 Distancia entre niveles: 1	
Genera las estructuras requeridas:	- *Cavidades cúbicas.* Es posible distribuir cavidades en 3 dimensiones.

Adicionalmente, y para agilizar la labor de diseño, se ha desarrollado un procedimiento que, de forma automatizada, convierte la geometría con la que se trabaja (normalmente polisuperficies, en el caso de los pisos CAD), a mallas de polígonos imprimibles en 3D, asegurando que la orientación de las caras de los polígonos que conforman las estructuras internas sea la correcta, de tal forma que el software de impresión 3D pueda gestionarlas de manera adecuada y evitando que este proceso deba ser llevado a cabo de manera manual.

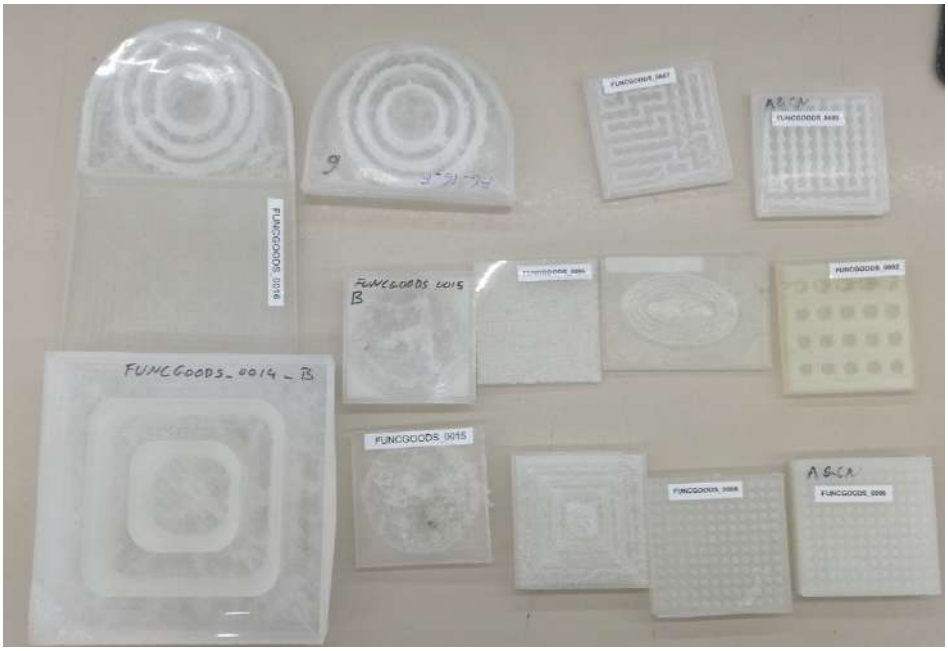
3.3 Diseño y fabricación de prototipos de pisos funcionalizados

En esta sección se describen las diferentes muestras de pisos de calzado funcionalizados mediante estructuras de amortiguación, así como el procedimiento seguido para llevar a cabo su diseño y fabricación.



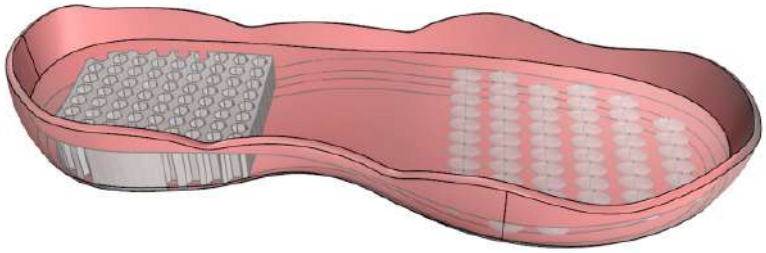
Fabricación de piso con estructuras de amortiguación por impresión 3D

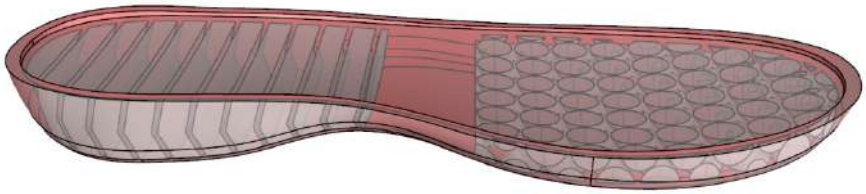
A medida que se fueron desarrollando los algoritmos para diseñar cada una de las diferentes estructuras, se estableció una metodología para imprimir en 3D de manera adecuada por medio de diseñar probetas de un determinado tamaño conteniendo dicha estructura, e imprimirla con filamento flexible de tipo TPU (poliuretano termoplástico) comparando diferentes parámetros y posiciones de impresión. Los resultados asociados a estas pruebas se encuentran reflejados en el apartado 6 del presente documento. Una vez se determinaba que la impresión se realizaba de forma correcta, se procedía con el diseño y fabricación de uno o varios pisos conteniendo estas estructuras, detectando posibles problemas y resolviéndolos por medio de refinar la creación automatizada de estructuras o variar los parámetros de impresión.

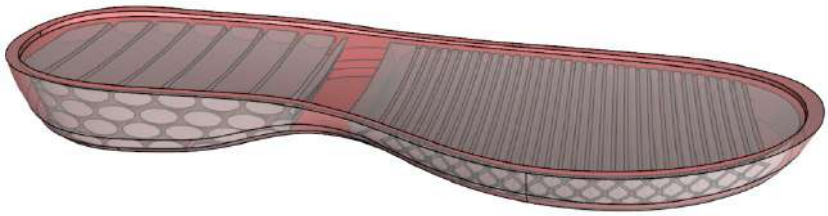


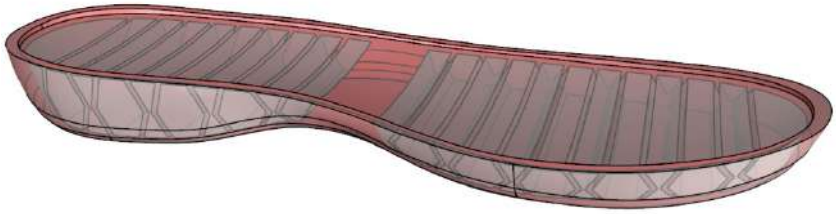
Algunas de las probetas que fueron fabricadas conteniendo estructuras de amortiguación.

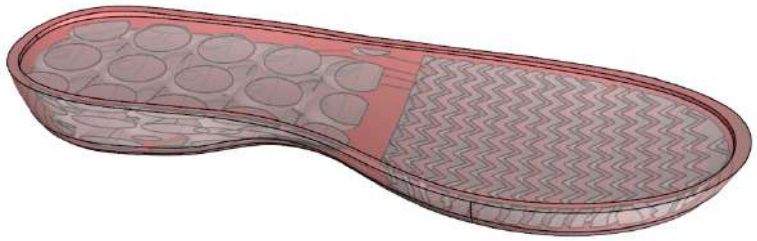
Las tablas que figuran a continuación representan el conjunto de muestras de pisos diseñados y fabricados para el proyecto, y que finalmente su impresión presentó un resultado correcto. Este conjunto de muestras fue obtenido a partir de tres pisos base diferentes, aplicando una estructura de amortiguación en la zona del talón, y otra en la zona del metatarso para cada uno de ellos. La nomenclatura utilizada para referenciar cada piso, *PX_IY*, representa en primer lugar el piso base *X*, y la instancia de diseño *Y*.

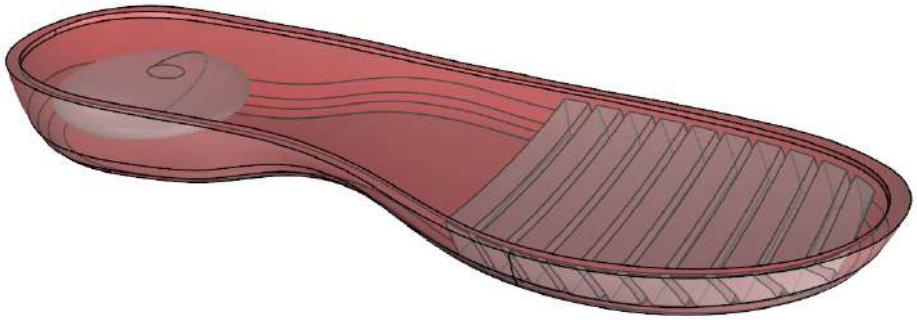
Referencia	**P1_I1**
	
Estructura talón	**Panal poligonal** de tipo cilindro
Estructura metatarso	**Cámaras de aire** elipsoidales XYZ, 10x5x5mm.

Referencia	**P1_I3**
	
Estructura talón	**Soportes transversales** a partir de línea recta, offset inclinación 3mm. Grosor estructura 1.5mm
Estructura metatarso	**Cámaras de aire** XYZ esféficas diámetro 10mm.

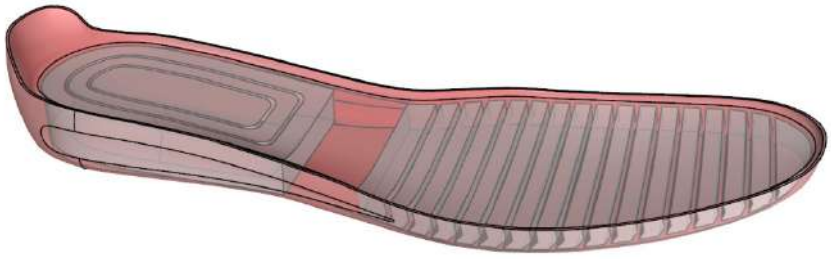
Referencia	**P1_I4**
	
Estructura talón	**Cámaras de aire** XZ, 10x∞x5mm. formando cavidades elípticas
Estructura metatarso	**Soportes transversales** entrelazados (cavidades triángulos)

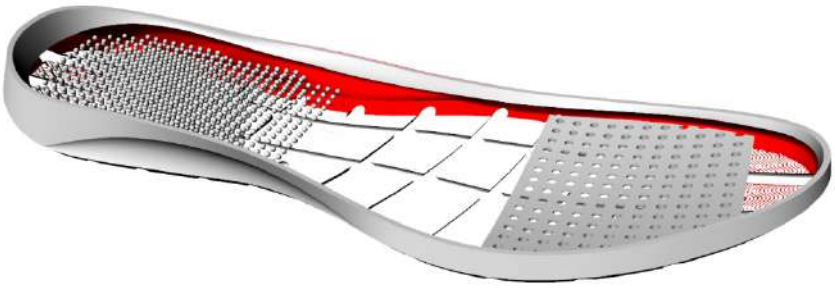
Referencia	**P1_I5**
	
Estructura talón	**Soportes transversales** en ZigZag, separación 8mm.
Estructura metatarso	**Soportes transversales** en ZigZag, separación 8mm.

Referencia	**P1_I6**
	
Estructura talón	**Cámaras de aire** elipsoidales XYZ de diámetro 20mm.
Estructura metatarso	**Soportes transversales** con forma de ZigZag en eje Y

Referencia	**P1_I7**
	
Estructura talón	**Cámara de aire** única de forma elipsoidal
Estructura metatarso	**Soportes oblícuos**

Referencia	**P1_I8**
Estructura talón	**Cavidades cúbicas** 4x3x2
Estructura metatarso	**Panal poligonal** de tipo hexágono

Referencia	**P2_I1**
	
Estructura talón	**Semizigzag 360º** Respecto a línea de planta
Estructura metatarso	**Soportes transversales** a partir de línea recta, offset inclinación 3mm. Grosor estructura 2mm.

Referencia	**P3_I1**
	
Estructura talón	**Cámaras de aire** XYZ esféricas diámetro 1mm.
Estructura metatarso	**Panal poligonal** de tipo cilindro

Referencia	**P3_I3**
Estructura talón	**Cámaras de aire** elipsoidales XYZ, 10x5x5mm.
Estructura metatarso	**Semizigzag 360º** respecto a círculo

Para todos los casos, la distancia de la estructura interna a la superficie de planta establecida fue de 1mm. Aumentar esta distancia restaría capacidad de amortiguación, por situarse la estructura más alejada de la planta. El offset de la estructura respecto a la curva lateral de planta es variable para cada caso dependiendo del tipo de estructura.

Conjunto de muestras fabricadas de los pisos diseñados.

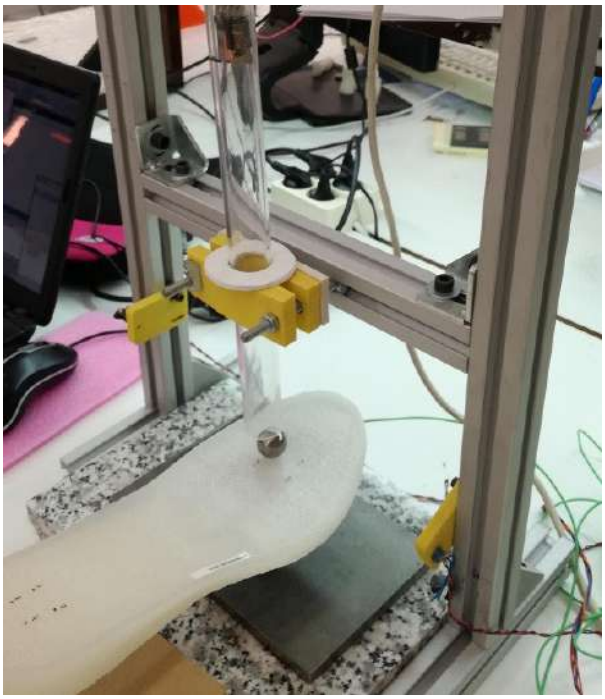
3.4 Caracterización de propiedades de amortiguación.

Se ha sometido al conjunto de pisos diseñados a ensayo de impactos. La metodología seguida en esta experimentación, ha consistido en definir una serie de puntos característicos sobre cada una de las estructuras de talón y metatarso en función de la variabilidad de su geometría. Para ilustrar esto, podemos usar el ejemplo de las cámaras de aire, donde los posibles puntos elegidos podrían ser: a) en el centro de la cámara, b) en algún punto perimetral de la cámara y c) en el exterior de la cámara. Para chequear que no se producen desviaciones, cada impacto se ha registrado dos veces. Del conjunto de los impactos, se ha registrado el pico de fuerza mínimo y máximo para cada una de ellas en el total de los puntos. A mayor fuerza de impacto, menor capacidad de amortiguación. Con este experimento se busca además obtener dos picos de fuerza mínimo y máximo similares, ya que una diferencia muy amplia entre ambos implicaría que dentro de una misma estructura existen algunas zonas con un índice de absorción de impactos adecuado, y otras zonas donde la absorción de impactos es deficiente.

La tabla que se muestra a continuación, ilustra el pico de fuerza en Newton máximo y mínimo registrado en las estructuras contenidas en los diferentes prototipos analizados, y cuya caracterización geométrica corresponde con la definida en el apartado 3.3.

Piso-Localización	Tipo de estructura básica	Min fuerza impacto (N)	Max fuerza de impacto (N)
P1_I1_TALON	**Panal poligonal**	63	70,2
P1_I1_META	**Cámaras de aire**	130,5	139,5
P1_I3_TALON	**Soportes transversales**	52,2	77,4
P1_I3_META	**Cámaras de aire**	108,9	155,7
P1_I4_TALON	**Cámaras de aire**	75,6	86,4
P1_I4_META	**Soportes transversales**	100,8	106,92
P1_I5_TALON	**Soportes transversales**	39,6	52,2
P1_I5_META	**Soportes transversales**	40,5	46,8
P1_I6_TALON	**Cámaras de aire**	85,5	82,8
P1_I6_META	**Soportes transversales**	130,5	146,7
P1_I7_TALON	**Cámara de aire**	54	114,3
P1_I7_META	**Soportes oblícuos**	57,6	73,8
P1_I8_TALON	**Cavidades cúbicas**	46,8	72,9
P1_I8_META	**Panal poligonal**	102,6	111,6
P2_I1_TALON	**Semizigzag 360º**	50,4	83,7
P2_I1_META	**Soportes transversales**	94,5	118,8
P3_I1_TALON	**Cámaras de aire**	122,4	162,9
P3_I1_META	**Panal poligonal**	108	165,6
P3_I3_TALON	**Cámaras aire**	72	138,6
P3_I3_META	**Semizigzag 360º**	123,3	157,5

Resultados de ensayos de impactos



Ensayo de impactos sobre estructura de zona metatarsal del piso con referencia P3_I1

A modo de conclusión, las estructuras que mejor resultado ofrecieron (ambos picos de fuerza registrados fueron inferiores a 100N. fueron:

- P1_I1_TALON (Panal poligonal cilíndrico)
- P1_I3_TALON (Soportes transversales)
- P1_I4_TALON (Cámaras de aire de cavidades elípticas)
- P1_I5_TALON (Soportes transversales en zigzag)
- P1_I5_META (Soportes transversales en zigzag)
- P1_I6_TALON (Cámaras de aire elipsoidales)
- P1_I7_META (Soportes oblicuos)
- P1_I8_TALON (Cavidades cúbicas)
- P2_I1_TALON (SemiZigzag 360º).

De entre las cuales el mayor índice de amortiguación fue obtenido por los soportes transversales en zigzag de talón y metatarso de P1_I5, con una fuerza registrada de menor a 55N.

La estructura que peor amortiguación ha presentado han sido las cámaras de aire esféricas de P3_I1_META, debido a que por su pequeño diámetro (1mm.) apenas han tenido incidencia. Por otra parte, llama particularmente la atención la disparidad de resultados de P3_I3_TALON (cámaras de aire elipsoidales), con una diferencia de picos de fuerza registrados mayor a 66N. Esto se debe al tamaño y separación de las cámaras de aire, las cuales dan un resultado adecuado cuando el impacto se registra justo sobre ellas, pero empeora cuando se registra en el área de separación entre ambas.

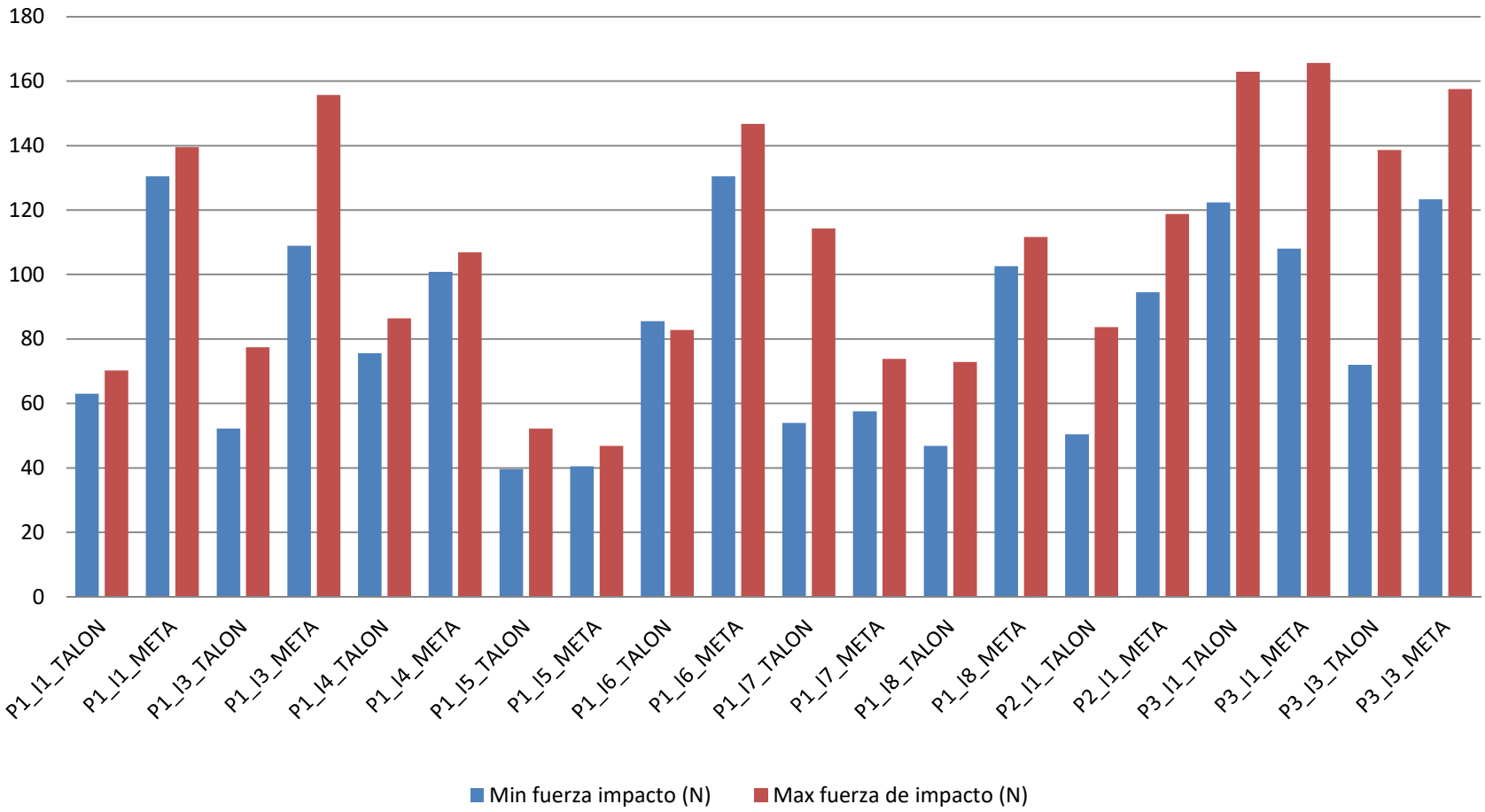


Diagrama de barras en el que se visualiza el pico de fuerza mínimo y máximo obtenido para cada estructura generada.

4. Diseño, fabricación y caracterización de punteras para funcionalizar las propiedades de dureza del zapato

4.1 Introducción

Como parte de la tarea de funcionalización de propiedades de dureza en el calzado**,** se ha procedido a utilizar la impresión 3D para crear topes de refuerzo para puntas de zapatos, además de analizar los niveles de refuerzo máximo que podemos obtener en función de diferentes parámetros de diseño y del material utilizado. Para ello, se ha diseñado un conjunto de punteras variando su longitud, grosor, horma base, etc., se han impreso (sección 4.2) y sometido a diferentes ensayos de compresión variando la fuerza máxima aplicada (sección 4.3), de acuerdo a la metodología definida en la fase de análisis E2.1.

4.2 Diseño y fabricación de punteras de refuerzo

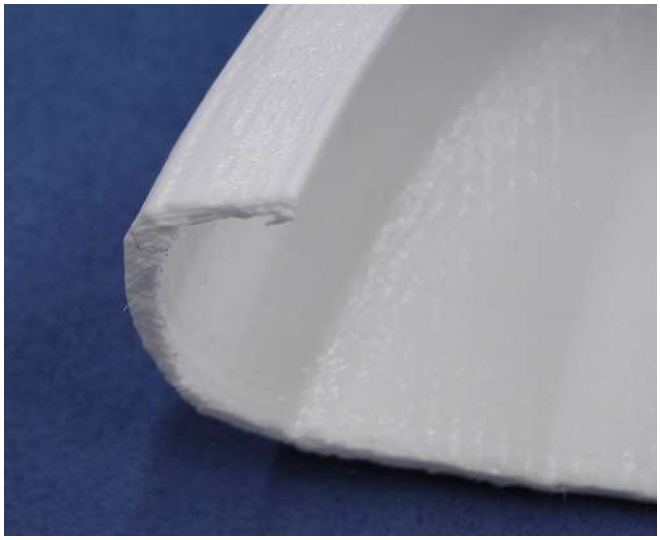
En este apartado se refleja el proceso que se ha seguido para obtener las muestras de punteras de zapatos impresas en 3D. En una primera instancia, se ha efectuado una búsqueda de hormas digitales de talla 42, cuya punta tenga la geometría adecuada y altura suficiente para ser válidas para el diseño de punteras de refuerzo según indican las diferentes normativas internacionales que fueron analizadas. Las hormas que finalmente se seleccionaron, se codificaron con las letas A, B, y C respectivamente.

Hormas base A, B y C para el diseño de punteras de calzado.

Con respecto a los parámetros de diseño utilizados, se ha establecido un rango de parámetros que se correspondería con los empleados en topes de refuerzo reales, y tal y como ocurre con las hormas seleccionadas, se ciñen a los requisitos establecidos por las distintas normas internacionales. Se determinaron por tanto tres valores de grosor diferentes: 1.5, 2.5 y 4mm. En cuanto a la longitud, se eligieron otros tres valores que se consideraron adecuados: 40, 50 y 60mm. Haciendo uso del software CAD de diseño de calzado ICad 3D+, se procedió al modelado del conjunto de punteras combinando los diferentes valores de horma base, longitud y grosor. Dado que Icad3D+ trabaja con la horma aplanada en 3 superficies distintas (cuerpo, planta y lupe), fue necesario

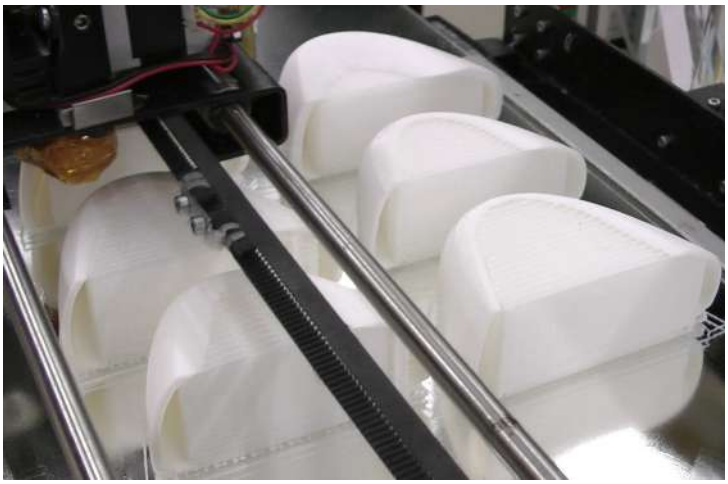
crear las punteras a partir de dos piezas distintas: por un lado la parte superior, que se sitúa sobre la punta de la horma, y por otro la parte inferior, que se monta sobre la planta. Aunque estas dos piezas se encuentran separadas en el fichero CAD exportado (.OBJ), al estar las dos piezas de la puntera superpuestas una sobre otra, el software de impresión las gestiona como un objeto único, de manera que finalmente se imprime como una única pieza totalmente cohesionada.

Piezas correspondientes a la parte superior y el montado de la puntera



Detalle de la zona de unión entre parte superior y montado en una de las punteras impresas en 3D.

Se procedió por tanto al diseño de las diferentes muestras siguiendo esta metodología, y combinando los parámetros de diseño establecidos; resultando en un total de 27 muestras distintas. La codificación utilizada para denominarlas, corresponde con *HORMAX_L_G,* donde la letra *X* corresponde al código de la horma base (A, B, o C), la *L* a la longitud expresada en mm. y la *G* al grosor expresado en décimas de mm. Al igual que en el caso de los pisos funcionalizados para amortiguación, se han desarrollado algoritmos para exportar dicha geometría generando de manera directa mallas válidas para impresión 3D, sin agujeros, ni vértices aislados, ni triángulos degenerados (cuyos vértices son colineales).



Conjunto de punteras imprimiéndose en 3D en posición horizontal.

Partiendo de los ficheros CAD de punteras diseñadas, se ha procedido a la impresión 3D de los mismos. Con el objetivo de conseguir un acabado lo más fino y preciso posible, y sobre todo, una adhesión entre capas óptima para garantizar una dureza adecuada, se han ido realizando sucesivas pruebas de impresión para obtener los parámetros de la impresora 3D que proporcionen estos resultados, los cuales se reflejan en el apartado 6 del presente documento. Según se determinó en el análisis, la posición de impresión para el caso de las punteras resulta un factor fundamental, ya que dicha posición determina la orientación de las capas de material, y las zonas de unión entre capas tienden a presentar menor resistencia. Las impresiones de punteras se han realizado en dos posiciones distintas, que denominaremos horizontal, en el que las capas se depositan en dirección planta-empeine; y vertical, en el que las capas se depositan en dirección talón-punta (ver entregable E2.1, apartado 4.3).

4.3 Caracterización de resistencia de punteras.

A lo largo de esta fase, se procedió a caracterizar las propiedades de dureza aportadas por las punteras de calzado impresas en 3D, y si éstas se ajustan a los parámetros que marcan las diferentes normas internacionales a partir de someterlas a ensayo de compresión.

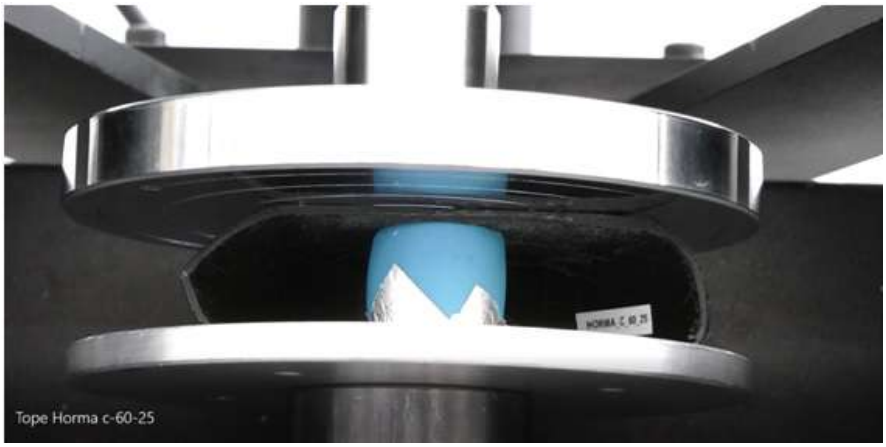
Para ello, y a partir de un experimento inicial, se han ido diseñando sucesivos experimentos en función de la respuesta obtenida, hasta alcanzar una serie de resultados que se pueden considerar concluyentes. Para más información sobre los parámetros del ensayo de compresión en relación a las diferentes normativas internacionales, ver entregable E2.1, apartado 4.2.

a) Experimento E1.

El objetivo del primer experimento consistió en establecer un punto de partida a partir del cual comenzar a elaborar conclusiones. A través de él, se comprimió la

puntera HORMAC_60_25 impresa en PLA en posición horizontal con una fuerza de 500N (de acuerdo a la normativa de calzado de bombero).

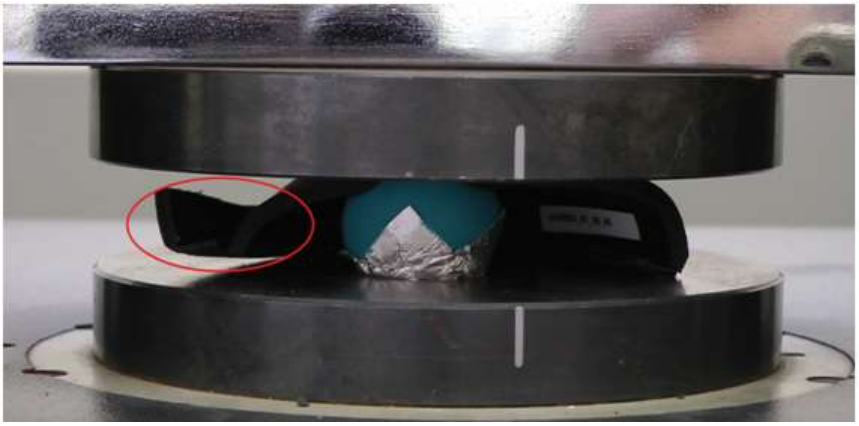
El tope analizado superó el ensayo, ya que no presentó rotura, y la longitud del cilindro interno pasó de 28.8 a 25mm., por encima del mínimo de 21 para hormas de talla 42.



Punto de máxima compresión del tope en el experimento E1.

b) *Experimento E2.*

En el experimento E2, se buscó un test inicial de compresión a 10kN (calzado de protección). Para ello, se seleccionó uno de los topes con grosor máximo, el HormaB_60_40 impreso en PLA en horizontal. La pieza se quebró en el momento en el que se aplicaban 4.3kN en la zona de unión entre capas de material de uno de los laterales.



Momento en el que el tope se quiebra en el experimento E2.

c) *Experimento E3*

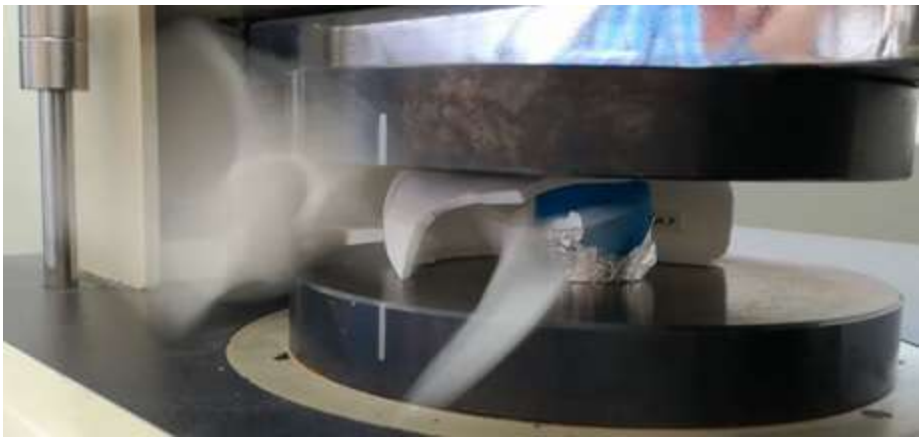
En el experimento E3, se realizó una prueba inicial sobre punteras impresas en vertical, tanto a 500N como a 10kN. Para ambos ensayos se utilizó la misma puntera, la HormaC_60_25 impresa en PLA. Ésta superó el ensayo de 500N de

forma satisfactoria, mientras que en el ensayo de 10kN, se rompió a los 1.8kN. Esta puntera impresa en vertical presentó menos resistencia que la impresa en horizontal del experimento *E2,* pero también contaba con un grosor menor.

CARGA DE COMPRESIÓN kN:

	Talla	Altura del cilindro (mm)		Requisito (mm)
		Inicial	Residual	
0,5 KN	HORMA-C-60-25-VA	28	26,90	sin rotura
1,0 KN	HORMA_C_60-25-V	28	1,8KN rotura del tope	

Resultado del experimento E3



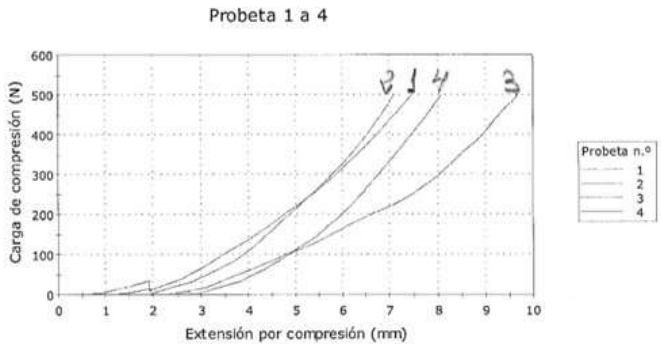
Momento en el que el tope se quiebra

d) *Experimento E4*

El siguiente experimento consistió en comparar de manera directa la resistencia de los topes impresos en vertical y en horizontal en el ensayo de 10kN con el tope HORMA_C_60_40 impreso en PLA. El tope impreso en horizontal se quebró a los 1.5kN, mientras que el vertical dio mejor resultado, quebrando a los 6.2kN.

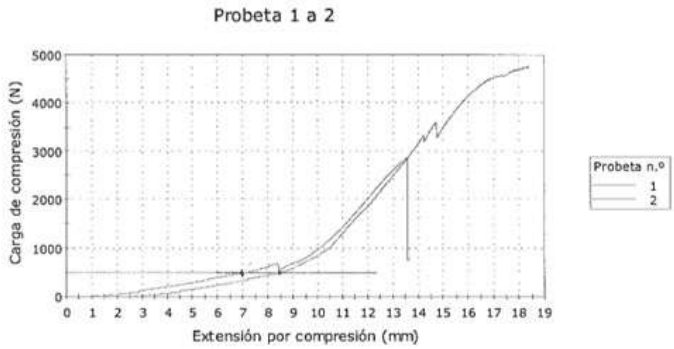
e) *Experimento E5*

Con el objetivo de corroborar que las punteras impresas en vertical resisten más que las impresas en horizontal, comprobar la resistencia de las punteras más gruesas (40mm.), y comparar los resultados que presentan punteras con distintas horma base se ha efectuado la siguiente tanda de ensayos. En ella, se han utilizado las muestras de longitud 60mm. impresas en vertical y horizontal de las tres hormas base impresas en PLA. A las hormas A y B se aplicaron 500N, mientras que a la C, 10kN. Los resultados fueron los siguientes:



PROBETA	MUESTRA	ALTURA CILINDRO (mm)
2	HORIZONTAL HORMA-C1-60-40	>29,5 *
1	VERTICAL HORMA-C1-60-40	>29,0 *
3	HORIZONTAL HORMA-B1-60-40	24,0
4	VERTICAL HORMA-B1-60-40	>28,5 *

(*) El hueco interior del tope es mayor que la altura del cilindro de plastilina.



MUESTRA	FUERZA MÁXIMA (N)	ALTURA CILINDRO (mm)
HORIZONTAL HORMA-A1-60-40	2850 (Rotura total)	17,5
VERTICAL HORMA-A1-60-40	4745 (Sin rotura)	15,0

Como se observa, todas las punteras pasaron el ensayo de 500N, obteniendo mejor resultado las impresas en vertical, ya que el cilindro quedó intacto. Sólo en el caso de la horma B impresa en horizontal, el cilindro presentó una compresión mínima. En el caso del ensayo de 10kN, la puntera impresa en vertical volvió a presentar mayor resistencia, aunque sin superar el ensayo.

f) Experimento E6

Considerando que las impresiones de topes en vertical proporcionan mayor resistencia que las impresas en horizontal, y que la diferencia distintas entre hormas base no es significativa, se ha diseñado la siguiente tanda de ensayos para determinar si la longitud de la puntera es un parámetro determinante. Para ello, se han analizado todas las muestras de la horma B impresas en PLA, combinando las tres longitudes con los tres grosores mediante el ensayo de 500N. El resultado obtenido no ha sido concluyente, ya que en todos los casos el cilindro interior de plastilina no se ha visto afectado.

g) *Experimento E7*

Dado que el ensayo de 500N no sirvió para determinar la incidencia de la longitud sobre la resistencia de la horma; y que ha quedado probado que el ensayo de 10kN resulta por el contrario demasiado agresivo para las punteras fabricadas con PLA, llegando a destruir todas en las diferentes pruebas preliminares llevadas a cabo, se ha optado por una solución intermedia: Se ha aplicado sobre las punteras una fuerza ascendente con el objetivo de que el recorrido de compresión llegue hasta el punto en el que el cilindro interno supera la altura mínima, de tal forma que se puede establecer una comparación de las propiedades de cada una de las punteras en función de la fuerza máxima que cada una de ellas ha soportado. Para ello, al igual que en el experimento anterior, se ha testeado toda la remesa de muestras de la horma B impresas en PLA. Adicionalmente, para comparar el rendimiento del filamento PLA con el ABS, se ha testeado en este material los topes correspondientes a la horma B con longitud 60mm. Los resultados fueron los siguientes:

MUESTRA	Fuerza a rotura (N)	Luz interna a rotura (mm)
Topes PLA:		
HORMA_B1_40_15	588	22,2
HORMA_B1_40_25	1473	21,5
HORMA_B1_40_40	3169	20,7
HORMA_B1_50_15	714	22,8
HORMA_B1_50_25	1776	22,5
HORMA_B1_50_40	3576	20,8
HORMA_B1_60_15	748	22,8
HORMA_B1_60_25	1580	22,0
HORMA_B1_60_40	2627	21,7
Topes ABS.		
HORMA_B1_60_15-ABS	492	22,8
HORMA_B1_60_25-ABS	946	22,2
HORMA_B1_60_40-ABS	1856	20,8

Como se observa, la fuerza a rotura asciende linealmente con el grosor del tope, cosa que no ocurre con la longitud, para la cuya evolución no existe una linealidad en punteras con grosor equivalente. Llama la atención por otra parte que las punteras impresas en PLA presenten mayor resistencia a las impresas en ABS, cuando el PLA está considerado como un material más frágil.

h) *Experimento E8*

El último ciclo de ensayos tuvo como objetivo confirmar los resultados obtenidos en el anterior experimento, por los cuales las punteras fabricadas en ABS resistían menos que las impresas en PLA, y que éstos no se debieron algún problema con la

impresión. Para ello, se repitió el anterior experimento volviendo a fabricar en ABS las punteras utilizadas. Los resultados obtenidos fueron:

MUESTRA	Fuerza inicio de rotura (N)	Luz interna inicio de rotura (mm)
HORMA_B1_60_15	456	21,8
HORMA_B1_60_25	950	22,1
HORMA_B1_60_40	2750	22,0

Los resultados siguieron siendo peor respecto a sus homólogas en PLA, salvo en el caso de la de longitud 60 y grosor 4mm. en la que el punto de rotura se podría considerar equivalente. Por lo tanto, se confirma que las punteras fabricadas en ABS presentan menor resistencia. Las gráficas de la evolución de la compresión indican que las impresas en PLA se quiebran repentinamente, mientras que las ABS lo hacen de una manera más progresiva. En cualquier caso, la fuerza de inicio de rotura siempre es inferior en ABS.

Tras los experimentos realizados, las conclusiones obtenidas a modo de resumen son las siguientes:

- Las punteras impresas en 3D en materiales comunes como PLA y ABS, **son aptas** de acuerdo a la norma internacional EN 15090:2012 para calzado de bombero, en las cuales se aplica una fuerza de 500N sobre el tope.

- Las punteras impresas en 3D en materiales comunes como PLA y ABS, **no son aptas** de acuerdo a las norma internacionales EN ISO 20346:2014 (calzado de protección) y EN ISO 20345:2011 (calzado de seguridad) en las cuales se aplica una fuerza de 10kN y 15kN sobre el tope respectivamente.

- La posición de impresión más adecuada de los topes es la **vertical,** ya que éstos presentaron mayor resistencia que los impresos en horizontal.

- Los topes impresos en filamento de material PLA, presentaron una **resistencia ligeramente mayor** a los impresos en ABS.

- La resistencia presentada aumenta de manera directamente proporcional al **grosor del tope**.

- La horma base (siempre que su geometría sea apta para fabricación de topes) y la longitud del tope **no tienen incidencia** en su resistencia a la compresión.

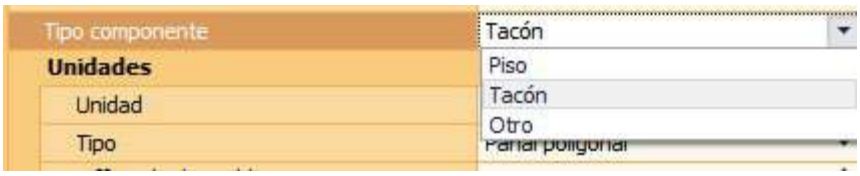
5. Diseño, fabricación y caracterización de tacones de calzado funcionalizados en cuanto a propiedades de dureza.

5.1 Introducción.

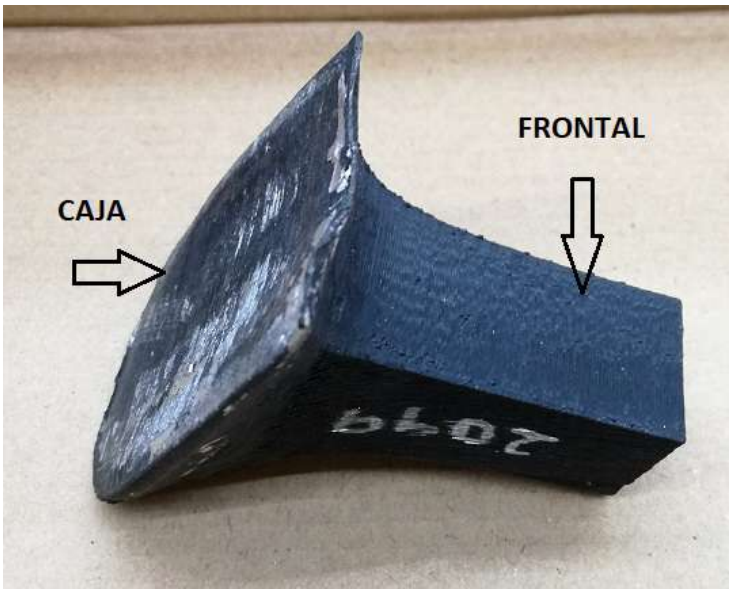
En esta fase del proyecto se ha llevado a cabo el diseño y fabricación de prototipos de tacones dotados de estructuras interiores para analizar si es posible mejorar su dureza a partir de incorporar este tipo de geometrías, así como analizar la viabilidad de su fabricación mediante impresión 3D. En base al análisis de las estructuras a incorporar llevada a cabo en la tarea T2.3, se han desarrollado los algoritmos para integrarlas dentro del tacón de manera paramétrica y automatizada (apartado 5.2), se ha procedido a su diseño y fabricación (apartado 5.3), y se ha caracterizado las propiedades de dureza aportadas, lo cual queda reflejado en el apartado 5.4.

5.2 Estructuras de refuerzo generables de manera automatizada.

Se ha realizado el desarrollo de algoritmos CAD para generar de manera automatizada las estructuras de amortiguación definidas en la fase de análisis, de tal forma que se ha facilitado la labor de diseño de prototipos. La generación de estas estructuras se ha implementado a partir de algunas de las estructuras básicas que fueron desarrolladas para la tarea T3.2 (funcionalización de pisos mediante estructuras de amortiguación), de manera que parte del desarrollo algorítmico se ha llevado a cabo en paralelo para las tareas T3.2 y T3.3. Sin embargo, la geometría de los tacones y los pisos difiere completamente, y por este motivo, ha sido necesario implementar una técnica totalmente distinta para ubicar y distribuir dichas estructuras a lo largo del tacón. Esta técnica se basa en dos parámetros de entrada: en primer lugar, es necesario separar respecto al resto del tacón una de las superficies que lo componen. Esta superficie será la correspondiente al frontal o la caja, dependiendo de la geometría del tacón y el tipo de estructura que se desea añadir. El segundo parámetro consiste en la polisuperficie que compone el resto del tacón, de manera que sirve esta de límite para distribuir volumétricamente la estructura.



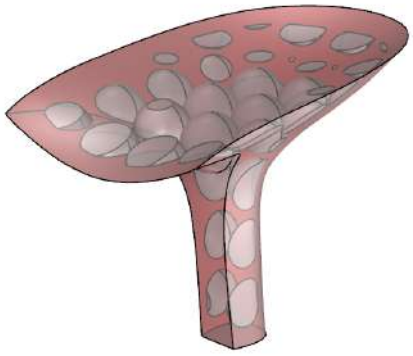
Parte de la interfaz de la utilidad de generación de estructuras donde se permite establecer si la estructura se debe crear y distribuir a modo de tacón o a modo de piso



Tacón impreso en 3D donde se indican las caras correspondientes a la caja y el frontal.

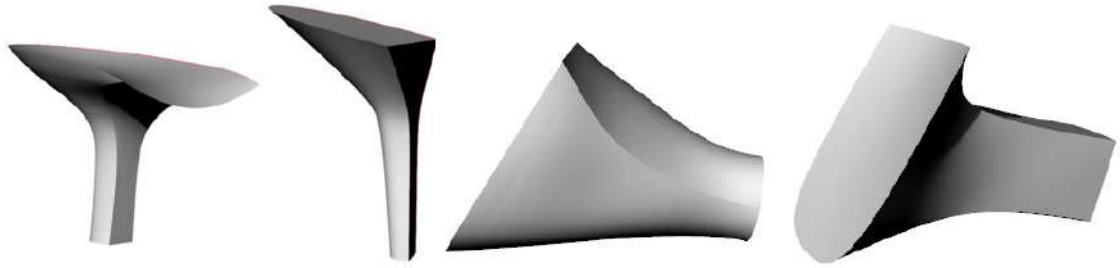
Los cuadros que se muestran a continuación reflejan las estructuras básicas que se han desarrollado para tacones, y cómo es posible generar a partir de ellas las que fueron definidas en la fase de análisis. Los parámetros de creación para cada tipo de estructura no se han reflejado por ser equivalentes a los indicados en la sección 3.2.

Estructura Básica	**Panal poligonal**
Imágenes	
Genera las estructuras requeridas:	- *Estructuras verticales.* La superficie base corresponde con la de la caja para generar los panales de arriba hacia abajo. - *Estructuras horizontales.* La superficie base corresponde con la de la caja para generar los panales de delante hacia atrás.

Estructura Básica	**Cámara de aire**
Imágenes	
Genera las estructuras requeridas:	- *Matriz de huecos.* Se distribuyen esferas en el tacón volumétricamente en XYZ. La superficie base puede ser la de la caja o el frontal.

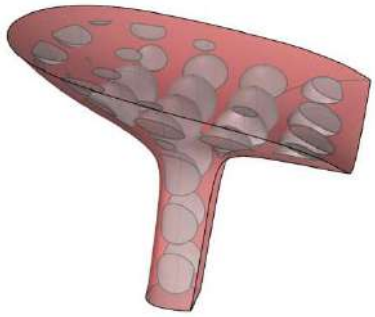
5.3 Diseño y fabricación de tacones funcionalizados.

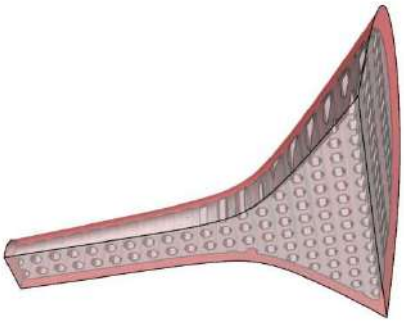
En esta sección se describen las diferentes muestras de tacones de calzado con propiedades de dureza funcionalizadas mediante estructuras, así como el procedimiento llevado a para su fabricación. Las muestras obtenidas fueron creadas a partir de 4 tacones base CAD que se seleccionaron de entre los que dispone INESCOP. De ellos, dos corresponden a tacones con una base fina, de anchura de 8mm. de diámetro aproximadamente; mientras que los otros dos disponen de una base gruesa, con un diámetro en torno a 20mm.

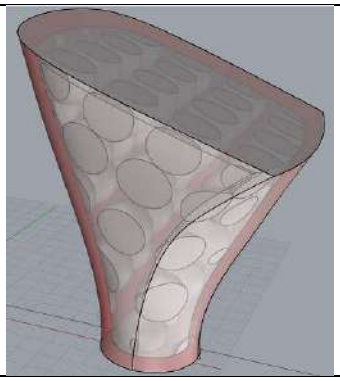


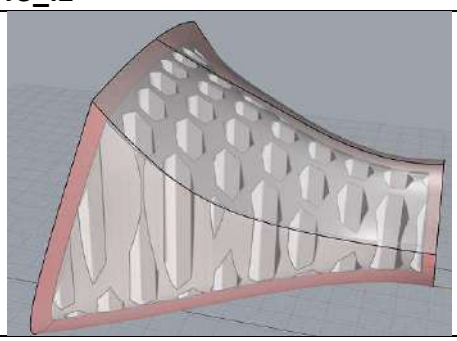
Tacones base seleccionados para integrar estructuras de refuerzo en ellos. De izquierda a derecha, referencias T1, T2, T3 y T7.

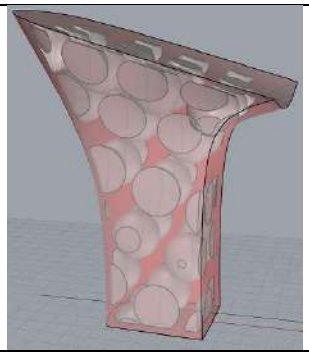
En la tabla que a continuación se adjunta, se reflejan los diferentes tacones de muestra con estructuras internas obtenidos a partir de los tacones base. En este caso, también se refleja la posición en la que se ha llevado a cabo la impresión, ya que resulta un parámetro que, dada la geometría variable de los tacones, se debe considerar para conseguir un acabado óptimo. Además, como queda patente en el siguiente apartado del entregable, influye en las características de dureza del tacón.

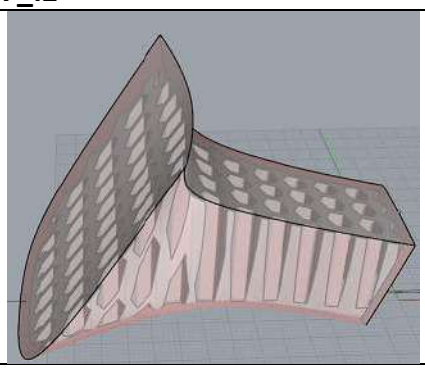
Referencia	**T1_I1**
	
Estructura utilizada	**Cámaras de aire** esféricas XYZ de 10mm. de diámetro y 1mm. de separación
Posición de impresión	Caja sobre la plataforma de impresión

Referencia	**T2_I1**
	
Estructura utilizada	**Panal poligonal horizontal** de tipo hexágono, 2mm. diámetro y 1mm. separación
Posición de impresión	Frontal sobre la plataforma de impresión

Referencia	**T3_I1**
	
Estructura utilizada	**Cámaras de aire** esféricas XYZ de 10mm. de diámetro y 1mm. de separación
Posición de impresión	Dorso (parte anterior al frontal) sobre plataforma de impresión

Referencia	**T3_I2**
	
Estructura utilizada	**Panal poligonal horizontal** de tipo hexágono, 5mm. diámetro y 1mm. separación
Posición de impresión	Dorso (parte anterior al frontal) sobre plataforma de impresión

Referencia	**T7_I1**
	
Estructura utilizada	**Cámaras de aire** esféricas XYZ de 10mm. de diámetro y 1mm. de separación
Posición de impresión	Dorso (parte anterior al frontal) sobre plataforma de impresión

Referencia	**T7_I2**
	
Estructura utilizada	**Panal poligonal horizontal** de tipo hexágono, 5mm. diámetro y 1mm. separación
Posición de impresión	Dorso (parte anterior al frontal) sobre plataforma de impresión

Tras la realización de diversas pruebas para determinar los parámetros válidos para la impresión 3D de tacones, se han fabricado los tacones diseñados utilizando filamento rígido, de tipo PLA (ácido poliáctico) y ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) dependiendo del caso.

Impresión en PLA del tacón con referencia T1_I1

Impresión de muestras T1_I1 y T2_I1 con corte transversal para poder apreciar las estructuras internas que componen los tacones.

5.4 Caracterización de propiedades de dureza en tacones.

Tal y como se indicó en el entregable E2.1, el método escogido para caracterizar la dureza de los tacones es el ensayo de resistencia a la fatiga por impacto (ISO 19956:2005). El objetivo de estos ensayos ha sido, por un lado, determinar si la fabricación de tacones mediante impresión 3D por fusión de filamento, utilizando materiales rígidos comunes como son el PLA y ABS, es viable para conseguir componentes con la dureza y resistencia suficiente como para respetar la normativa internacional. Por otra parte, se ha pretendido determinar si es posible mejorar la dureza del tacón, además de aligerar su peso y ahorrar material, incluyendo estructuras interiores huecas dentro del tacón.

En una primera serie de ensayos, se utilizaron los tacones de base fina. Las muestras analizadas fueron:

- *T1* totalmente relleno fabricado en PLA, impreso sobre caja.
- *T1_I1* fabricado en PLA, impreso sobre caja.
- *T2* totalmente relleno fabricado en PLA, impreso sobre frontal.
- *T2_I1* fabricado en PLA, impreso sobre frontal.
- *T2* totalmente relleno fabricado en ABS, impreso sobre frontal.

El objetivo de esta serie de ensayos ha sido, en relación a los tacones sólidos, comprobar cómo afecta la posición de impresión a su resistencia, y además, si se observa alguna diferencia en el resultado que presenta el PLA respecto al ABS. Con los tacones funcionalizados, se pretende comparar su resistencia respecto a la presentada en los tacones sólidos. Los resultados del ensayo fueron los siguientes:

ENSAYO E1	Tacón					Referencia [(1)]
	T1_I1	T2_1	T2	T1	T2 (ABS)	
R. FATIGA POR IMPACTO (ciclos)	1	1	310	1	325	14.000 mínimo
	R	R	R	R	R	Sin Rotura

R: rotura del tacón por la caña.

Como se puede observar en los resultados del ensayo, ninguno de los tacones soportó sin romperse los 14.000 mil ciclos requeridos para superarlo, con lo que se puede concluir que la impresión 3D por filamento fundido no sería adecuada para fabricación de tacones con base fina. En relación a los tacones sólidos, el T2 llegó a los 310 ciclos, mientras que el T1 se rompió al primer golpe. Este hecho sirve para concluir que es más adecuado imprimir el tacón sobre su frontal o dorsal que sobre su caja, debido a que al imprimir sobre el frontal o dorsal, la orientación de las capas de material es perpendicular a la dirección del impacto, lo que favorece su resistencia,

mientras que al imprimir sobre la base, la orientación de las capas es paralela a la dirección del impacto, y el tacón se quiebra precisamente en alguna de las zonas de unión entre capas. En el caso del tacón impreso en material ABS, se observa que resistió más ciclos que su equivalente en PLA, con lo cual se puede considerar un material más apto para su uso en tacones. Con respecto a los tacones con estructuras internas, ambos se rompieron al primer golpe, y por lo tanto, las estructuras aplicadas no sirvieron para reforzar el tacón.

La siguiente serie de ensayos tuvo como objetivo comprobar la viabilidad de la impresión 3D para tacones de base gruesa. Por ello, se fabricaron en ABS (ya que presentó un rendimiento superior al PLA en los anteriores ensayos) y testearon los tacones T3 y T7 en su versión sólida. Ambos se imprimieron reposando sobre su dorsal, y los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

ENSAYO E2			Referencia (1)
Tacón	T3	T7	
R. FATIGA POR IMPACTO (kc)	14/SG	14/SG	14 mín/SG

SG: sin grietas.

Como se observa, ambos tacones superaron el ensayo, con lo cual para este tipo de tacones, su fabricación por impresión 3D resulta ser viable.

En un último ensayo, se ha pretendido evaluar si por el contrario, las estructuras aplicadas restan resistencia al tacón y en qué medida lo hacen. Por ello, se han ensayado los tacones anteriores, en material ABS, y provistos de estructuras internas de tipo cámaras de aire y panal poligonal. Los resultados fueron:

ENSAYO E3_A			Referencia (1)
Tacón	T3-1	T7-1	
R. FATIGA POR IMPACTO (kc)	14/SG	9/R	14 mín/SG

ENSAYO E3_B			Referencia (1)
Tacón	T3-2	T7-2	
R. FATIGA POR IMPACTO (kc)	5,6/R	3,5/R	14 mín/SG

SG: sin grietas.
R: rotura del tacón (ver fotografías).

En este caso, se observa que la estructura que mejor resultado ha dado ha sido la de cámaras de aire, ya que ambos tacones han aguantado 14.000 (superó el ensayo) y 9.000 ciclos respectivamente. En el caso de los panales hexagonales, aguantaron 5.600 y 3.500 ciclos. Se puede concluir por tanto que que todas las estructuras utilizadas restan dureza al tacón. Sin embargo, en tacones con suficiente volumen, dichas estructuras podrían ser adecuadas para ahorrar material y aligerar el componente.

Apariencia presentada por las muestras de los tacones T3 y T7 tras verse sometidos a ensayo.

A modo de resumen, las principales conclusiones obtenidas fueron:

- Es más adecuado **imprimir el tacón sobre su frontal o dorsal** que sobre su caja, debido a que al imprimir sobre el frontal o dorsal, la orientación de las capas de material es perpendicular a la dirección del impacto, lo que favorece su resistencia.

- La resistencia presentada en los tacones con **base fina** (diámetro <10mm.) impresos en 3D con PLA y ABS los hace **no adecuados** para ser utilizados.

- La resistencia presentada en los tacones con **base gruesa** (diámetro >10mm.) impresos en 3D con PLA y ABS los hace **adecuados** para ser utilizados.

- Los tacones fabricados en material ABS presentaron **una mayor resistencia** que los fabricados en PLA.

- Las estructuras internas aplicadas **restan resistencia al tacón**, aunque en tacones con suficiente volumen, dichas estructuras podrían ser adecuadas para ahorrar material y aligerar el componente

- De las estructuras implementadas, el tipo **cámaras de aire** presentó un mejor resultado que los panales hexagonales.

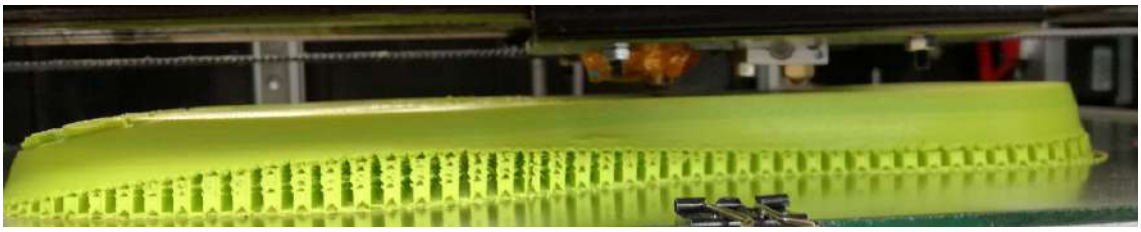
6. Directrices de impresión 3D por FDM para elementos funcionalizados.

6.1 Recomendaciones para la impresión de los elementos funcionalizados.

En esta sección se detalla el conocimiento generado a lo largo del desarrollo del paquete de trabajo 3, a modo de directrices de impresión específicas para cada uno de los tipos de elementos de calzado para los cuales se ha estudiado su funcionalización. Estas directrices se han obtenido, en una primera instancia, gracias a analizar cómo es posible fabricar un componente de manera que se maximice su rendimiento y se eviten problemas de impresión dada la naturaleza y limitaciones de la impresión 3D por fusión de filamento, y el material establecido en cada caso. Dentro de estos condicionantes, los más importantes son la disposición en la que se distribuyen las capas de material para componer el elemento; y la necesidad que tiene la máquina de generar un soporte para comenzar a depositar material en las zonas donde el elemento no esté en contacto directo sobre la plataforma de impresión. Con estas premisas, se ha ido realizando sucesivos test de impresión, los cuales han servido para modificar y refinar las directrices establecidas inicialmente.

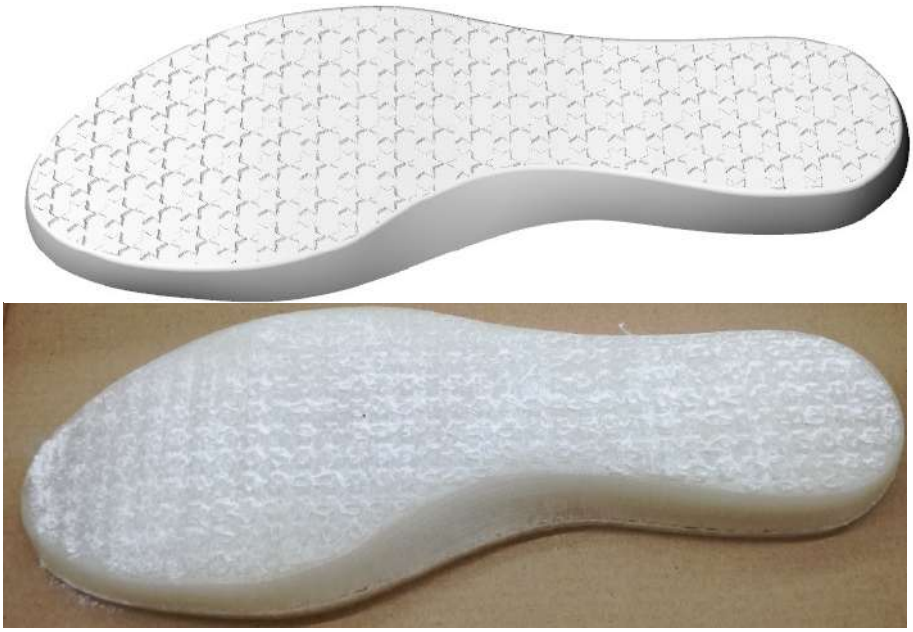
a) Pisos que incorporan texturizado 3D

La impresión de pisos con texturizado 3D se ha llevado a cabo con filamento flexible de TPU (poliuretano termoplástico) En este tipo de pisos, es especialmente importante que el acabado superficial sea óptimo, debido a que si no es así, los texturizados con elementos muy pequeños serán inapreciables. La conclusión principal obtenida del análisis preliminar, es que la posición de impresión óptima consiste en ubicar la cara del piso que está en contacto con el forro sobre la plataforma. La rugosidad producida por el soporte de impresión, el cual se fabrica con el mismo tipo de filamento, no afecta al texturizado, e incluso favorecería la adhesión con el corte.



El piso se sitúa "boca abajo" para que el soporte añadido no afecte al texturizado.

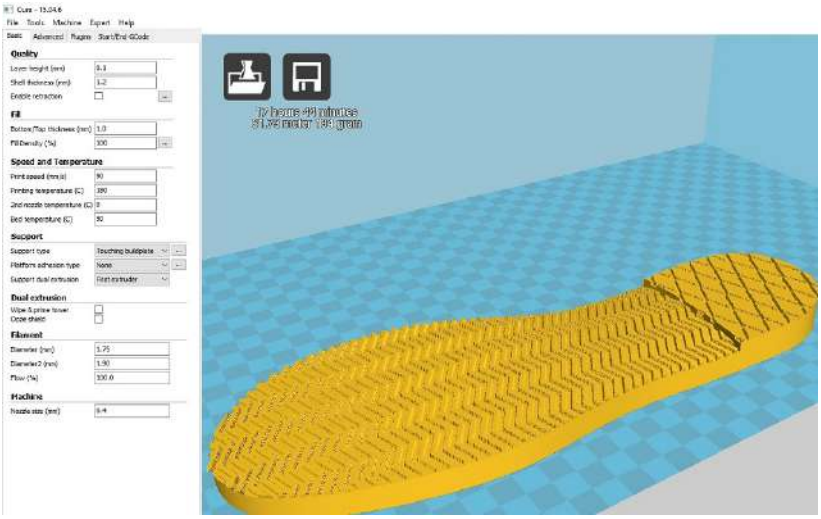
Dada la importancia de conseguir un acabado óptimo para el texturizado, además de hacerlo en un tiempo lo más reducido posible, se ha ido variando los parámetros de impresión, registrando los cambios que se consideraban oportunos.



Una de las primeras pruebas de impresión, donde la apariencia del texturizado en forma de estrella es deficiente.

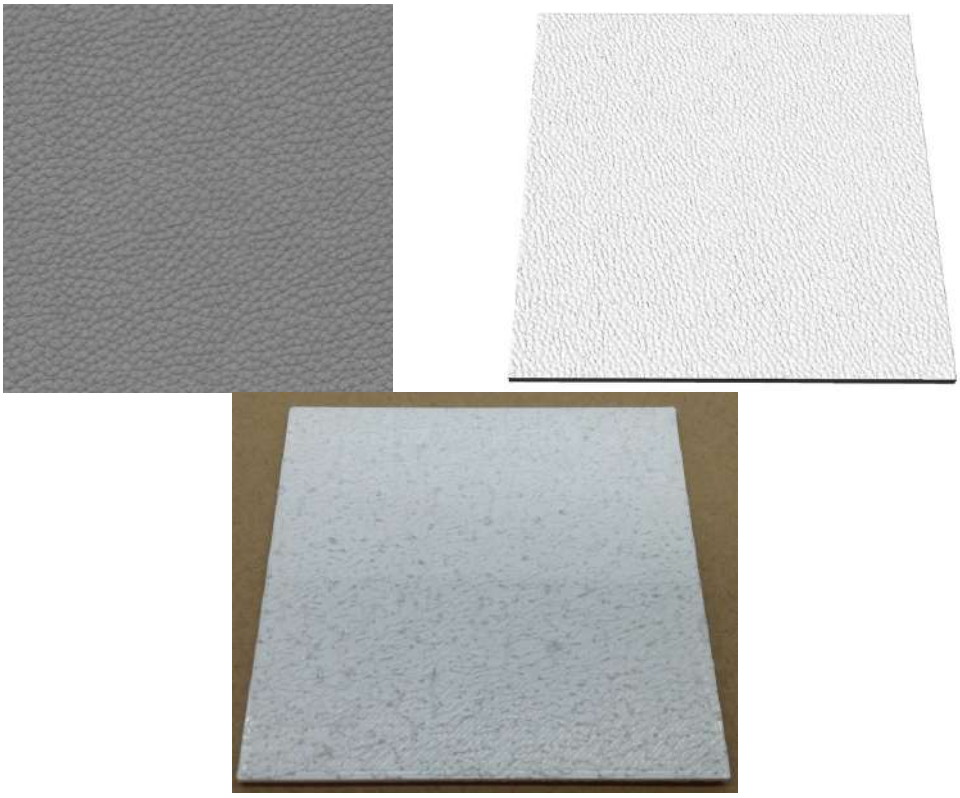
Las principales conclusiones extraídas de esta secuencia de tests han sido:

- La **altura de capa** máxima para texturizado debe ser de 0.1mm.
- La **velocidad de desplazamiento** del cabezal se ha podido incrementar hasta 90mm/s. sin pérdida de calidad.
- La **densidad de relleno** es recomendable mantenerla al 100%
- A mayor temperatura ambiente, es recomendable reducir la **temperatura de impresión y el flujo de material**.
- La **retracción del filamento** debe habilitarse. Evita goteo ocasional de material residual, el cual produce restregones indeseados sobre el acabado del texturizado.



La configuración de unos parámetros de impresión adecuados es fundamental para obtener un texturizado óptimo

No obstante, y aun refinando los parámetros de impresión, existen casos en los que la textura a aplicar tiene un nivel de detalle muy elevado, el cual es apreciable en la probeta diseñada, pero por la resolución a la que trabajan las impresoras 3D de filamento, no son fabricables con un nivel de calidad suficiente.



Textura, probeta CAD texturizada a partir de ella e impresión realizada. La resolución a la que trabaja la máquina impide obtener un resultado mejor.

b) Pisos que incorporan estructuras de amortiguación.

La fabricación de pisos con estructuras de amortiguación se ha realizado también utilizando filamento flexible TPU. La principal dificultad radica en los voladizos (zonas desprovistas base suficiente para depositar material) de provocados por las estructuras internas huecas. Las pruebas de impresión iniciales, tanto de probetas como de pisos completos, se realizaban posicionando el piso con la parte de la suela en contacto con la plataforma de impresión. En determinados casos el resultado era correcto, pero en los casos en los que las superficies en voladizo eran demasiado extensas, el material no se solidificaba correctamente.

Probeta de estructura de amortiguación con el material de la superficie superior levantado

Este caso se solucionó modificando la posición de impresión del piso, de manera que una de sus superficies laterales repose sobre la plataforma. De este modo, se minimizan las superficies en voladizo y se ha conseguido fabricar todas las estructuras propuestas de la forma adecuada. Sin embargo, la impresión en lateral provoca que el soporte integrado produzca un residuo el cual es complicado eliminar completamente, e incluso puede dañar las aristas laterales cuando éstas son muy finas. Este problema ha sido abordado utilizando el doble cabezal de la impresora para generar un soporte en material rígido con el segundo cabezal. Al tratarse de materiales distintos, la adhesión entre ellos es menor pudiendo ser el soporte retirado de manera sencilla sin dañar el piso, al igual que ocurriría con soportes en material soluble.

Zona lateral-trasera de piso impreso sobre su costado usando soporte del mismo material

Dos impresiones de un mismo piso. El de arriba utilizó soporte de tipo PLA, mientras que el de abajo utilizó el mismo TPU.

A modo de resumen, las directrices de impresión 3D que se han obtenido para los pisos con estructuras de amortiguación han sido:

- La **posición** adecuada de impresión consiste en ubicarlo con su lateral sobre la plataforma. De esta forma, las cámaras de aire se fabrican de manera correcta al minimizarse las superficies que quedan en voladizo.

- El **soporte** se debe configurar exclusivamente sobre la plataforma de impresión para que no se rellenen de soporte las estructuras huecas.

- El **ángulo de voladizo** de soporte se debe configurar como máximo al 10º. De lo contrario, el material de soporte de la zona de punta y talón se deforma al no disponer de la superficie adecuada sobre la que depositarse.

- La **retracción del filamento** puede deshabilitarse, ya que en este caso la precisión en el acabado no es tan necesaria como en el caso del texturizado.

- La utilización del **doble cabezal** para fabricar un soporte de material distinto al del resto del piso facilita su proceso de retirado y limpieza, y proporciona un acabado de más calidad al prototipo de piso.

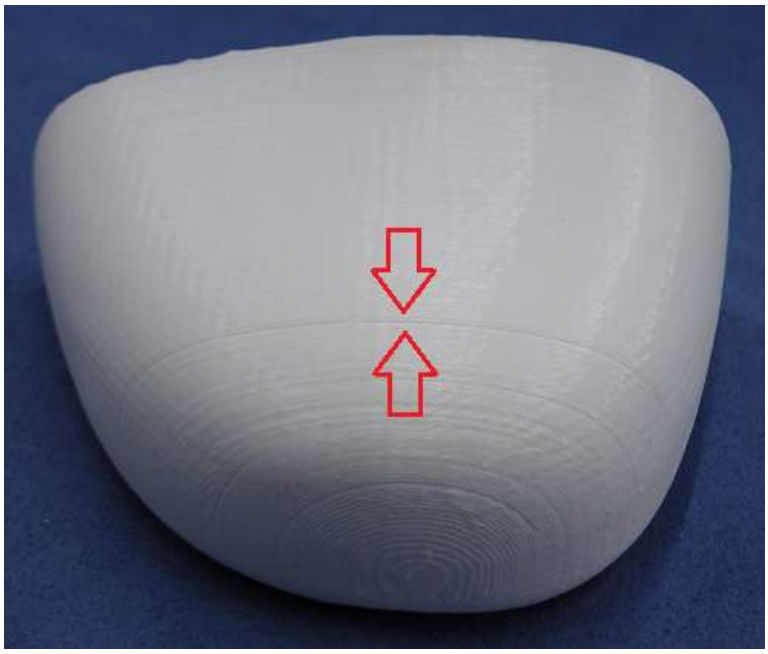
c) Topes de refuerzo

Los topes de refuerzo con los que se ha trabajado a lo largo del proyecto han sido fabricados utilizando filamento rígido de tipo PLA y ABS. Tal y como se ha expuesto en el apartado 4.3 de la presente memoria, la posición de impresión tiene una incidencia directa en las propiedades de resistencia del tope. Las principales conclusiones específicas obtenidas para impresión de topes de refuerzo fueron:

- La **posición** adecuada de impresión es con la punta del tope mirando hacia arriba. La disposición de las capas de material favorece la dureza del tope al aplicarle compresión.

- Para que el tope sea resistente es fundamental una **correcta adhesión entre capas**. Una velocidad alta de desplazamiento del cabezal, una altura de capa demasiado grande, o una temperatura de impresión demasiado baja, podría provocar que determinadas capas queden separadas.

- Cuando el material utilizado sea ABS, y debido a la tendencia de este material a despegarse, se debe configurar un **soporte de adhesión adicional**.



Problema de separación entre capas en un tope impreso en PLA.

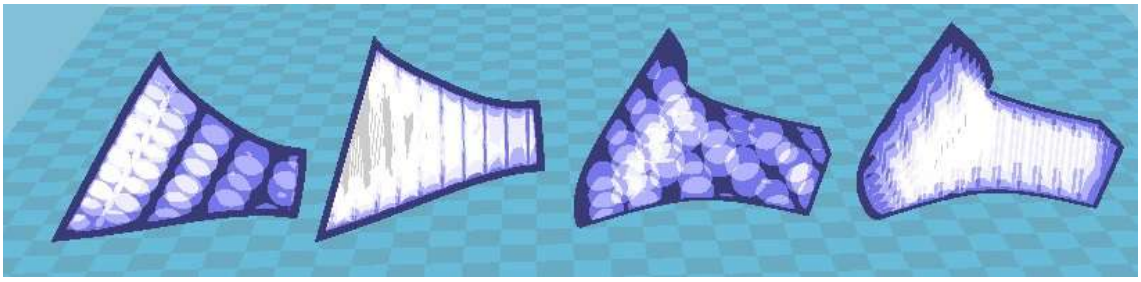
d) Tacones con estructuras internas de refuerzo.

La fabricación de tacones se ha realizado utilizando filamento rígido (PLA y ABS). Al igual que ocurre con las fabricación de punteras, la disposición de las capas de material tiene una incidencia directa en la durabilidad del tacón. Las conclusiones obtenidas en relación a la impresión 3D de tacones fueron:

- Posición de impresión con el frontal o el dorso sobre la plataforma de impresión para favorecer la resistencia del tacón con la disposición de las capas.

- El **soporte** se debe configurar exclusivamente sobre la plataforma de impresión para que no se rellenen de soporte las estructuras huecas.

- Al igual que ocurre con los topes de refuerzo, cuando el material utilizado sea ABS, se debe configurar un **soporte de adhesión adicional**.



Conjunto de tacones funcionalizados para imprimir con su superficie dorsal ubicada sobre la plataforma de impresión

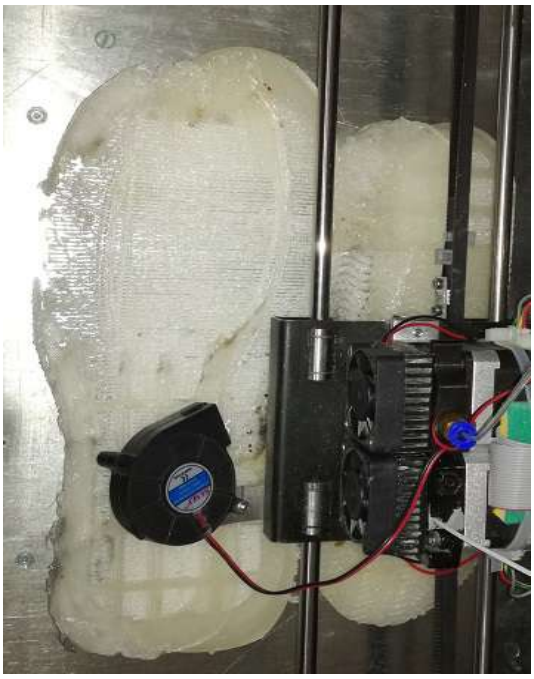
6.2 Recomendaciones para evitar problemas comunes de impresión.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se han encontrado a menudo problemas de impresión comunes al conjunto de elementos fabricados, y a los diferentes tipos de filamento utilizados. En este apartado se reflejan cada uno de estos problemas, el motivo de los mismos, y una serie de recomendaciones para evitarlos elaboradas en base a la experiencia obtenida.

Problema de impresión	Recomendaciones para su prevención
Obstrucción del cabezal.	- Temperatura de impresión excesiva: El material se carboniza produciendo pequeñas obstrucciones. - Temperatura de impresión insuficiente: El filamento no funde completamente y produce atascos en el extrusor. - Deshabilitar retracción de filamento. La retracción del filamento hacia dentro del extrusor en ocasiones ha provocado en ciertas ocasiones obstrucciones del mismo. - Comprobar diámetro constante de filamento, y acabado correcto, sin hendiduras ni dobleces

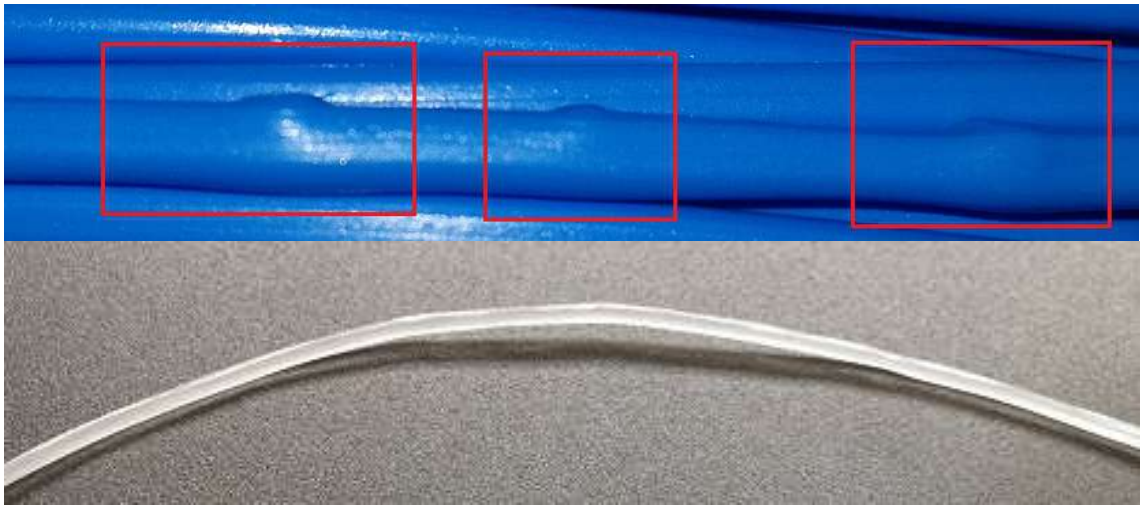
La obstrucción del cabezal provoca que el elemento quede a medio fabricar y se deba descartar

Problema de impresión	Recomendaciones para su prevención
Desplazamiento de capas de material	- Por sobrecalentamiento de la electrónica del motor: reducir la velocidad de impresión. - Por problemas mecánicos (correas, poleas, etc.): revisar periódicamente estos elementos.



El desajuste de los ejes de la impresora provoca que se observen desplazamientos entre las capas de material del elemento fabricado

Problema de impresión	Recomendaciones para su prevención
Acabados imprecisos	- Comprobar diámetro constante de filamento, y acabado correcto, sin hendiduras ni dobleces - Ajustar el flujo de impresión - No usar velocidad de desplazamiento excesiva - Ajustar temperatura en función de la temperatura ambiente y velocidad de desplazamiento utilizada. - La retracción de filamento evita la aparición de hilos residuales, pero puede producir obstrucción del cabezal.



Se debe comprobar que el filamento tenga un diámetro constante y un acabado adecuado. En caso contrario, puede provocar obstrucciones del cabezal e impresiones de baja calidad.

Problema de impresión	Recomendaciones para su prevención
Material desprendido	- En elementos exteriores: Aumentar en ángulo de aplicación del soporte. - En elementos interiores: a) Modificar la posición de impresión para minimizar voladizos. b) Incluir soportes interiores de reducido grosor que no afecten funcionalmente a la pieza

Problema de impresión	Recomendaciones para su prevención
La primera capa no se adhiere a la plataforma de impresión.	- Verificar que la plataforma de impresión está nivelada - La utilización de lacas facilitan la adhesión de la primera capa de material. - Para imprimir elementos con poca base, o impresiones en material ABS, se debe configurar un soporte de adhesión adicional.

Parte inferior de tacón fabricado en PLA que se desprendió de la plataforma de impresión.

Tacones impresos en ABS a los que se les ha provisto de un soporte de adhesión adicional.

7. Viabilidad de impresión de prototipos de calzado funcionalizados mediante otras tecnologías de AM.

7.1. Objetivo

El objetivo del análisis realizado consiste en estudiar la viabilidad de fabricar mediante otras tecnologías de fabricación aditiva, como pueden ser el *Polyjet* y el sinterizado láser selectivo (SLS), prototipos de pisos y modelos completos de modelos de calzado, cuyo piso esté funcionalizado mediante estructuras internas de amortiguación, y dotado de superficies texturizadas en 3D en determinadas zonas. En el caso de los modelos completos, la parte correspondiente al corte, debe imprimirse con material rígido, mientras que la correspondiente al piso, con material flexible. Deben respetarse los colores y texturas originales del modelo CAD. Mediante la tecnología polyjet, pueden obtenerse modelos completos impresos con texturas foto-realistas. Por otra parte, mediante el análisis de los resultados obtenidos con tecnología SLS se pretende comprobar la calidad del resultado obtenido con una impresora que a diferencia de la tecnología polyjet, no admite color y tiene una resolución de impresión menor, pero por el contrario, trabaja a más velocidad. A partir del análisis de los diferentes tipos de modelo de calzado que se desean imprimir en 3D, se han determinado las limitaciones de las tecnologías analizadas y con el objetivo de salvarlas, se han establecido unas metodologías de diseño específicas para este tipo de fabricación.

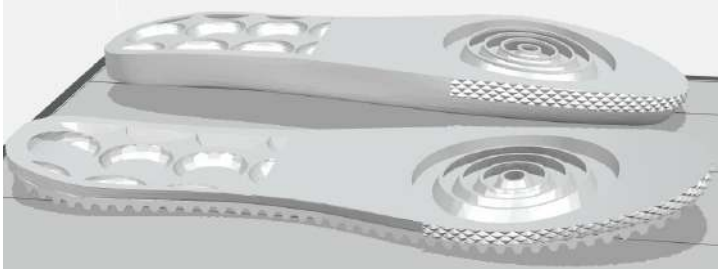
El documento se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se exponen las problemáticas y limitaciones encontradas a través de los casos prácticos. En segundo lugar, se exponen las soluciones adoptadas, y finalmente, se presentan cada uno de los casos prácticos diseñados y fabricados, los cuales han servido para definir las diferentes metodologías de trabajo.

Uno de los prototipos virtuales seleccionado para analizar la viabilidad de funcionalización y fabricación mediante PolyJet.

7.2. Problemática de diseño y limitaciones software

7.2.1 Estructuras internas del piso.

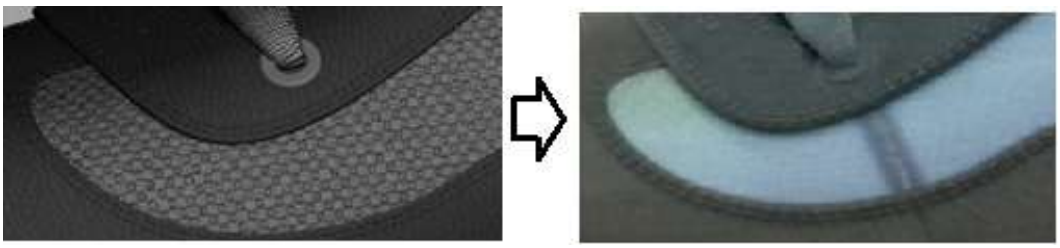
Tanto en *Polyjet* como en SLS, y debido a que el piso contiene estructuras huecas en su interior, para poder efectuar el vaciado del material de soporte, el piso debe ser fabricado en dos mitades, que posteriormente deben ser pegadas. De realizarse en una única pieza, el material de soporte quedaría atrapado en el interior del piso sin ser posible su extracción. Fabricar el prototipo de piso en dos mitades, implicaría realizar posteriormente el pegado mediante adhesivo y de manera manual, con lo cual es probable que la discontinuidad entre ambas partes sea perceptible en el prototipo, y por tanto pierda su función de mostrar la apariencia real del modelo diseñado.



Piso partido en dos mitades para posibilitar la fabricación de las estructuras de amortiguación. El acabado exterior después de pegar las dos mitades podría no resultar óptimo.

7.2.2 Colores de capa superpuestos.

Se ha detectado que en ocasiones existe transferencia de color entre piezas del corte de diferentes colores, dando lugar a un color intermedio. Esto ocurre por la existencia de capas solapadas, y debido a que en ocasiones, los diseñadores plantean el diseño de un modelo pensando en que visualmente sea correcto. Sin embargo, existen ciertos detalles no visibles, como es el caso del solapamiento de piezas, que es crítico de cara a la fabricación. Normalmente, las impresoras 3D interpretan las zonas de unión entre diferentes piezas como una geometría única. Sin embargo, cuando estas geometrías diferentes contienen información de color, no es capaz de interpretar correctamente cuál de los colores de las dos piezas es el que debe utilizar, realizando una combinación entre ambos.

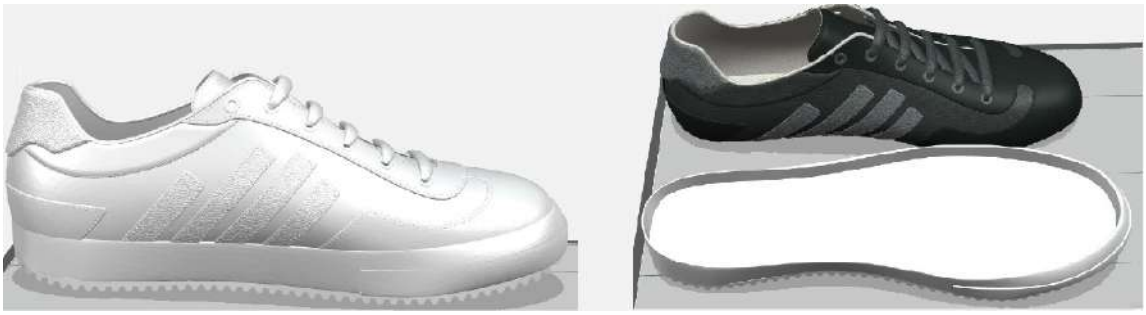


Del color gris del modelo virtual, se pasa al azulado e incluso verdoso en algunas zonas, del modelo fabricado. Además, se observa cómo la parte interior de la cordonera ha traspasado su color al corte.

7.2.3 Impresión corte-piso

En el caso de la impresión de modelos completos, es requisito indispensable separar corte y el piso en dos ficheros CAD separados para que la impresora pueda efectuar el cambio de material entre una parte y otra del modelo.

Por otro lado, para que el software de impresión GRABCAD sea capaz de hacer que la impresora *Polyjet* fabrique corte y piso unidos como si de un solo objeto se tratara, se debe importar en primer lugar el fichero .OBJ (formato utilizado para los ficheros CAD del prototipo) del piso. A continuación, mediante la opción de ensamblado, se debe añadir el fichero correspondiente al corte para que el software respete su posición original, en la que está unido al piso. De no incluir el corte con la opción de ensamblado, éste se posiciona separado del piso automáticamente. Dadas estas premisas, se encontró una limitación en el software GRABCAD por la cual sólo es posible añadir ficheros en formato .STL para ensamblar. Los ficheros STL solo disponen de información geométrica y no de texturas. Por lo tanto, el convertir el fichero .VRML del corte a .STL, implicaría perder la una información esencial, como son todas las texturas que integran el modelo y los parámetros con los que se aplican con el objetivo de conseguir una apariencia realista. Por otra parte, el fabricar corte y piso en una sola pieza implica que debe utilizarse un material del mismo tipo para ambas partes, mientras que para obtener un piso más realista, sería conveniente fabricarlo utilizando material flexible.



Vista de simulador de fabricación por PolyJet. Izquierda: Corte y piso ensamblado, el corte ha perdido la información de la textura, y todo el conjunto debe fabricarse en el mismo material.
Derecha: Corte y piso para fabricar por separado.

Esta limitación implica por tanto que piso y corte deban imprimirse por separado, para unirlos posteriormente de manera manual.

7.3. Soluciones adoptadas.

7.3.1 Diseño de piso para impresión de estructuras internas.

Se ha determinado modificar el diseño del piso funcionalizado, de tal forma que se separen por un lado, la parte interior del piso que contiene las estructuras de amortiguación, y por otro, toda la parte exterior, que incluye la superficie inferior y las laterales. La parte interior a su vez se divide en dos mitades con el objetivo de fabricar y poder vaciar de material de soporte las estructuras interiores de amortiguación, tal y como se ha reflejado con anterioridad. De esta forma, se fabrican tres partes diferentes: exterior del piso a modo de "cáscara de nuez", mitad inferior del interior del piso, y mitad superior del interior del piso. Gracias a ello, al estar la parte exterior impresa en una sola pieza, no existirá en el piso partición perceptible para el observador.

La secuencia de pasos seguida en el proceso de diseño para dividir el piso completo en tres partes es el siguiente:

a) El punto de partida consiste en el piso dotado de estructuras internas.

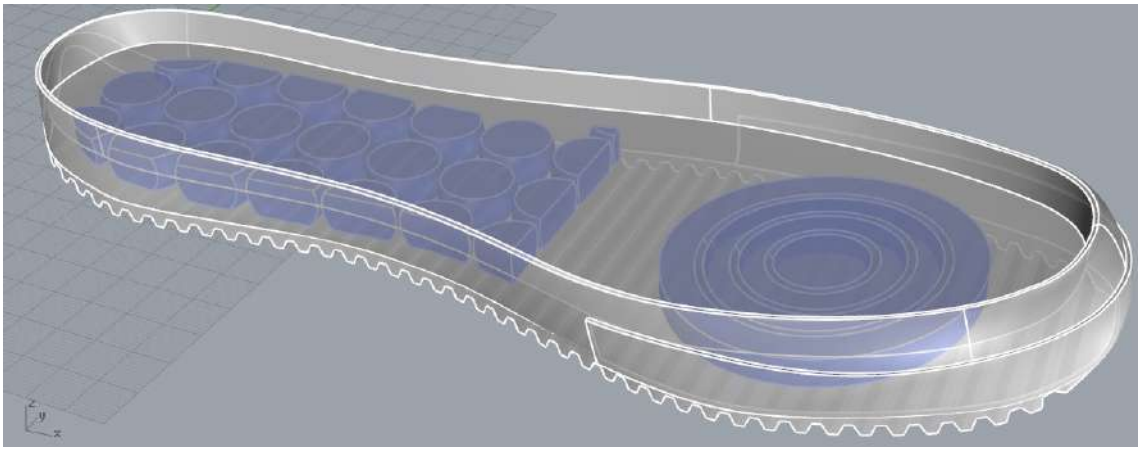
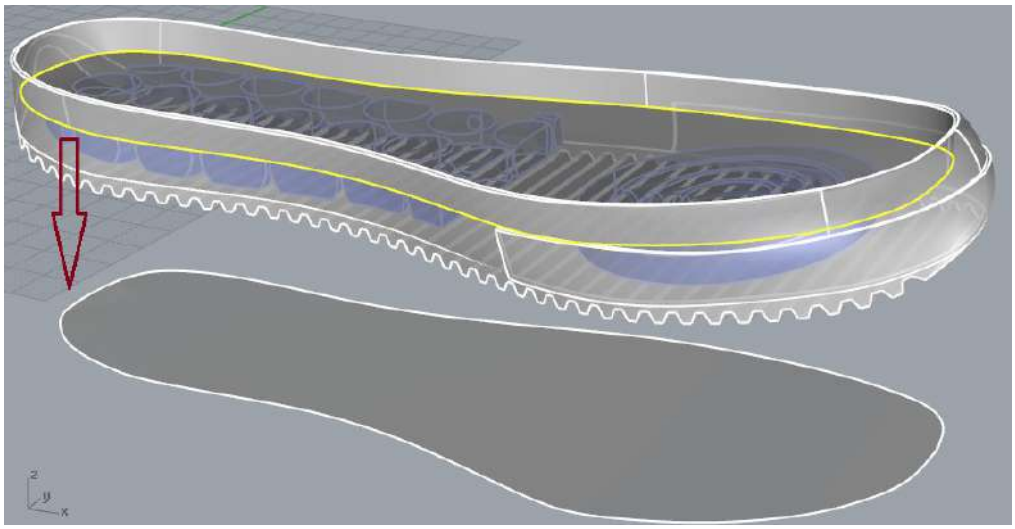


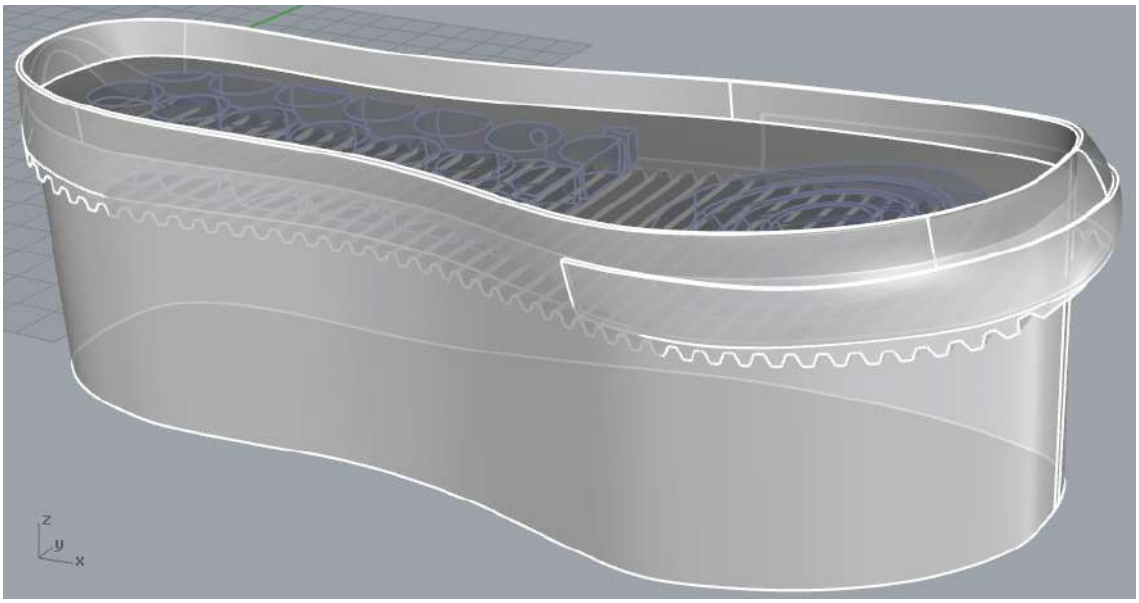
Fig. 4. Piso con estructuras internas en zona trasera y metatarsal.

b) Con el objetivo de crear un objeto tridimensional que englobe la parte interior del piso, se replica la tapa superior y se desplaza hacia abajo (eje –Z), de forma que quede situado por debajo del conjunto del piso, tal y como se ilustra en la figura siguiente:



La tapa superior del piso debe duplicarse y desplazarse

c) A partir de las tapas superior (superficie del piso) e inferior (copia desplazada), se crea una superficie de transición para conformar el objeto cerrado.



Se crea una superficie de cierre de la parte interior con las caras superior e inferior.

d) La cara inferior del objeto interno debe rediseñarse para que quede en el interior del piso y se adapte a su geometría. Para ello, se crea una curva que define su perfil inferior, tal y como se observa en la siguiente imagen.

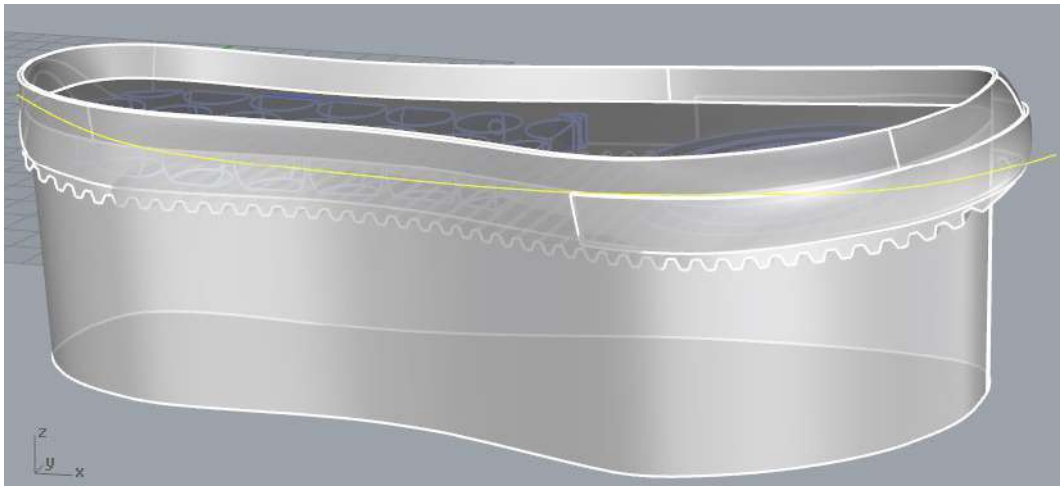


Fig. 7. Curva para recortar la cara inferior del interior del piso.

e) El siguiente paso consiste en crear una superficie de corte a partir de la curva, y aplicar una diferencia booleana para definir la parte inferior del interior del piso.

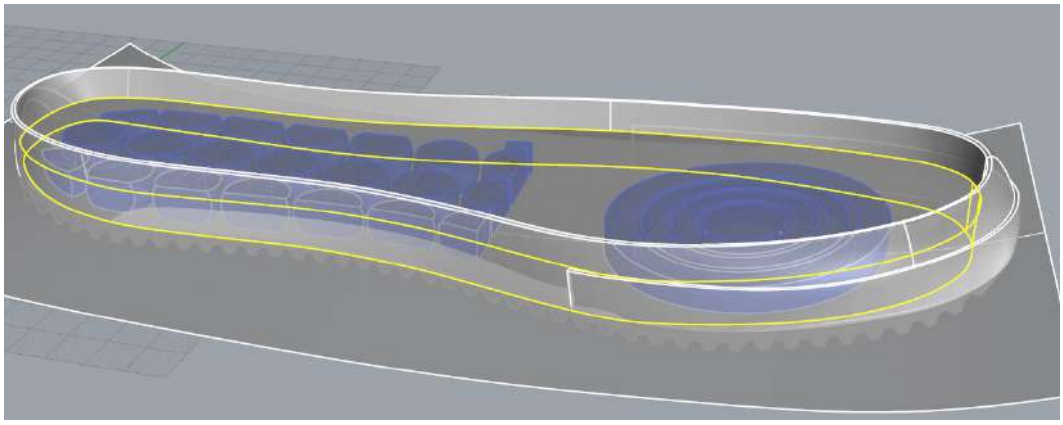
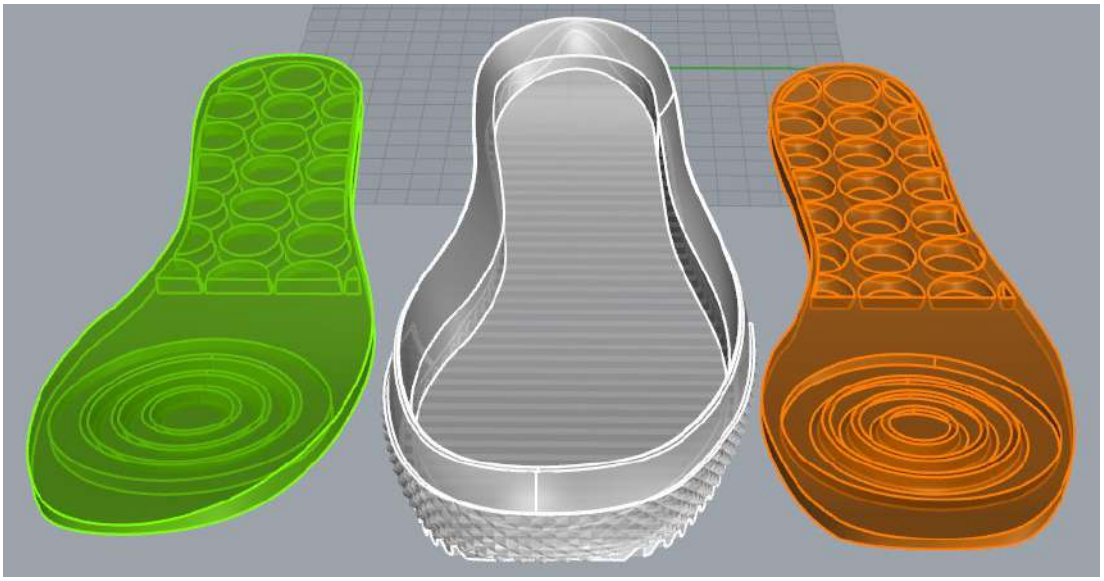


Fig. 8. Recortando con la superficie, queda definida correctamente la parte inferior del piso.

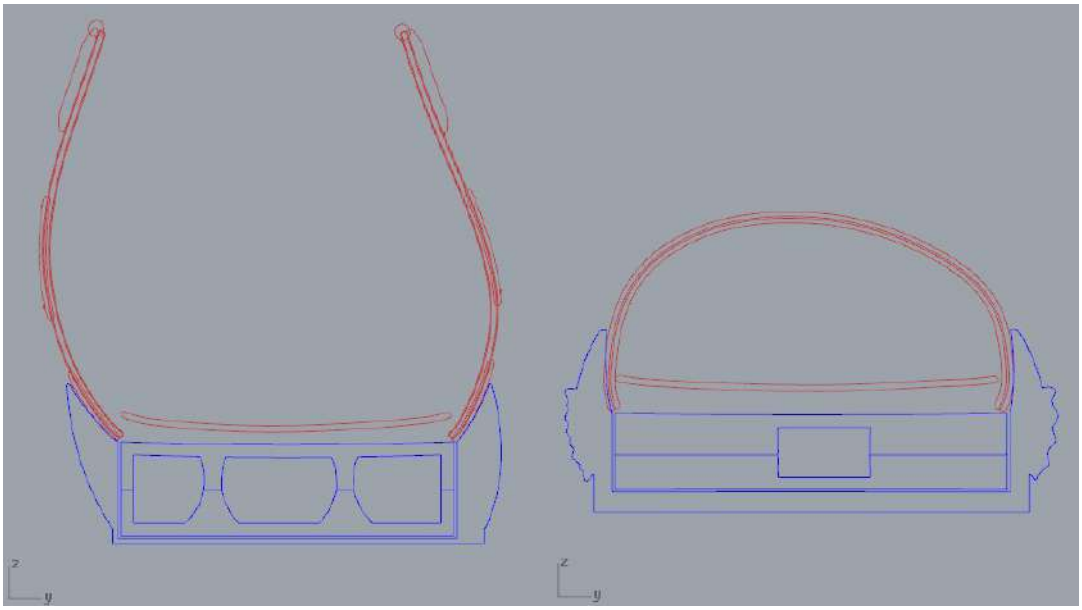
f) Una vez se dispone de la geometría interior del piso, es necesario a su vez efectuar una partición sobre ésta de manera que las estructuras interiores de amortiguación sean imprimibles. Para ello, se sigue un procedimiento similar: se diseña una curva de corte, se genera una superficie de corte a partir de ella, y se utiliza para dividir en interior en dos mitades. En la siguiente imagen, se observa el resultado final, con el piso desprovisto de interior en color blanco, la mitad superior del interior a la izquierda pintada en color verde, y la mitad inferior del interior a la derecha pintada en color naranja. Además, a la parte exterior se la ha añadido la pieza texturizada en la puntera. El resultado es apreciable en la siguiente imagen:



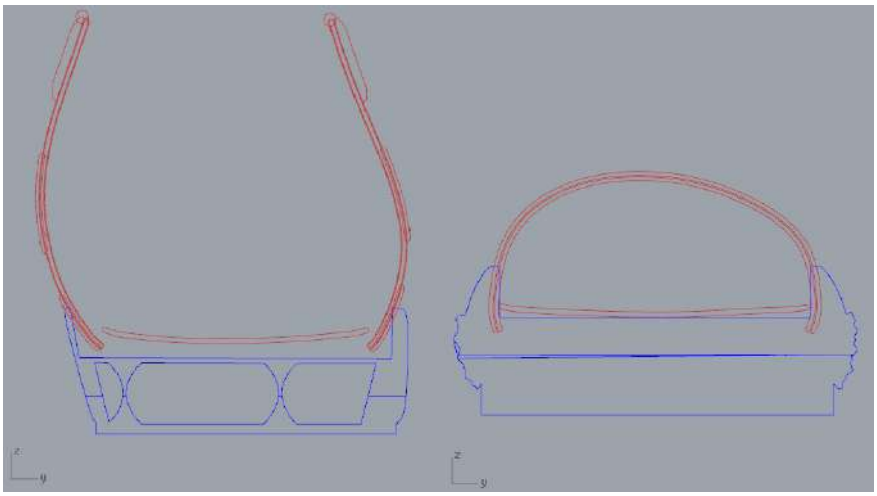
En blanco, piso sin parte interior. En naranja, mitad inferior del interior. En verde, mitad superior del interior.

g) Con el fin de comprobar que el piso se ha diseñado correctamente y es integrable con el corte del zapato completo, se han importado las mallas correspondientes al corte y se han posicionado sobre el piso, tal y como se procedería con el modelo real. A continuación, se han obtenido secciones transversales mediante la intersección con un plano de corte a diferentes alturas, para verificar que no existe separación ni solapamiento entre las distintas partes que integran el modelo. En las siguientes figuras se muestra, por un lado, un piso que ha sido diseñado teniendo en cuenta la geometría del corte, y por ello, no se producen apenas solapamientos ni separaciones. Por otro lado, el siguiente piso que se ilustra ha sido diseñado de manera independiente al corte, y por ese motivo, el encaje de ambas piezas en determinadas zonas es incorrecto.

Piso y corte integrados, y plano de corte en zona trasera para verificar la correcta integración de ambas partes.

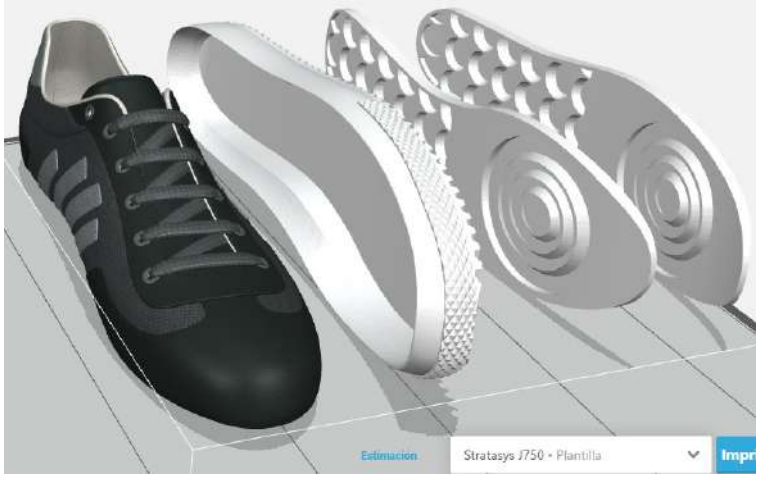


Secciones de talón y puntera del modelo con un piso diseñado correctamente. No se aprecia solapamiento ni separación significativa entre corte (marcado en rojo) y piso (marcado en azul).



Secciones de talón y puntera del modelo con un piso incorrecto. En la sección del talón se aprecia una separación excesiva entre corte y piso, mientras que en la punta, existe demasiado solapamiento

h) En último lugar, se convierte a malla de polígonos las superficies que conforman el piso, y se cargan las diferentes partes del piso, junto con el corte, en el software de impresión 3D, tal y como se observa en la siguiente imagen.



Corte del modelo y las tres partes que integran el piso cargados en la bandeja del software de impresión.

7.3.2 Diseño de corte para evitar solapamientos de color entre capas.

Según las pruebas de impresión realizadas, es crítico evitar el solapamiento de piezas a la hora de diseñar un modelo virtual para impresión 3D para obtener una impresión con color correcto, sin que exista transferencia entre piezas. En el ejemplo que a continuación se muestra, se advierte la transferencia de color entre dos piezas, una negra y otra blanca, con distintos niveles de solapamiento.

En la pieza de la izquierda, en la que no existe solapamiento, el color es blanco. Según aumenta el solapamiento, el blanco se va tornando en azul.

Además, se ha determinado que aunque no exista solapamiento, el grosor de cada pieza debe ser al menos de 1.5 mm. para que no exista transferencia de color. Esto supone un serio condicionante para el diseño, debido a que en determinados modelos de calzado, se llegan a superponer hasta tres piezas en determinadas zonas, lo cual resultaría en un corte de 5mm. de grosor total, por lo que se debe efectuar el diseño de cada pieza minimizando estas áreas de solapamiento. En la siguiente imagen se observa la transferencia de color entre piezas superpuestas una encima de otra, pero que no llegan a solaparse.

Probetas de dos piezas superpuestas sin solapamiento, con grosor de 1.5, 1 y 0.5mm respectivamente. El color blanco se torna azulado según se utiliza un grosor menor a 1.5mm.

Se debe por tanto tener en cuenta esta serie de consideraciones específicas a la hora de diseñar las piezas que componen el corte de un modelo virtual que se va a imprimir en 3D.

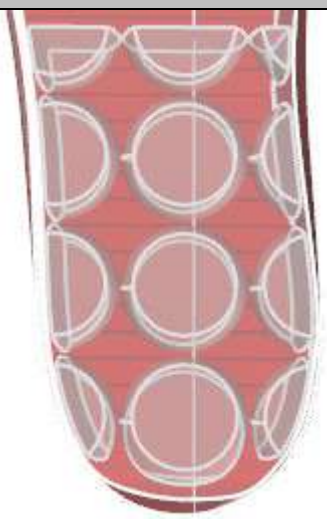
7.4. Caso Sneaker

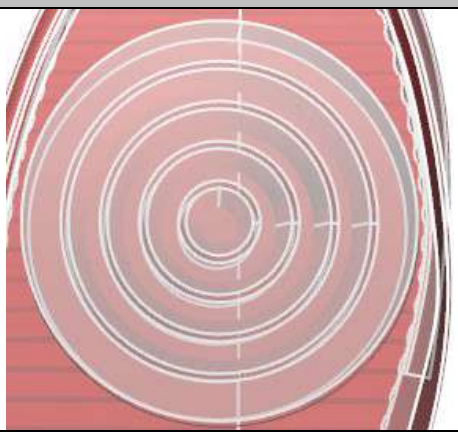
7.4.1 Características del modelo

El primer prototipo diseñado y fabricado se corresponde con un modelo deportivo urbano de caballero con carrillera en U como el que aparece en la *Fig.1.* Las piezas del corte tienen color gris y negro, mientras que el piso está diseñado con color blanco. Mediante la realización de este modelo, se ha abordado la problemática de la unión corte piso, así como la viabilidad de creación de estructuras internas mediante tecnología polyjet.

7.4.2 Estructuras de amortiguación incorporadas.

Se han incorporado dos tipos de estructuras de amortiguación al piso diseñado. La primera de ellas en la zona de apoyo metatarsal del piso, mientras que la segunda, en la parte trasera.

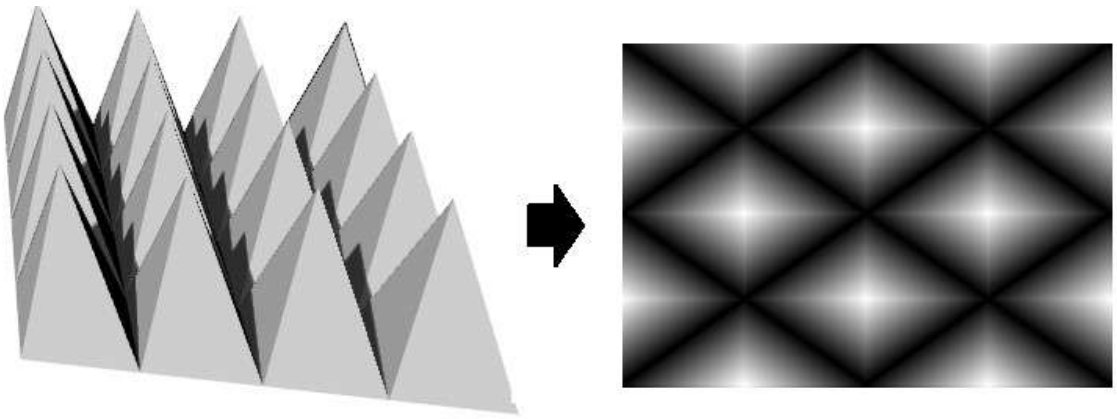
Estructura trasera		
Tipo:	Cámara de aire	
Offset en Z desde planta	1mm.	
Borde exterior	Borde de planta	
Offset desde borde planta	5 mm.	
Incluir intersecciones	Si	
Desplazamiento interior en Y	15 mm.	
Desplazamiento interior en Z	-4 mm.	
Separación entre filas	3 mm.	
Desfase en fila	0 mm.	
Separación entre columnas	3 mm.	
Desfase en columna	0 mm.	
Longitud	18 mm.	
Anchura	18 mm.	
Altura	18 mm.	

Estructura delantera		
Tipo:	SemiZigZag 360º	
Offset en Z desde planta	1mm.	
Borde exterior	Círculo 40mm. radio	
Grosor de estructura:	2 mm.	
Offset inclinación:	3 mm.	
Alternar dirección ZigZag	No	
Distancia entre estructuras	8 mm.	

7.4.3 Texturizado incorporado

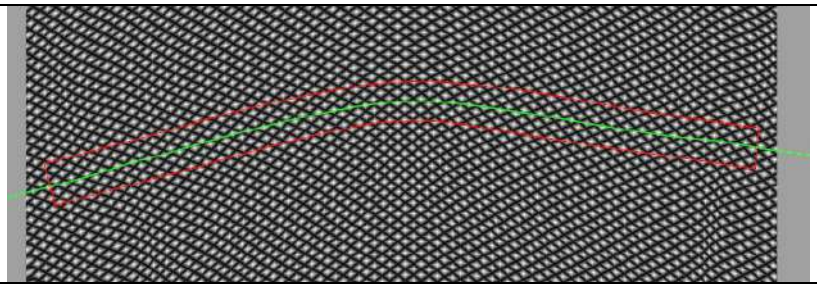
Se ha incorporado un texturizado superficial a la pieza del piso ubicada en la puntera, con el fin de comparar la precisión y acabado obtenidos mediante PolyJet respecto al obtenido mediante impresión con FDM. El texturizado aplicado pretende imitar a los rombos tridimensionales que incorporan diversos de pisos para zapatillas de estilo casual.

La textura utilizada ha sido generada a partir de diseñar una pirámide tridimensional de 20x14x20mm. y replicarla.

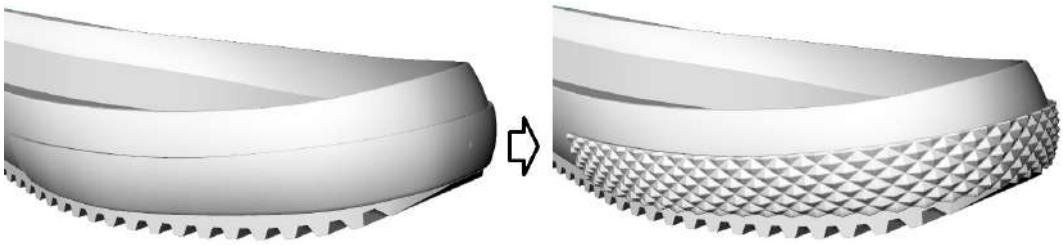


Grid de objetos 3D y textura obtenida a partir de su mapa de alturas.

Los parámetros que se han utilizado para generar el texturizado 3D a partir de la textura 2D se encuentran reflejados en la *Tabla 2*.

Parámetros de texturizado 3D	
Altura máxima	1 mm.
Mosaico	24x24
Resolución de la rejilla	0.1mm.
Suavizado de borde	Recto 0.1mm
Curva de deformación	

El resultado final de aplicar el texturizado sobre el diseño se puede apreciar a través de la siguiente imagen:



Piso con pieza de puntera sin texturizar, y texturizada.

7.4.4 Resultado

Modelo Sneaker impreso.

Los aspectos analizados en el modelo impreso han sido:

- Ajuste entre corte y piso: El corte se ajusta perfectamente al piso, dando la apariencia de un modelo real.

- Estructuras de amortiguación en piso: Mediante la metodología expuesta en el punto 3.1 ha sido posible generar un piso con estructuras internas. El encaje entre las diferentes partes que componen el piso es óptimo, y las estructuras internas cumplen su función restar rigidez al piso.

- Acabado del corte: El color del corte obtenido no se corresponde completamente con el modelo diseñado y ello, ha llevado a descubrir la problemática expuesta en el punto 2.2 del presente documento. Además, el espesor del corte es muy fino, con la consecuencia de hacer el prototipo de calzado muy frágil y propenso a roturas.

- Texturizado de puntera: El resultado del texturizado de la zona de la puntera tiene una definición precisa que la hace adecuada para su utilización.

7.5. Caso Zapato Oxford

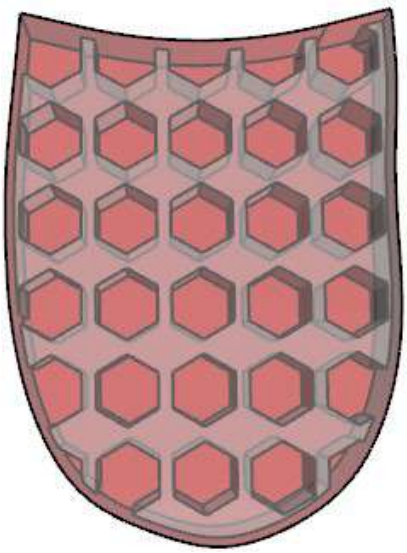
7.5.1 Características del modelo

Después de abordar en la primera prueba el diseño y fabricación mediante polyjet de un calzado deportivo, en esta segunda prueba se aborda la viabilidad del polyjet para fabricar calzado de vestir funcionalizado. El modelo diseñado se corresponde con un zapato modelo Oxford, con pala de tipo Vega y picado María. La textura que se ha dado al corte simula el tintado manual del modelo.

Modelo virtual Zapato Oxford.

7.5.2 Estructuras internas.

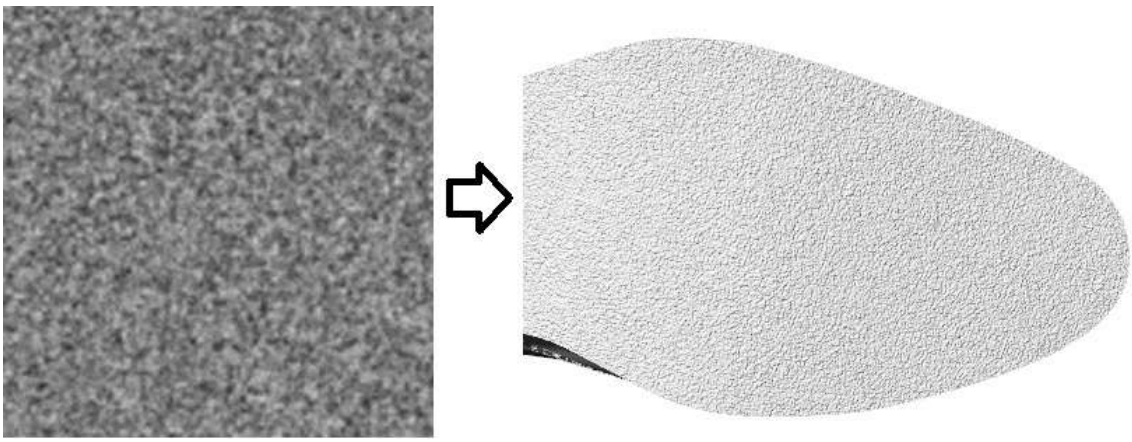
Se ha incorporado un tipo de estructura de amortiguación al tacón del piso diseñado. Las características de estas estructuras internas son las siguientes:

Estructura trasera		
Tipo:	Panal poligonal	
Offset en Z desde planta	1 mm.	
Borde exterior	Borde de planta	
Offset desde borde planta	1 mm.	
Incluir intersecciones	Si	
Desplazamiento interior en Y	0 mm.	
Número de lados	6	
Separación entre filas	2 mm.	
Desfase en fila	0 mm.	
Separación entre columnas	2 mm.	
Desfase en columna	0 mm.	
Longitud	10 mm.	
Anchura	10 mm.	
Pre-rotación	0º	
Post-rotación	0º	

7.5.3 Texturizado incorporado

Se ha incorporado un texturizado al piso del modelo con el objetivo de crear una cierta rugosidad sobre su superficie con el objetivo de aumentar sus propiedades de agarre. El texturizado ha sido generado a partir de la utilización de una textura procedural seleccionada de la librería elaborada para el proyecto FUNCGOODS. Los parámetros de texturizado utilizados han sido:

Textura: **RUI_3**
Altura máxima: **1mm.**
Resolución de rejilla**: 0.1mm.**
Suavizado de borde: **0.1mm. Suave**
Mosaico: **3x3**
Fusión mosaico: **Costuras simétricas**



Textura y texturizado 3D incorporado al piso

7.5.4 Resultado

Modelo impreso, con el corte sobre el piso, y las estructuras del tacón fuera del mismo.

Los aspectos analizados en el modelo impreso han sido:

- Ajuste entre corte y piso: El corte se ajusta perfectamente al piso, dando la apariencia de un modelo real.

- Estructuras de amortiguación en piso: Mediante la metodología expuesta en el punto 3.1 ha sido posible generar un piso con estructuras internas. El encaje entre las diferentes partes que componen el piso es óptimo, y las estructuras internas cumplen su función restar rigidez al piso.

- Acabado del corte: En este caso, el espesor del corte es el adecuado, sin capas superpuestas. Sin embargo, el color real obtenido no se ajusta al 100% al del modelo virtual, pasando de tonos marrones a tonos verdosos. Debido a que la causa sin duda no fue la transferencia de color debido a capas superpuestas, se desconocen los motivos reales de esta desviación.

- El color del corte obtenido no se corresponde completamente con el modelo diseñado y ello, ha llevado a descubrir la problemática expuesta en el punto 2.2 del presente documento. Además, el espesor del corte es muy fino, con la consecuencia de hacer el prototipo de calzado muy frágil y propenso a roturas.

- Texturizado en el piso: El resultado del texturizado en el piso tiene un acabado adecuado, y se ajusta totalmente a la apariencia visual del modelo virtual diseñado. Con esta textura impresa mediante FDM no se consiguieron buenos resultados.

El texturizado en la parte inferior del piso tiene una apariencia óptima

- Material del piso.: La dureza del material escogido en este caso para fabricar el piso resulta demasiado blanda, de tal forma que cuando se posa sobre el suelo, el ángulo de quiebre real del piso se reduce, y la zona delantera, que dispone de cierta curvatura, se posa plana sobre el suelo, dejando la parte inferior del corte al descubierto.

- Baquetón. El baquetón, o costura que encuentra sobre el piso, no se imprimió. Desde AIJU se puntualizó que fue debido a un error de diseño, ya que éste se encontraba 0.2 mm por encima del piso.

7.6. Caso Piso Sneaker con SLS

Se ha dispuesto volver a imprimir el piso del modelo Sneaker, pero esta vez haciendo uso de tecnología de sinterizado láser selectivo (SLS). Los parámetros de diseño utilizados han sido por tanto los mismos que los usados en el apartado 4.

Las diferentes partes que componen el piso del modelo Sneaker impresa con SLS.

Los aspectos analizados en esta impresión han sido:

- Estructuras de amortiguación en piso: Se ha detectado que el encaje entre las distintas partes que componen el piso no es óptimo.

- Texturizado de puntera: El resultado del texturizado de la zona de la puntera tiene una definición suficientemente precisa, presentando una diferencia prácticamente imperceptible con respecto al resultado obtenido en su homólogo fabricado mediante polyjet.

El encaje entre las partes superior e inferior del interior del piso impreso en SLS no es óptimo.