



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica.**

**Diseño y Fabricación de una Órtesis  
para Pie y Tobillo mediante  
Modelado por Deposición Fundida**

**Autor:**

**Casado Fernández, Francisco Javier.**

**Tutor:**

**Mansilla Gallo, Alberto.**

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería  
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la  
Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia  
y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e  
Ingeniería de los Procesos de Fabricación

**Valladolid, octubre 2019.**



## **Resumen**

Hoy en día las tecnologías 3D están en un continuo avance. Desde la impresión 3D a la realidad virtual este tipo de tecnologías y aplicaciones derivadas de ella están cada vez más presentes en nuestra vida diaria.

En cambio, el gremio de las ortopedias sigue anclado en el pasado, utilizando los mismos métodos que en el siglo pasado.

Con este trabajo se pretende unir los dos mundos mediante el escaneado 3D del cuerpo humano y la impresión 3D mejorando de esta forma los sistemas de medida y la fabricación de productos por parte del sector de las ortopedias.

En este proyecto nos centraremos en el escaneado de una pierna y en el diseño y fabricación de una órtesis para pie y tobillo, con la intención de mejorar las órtesis actuales y por consiguiente la calidad de vida de sus usuarios.

## **Palabras clave**

- ✚ Escáner 3D.
- ✚ Luz estructurada.
- ✚ Órtesis para pie y tobillo.
- ✚ Modelado por deposición fundida o F.D.M.
- ✚ Ácido profiláctico o poliácido láctico o P.L.A.



## **Abstract**

Nowadays 3D technologies are in a continuous advance. From 3D printing to virtual reality this type of technologies and applications derived from it are increasingly present in our daily lives.

On the other hand, the orthopaedics guild is still anchored in the past, using the same methods as in the last century.

The aim of this work is to unite the two worlds by means of 3D scanning of the human body and 3D printing, thus improving measurement systems and the manufacture of products by the orthopaedics sector.

In this project we will focus on the scanning of a leg and the design and manufacture of a foot and ankle orthosis, with the intention of improving the actual orthosis and consequently the quality of life of its users.

## **Keywords**

-  3D scanner.
-  Structured light.
-  Ankle and foot orthosis.
-  Fused Deposition Modeling.
-  Prophylactic acid or lactic polyacid or P.L.A.



# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Objetivos</b> .....	2
<b>3. Tecnología de Escáner 3D</b> .....	3
<b>3.1 Introducción</b> .....	3
<b>3.2 Nube de puntos y mallado</b> .....	3
<b>3.3 Funcionamiento</b> .....	4
<b>3.4 Tipos de escáner 3D</b> .....	6
<b>3.4.1 Escáneres de contacto</b> .....	6
<b>3.4.2 Escáneres sin contacto</b> .....	7
<b>3.5 Escáner 3D utilizado</b> .....	25
<b>3.5.1 Características del escáner:</b> .....	25
<b>3.5.2 Modos de escáner:</b> .....	26
<b>3.5.3 Verificación de los datos obtenidos con el escáner</b> .....	27
<b>3.5.4 Calibración del escáner:</b> .....	30
• <b>Medición con pie de rey:</b> .....	34
• <b>Medición con pieza escaneada:</b> .....	34
• <b>Comparación de resultados:</b> .....	35
<b>4 Diseño CAD para órtesis de pie y tobillo:</b> .....	37
<b>4.1 Introducción:</b> .....	37
<b>4.2 Especificaciones de la órtesis:</b> .....	37
<b>4.2.1 Aspectos importantes:</b> .....	37
<b>4.2.2 Materiales de trabajo:</b> .....	38
<b>4.2.3 Lesiones a tratar:</b> .....	38
<b>4.2.4 Objetivos para una órtesis de pie y tobillo:</b> .....	39
<b>4.3 Parámetros a tener en cuenta en el diseño para la impresión 3D</b> .....	40
• <b>Grosor de pared:</b> .....	40
• <b>Orientación y calidad superficial:</b> .....	40
• <b>Soportes:</b> .....	40
• <b>Mínimo ángulo de impresión:</b> .....	41
• <b>Letras y grabados:</b> .....	41
<b>4.4 Descripción del proceso de trabajo</b> .....	42

4.4.1	Escaneado 3D:.....	42
4.4.2	Tratamiento y corrección de la malla con Meshmixer. ....	46
4.4.3	Tratamiento con Fusion 360 de la malla y construcción de la órtesis	
	53	
4.5	Principales fabricantes de órtesis por F.D.M:.....	75
5	<b>Fabricación mediante impresión 3D: método de moldeado por deposición fundida o fabricación por filamento fundido.</b> ....	79
5.1	Funcionamiento de la tecnología F.F.F.: .....	79
5.2	Parámetros variables en la fabricación por filamento fundido: .....	81
	➤ Dimensiones del material extruido: .....	81
	➤ Temperatura de impresión: .....	82
	➤ Flujo de material: .....	82
	➤ Retracción: .....	82
	➤ Velocidad de impresión: .....	83
	➤ Soporte:.....	83
	➤ Relleno y perímetro:.....	84
5.3	Impresora utilizada .....	86
5.4	Material utilizado .....	87
	5.4.1 P.L.A. (ácido poliláctico):.....	87
	5.4.2 P.E.T.G. (treftalano polietileno glicol): [1].....	88
5.5	Resultados obtenidos de la fabricación por filamento fundido: .....	89
6	<b>Conclusiones</b> .....	91
7	<b>Líneas futuras:</b> .....	92
	<b>Bibliografía:</b> .....	93
	<b>Anexos:</b> .....	95
	Anexo 1: especificaciones del escáner: .....	95
	Anexo 2: características de la impresora Wasp© 4070 Industrial.....	97
	Anexo 3: Propiedades de los materiales de impresión: .....	98
	Anexo 4: Especificaciones pie de rey Mitutoyo© .....	99
	Anexo 5: Posición marcadores pie escaneado. ....	100

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1- Proceso de digitalización.	3
Ilustración 2- Nube de puntos.	4
Ilustración 3- Mallado nube de puntos.	4
Ilustración 4- Esquema de funcionamiento escáner 3d. Adrián Ortega Lázaro-Desarrollo de férula para impresión 3d	5
Ilustración 5- Palpador escáner de contacto.	6
Ilustración 6- Escaneado de contacto.	7
Ilustración 7- Procedimiento de fotogrametría.	8
Ilustración 8- gafas 3D.	9
Ilustración 9-Funcionamiento tiempo de vuelo.	10
Ilustración 10- Escáner tiempo de vuelo. <a href="https://www.faro.com/es-es/case_study/anderson-associates-reduccion-del-tiempo-de-medicion-en-interior-de-tuneles-gracias-al-escaner/">https://www.faro.com/es-es/case_study/anderson-associates-reduccion-del-tiempo-de-medicion-en-interior-de-tuneles-gracias-al-escaner/</a> consulta 23/09/19	11
Ilustración 11-Esquema de triangulación.	12
Ilustración 12- Esquema triangulación láser.	13
Ilustración 13- Escáner diferencia de fase.	14
Ilustración 14- Ejemplo proyección patrón luz estructurada.	15
Ilustración 15- Técnica de escaneado por luz estructurada.	16
Ilustración 16- Análisis de patrones por luz estructurada.	17
Ilustración 17- Patrón código binario.	18
Ilustración 18- Patrón código de grises.	19
Ilustración 19-Cambio de fase con tres patrones de proyección y un ejemplo de una imagen marginal.	20
Ilustración 20- Esquema posiciones triangulación.	21
Ilustración 21-Combinando código gris con cambio de fase.	22
Ilustración 22- Escaneado carrocería automóvil.	23
Ilustración 23-Extremidad escaneada con escáner de luz estructurada y prótesis creada a partir del escaneado.	23
Ilustración 24- Aplicación para conservación histórica.	24
Ilustración 25- Aplicación ingeniería inversa.	25
Ilustración 26- Escáner EinScan-Pro.	25
Ilustración 27- Modos de escaneado manual.	26
Ilustración 28-Escáner fijo.	27
Ilustración 29- Escaneado automático.	27
Ilustración 30-Espray escaneado.	29
Ilustración 31- Placa de calibrado.	30
Ilustración 32- Procedimiento de calibración 1.	31
Ilustración 33- Procedimiento de calibración 2.	32
Ilustración 34- Pie impreso para la comparación de medidas.	33
Ilustración 35- Pie de rey utilizado.	34
Ilustración 36- Pie escaneado.	35
Ilustración 37- Ejemplo pieza sumergible. <a href="https://fiixit.es/wordpress/wp-content/uploads/elementor/thumbs/3-Esguince-de-segundo-grado-nmvesxs73h0tvoqki4fiiyq5csxmsx9ncpu0evgbjk.jpg">https://fiixit.es/wordpress/wp-content/uploads/elementor/thumbs/3-Esguince-de-segundo-grado-nmvesxs73h0tvoqki4fiiyq5csxmsx9ncpu0evgbjk.jpg</a>	39

Ilustración 38- Ejemplos de voladizo.	40
Ilustración 39- Ángulos de impresión.	41
Ilustración 40- Medidas para grabados.	42
Ilustración 41- botón de inicio escáner.	43
Ilustración 42- Escaneado pierna.	44
Ilustración 43- herramientas de tratamiento nube de puntos.	44
Ilustración 44- Pierna escaneada.	45
Ilustración 45- Priorización calidad.	45
Ilustración 46- Modelo cerrado.	46
Ilustración 47- Herramienta Transform.	47
Ilustración 48-Posicionamiento de la pieza con Transform.	48
Ilustración 49-Eliminación partes indeseadas 1. Elaboración propia.	48
Ilustración 50-Eliminación partes indeseadas 2.	49
Ilustración 51-Eliminación partes indeseadas 2.	49
Ilustración 52-Limpieza de superficies 1. Elaboración propia.	50
Ilustración 53-Limpieza de superficies 2.	51
Ilustración 54-Limpieza de superficies 3.	52
Ilustración 55-Limpieza de superficies 4.	52
Ilustración 56-Limpieza de superficies 5.	53
Ilustración 57-Comando "Export" para guardar el archivo en formato .STL.	53
Ilustración 58-Dibujo con "Spline" base plana.	54
Ilustración 59-Extrusión planta.1. Elaboración propia	54
Ilustración 60-Extrusión planta.2. Elaboración propia	55
Ilustración 61-Herramienta de transformación de planta en .STL. Elaboración propia.	55
Ilustración 62- Malla con planta. Elaboración propia	56
Ilustración 63- Herramienta para obtener contorno de malla. Elaboración propia	56
Ilustración 64- Planos de corte con la malla. Elaboración propia.	57
Ilustración 65-Herramienta "Fit Curves to Mesh Section". Elaboración propia.	57
Ilustración 66-Opciones dentro de la herramienta "Fit Curves to Mesh Section". Elaboración propia.	58
Ilustración 67-Resultado tras usar la herramienta "Fit Curves to Mesh Section". Elaboración propia.	58
Ilustración 68-Espacio de trabajo "Patch". Elaboración propia.	59
Ilustración 69- herramienta "Loft".	60
Ilustración 70-Resultado espacio de trabajo "Patch". Elaboración propia.	60
Ilustración 71-Espacio de trabajo "Sculp". Elaboración propia.	61
Ilustración 72-Bloque de herramientas "Utilities". Elaboración propia.	61
Ilustración 73- Herramienta "Convert". Elaboración propia	62
Ilustración 74- Resultado al usar "Convert". Elaboración propia.	62
Ilustración 75-Herramienta "Merge edge". Elaboración propia.	63
Ilustración 76-Resultado "Merge edge". Elaboración propia.	63
Ilustración 77- Herramienta "Edit form"1. Elaboración propia.	64
Ilustración 78-Herramienta "Edit form"2. Elaboración propia.	64
Ilustración 79-Fallo en la impresión de prototipo con espesor de 2mm. Elaboración propia.	65
Ilustración 80-Opciones en la herramienta "thicken". Elaboración propia.	66

Ilustración 81-Convert Type T-Splines to BRep. Elaboración propia.	66
Ilustración 82-Plano colocado en la mitad de la órtesis dividiendo al mismo en dos. Elaboración propia	67
Ilustración 83-Herramienta Extrude. Elaboración propia.	67
Ilustración 84-Resultado de la eliminación de la parte trasera de la órtesis. Elaboración propia.	68
Ilustración 85-Obtención de contorno de la pieza. Elaboración propia.	68
Ilustración 86-Extrusión de la circunferencia sobre la órtesis. Elaboración propia.	69
Ilustración 87-Herramienta para realizar patrones siguiendo un "Path". Elaboración propia.	69
Ilustración 88-Pieza aligerada mediante la realización de patrones" Path" en diferentes puntos. Elaboración propia.	70
Ilustración 89-Herramienta pipe1. Elaboración propia.	71
Ilustración 90-Herramienta pipe2. Elaboración propia.	71
Ilustración 91-Construcción nervio cuadrado con la herramienta "Pipe". Elaboración propia.	71
Ilustración 92-Herramienta "Filet". Elaboración propia.	72
Ilustración 93-Medidas de las hebillas de ajuste. Elaboración propia.	72
Ilustración 94- Colocación de la hebilla. Elaboración propia.	73
Ilustración 95-Herramienta "Combine". Elaboración propia.	73
Ilustración 96- Medidas de los huecos para las correas. Elaboración propia.	74
Ilustración 97-Extrusión de corte sobre la órtesis. Elaboración propia.	74
Ilustración 98-Resultado de la extrusión sobre la órtesis. Elaboración propia.	75
Ilustración 99- Órtesis Wilde. <a href="https://www.instagram.com/p/Bsqt3YHH7A/">https://www.instagram.com/p/Bsqt3YHH7A/</a>	75
Ilustración 100- Órtesis Younest. <a href="https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ortesis-antiequino/">https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ortesis-antiequino/</a>	76
Ilustración 101- Órtesis Fiixit- <a href="https://fiixit.es/recuperacion-del-tendon-aquiles/">https://fiixit.es/recuperacion-del-tendon-aquiles/</a>	77
Ilustración 102- Bobinas de material para imprimir.	79
Ilustración 103- Partes principales de una impresora F.D.M.	80
Ilustración 104- Deposición de filamento fundido.	80
Ilustración 105-Dimensiones modificables en el software CURA©.	82
Ilustración 106-Temperaturas modificables en el software CURA©.	82
Ilustración 107- Opciones de velocidad en el software CURA©.	83
Ilustración 108- Órtesis impresa con soportes.	84
Ilustración 109- Patrón triangular.	85
Ilustración 110-Patrón giroide.	85
Ilustración 111- Líneas de pared.	86
Ilustración 112- Impresora 4070 Industrial.	87
Ilustración 113- Molécula Acido Poliláctico.	88
Ilustración 114- Órtesis para pie y tobillo fabricada en P.E.T.G.	89
Ilustración 115- Órtesis colocada en la pierna para la que ha sido diseñada.	90



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 .....	10
Ecuación 2 .....	10
Ecuación 3 .....	10
Ecuación 4 .....	12
Ecuación 5 .....	12
Ecuación 6 .....	12
Ecuación 7 .....	14
Ecuación 8 .....	14
Ecuación 9 .....	19
Ecuación 10 .....	19
Ecuación 11 .....	19
Ecuación 12 .....	20
Ecuación 13 .....	20
Ecuación 14 .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- medidas realizadas con pie de rey.	34
Tabla 2- Mediciones realizadas sobre las digitalizaciones.	35
Tabla 3- Error escáner.	36



## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEISIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

## **1. Introducción**

El aumento de la esperanza de vida en el mundo occidental hace necesaria la utilización de sistemas complementarios que nos mejoren la calidad de vida cuando tengamos problemas de movilidad. Para esta tarea se desarrollan órtesis para las extremidades, que nos sirven de complemento para realizar movimientos o ayudan a la curación de lesiones y su prevención.

De esta necesidad surge este trabajo final de grado en ingeniería mecánica, con la intención de mejorar los sistemas de fabricación de órtesis actuales y mejorar la calidad de vida de sus usuarios.

El sector de la ortopedia es un sector obsoleto en cuanto a sus sistemas de medida y fabricación se refiere, ya que utiliza los mismos métodos que se usaban a mediados del Siglo XX.

La toma de medidas del cuerpo humano para la fabricación de una órtesis, actualmente se hace con procedimientos manuales y lentos como pueden ser los moldes de escayola. La primera parte de este proyecto consistirá en la toma de medidas y la digitalización de una pierna mediante la tecnología de escaneo 3D por luz estructurada. De esta forma obtendremos un modelo digital de la pierna de forma rápida, cómoda para el paciente y precisa.

Como hemos mencionado anteriormente, el sector de la ortopedia continúa usando métodos propios del Siglo XX para la fabricación de órtesis. Estos sistemas de fabricación son prácticamente artesanales, esto comporta unos tiempos y costes de producción demasiado elevados, además de imperfecciones en las órtesis que pueden generar molestias a sus usuarios.

Siguiendo con los avances de la tecnología 3D, en este Trabajo Final de Grado diseñaremos una órtesis para pie y tobillos utilizando la tecnología de modelado por deposición fundida (siglas en Inglés F.D.M.) o fabricación por fundición de filamento (F.F.F.). De este modo diseñaremos una órtesis en un modelo C.A.D. teniendo en cuenta que será impresa en 3D y aprovechando el modelo de la pierna digitalizado previamente con el escáner 3D.

La órtesis diseñada será fabricada en una impresora de gran tamaño suministrada por la **empresa italiana Wasp® modelo 4070 Industrial** que podremos encontrar en el Fab Lab de la Universidad de Valladolid. Para su fabricación se utilizarán materiales biocompatibles como son el ácido profiláctico o poliácido láctico (P.L.A.) y el tereftalato de polietileno glicol (P.E.T.G.)

El diseño de la órtesis se realizará buscando:

- Fabricación por modelado por deposición fundida.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- Ligereza.
- Traspiración.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia a fatiga.
- Resistencia al agua.
- Comodidad para el usuario.

## **2. Objetivos**

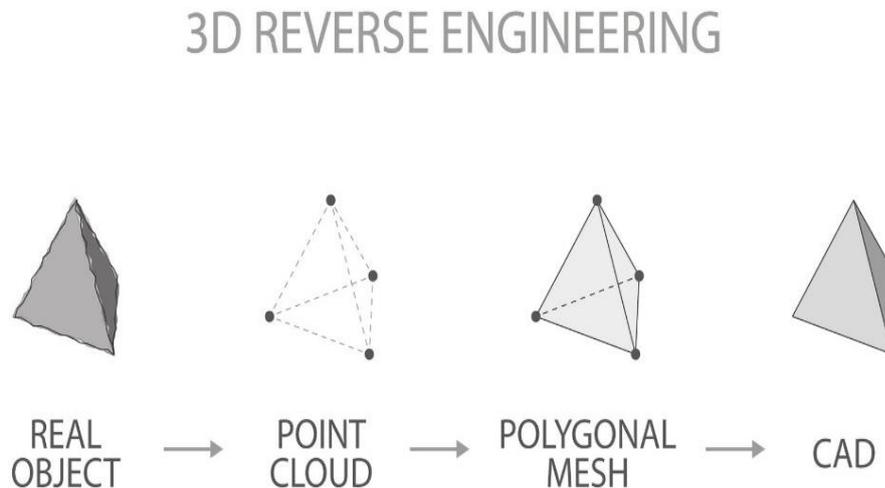
- ✚ Digitalización de la pierna y verificando la precisión del escáner 3D.
- ✚ Tratamiento del modelo digitalizado y diseño de la órtesis para pie y tobillo a partir de él.
- ✚ Impresión mediante modelado por deposición fundida de la órtesis.

### **3. Tecnología de Escáner 3D**

#### **3.1 Introducción**

Un **escáner 3D** es una herramienta que nos permite capturar la geometría, la textura (dependiendo de la precisión del escáner) y en ocasiones el color del objeto (depende de las prestaciones del escáner), creando así un archivo 3D que posteriormente podremos modificar con un software C.A.D.

La geometría del objeto a escanear se procesa como una nube de puntos. Este tipo de archivo es un conjunto tridimensional de puntos que representan la superficie de un objeto. Estos puntos se encuentran condicionados por sus coordenadas x, y, z en el espacio.



*Ilustración 1- Proceso de digitalización.*

*[<https://www.cadcrowd.com/architectural-design/point-cloud-modeling-services>]*

Este tipo de tecnología se utiliza en el ámbito de la metrología industrial y el desarrollo de ingeniería inversa. Los avances en esta tecnología y el aumento en la precisión de los escaneados han permitido su utilización en campos como la medicina, la aeronáutica, la arquitectura....

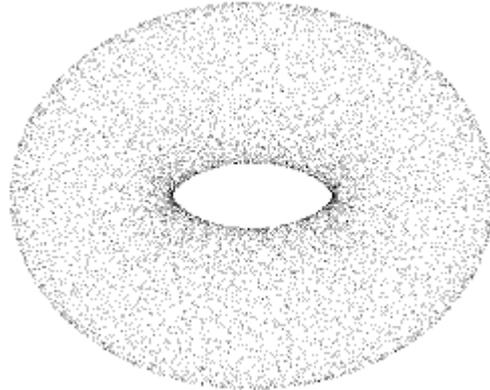
Posteriormente a la generación de la nube de puntos, podremos trabajar a través de un software C.A.D. sobre el modelo

#### **3.2 Nube de puntos y mallado**

Una nube de puntos es un conjunto tridimensional de puntos que representan la superficie de un objeto. Cada uno de estos puntos tendrá su posición

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

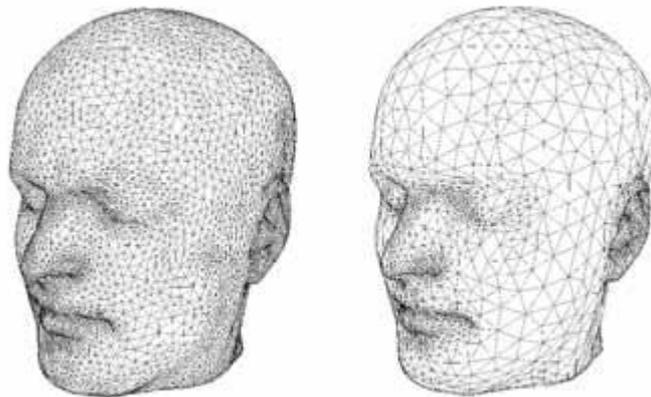
definida según un sistema de coordenadas y un punto de referencia, de tal manera que cada punto de la superficie del objeto quedará posicionado en el espacio.



*Ilustración 2- Nube de puntos.*

<https://www.cadcrowd.com/architectural-design/point-cloud-modeling-services>

A partir de la nube de puntos obtendremos un modelo. Para ello debemos convertir los datos de la nube de puntos en una malla. En este procedimiento convertimos la nube de puntos en una imagen de malla, donde la superficie se divide en miles y miles de triángulos pequeños. Con esto buscamos obtener gran cantidad de detalle y un aspecto lo más similar posible a la realidad.



*Ilustración 3- Mallado nube de puntos.*

<https://www.luisllamas.es/conversion-de-mallas-solidos-y-superficies-para-impresion-3d/>

Una vez se ha convertido la nube de puntos en una malla, podremos trabajar con esta en un software C.A.D.

### 3.3 Funcionamiento

Como se ha comentado anteriormente, el **escáner 3D** funciona recogiendo información sobre la geometría de los objetos a estudiar. Esta información se

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEISIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

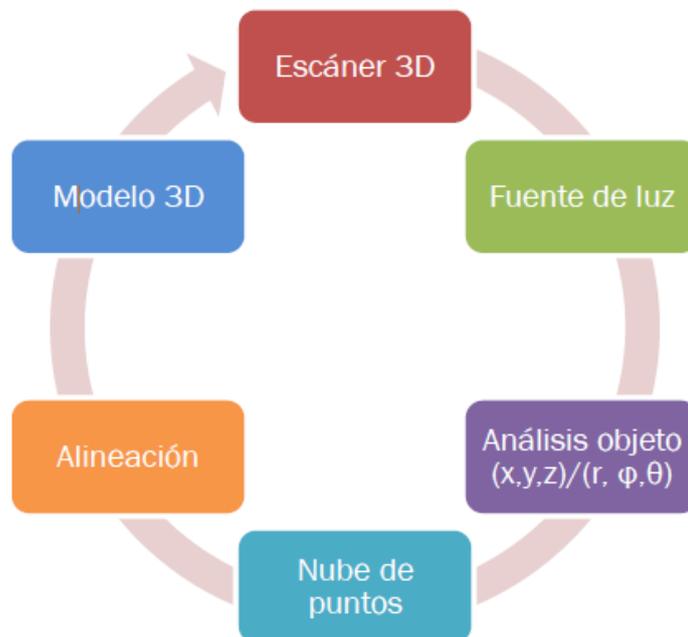
procesa en forma de una nube de puntos condicionada por las coordenadas de cada punto. [7]

Para obtener el lugar de cada punto en el espacio se define un sistema de coordenadas esféricas, considerando el origen del sistema el escáner. Cada punto del objeto a escanear tendrá **dos coordenadas las coordenadas  $\phi$  y  $\theta$**  a las que se les asociará una distancia  $r$ . [1]

El escaneado de las piezas depende de diferentes factores como pueden ser:

- Precisión de escáner o precisión deseada.
- Forma del objeto a escáner.
- Color del objeto.
- Distancia al objeto.

Debido a la variabilidad de estos objetos, el escaneado precisa de varios análisis sobre el mismo objeto para obtener un resultado adecuado. Para obtener un buen resultado de la serie de escaneados se necesita un sistema de referencia común que nos permita relacionar los datos. A este procedimiento se le denomina alineación. Este proceso transforma las coordenadas locales de cada escaneado en un sistema de coordenadas generales.



*Ilustración 4- Esquema de funcionamiento escáner 3d. Adrián Ortega Lázaro-Desarrollo de férula para impresión 3d*

### 3.4 Tipos de escáner 3D

Podemos distinguir los siguientes tipos de escáner:

- Escáneres de contacto.
- Escáneres sin contacto, entre los que tenemos:
  - Activos
  - Pasivos

#### 3.4.1 Escáneres de contacto

Los **escáneres de contacto** toman las medidas del objeto a escanear tocándolo con una serie de sensores en distintos puntos de la superficie de la pieza. [3]

Estos sensores se encuentran en un palpador que recorre la superficie de la pieza a escanear de forma continua, o simplemente toca la superficie con el palpador en distintos puntos obteniendo así sus coordenadas XYZ. [23]



Ilustración 5- Palpador escáner de contacto.

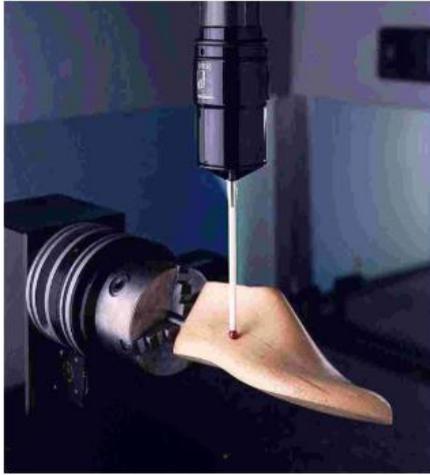
<https://www.renishaw.es/es/sistema-sprint-con-supascan--42579>

Con este tipo de escáner se pueden obtener óptimos resultados gracias a su gran precisión.

Las principales desventajas de estos escaneos son su lentitud y el desgaste. Estos escáneres pueden obtener las coordenadas de entre 100 y 10000 puntos por segundo, lo que ralentiza el proceso de escaneado. Estos procedimientos con contacto conllevan un rozamiento entre el palpador y la pieza. Estos contactos o rozamientos, pueden causar en cualquiera de los dos casos el desgaste de la pieza o del palpador, lo que conlleva una pérdida de precisión. Esta desventaja del rozamiento y la deformación de la pieza

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

escaneada hacen que este tipo de escáneres se hayan dejado de utilizar en tareas de restauración o estudios de conjuntos histórico/artísticos. [8]



*Ilustración 6- Escaneado de contacto.*

<https://www.digitalizacion-3d.com/que-es-y-para-que-sirve-un-escaner-3d/20/9/19>

Su gran precisión hace que en la actualidad el principal campo en el que se utiliza este tipo de escáneres sea en la metrología industrial.

### 3.4.2 Escáneres sin contacto

Los escáneres sin contacto toman la información sobre la geometría de la superficie del objeto sin tocar el objeto escaneado. Para realizar el escaneado utilizan diferentes tipos de radiación. Dependiendo del tipo de radiación que utilicen tenemos:

- **Escáneres pasivos:** no emiten ningún tipo de radiación sobre el objeto a digitalizar, sino que utilizan la propia radiación visible del ambiente.
- **Escáneres activos:** emiten señales sobre el objeto a escanear y recogen la señal que refleja el objeto. A través de esta señal reflejada toman la información sobre la geometría del objeto estudiado. Las señales con las que trabajan este tipo de escáneres son señales electromagnéticas, ultrasonidos...

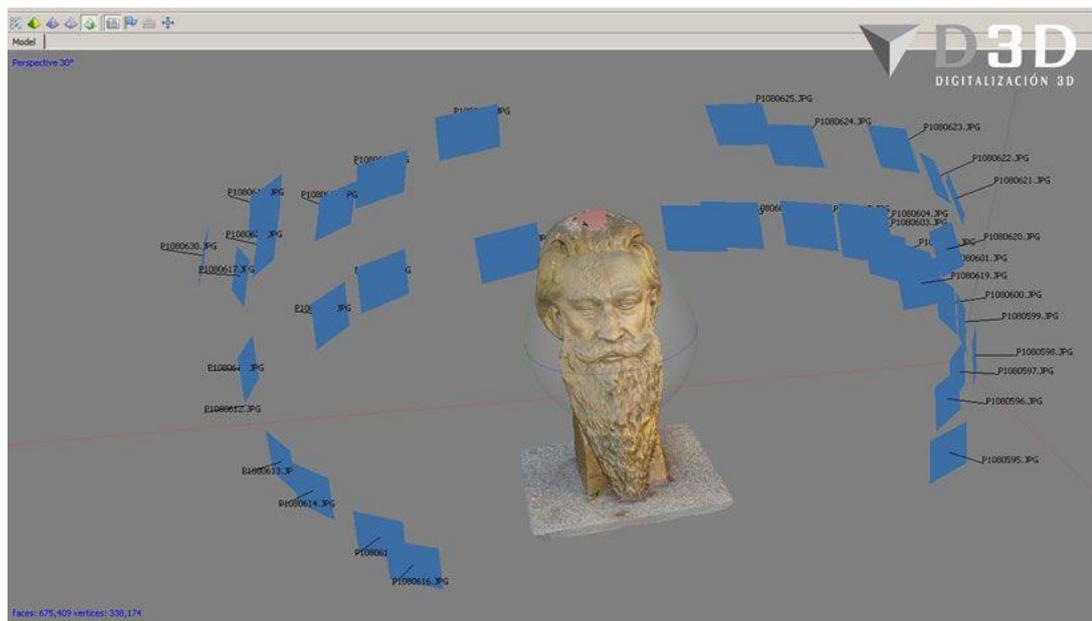
#### 3.4.2.1 Escáneres pasivos:

No emiten ninguna señal sobre el objeto a escanear, además utilizan la propia radiación del ambiente reflejada por el objeto examinado. Las técnicas de escáner de este tipo más utilizadas son:

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**3.4.2.1.1 Fotogrametría:**

Es la técnica que nos permite realizar mediciones a partir de una fotografía. En la fotogrametría digital se toman imágenes desde múltiples posiciones entorno al objeto. A partir de esos datos, recopilados en diferentes posiciones, con ángulos diferentes respecto del objeto examinado y mediante un algoritmo podemos determinar matemáticamente la posición de cada uno de los puntos del objeto escaneado en el espacio y obtener la nube de puntos.



*Ilustración 7- Procedimiento de fotogrametría.*

<https://www.digitalizacion-3d.com/generar-modelos-3d-por-fotogrametría/>

Una de las principales aplicaciones de la fotogrametría está en la topografía. Con esta técnica podemos medir las tres coordenadas de un punto y representarlas fácilmente en un documento.

**3.4.2.1.2 Estereoscopio:**

La estereoscopia es la técnica por la cual se crea la ilusión de profundidad o imagen 3D a partir de la superposición de imágenes. Esta ilusión se crea a partir de la presentación de imágenes diferentes para cada ojo.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



Ilustración 8- gafas 3D.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Estereoscopio>

Los ojos, al encontrar en posiciones distintas, recogen imágenes diferentes. Estas imágenes se procesan en el cerebro, donde mediante la técnica de paralaje, se calcula la distancia a la que se encuentra el objeto. Este cálculo posiciona los objetos en el espacio, dando así una sensación de profundidad o volumen. A partir de esta cualidad de los ojos y del cerebro humano podemos crear imágenes tridimensionales mostrando diferentes imágenes a cada ojo. En la actualidad esta técnica está siendo utilizada y desarrollada por la industria cinematográfica.

### 3.4.2.2 Escáneres activos:

Este tipo de escáneres trabajan emitiendo una señal sobre el objeto a escanear y la recogida de la señal rebotada por el objeto.

Entre las distintas técnicas de escáneres activos nos podemos encontrar los siguientes:

- Escáner de tiempo de vuelo.
- Escáner láser por triangulación.
- Escáner por diferencia de fase.
- Escáner de luz estructurada.

Estos escáneres trabajan emitiendo ondas electromagnéticas

#### 3.4.2.2.1 Tiempo de vuelo:

Los escáneres de tiempo de vuelo constan principalmente de un **emisor láser**, un **receptor** y un **reloj**.

El escaneado consiste en la emisión de un pulso láser sobre el cuerpo a examinar. El pulso láser rebota sobre el objeto y es captado por el receptor. Conocido el tiempo que tarda el pulso láser en recorrer el camino de ida y vuelta entre el escáner y el cuerpo, podemos conocer la distancia entre el escáner y la superficie del objeto escaneado a través de la ecuación:

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

Ecuación 1

Donde:

- D → distancia entre el objeto y el escáner.
- t → tiempo de vuelo.
- c → velocidad de la luz.

## Ejemplo de un sensor reflectivo modelo de tiempo de vuelo (TOF)

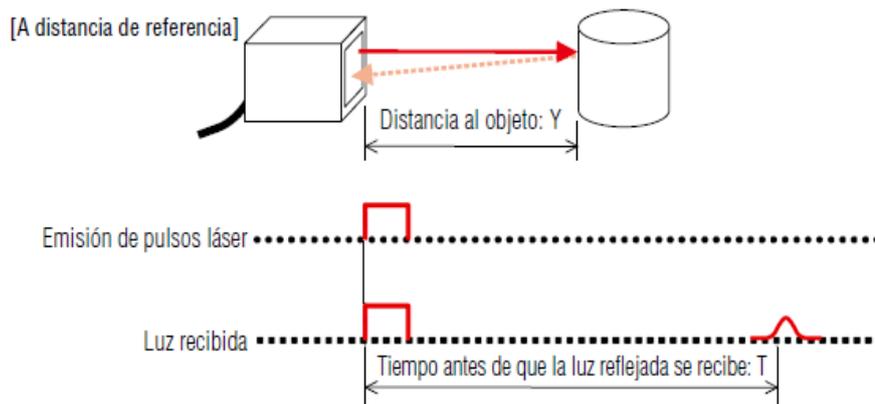


Ilustración 9-Funcionamiento tiempo de vuelo.

[https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/laser\\_location/info/](https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/laser_location/info/)

Estos escáneres precisan de un reloj capaz de medir pequeños intervalos de tiempo. Así considerando la velocidad de la luz igual a 3.108 kilómetros por segundo, un pulso tarda 33.3 nano segundos en recorrer un metro, por lo tanto, para obtener una precisión de 1mm, necesitamos un reloj capaz de medir tiempos entre los 3.33 pico segundos.

Para que no se produzcan interferencias entre las señales el tiempo medido entre la salida de la señal y la captación del rebote debe ser superior a la amplitud del pulso. [1]

$$t > T_{\text{pulso}}$$

Ecuación 2

O la precisión del reloj del escáner debe cumplir la siguiente ecuación.

$$d > \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_{\text{pulso}}$$

Ecuación 3

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Por esta razón, la precisión de este tipo de escáneres, depende de la precisión del reloj que llevan incorporado y no dependen de la distancia que estemos midiendo.

La velocidad de escaneado de los escáneres de tiempo de vuelo es muy alta, llegando a obtener la información de entre 10.000 y 100.000 puntos por segundo.

Su principal desventaja es su afectación por las interferencias, la fuerza de la señal emitida y la sensibilidad del receptor de la onda rebotada.

Sus principales aplicaciones se encuentran en la ingeniería civil y en la arquitectura gracias a su capacidad de medir grandes distancias.



*Ilustración 10- Escáner tiempo de vuelo. [https://www.faro.com/es-es/case\\_study/anderson-associates-reduccion-del-tiempo-de-medicion-en-interior-de-tuneles-gracias-al-escaner/](https://www.faro.com/es-es/case_study/anderson-associates-reduccion-del-tiempo-de-medicion-en-interior-de-tuneles-gracias-al-escaner/) consulta 23/09/19*

### **3.4.2.2.2 Escáner láser por triangulación:**

Un equipo de escáner 3D de triangulación láser consta de:

- Sistema de proyección láser.
- Sistema de espejos motorizados.
- Sistema de medida de distancias.

Este procedimiento de escaneado, consiste en la proyección del láser sobre los espejos, estos reflejan el láser y lo proyectan sobre el cuerpo que queremos estudiar.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Una vez alcanzado el cuerpo por la proyección láser, la cámara del sistema de medida recoge la deformación del láser sobre el objeto. Esta deformación se analiza en el sistema de medida, el cual es capaz de medir la distancia y el ángulo en el que se encuentran los puntos escaneados. Así podemos determinar las coordenadas X, Y, Z de los puntos de la superficie alcanzados por el láser.

El escáner realizará esta operación por toda la superficie del cuerpo a examinar gracias al sistema de espejos motorizados, que irán modificando su posición barriendo así todos los puntos de la superficie. [2]

Los algoritmos con los que trabajan este tipo de escáner para determinar la distancia y posición de los objetos se basan en la triangulación o trigonometría. Esta técnica se fundamenta en lo siguiente:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

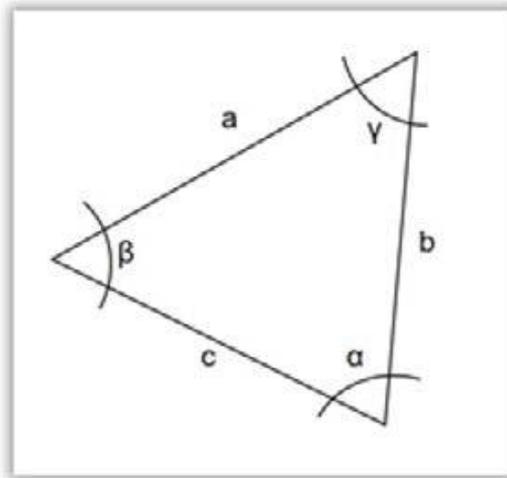
*Ecuación 4*

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2b * c \cos \alpha$$

*Ecuación 5*

$$c = a * \cos \beta + b * \cos \alpha$$

*Ecuación 6*



*Ilustración 11-Esquema de triangulación.*

*Fabio Romeral Pérez- Flujo de trabajo en proyectos de modelización 3D con equipo láser escáner – Universidad Politécnica de Madrid.*

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

El **escáner láser** utiliza este mismo principio formando un triángulo entre el proyector láser, el objeto y la cámara de análisis. El proyector láser y la cámara están colocados con un ángulo y a una distancia constante.

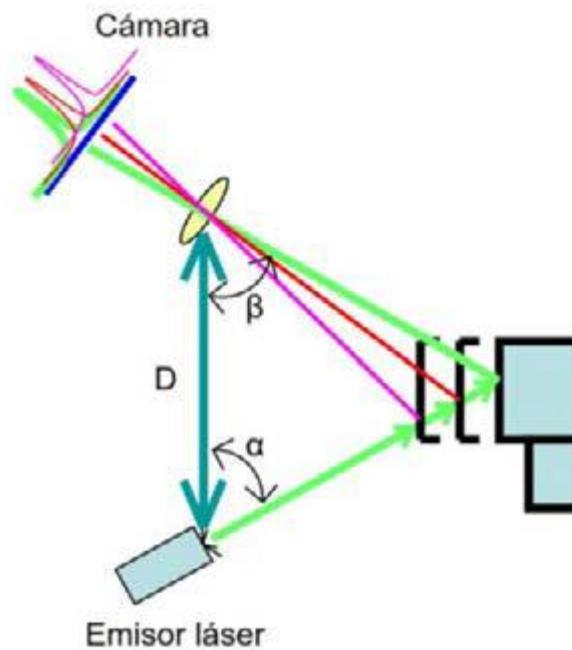


Ilustración 12- Esquema triangulación láser.

*Fabio Romeral Pérez- Flujo de trabajo en proyectos de modelización 3D con equipo láser escáner – Universidad Politécnica de Madrid.*

Como podemos ver en la ilustración el lado  $D$  del triángulo, entre la cámara y el emisor es conocido. El ángulo  $\alpha$ , del emisor láser también es conocido, y el ángulo  $\beta$ , de la cámara, se puede determinar gracias a la imagen recogida por la cámara de la deformación del láser sobre el objeto. Con estos tres elementos podemos determinar la distancia del escáner a la superficie del objeto, determinando así las coordenadas de sus puntos y por lo tanto la geometría de la superficie escaneada. [2]

Este tipo de escáner tiene la capacidad de captar la posición de un elevado número de puntos en un periodo corto de tiempo con una gran precisión, permitiendo así la realización de los escaneados de forma rápida y precisa. [2]

La gran desventaja de este tipo de escáneres está en la necesidad de una estación total para referenciar los modelos. Además, se ve afectado por la luz ambiental y necesita sistemas complementarios para poder escanear superficies brillantes como pueden ser las superficies metálicas.

### 3.4.2.2.3 Escaneados por diferencia de fase:

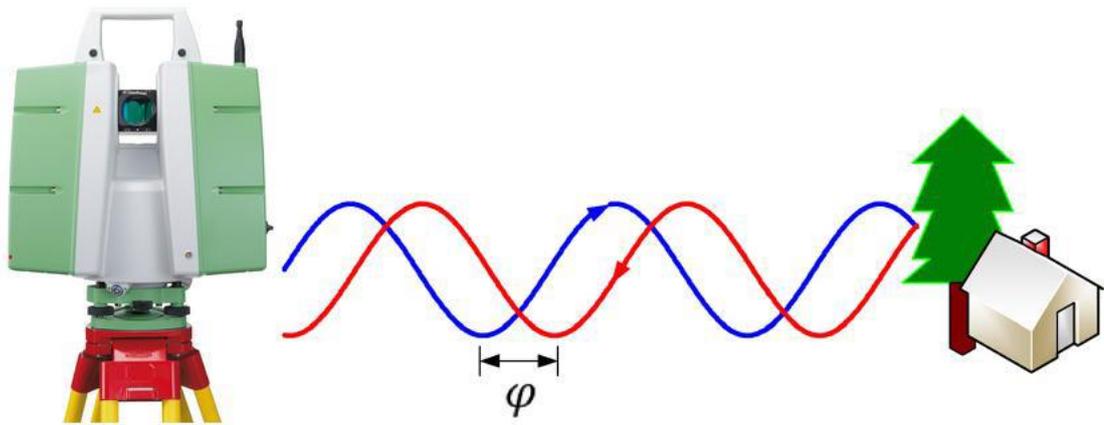
Los escáneres basados en el cambio de fase emiten una señal láser al igual que los escáneres de tiempo de vuelo. En cambio, este tipo de escáneres no cuentan con un reloj para medir el tiempo que tarda en volver el haz de luz, sino que cuentan con un modulador.

El modulador del escáner emite una señal periódica. Esta señal, al impactar contra el objeto escaneado, llega al modulador con un desfase  $\phi$ .

La relación entre el desfase  $\phi$ , la frecuencia modular  $f_m$  y el tiempo que tarda en volver la señal será:

$$t = \frac{\phi}{2\pi * f_m}$$

*Ecuación 7*



*Ilustración 13- Escáner diferencia de fase.*

*Jorge Adán Romero Guerrero / José Luis Cuellar Vázquez – Estudio comparativo entre las tecnologías de escaneo láser terrestre.*

Al emplear el escáner un haz de luz podemos determinar la distancia  $D$ , entre el escáner y el objeto escaneado con la ecuación:

$$D = \frac{1}{2} * c * t = \frac{c}{4\pi} * \frac{\phi}{f_m}$$

*Ecuación 8*

Donde  $c$  es la velocidad de la luz aproximadamente 3.108 Km/s.

Este tipo de escáner tiene una velocidad de escaneo muy alta, ya que son capaces de capturar entre 50.000 y 100.000 puntos por segundo. [11]

### 3.4.2.2.4 Escáner de luz estructurada:

#### Introducción

La primera parte de este proyecto se ha realizado a través de un escáner de luz estructurada. Se ha escogido este tipo de tecnología, ya que es el que mayor versatilidad nos proporcionaba.



*Ilustración 14- Ejemplo proyección patrón luz estructurada.*

<https://www.digitalizacion-3d.com/que-es-y-para-que-sirve-un-escaner-3d/>

Este tipo de escáner toma las medidas a partir de la deformación del patrón de luz proyectado sobre la superficie del cuerpo escaneado.

Esta tecnología surgió en los años 80 pero no ha tenido gran importancia hasta la actualidad con el desarrollo de la impresión 3D. Además de la impresión 3D esta tecnología también se utiliza en el campo de la metrología, ya que permite realizar análisis de piezas opacas de forma rápida.

La principal ventaja de los escáneres de luz estructurada está en su alta velocidad de muestreo de puntos, logrando obtener un elevado número de puntos con alta precisión en intervalos cortos de tiempo.

Alguno de los inconvenientes de esta tecnología está en la imposibilidad de escanear superficies brillantes o transparentes. Tampoco es posible el escaneado de cuerpos muy oscuros, ya que absorben toda la radiación del patrón proyectado. Este problema se soluciona rociando una fina capa de laca opaca y de un color claro sobre el objeto escaneado. Además, también tenemos

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

una desventaja en cuanto a la iluminación del entorno, ya que esta debe estar controlada para evitar la distorsión del patrón al ser proyectado.

### Técnica

Los sistemas de escaneado con luz estructurada trabajan estudiando la deformación sufrida por el patrón de luz al ser proyectado sobre el objeto a escanear.

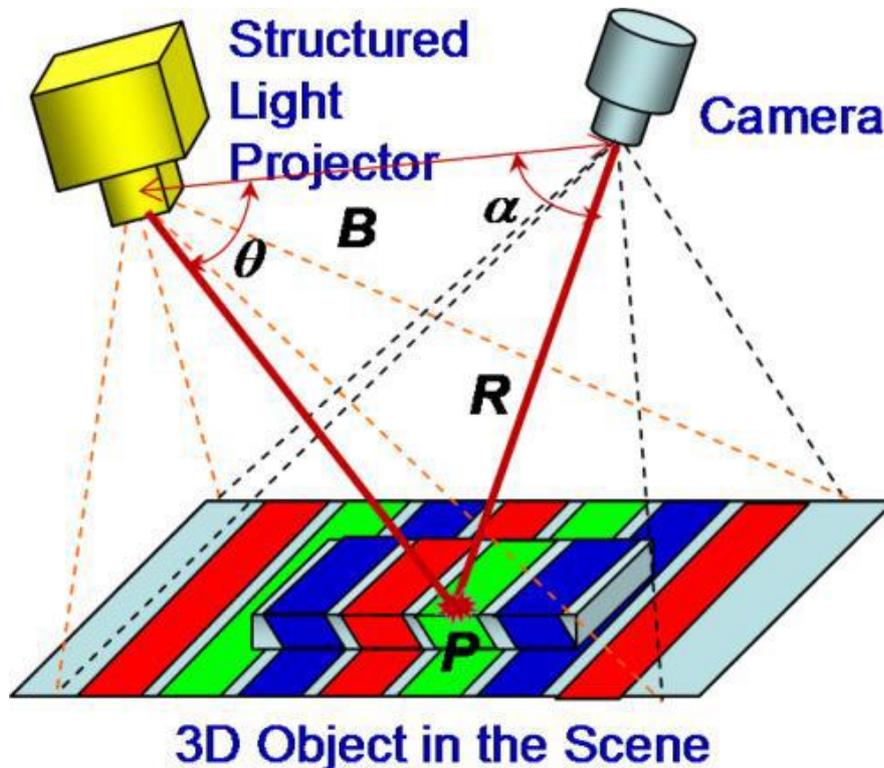


Ilustración 15- Técnica de escaneado por luz estructurada.

Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging

Los escáneres de este tipo normalmente constan de un proyector, encargado de dirigir el patrón de luz coherente sobre el objeto de estudio, y una o varias cámaras a los lados del proyector, encargadas de recoger la deformación del patrón sobre el cuerpo escaneado. El posicionamiento de estos elementos es de vital importancia para obtener la mejor resolución y evitar la existencia de zonas oscuras que nos distorsionen la información. [12]

Una vez obtenida la información de la deformación del patrón, esta se procesa mediante algoritmos de triangulación comparando el patrón proyectado sobre una superficie plana (conocido) y el patrón deformado sobre la superficie de cuerpo escaneado.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

Uno de los problemas de este tipo de escáneres es su proyector. Para que esta tecnología pueda desarrollar su trabajo necesitamos que el proyector nos proporcione luz coherente en una misma frecuencia para evitar que se difumine el haz de luz sobre el objeto. Esto hace que sea imposible la utilización de sistemas convencionales de iluminación y que necesitemos un entorno con iluminación controlada para trabajar.

Otro aspecto importante a tener en cuenta al trabajar con esta técnica es la elección del patrón a proyectar. Tenemos distintas opciones desde patrones de puntos a patrones de franjas y rayas. Debemos tener en consideración la forma y el tamaño del objeto a la hora de escoger un patrón. Los más importantes se explicarán a continuación.

## Patrones

Los patrones utilizados para proyectar sobre los objetos a escanear están diseñados para que cada pixel de la imagen este bien definido.

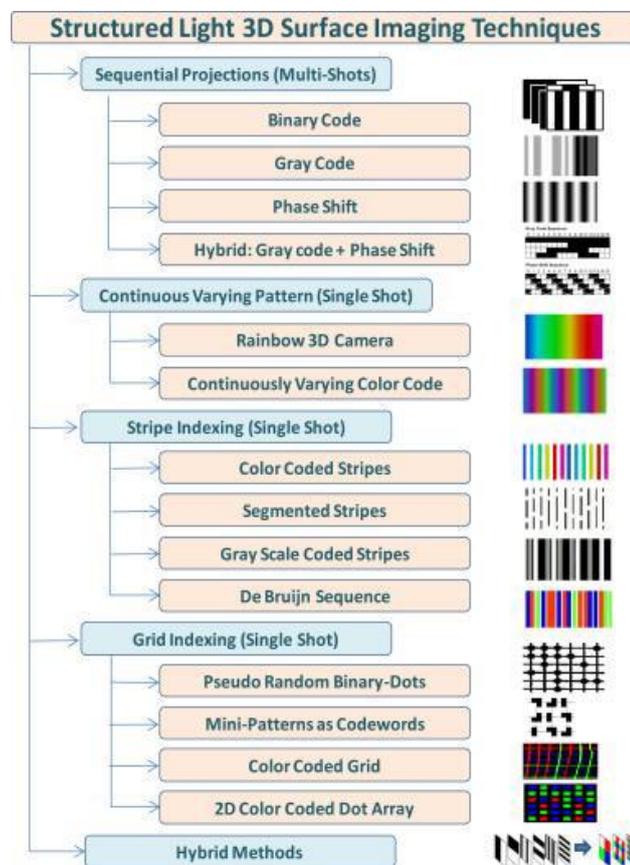


Ilustración 16- Análisis de patrones por luz estructurada.

Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

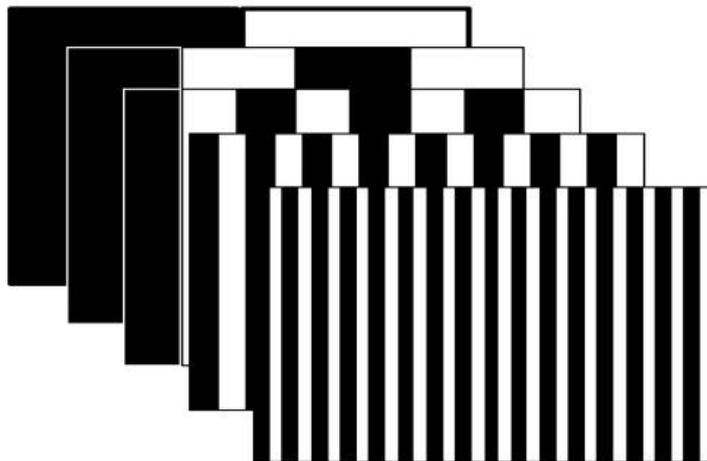
Existen diferentes tipos de patrones de luz estructurada, los más utilizados son:

- **Código binario:**

Para este patrón se codifican únicamente dos niveles de iluminación. Esta codificación será binaria con 1 y 0 de tal forma que cada píxel del patrón tendrá su propia codificación. [12]

Este patrón proyecta rayas blancas (código 1) y rayas negras (código 0), de tal forma que cada punto del objeto sobre el que se proyecta tiene un código binario único.

Las coordenadas 3D (X,Y,Z) pueden ser calculadas a través de la triangulación a lo largo de cada línea horizontal, formando así un marco completo de la imagen 3D.



*Ilustración 17- Patrón código binario.*

*Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging*

Esta técnica de patrón binario es muy fiable y esta menos afectada por las características de la superficie al haber únicamente valores binarios.

Sin embargo, el trabajo con este tipo de patrón puede ser muy lento, ya que es necesario proyectar un gran número de patrones secundarios y todos los objetos a escanear deben permanecer estáticos. [4]

- **Nivel de grises:**

Con esta técnica reducimos el número de patrones a proyectar, manteniendo un nivel alto en la resolución de la imagen 3D.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEZIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

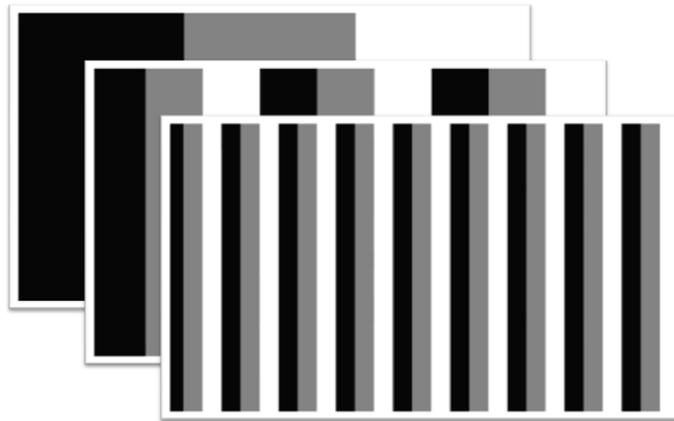


Ilustración 18- Patrón código de grises.

Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging

A diferencia de los patrones binarios, los patrones de nivel de grises utilizan múltiples niveles de iluminación, incrementando de esta manera la información obtenida. [12]

- **Cambio de fase:**

El cambio de fase es un método de proyección de franjas para la obtención del modelo 3D de una superficie.

El proceso de obtención de las imágenes consiste en la proyección de un conjunto de patrones sinusoidales sobre el objeto. Las intensidades de cada pixel vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) + I_{mod}(x, y) * \cos(\phi(x, y) - \theta)$$

Ecuación 9

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) + I_{mod}(x, y) * \cos(\phi(x, y))$$

Ecuación 10

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) + I_{mod}(x, y) * \cos(\phi(x, y) + \theta)$$

Ecuación 11

Donde:

- $I_x$  = Intensidad de los tres patrones.
- $I_0$  = componente continua.
- $I_{mod}$  = señal de modulación de la amplitud.
- $\Phi$  = fase media.
- $\Theta$  = ángulo constante de cambio de fase.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

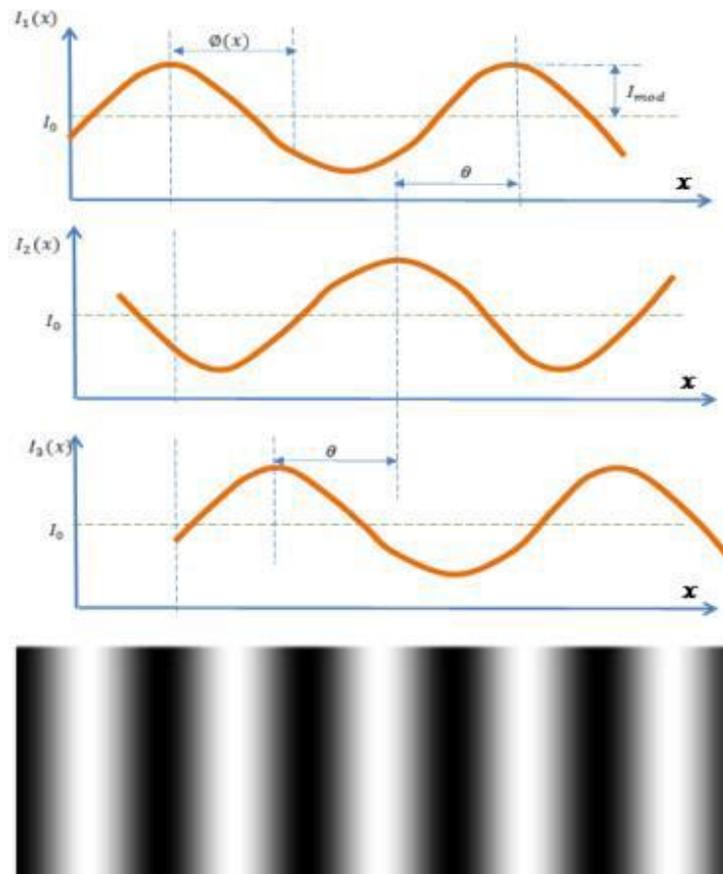


Ilustración 19-Cambio de fase con tres patrones de proyección y un ejemplo de una imagen marginal.

Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging

Obtenemos la fase absoluta a partir de la envuelta:

$$\phi' = \arctg\left[\sqrt{3} * \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right]$$

Ecuación 12

Las coordenadas 3D se obtienen con la diferencia de fase desde el plano de referencia. [3]

$$Z = \frac{L}{B} * d = \frac{L}{B} (\phi - \phi_0)$$

Ecuación 13

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

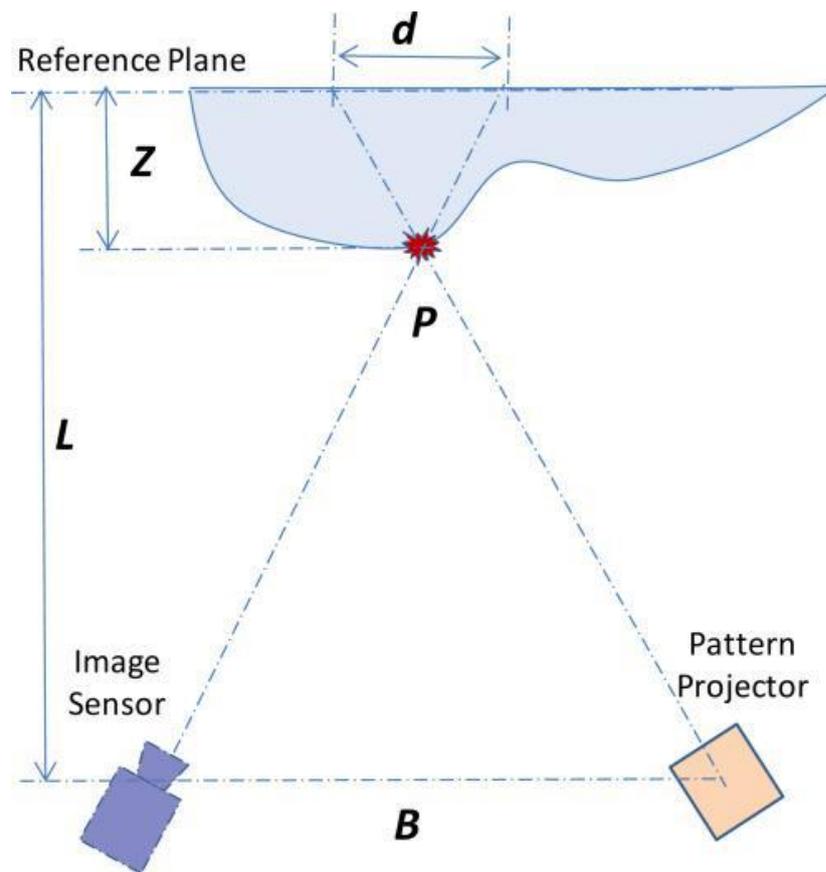


Ilustración 20- Esquema posiciones triangulación.

<https://www.osapublishing.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561>

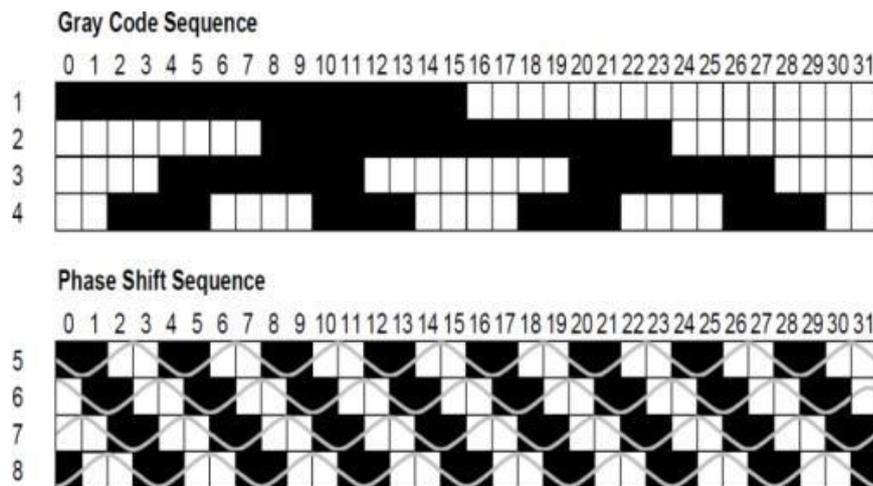
- **Codificación en grises y desplazamientos de fase:**

Este método trabaja a través de un conjunto de patrones binarios que dividen al objeto en diferentes partes. Estos patrones aumentan su resolución a través de la proyección de un patrón complementario en movimientos o cambio de fase.

Con esta técnica podemos dar la fase absoluta, algo que el procedimiento de cambio de fase no puede hacer, y nos permite reconstruir la fase envuelta cuando dos superficies tengan una discontinuidad de fase mayor a  $2\pi$ . [4]

En la siguiente imagen vemos como el código gris determina el rango absoluto de fase, mientras que el cambio de fase ofrece una resolución de sub-píxeles más allá del número de franjas que ofrece el código gris.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEISIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 21-Combinando código gris con cambio de fase.*

*Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging*

Este método es más lento que el resto, ya que necesita realizar un mayor número de proyecciones lo que hace que su eficiencia sea baja a la hora de trabajar con objetos dinámicos.

### **Aplicaciones de los escáneres de luz estructurada**

A continuación, expondremos los principales campos en los que se emplea la tecnología de escáner 3D de luz estructurada

- **Diseño industrial y manufactura**

La utilización de escáneres 3D simplifica el trabajo y acortan los tiempos a la hora de desarrollar nuevos diseños de productos o toma de medidas de objetos de geometrías complejas. Con esta técnica podremos obtener la geometría de prácticamente cualquier pieza industrial, cuyos datos podrán ser manipulados a través de software C.A.D. y C.A.M. Entre las tareas que nos permite desarrollar un escáner de luz estructurada destacan: [13]

- Comprobación de medidas y calibración.
- Elaboración rápida de prototipos

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



Ilustración 22- Escaneado carrocería automóvil.

<https://www.einscan.com/applications/bringing-digital-vehicle-customizations-to-life/>

- **Cuidado y salud:**

La fabricación de prótesis y órtesis requieren una gran precisión a la hora de tomar las medidas para que sus usuarios puedan tener una buena calidad de vida. Con un escáner 3D de luz estructurada, el proceso de toma de medidas mejora exponencialmente, al mejorar la precisión de las medidas y reducir el tiempo, a la hora de tomar las dimensiones del cuerpo humano. Además, gracias al escáner podremos crear un modelo virtual que evite la continua presencia del paciente en la elaboración del producto.



Ilustración 23-Extremidad escaneada con escáner de luz estructurada y prótesis creada a partir del escaneado.

Elaboración propia.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- **Ciencia y educación:**

Desde universidades, laboratorios y museos están utilizando los escáneres 3D de luz estructurada para trabajar con artefactos sin dañarlos. Los museos en especial, están creando modelos en 3D de sus piezas para poder estudiarlos sin dañarlos y tener una referencia de su estado óptimo en caso de sufrir algún percance o desastre. [14]



*Ilustración 24- Aplicación para conservación histórica.*

<https://www.einscan.com/applications/3d-scanning-provides-access-to-priceless-cultural-relics-of-the-tang-dynasty/>

- **Arte y Diseño:**

La reproducción de piezas por seguridad, o la necesidad de modelos para el desarrollo de tareas de maquillaje o efectos especiales hacen que la industria del arte, el cine y los videojuegos utilicen la tecnología de escáner por luz estructurada para el desarrollo de sus actividades y dar mayor realismo a sus trabajos. [13]

- **Ingeniería inversa:**

La utilización de los escáneres 3D de luz estructurada para la ingeniería inversa se focaliza en las industrias del automóvil y aeroespacial.

Su objetivo es obtener información o un diseño a partir de un objeto ya existente. Con esta tecnología podemos crear modelos de forma rápida sin tener que medir todas sus características, como haríamos de forma convencional, que posteriormente podremos modificar estudiar. [13]

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

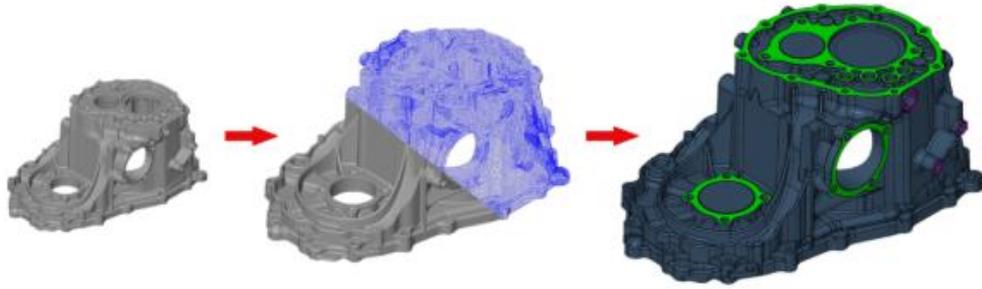


Ilustración 25- Aplicación ingeniería inversa.

<https://todo-3d.com/escaneado-3d/>

### 3.5 Escáner 3D utilizado

Para el desarrollo de este proyecto se va a utilizar el escáner 3D modelo **Einscan-Pro** de la marca **SHINING 3D** ©. A continuación, podremos ver sus principales características:

#### 3.5.1 Características del escáner:

Einscan-Pro es un escáner de mano, versátil y rápido. Utiliza la tecnología de digitalización 3D basada en la luz estructurada cuenta con un proyector, capaz de dirigir diferentes tipos de patrones sobre las piezas escaneadas en función del modo de escaneado empleado, y con dos cámaras a los lados para identificar la deformación del patrón proyectado.

Dispone de varios modos de digitalización 3D en función de las necesidades de precisión y velocidad que precisa el trabajo a desarrollar.



Ilustración 26- Escáner EinScan-Pro.

<https://www.3dnatives.com/es/3D-compare/scanner/einscan>

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

El software Einscan-Pro nos permite generar modelos abiertos y cerrados para trabajar con ellos en un programa C.A.D. o imprimirlos directamente. Posee tres modos de escaneo distintos para objetos grandes y pequeños. Las dimensiones de las piezas con las que podemos trabajar son las siguientes: [15]

- **Piezas pequeñas:** 150 mm de ancho, por 150 mm de alto, por 150 mm de largo.
- **Piezas grandes:** 4000 mm de alto, por 4000 mm de ancho, por 4000 mm de largo.

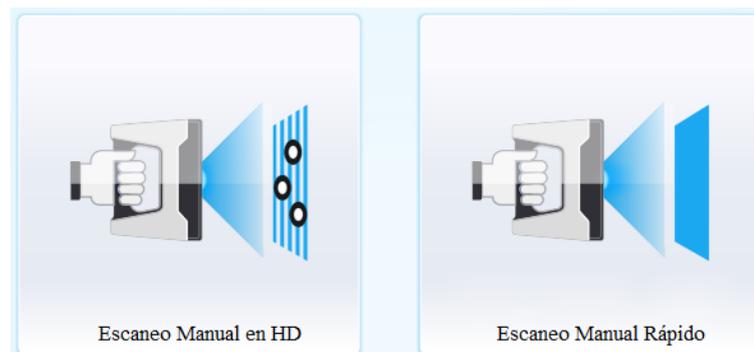
Se adjunta el Anexo [1] con las diferentes características del escáner Einscan-Pro de la marca SHINING 3D ©.

### 3.5.2 Modos de escáner:

Este escáner cuenta con **tres modos de escaneo** en función del tamaño de la pieza.

- **Escaneado manual portátil:**

Realiza un escaneado rápido, realizando diez tomas por segundo. Se utiliza para piezas de gran tamaño como partes de vehículos o el cuerpo humano.



*Ilustración 27- Modos de escaneado manual.*

*Elaboración propia.*

También cuenta con un escaneado portátil de alta definición HD, utilizado para cuerpos con más detalles.

- **Escaneado fijo:**

El escaneado fijo se centra en el uso del trípode. Es compatible con varias aplicaciones. [1]

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 28-Escáner fijo.*

*Elaboración propia*

- **Auto escaneo:**

Contamos con una mesa giratoria que nos permite realizar escaneado de 360 grados, pudiendo tomar las imágenes de la pieza entre 2 y 180 posiciones diferentes. Su uso se centra en el escaneado de piezas pequeñas.



*Ilustración 29- Escaneado automático.*

<https://www.3dnatives.com/es/3D-compare/scanner/einscan>

### **3.5.3 Verificación de los datos obtenidos con el escáner**

Para comprobar que los datos obtenidos no se distorsionan de la realidad y podemos trabajar con ellos de forma correcta y con errores mínimos, vamos a realizar una comparación entre las medidas tomadas por el escáner y las medidas reales.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La toma de medidas del escáner estará afectada por los siguientes factores:

- Factores que afectan al escáner:
  - Distancia de trabajo.
  - Configuración y calibración del proyector.
  - Brillo de la cámara.
  - Enfoque y posición del proyector y la cámara.
- Factores ambientales.
  - Iluminación.
  - Viento.
  - Humo.
  - Niebla.
  - Humedad.
- Factores que afectan al objeto:
  - Reflexión.
  - Refracción.
  - Transparencia.
  - Morfología.
  - Material de la superficie.
  - Color de la superficie.
  - Brillo.

Para nuestro estudio podemos despreciar algunos de los factores mencionados. Se despreciarán todos los factores ambientales salvo la iluminación, ya que el trabajo de escaneado se realizará en el laboratorio 1.2 del edificio Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada (L.U.C.I.A.) donde no nos afectará ninguno de los factores descartados.

Además, el color de la pieza, la transparencia, la refracción y la reflexión no nos afectaran, ya que la superficie será la piel humana, que carece de estas propiedades.

Los factores que se han considerado y tratado a la hora de realizar el escaneado son:

- **Iluminación ambiental:**

Es el único factor ambiental considerado debido a las características del entorno. Para controlar este parámetro hemos tenido en cuenta la posición del escáner, colocándolo en un lugar alejado de la luz solar (principal fuente de fallos al escanear), en zonas de luminosidad artificial tenue, sin fuentes de luz directa, evitando generar brillos y sombras que impidan la lectura del patrón deformado por las cámaras.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- **Color del material:**

Las geometrías con colores oscuros pueden afectar al escaneado. Esto es debido a que los colores oscuros absorben la radiación del patrón de luz proyectado, impidiendo que las cámaras recojan la deformación del patrón sobre el objeto. Es recomendable aumentar el contraste de las cámaras a través del software del escáner desde el ordenador.

Las piezas con colores claros y acabado brillante pueden causar problemas en las zonas con luminosidad alta, por lo que se recomienda bajar el contraste en esas zonas.

- **Material del objeto:**

Durante la elaboración de este proyecto se ha colaborado en el desarrollo de otros en los que se han tenido que escanear piezas metálicas y transparentes. Gracias a estas experiencias, se ha podido comprobar que las superficies brillantes y transparentes no son posibles de escanear por sí solas.

Para escanear este tipo de materiales se ha utilizado un espray complementario al escáner. Este espray deposita una pequeña capa de polvo blanco mate, que tras el escaneado es posible retirar sin dejar rastro.



*Ilustración 30-Espray escaneado.*

*Elaboración propia.*

- **Forma del objeto:**

Uno de los problemas encontrados al escanear el cuerpo humano es su forma. Los diferentes recovecos encontrados, como los huecos entre los dedos de los

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

pies o las manos, son zonas ocultas que el escáner no puede reconocer, ya que no entra el patrón. Además, hemos tenido problemas al escanear la piel, debido a la existencia de vello corporal, ya que distorsiona el patrón sobre la superficie, provocando rugosidades e imperfecciones en el modelo digitalizado.

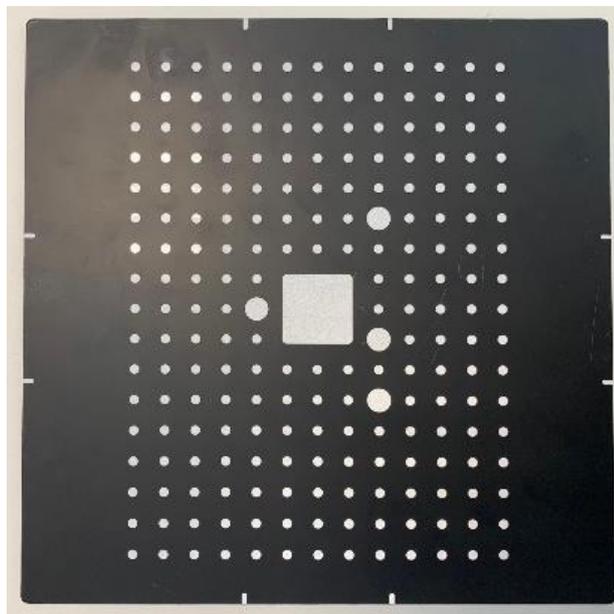
Para solucionar estos problemas tenemos dos opciones:

1. Post procesado del modelo mediante un programa que nos permita modificar la nube de puntos, rellenando huecos y suavizando la superficie.
2. Escanear el objeto en diferentes posiciones para obtener los datos de aquellas posiciones que posteriormente nos den problemas al alinear el modelo digital o al cerrar la malla y obtener la geometría completa.

#### 3.5.4 Calibración del escáner:

Para obtener un buen resultado al realizar el escaneado y obtener unas medidas con el menor error posible, es de vital importancia que el escáner esté calibrado de forma correcta. El calibrado del escáner se debe realizar cada vez que modifiquemos el ambiente del dispositivo, ya que la modificación de la iluminación puede modificar los parámetros de análisis de la herramienta. Además, la calibración también debe realizarse cada vez que los resultados obtenidos por el escáner no se asemejen a la superficie escaneada.

Para la calibración de nuestro dispositivo, el fabricante nos proporciona una herramienta dentro del software del escáner y una placa de calibración que permitirá obtener los parámetros de medida de la cámara y del proyector.



*Ilustración 31- Placa de calibrado.*

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

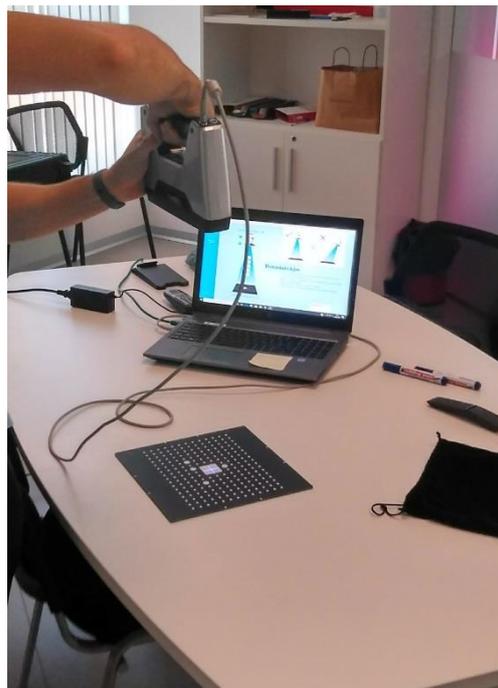
*Elaboración propia.*

Entre los parámetros que se calibran son:

- Longitud focal.
- Punto de enfoque.
- Factores de escalado.
- Ubicación espacial de las cámaras respecto del origen de coordenadas.

Como hemos mencionado anteriormente, para la realización del escaneado contamos con una herramienta dentro del software del dispositivo. Esta herramienta nos irá guiando durante la calibración. Los pasos a seguir durante la calibración serán:

1. Colocar la placa de calibración sobre una superficie plana, y a una altura adecuada para la realización de las operaciones.
2. Seleccionar la opción de calibrado dentro del programa de control del escáner. En este apartado tenemos la opción de calibrar la cámara o de realizar una calibración en HD.
3. Colocaremos el escáner orientado de forma perpendicular a la placa de calibración. Sobre la placa el proyector emitirá el patrón de luz, en el que podremos observar una cruz. Dicha cruz será colocada en el cuadrado central de la placa de calibración.



*Ilustración 32- Procedimiento de calibración 1.*

*Elaboración propia.*

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

4. Cuando tengamos el escáner colocado en la posición correcta, iremos modificando la posición del escáner según nos vaya indicando el programa del escanear. El cambio de posición consistirá en un movimiento vertical a una distancia de la placa de calibración de entre 400 mm y 300 mm.
5. Con esta operación se proyectará una secuencia patrón que indicará al software la posición, la orientación, la distancia a la placa de calibración y las características internas de la cámara y del proyector.
6. El procedimiento de calibración se realiza respetando los parámetros que impone el software de calibración, moviendo el escáner de forma lenta y siempre proyectando en perpendicular a la superficie plana sobre la que se apoya la placa de calibración.
7. Las operaciones anteriores se repetirán otras 4 veces, pero con la placa de calibración inclinada.



*Ilustración 33- Procedimiento de calibración 2.*

*Elaboración propia.*

8. Por último, daremos la vuelta a la placa y proyectaremos un patrón de líneas sobre la placa de calibración (por la parte posterior la placa de calibración es totalmente blanca) y repetiremos el movimiento explicado anteriormente.

Con esta calibración, el escáner calcula los distintos parámetros de medida en función de las diferentes orientaciones utilizadas.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**Precisión dimensional del escáner:**

Para que los datos obtenidos a través del escaneado de la pierna sean útiles y nos sirvan para trabajar, necesitamos que la información capturada sea precisa, por esto en esta parte del trabajo obtendremos el error cometido por el escáner comparando una digitalización de un pie escaneado e impreso en 3D y las medidas analógicas tomadas sobre el pie impreso.



*Ilustración 34- Pie impreso para la comparación de medidas.*

*Elaboración propia.*

La toma de medidas analógica se realizará con un pie de rey, tomando como puntos de referencia los puntos señalados mediante marcadores, como se ve en la ilustración anterior. Las distancias analizadas se podrán ver en el Anexo [5].

Para comprobar las medidas tomadas por el escáner, trabajaremos con el software C.A.D. Autodesk Fusion 360©.

Una vez hayamos tomado las medidas con ambos sistemas, compararemos los valores obtenidos y veremos si dichos valores están dentro de los datos de exactitud del fabricante.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- **Medición con pie de rey:**

La medición manual se realizará con un pie de rey con una precisión de 0,01 mm cuyas características podremos ver en el Anexo [4].



*Ilustración 35- Pie de rey utilizado.*

*Elaboración propia.*

Se han realizado tres medidas diferentes de cada una de las distancias entre marcadores seleccionadas. Los resultados se exponen en la siguiente tabla.

DISTANCIAS ENTRE MARCADORES	MEDIDAS			MEDIA
1-2	32,36	32,4	32,34	32,37
1-3	42,44	42,43	42,46	42,44
3-5	50,5	50,52	50,49	50,50
1-5	94,65	94,62	94,64	94,64
2-4	40,62	40,60	40,63	40,62
4-6	39,37	39,30	39,32	39,33
2-6	79,4	79,41	79,49	79,43

*Tabla 1- medidas realizadas con pie de rey.*

- **Medición con pieza escaneada:**

Para comprobar la precisión de la toma de medidas del escáner se han realizado 3 escaneados distintos, del pie modelo impreso en 3D, en el modo manual del escáner.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

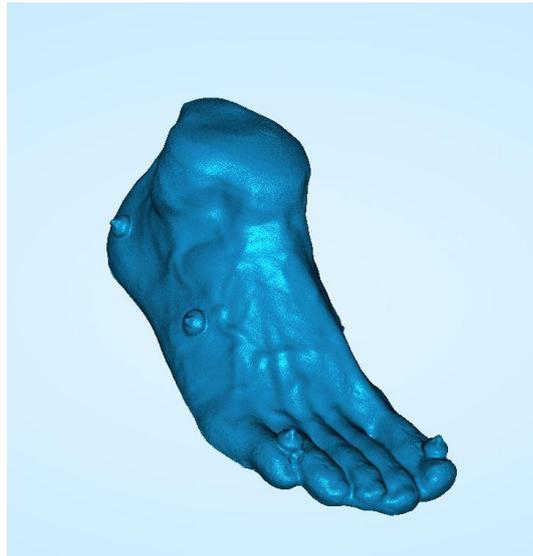


Ilustración 36- Pie escaneado.

Elaboración propia.

Una vez realizados los tres escaneados, tomaremos las diferentes medidas a través del software C.A.D. Autodesk Fusion 360©. Los resultados obtenidos se expondrán en la siguiente tabla:

DISTANCIAS ENTRE MARCADORES	MEDIDAS			MEDIA
1-2	32,67	32,7	32,62	32,66
1-3	42,83	42,76	42,6	42,73
3-5	52,23	52,62	52,23	52,36
1-5	94,72	94,72	94,67	94,70
2-4	40,74	40,7	40,73	40,72
4-6	39,17	39,25	39,17	39,20
2-6	79,58	79,59	79,58	79,58

Tabla 2- Mediciones realizadas sobre las digitalizaciones.

- **Comparación de resultados:**

El modo manual del escáner, según los datos aportados por el fabricante Shining 3d©, nos permite realizar digitalizaciones cuya exactitud media varíe en torno a 0.3mm.

Para obtener el error cometido por el escáner aplicaremos la siguiente ecuación:

$$ERROR = |MEDIA MEDIDAS PIE DE REY - MEDIA MEDIDAS DIGITALIZACIÓN|$$

Ecuación 14

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

A partir de esta fórmula obtenemos los siguientes resultados.

DISTANCIAS	MEDIDAS MEDIAS CALIBRE	MEDIDAS MEDIAS FUSION	ERROR	ERROR ABSOLUTO
1-2	32,37	32,66	-0,30	0,30
1-3	42,44	42,73	-0,29	0,29
3-5	52,50	52,36	0,14	0,14
1-5	94,64	94,70	-0,07	0,07
2-4	40,62	40,72	-0,11	0,11
4-6	39,33	39,20	0,13	0,13
2-6	79,43	79,58	-0,15	0,15

*Tabla 3- Error escáner.*

Los resultados de error que hemos obtenido son satisfactorios y concuerdan con los datos proporcionados por el fabricante al ser iguales o inferiores a 0.3 mm.

## **4 Diseño CAD para órtesis de pie y tobillo:**

### **4.1 Introducción:**

Como aplicación de lo expuesto anteriormente, vamos a diseñar **una órtesis de pie y tobillo** que inmovilice las extremidades inferiores y cuya fabricación se lleve a cabo mediante impresión 3D.

Para realizar esta tarea, utilizaremos como modelo mi pierna derecha, la cual ha sido escaneada previamente y hemos obtenido su geometría en forma de nube de puntos. Esta nube de puntos será tratada con los programas Meshmixer © y Fusion 360 © de Autodesk para obtener el diseño C.A.D. que buscamos.

Al diseñar la órtesis debemos respetar las especificaciones del producto. Estas órtesis se fabricarán adaptándose a los requisitos del paciente y su lesión, proporcionando un producto propio, personal y a medida.

### **4.2 Especificaciones de la órtesis:**

El trabajo que vamos a realizar se centra en la inmovilización de la zona del tobillo para tratar posibles lesiones en esta zona.

Una órtesis de pie y tobillo, es un equipo médico diseñado para proveer de soporte a las estructuras del pie y del tobillo. Se extiende desde un poco más abajo de la rodilla hasta el pie. Este equipo se utiliza en pacientes que presentan inestabilidad en las extremidades inferiores. [5]

#### **4.2.1 Aspectos importantes:**

Al diseñar la órtesis debemos tener en cuenta los siguientes factores: [5]

- ✓ Edad del paciente.
- ✓ Actividad diaria del paciente.
- ✓ Tiempo de uso de la órtesis, para un uso determinado (varias horas al día) o uso temporal (semanas o meses).
- ✓ Tiempo y coste de fabricación.
- ✓ Resistencia a esfuerzos y fatiga.
- ✓ Facilidad para el montaje por el paciente.
- ✓ Diseño adecuado para la lesión.
- ✓ Como combinar la órtesis con un programa de ejercicios para mejorar la recuperación, bajo la supervisión de un terapeuta.
- ✓ Situación del paciente.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

#### 4.2.2 Materiales de trabajo:

A la hora de diseñar la órtesis, debemos tener muy presente el material con el que vamos a trabajar para conseguir una mayor comodidad del paciente, y un resultado eficaz para el tratamiento de la lesión. Teniendo en cuenta este aspecto podemos trabajar.

- ✓ **Materiales plásticos:** Una órtesis de plástico generalmente se usa en pacientes que sufren de una condición neurológica y/u ortopédica. Ejemplos de condiciones neurológicas lo son Accidentes Cerebro Vasculares (CVA por sus siglas en ingles), esclerosis múltiple y perlesía cerebral. En estos casos la función de la órtesis es mantener el alineamiento apropiado de las articulaciones afectadas para compensar por la debilidad y el desequilibrio muscular. Ejemplos de condiciones ortopédicas son fracturas, lesiones severas a tendones y artritis. Pacientes que presentan dolor en el área del tobillo y el pie debido a trauma o alguna otra razón podrían beneficiarse de una órtesis de pie y tobillo. Este inmoviliza el área, permitiendo que sane, y reduciendo el dolor relacionado al movimiento. [16]  
Entre los plásticos que se utilizan en impresión 3D tenemos PLA, PETG, Nylon, ABS... debido a las características medicas de la órtesis lo más recomendable es utilizar PLA y PETG, ya que son materiales biocompatibles, además de ser fácilmente reciclables e imprimibles.
- ✓ **Espumas:** para evitar posibles rozaduras y aumentar la comodidad de la órtesis podremos colocar espumas en la parte interior de la órtesis, la zona de los maléolos...
- ✓ **Velcro:** para sujetar la órtesis a la extremidad y asegurarnos una correcta colocación de la misma utilizaremos velcros para dar una cierta presión.

#### 4.2.3 Lesiones a tratar:

Las principales lesiones que podemos tratar con este tipo de órtesis son: [24]

- ✓ Fractura de tobillo.
- ✓ Fracturas tarsianas y metatarsianas.
- ✓ Patologías aquileanas.
- ✓ Pie equino.
- ✓ Lesiones producidas por Accidentes Cerebro Vasculares, esclerosis múltiple, perlesía cerebral etc.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

#### 4.2.4 Objetivos para una órtesis de pie y tobillo:

Sufrir una lesión es un motivo de sufrimiento bastante importante, por ello el tratamiento de la lesión debe ser lo menos molesto para el paciente y permitirle tener una buena calidad de vida durante el tratamiento.



*Ilustración 37- Ejemplo pieza sumergible. <https://fiixit.es/wordpress/wp-content/uploads/elementor/thumbs/3-Esguince-de-segundo-grado-nmvesxs73h0tvoqki4fiiyq5csxmsx9ncpu0evgbjk.jpg>*

Para ello, cuando diseñemos la órtesis debemos tener cuenta, los siguientes aspectos:

- ✓ Deben ser ligeras, permitiendo un movimiento sin necesidad de realizar grandes esfuerzos.
- ✓ Resistentes. Deben ser capaces de aguantar el día a día del paciente sin sufrir fracturas o deformaciones.
- ✓ Resistentes al agua. Los tratamientos convencionales de las lesiones en las extremidades no permiten el contacto con el agua, ya que pierden sus características, lo que empeora en gran medida la calidad de vida del paciente.
- ✓ Correcta adaptación a la anatomía del paciente.
- ✓ Debe permitir la circulación del aire, permitiendo así la transpiración de la piel.
- ✓ No puede tener picos o rebordes afilados que produzcan irritaciones o cortes.
- ✓ Debe permitir la revisión de la lesión de forma sencilla y sin producir molestias.
- ✓ Facilitará la rehabilitación del paciente permitiendo la utilización de electroestimulación o tratamientos fisioterapéuticos.
- ✓ Tendrá un aspecto atractivo y novedoso al gusto del paciente

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

### 4.3 Parámetros a tener en cuenta en el diseño para la impresión 3D

Para conseguir un buen resultado a la hora de imprimir una pieza, debemos tener en cuenta ciertos parámetros durante la fase de diseño CAD.

A continuación, describimos los más importantes.

- **Grosor de pared:**

A la hora de imprimir una pieza, podemos hacerlas huecas cambiando la densidad del relleno, por lo que debemos darle un grosor de pared. Este grosor de pared debe ser al menos el doble del diámetro de la boquilla del extrusor. Al aumentar el grosor de pared, aumentamos la robustez y el tiempo de impresión de nuestra pieza. [17]

- **Orientación y calidad superficial:**

La impresión 3d se realiza mediante la adición de una capa sobre otra. Esto afecta a las cargas que es capaz de soportar la pieza, durante su vida útil, y cambiarán en función de la orientación de la deposición de la capa.

Para posicionar bien una pieza a la hora de imprimir debemos:

- Colocar la pieza con su zona más plana en contacto con la placa de impresión, reduciendo así la necesidad de material de apoyo, reduciendo el coste de la pieza y el tiempo de impresión.
- El detalle de la pieza dependerá de la orientación con la que se depositen las capas. Los detalles verticales tendrán una mayor calidad al imprimirse en el eje Z.

- **Soportes:**

La tecnología FDM no puede extruir material sobre el aire, por este motivo es necesario utilizar soportes que actúen como andamiajes de apoyo sobre el que se depositen las capas de la pieza. Esto ocurre principalmente cuando se diseñan voladizos de gran longitud.

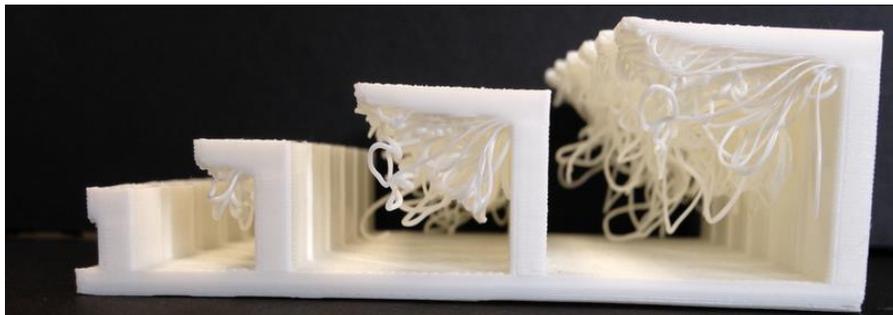


Ilustración 38- Ejemplos de voladizo.

<https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o>

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Estos soportes suelen tener relleno, patrón, espesor y altura de capa distinta al resto de la pieza, incluso si es posible también se pueden utilizar distintos materiales para realizarlos como el PVA (soluble en agua).

- **Mínimo ángulo de impresión:**

Para evitar el uso de soportes debemos diseñar la pieza de tal forma que ninguna de sus partes sobresalga en voladizo formando más de  $45^\circ$  con respecto al eje z. A partir de los  $45^\circ$  se podrá imprimir, pero no está garantizada la obtención de buenos resultados sin soportes.

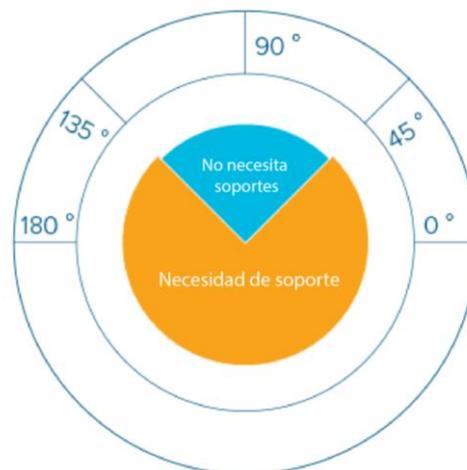


Ilustración 39- Ángulos de impresión.

<https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o>

- **Letras y grabados:**

La impresión 3D nos permite hacer piezas con multitud de detallas y personalizaciones. En este aspecto es muy común incluir letras o formas con relieves en las piezas.

Se recomienda que los textos se realicen incrustando las letras dentro de la pieza. Para este tipo de detalles se recomienda una profundidad de 0.3 mm y un ancho de línea de 1mm. Si los detalles sobresalen de la pieza, se recomienda que el grosor de línea sea de 2.5 mm y 0.5 mm de profundidad.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

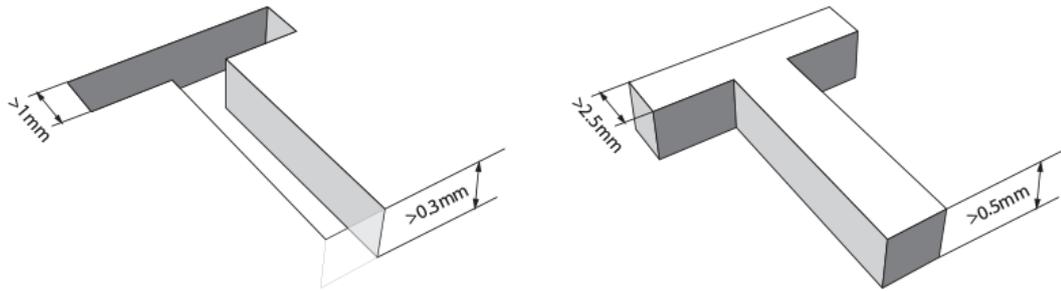


Ilustración 40- Medidas para grabados.

<https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o>

### 4.4 Descripción del proceso de trabajo

A continuación, describiremos los distintos programas y procedimientos que aplicamos en la construcción de la órtesis.

- ✓ **Software de escáner 3D EinScan-Pro:** con este programa podremos ver en tiempo real los objetos o partes del cuerpo que estamos escaneando. Este programa se encargará de generar la nube de puntos que buscamos a partir de los datos obtenida por el escáner. Además, con este programa podemos realizar parte del pos procesado, eliminando las partes de la nube de puntos obtenida por el escáner no deseadas. Por último, el programa nos permitirá guardar los datos en un archivo con diferentes formatos, entre el que nos interesa el. STL.
- ✓ **Autodesk Meshmixer:** es una de las herramientas más potentes para trabajar con archivos de malla. Con esta herramienta podemos crear, reconstruir y esculpir diseños 3D de forma sencilla.
- ✓ **Autodesk Fusion 360:** es un programa de gran potencia y fácil de usar. Nos permite crear modelos en 3D, en función del archivo. STL obtenido del escáner .Su principal uso se encuentra en el diseño industrial mecánico, para lo que cuenta con diferentes módulos.

#### 4.4.1 Escaneado 3D:

La primera parte de este proyecto consiste en la toma de datos a través de un escáner 3D. Para esta tarea se ha utilizado el escáner **Einscan-Pro 3D** de la empresa SHining 3D.

La toma de datos se ha realizado en el **laboratorio 1.2 del edificio LUCIA** del campus Miguel Delibes de Valladolid, donde se han tomado las medidas proporcionadas, en cuanto a la situación del entorno y del escáner, para que la toma de datos sea lo más eficiente.

Los factores que se han controlado han sido:

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEISIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- ✓ **Calibración:** es necesario realizar la calibración al iniciar el escaneo para obtener la mayor precisión posible en la toma de datos.
- ✓ **Iluminación ambiental:** debido a las características del escáner, de luz estructurada, es necesario aislar la sala de luz solar y tener una iluminación artificial baja y constante.
- ✓ **Color del material:** la proyección del patrón del escáner debe realizarse sobre superficies de colores que no sean oscuros. Para el caso del escaneo de esta pierna no tenemos este problema.
- ✓ **Forma del objeto:** los objetos en los que nos encontramos recovecos o pequeños orificios podemos tener problema a la hora de escanear, ya que puede que el patrón no pueda ser proyectado en el interior del hueco. Para el caso que nos ocupa, este problema se puede dar en los dedos del pie. Además, el vello puede dificultar el escaneo. Estas dificultades se pueden subsanar colocando una media o un calcetín de pequeño espesor que se adapte a la pierna, deformando así lo menos posible la pierna.  
También es importante que durante el proceso de escaneo el paciente permanezca inmóvil.

➤ **Digitalización:**

Para la digitalización de la pierna escogemos el modo manual del escáner. Al comenzar el escaneo el programa nos permite realizar una vista previa de la nube de puntos, que representa el objeto que se está escaneado.

Una vez colocado el paciente en la posición adecuada, procedemos al escaneo pulsando el botón de “play” en el escáner.

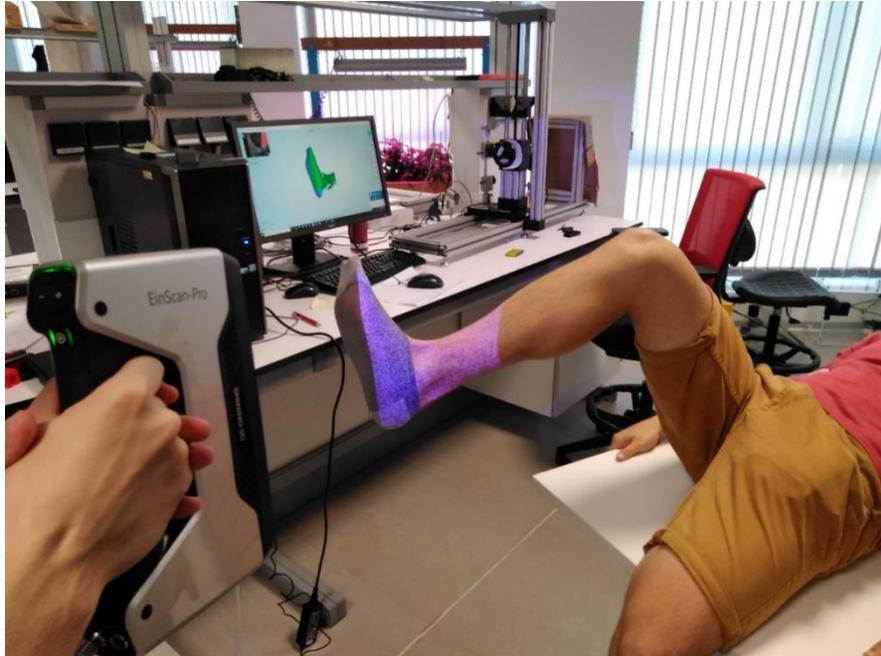


*Ilustración 41- botón de inicio escáner.*

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

*Elaboración propia.*

El escaneado debe hacerse de forma lenta, asegurándonos de obtener los puntos que buscamos con una buena calidad y sin distorsiones.



*Ilustración 42- Escaneado pierna.*

*Elaboración propia.*

Tras la realización de la digitalización podemos modificar los datos, eliminando las partes que no nos interesen o que hayan podido salir mal, con las herramientas de edición que nos proporciona el software del escáner.



*Ilustración 43- herramientas de tratamiento nube de puntos.*

*Elaboración propia.*

A través de estos comandos podemos seleccionar la zona de interés con el ratón y el botón “shift”, para revertir la zona seleccionada o borrar las zonas seleccionadas.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



Ilustración 44- Pierna escaneada.

Elaboración propia.

Una vez tengamos los datos que buscamos, el software del escáner generará la nube de puntos. El programa nos permitirá generar la nube de forma rápida, perdiendo calidad, u obtener una mayor calidad, perdiendo velocidad en la creación de la nube de puntos. En nuestro caso priorizaremos la calidad de la nube

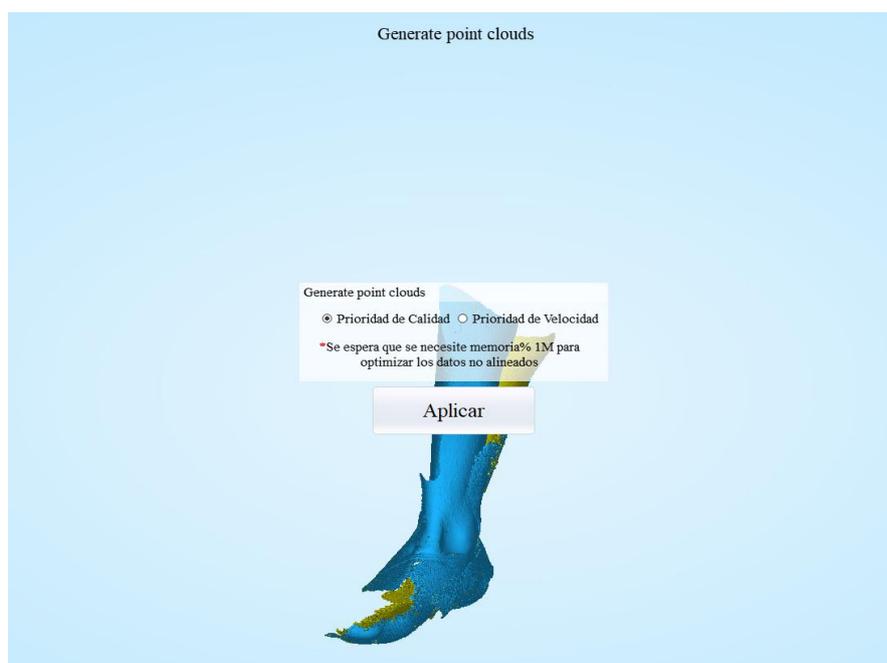
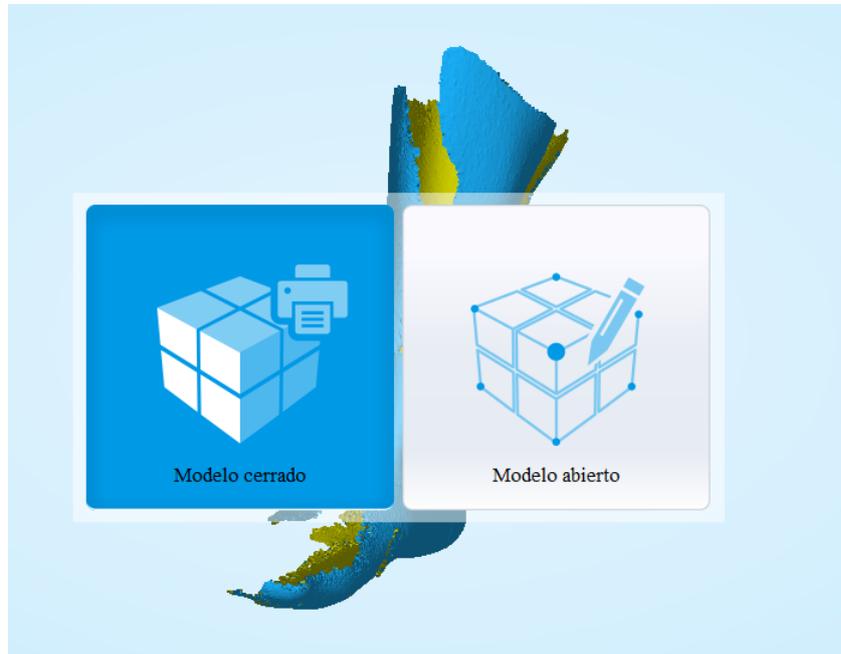


Ilustración 45- Priorización calidad.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

*Elaboración propia.*

Cuando esté generada la nube de puntos, obtendremos un modelo cerrado o abierto de la nube de puntos.



*Ilustración 46- Modelo cerrado.*

*Elaboración propia.*

Escogeremos realizar un modelo cerrado, ya que nos facilitará el trabajo posteriormente cuando trabajemos con Fusion 360.

Una vez finalizado el proceso guardaremos la nube de puntos como un archivo. STL.

#### **4.4.2 Tratamiento y corrección de la malla con Meshmixer.**

Una vez obtenido el archivo. STL del software del escáner debemos abrir el modelo en Meshmixer para mejorar en la medida de lo posible la malla a través de diferentes herramientas que nos proporciona el programa.

En general cuando abramos el archivo. STL tendremos diferentes problemas entre los que nos encontraremos:

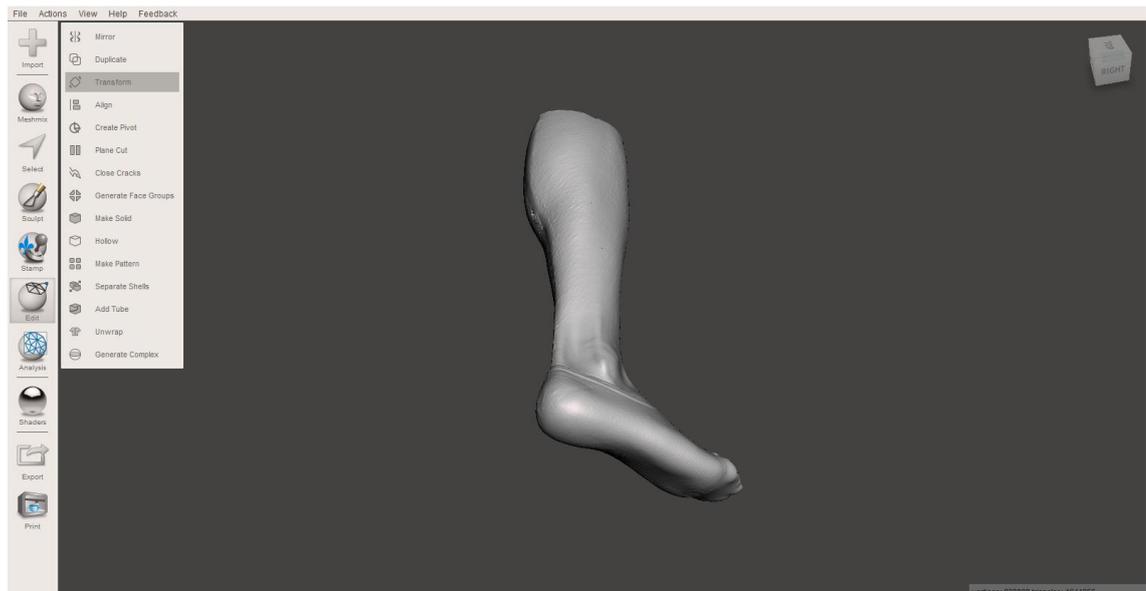
- Partes sobrantes generadas por el escáner que no hemos podido retirar con el software del escáner por falta de precisión de sus herramientas.
- Superficies irregulares que deformen el modelo.
- Colocación del modelo en unos ejes distintos a los que buscamos.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**4.4.2.1 Colocación de la pieza en los ejes adecuados:**

Al obtener los datos del escáner, el software del escáner nos coloca el modelo en unos ejes que posiblemente no sean los más adecuados o cómodos para trabajar con los programas de diseño CAD. Por este motivo antes de modificar el aspecto de la malla debemos modificar su posición.

Para posicionar la pieza según unos ejes adecuados para trabajar posteriormente debemos seleccionar la herramienta “Transform”.



*Ilustración 47- Herramienta Transform.*

*Elaboración propia.*

Con esta herramienta podemos mover la pieza por el espacio de trabajo, rotarla entorno a los 3 ejes y escalarla a través de los display que nos aparecen al seleccionar la herramienta o mediante las herramientas que nos aparecen sobre la pieza.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

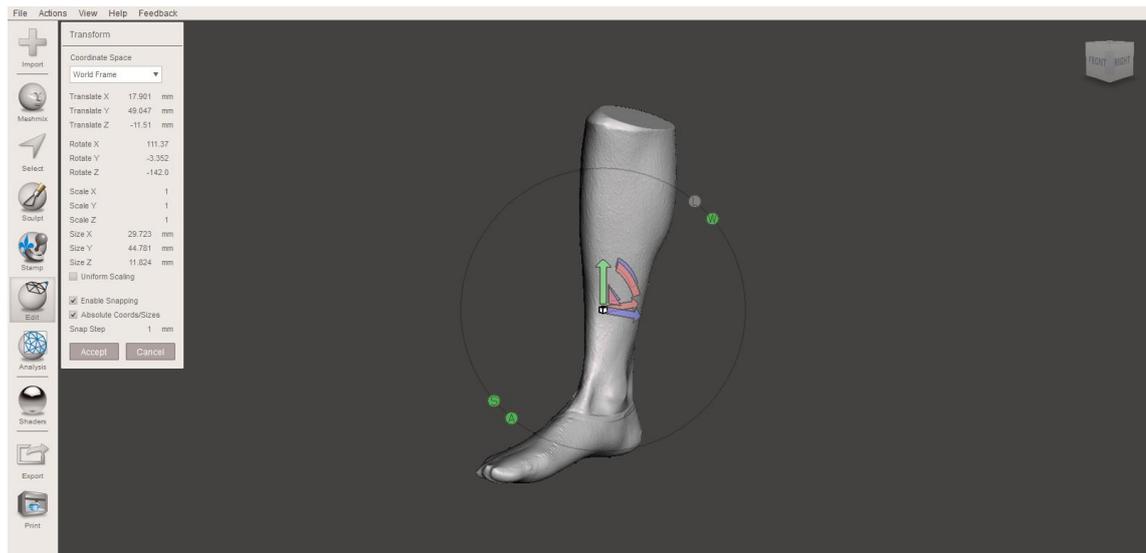


Ilustración 48-Posicionamiento de la pieza con Transform.

Elaboración propia.

Si utilizamos las herramientas que nos aparecen sobre la pieza, debemos seleccionar en el display la opción “Worldposition”.

### 4.4.2.2 Eliminar elementos sobrantes:

Para eliminar zonas, que el escáner ha captado y no nos interesan o que han surgido al escoger el modelo cerrado, debemos seleccionar esas partes con la herramienta “Select” y la suprimimos con el botón del teclado “Supr”.

Si la parte a suprimir es muy grande, debemos seleccionar su contorno o la zona por la que se une al resto de la pieza y eliminarla.



Ilustración 49-Eliminación partes indeseadas 1. Elaboración propia.

Una vez separada la zona a eliminar, seleccionamos un punto de la misma y pulsamos en el teclado el botón E.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

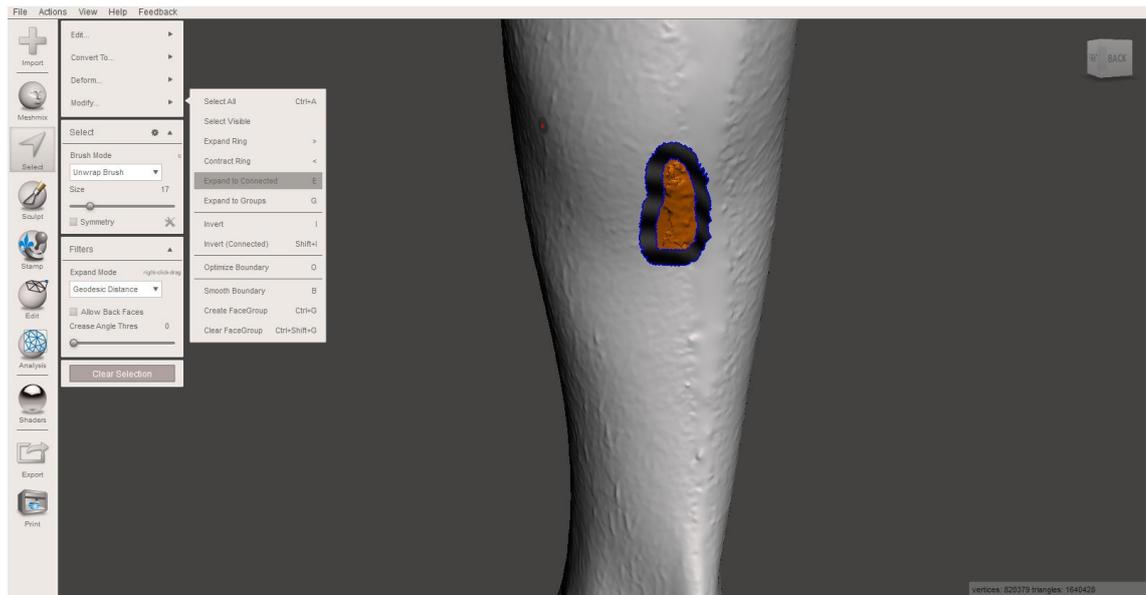


Ilustración 50-Eliminación partes indeseadas 2.

Elaboración propia.

De esta forma se seleccionarán todos los puntos unidos al punto seleccionado y podremos eliminarlos de una sola acción.

Una vez eliminado el elemento sobrante, rellenamos el hueco que ha dejado. Para ello seleccionamos el contorno del hueco y seleccionamos la herramienta "Erase and fill" o pulsamos el botón F del teclado del ordenador.

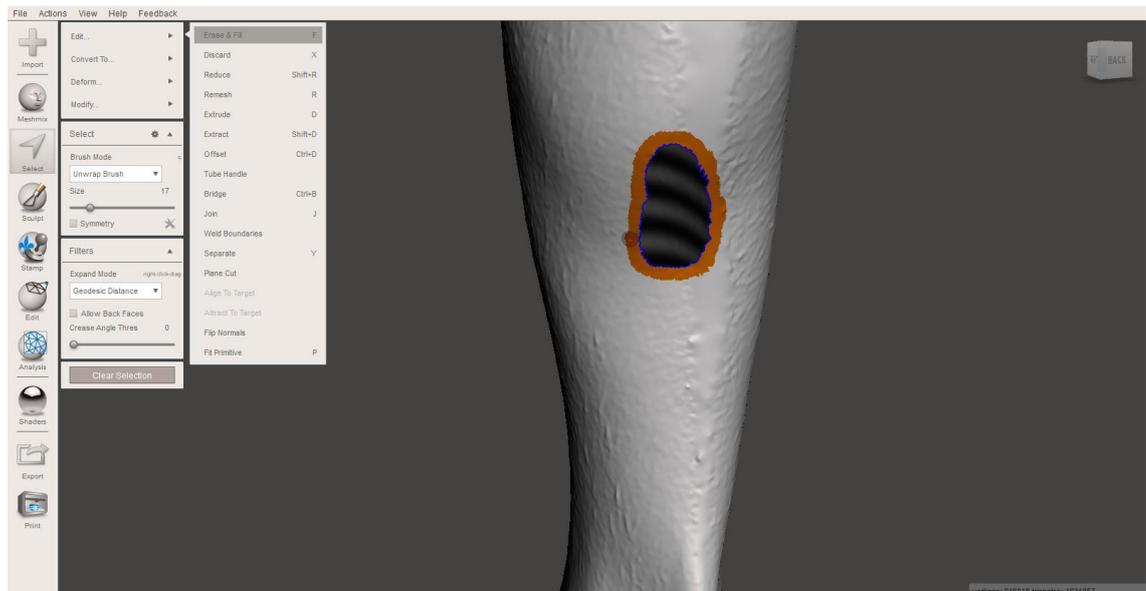


Ilustración 51-Eliminación partes indeseadas 2.

Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Con esta operación rellenamos el hueco que hemos generado con una malla similar a los puntos que rodeaban el hueco.

### 4.4.2.3 Limpieza de superficies irregulares.

Para mejorar la pieza y darle una superficie lisa y uniforme tendremos dos opciones.

- **Smooth general de la pieza:** si buscamos una tratamiento rápido y sencillo de la pieza usaremos la herramienta “Smooth”.



Ilustración 52-Limpieza de superficies 1. Elaboración propia.

Para usar esta herramienta debemos seleccionar la pieza entera, como hemos visto anteriormente, y escoger la opción “Smooth”.

Esta herramienta es útil si el escaneo no es bueno y tenemos muchas irregularidades. Si no es así, esta herramienta no es adecuada, ya que podríamos perder detalles interesantes de la pieza.

- **Smooth manual:** a través de la herramienta “Sculp”, en la aplicación “Smooth”, podemos mejorar la pieza en partes concretas.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

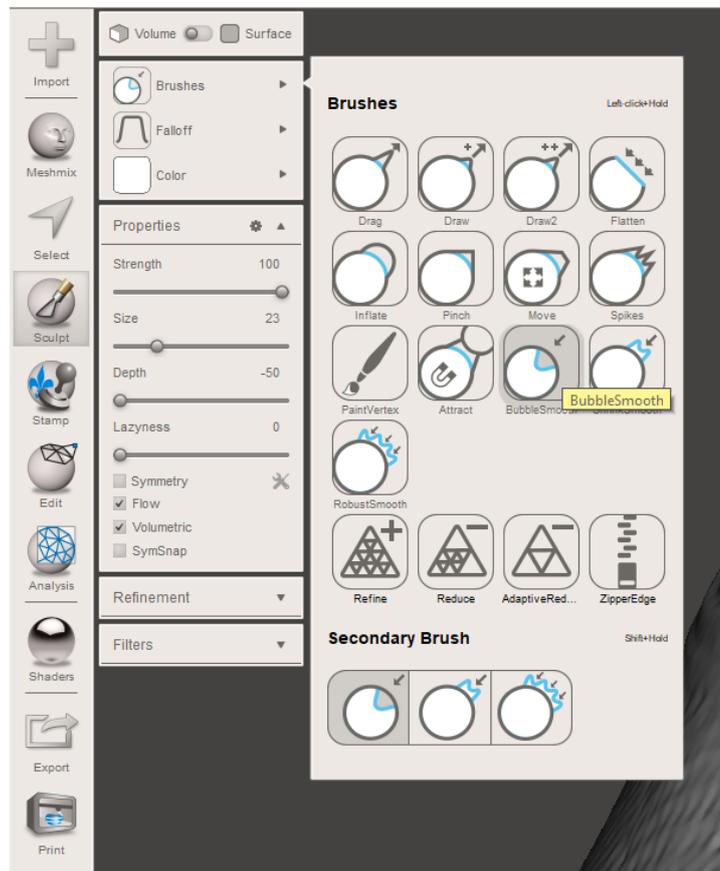


Ilustración 53-Limpieza de superficies 2.

Elaboración propia.

Esta herramienta nos permitirá modificar la superficie de la zona que nos interesa a través del pincel en forma de burbuja que nos proporciona el programa. De dicho pincel podremos controlar su tamaño y la fuerza con la que actué.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

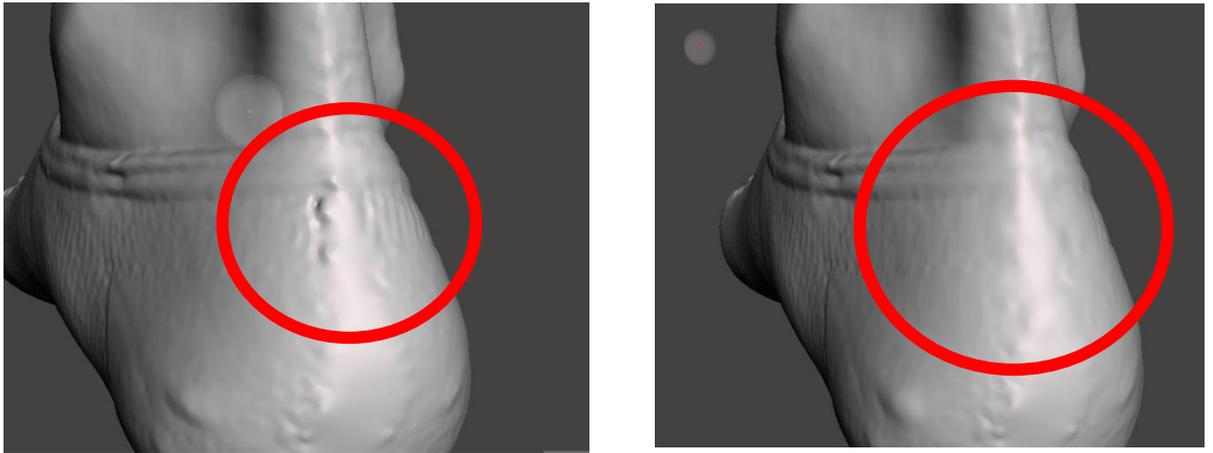


Ilustración 54-Limpieza de superficies 3.

Elaboración propia.

Con la herramienta “Flatten “podemos alisar la superficie, creando así una forma más uniforme.

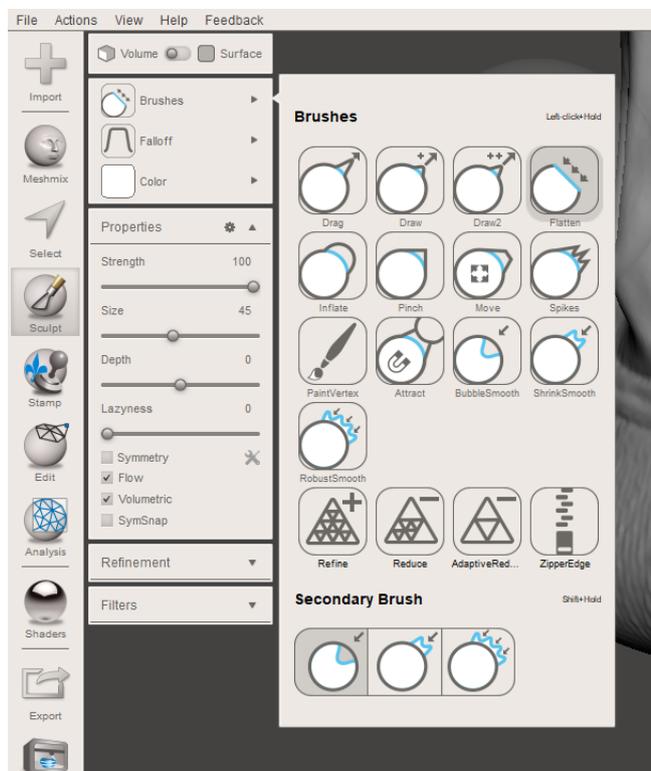


Ilustración 55-Limpieza de superficies 4.

Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

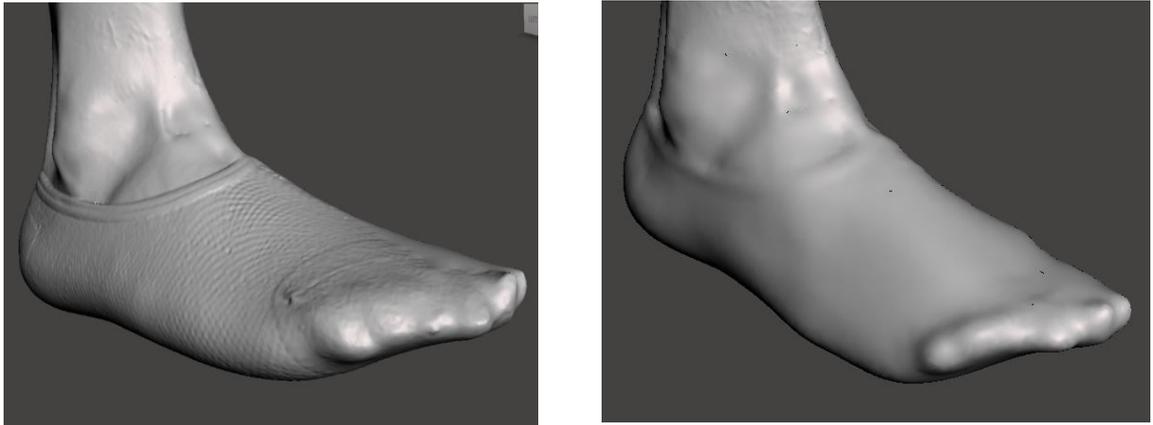


Ilustración 56-Limpieza de superficies 5.

Elaboración propia.

Guardamos el archivo .STL para poder trabajar con el posteriormente en Fusion 360© a través de “Export”.



Ilustración 57-Comando “Export” para guardar el archivo en formato .STL.

Elaboración propia.

### 4.4.3 Tratamiento con Fusion 360 de la malla y construcción de la órtesis

Para comenzar a trabajar en Fusion 360 abriremos el STL. Que hemos obtenido de Meshmixer. En este archivo tendremos la malla con los datos obtenidos del escáner refinados con Meshmixer.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La pieza que diseñemos con Fusion 360® posteriormente será impresa en 3D por FDM. Como hemos visto anteriormente, este tipo de impresión requiere una base lo más plana posible. Para ello creamos una “planta” con la forma de la planta del pie. Trabajamos en el espacio de trabajo “Model” con la barra de herramientas Sketch.

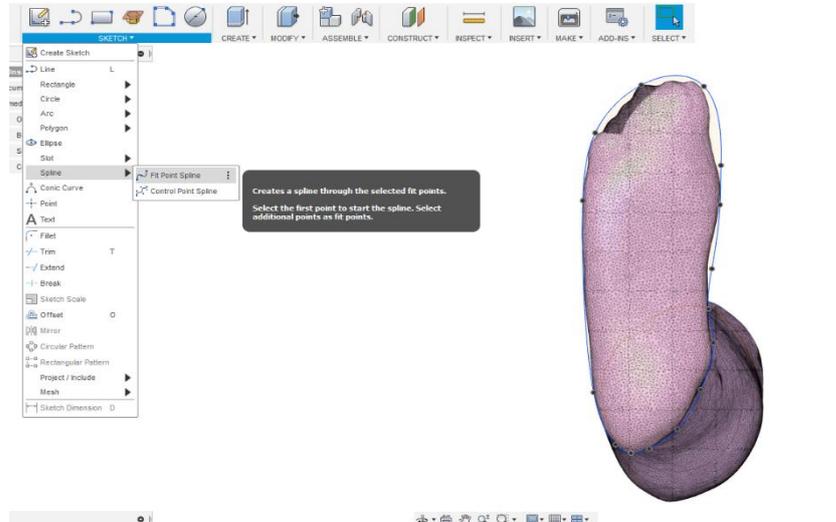


Ilustración 58-Dibujo con “Spline” base plana.

Elaboración propia.

Esta Sketch lo extruiremos, dando le volumen a la pieza de tal forma que se adapte a la malla obtenida del escáner.

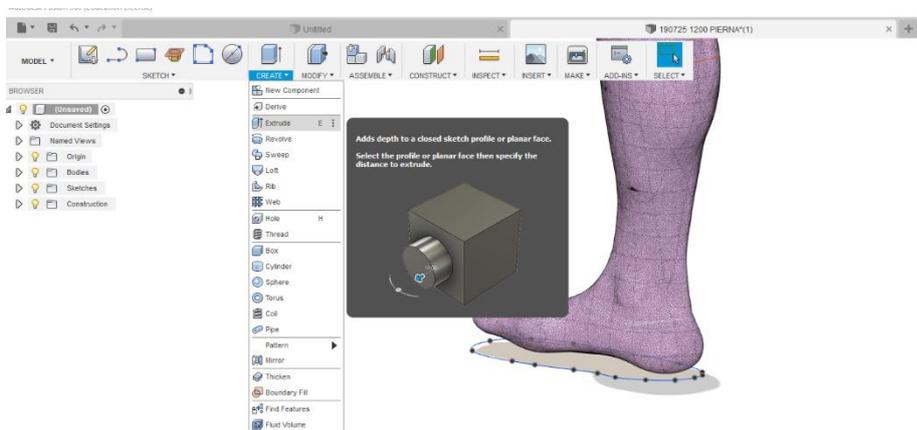


Ilustración 59-Extrusión planta.1. Elaboración propia

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



Ilustración 60-Extrusión planta.2. Elaboración propia

Una vez hayamos extruido la plana y la hayamos colocado de la forma que nos interesa para que la posición del pie sea correcta, transformaremos la planta en una malla .STL.

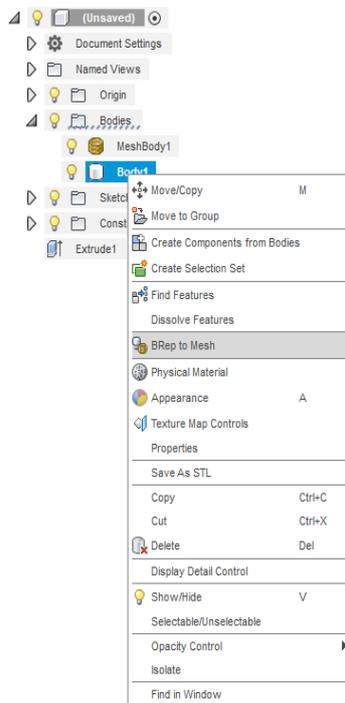


Ilustración 61-Herramienta de transformación de planta en .STL. Elaboración propia.

Una vez transformada la planta en .STL obtendremos el siguiente cuerpo, que será mediante el cual trabajaremos.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



Ilustración 62- Malla con planta. Elaboración propia

Para poder trabajar con esta malla debemos obtener su contorno. Este contorno será el que utilizaremos para hacer la órtesis a la medida del paciente. Para esta tarea utilizaremos la herramienta “Create Mesh Section Sketch”.

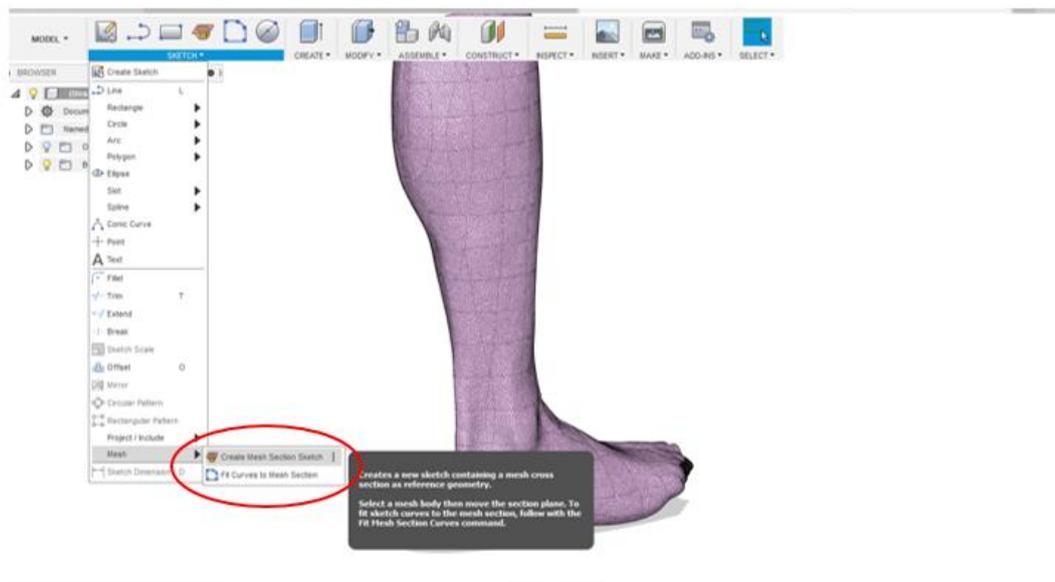


Ilustración 63- Herramienta para obtener contorno de malla. Elaboración propia

Con esta herramienta iremos obteniendo la forma del contorno de la malla a través de la intersección con diferentes planos que nos interese. Obtendremos el siguiente resultado.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

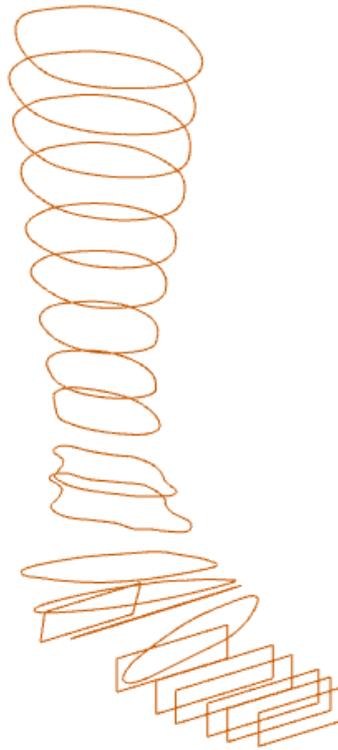


Ilustración 64- Planos de corte con la malla. Elaboración propia.

Con esta herramienta solo obtenemos los contornos de la malla. Posteriormente debemos seleccionar la parte del contorno que queremos. Para realizar esta tarea utilizaremos la herramienta “Fit Curves to Mesh Section”.

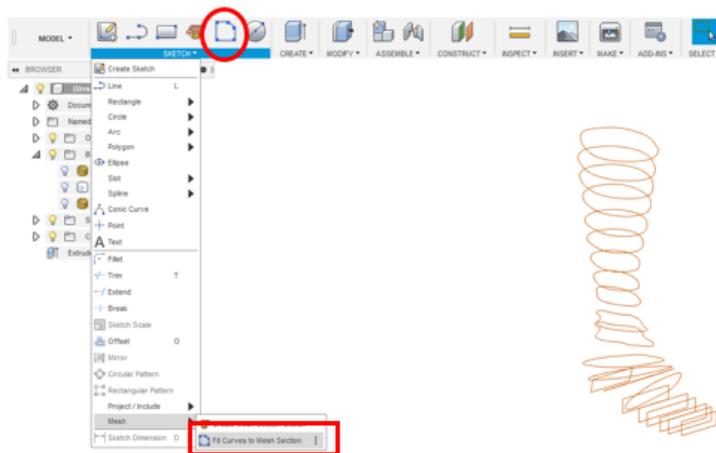


Ilustración 65-Herramienta “Fit Curves to Mesh Section”. Elaboración propia.

Tenemos varias opciones a seleccionar. A nosotros nos interesa obtener todo el contorno o solo una parte. Es importante que si solo seleccionamos una

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

parte, seleccionemos el mismo número de puntos en todas las secciones que utilizemos. Esto es necesario para realizar operaciones posteriores.

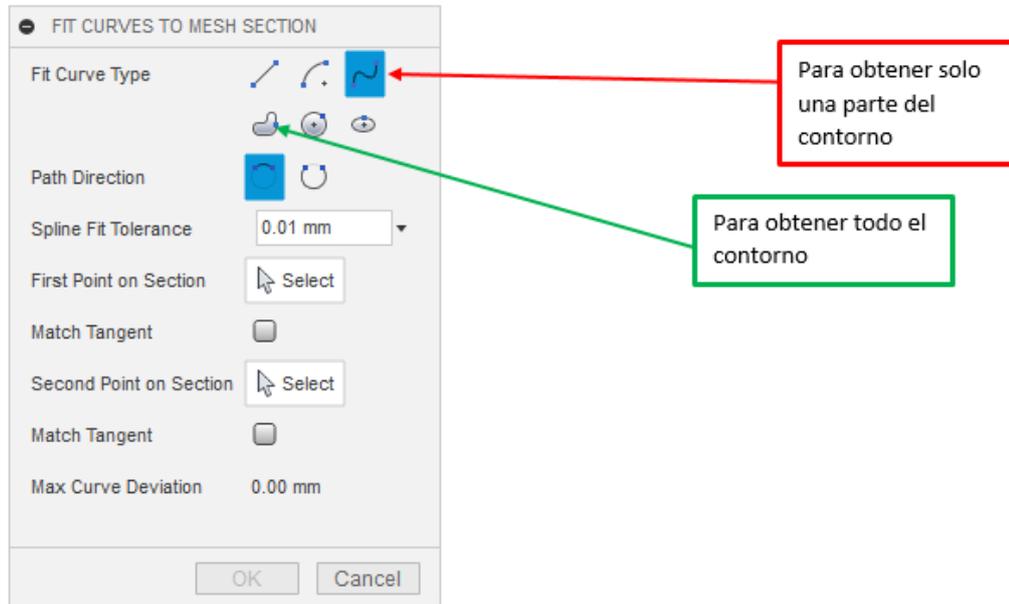


Ilustración 66-Opciones dentro de la herramienta "Fit Curves to Mesh Section". Elaboración propia.

Una vez realizados los diferentes sketches con la herramienta "Fit Curves to Mesh Section" obtenemos el siguiente resultado.

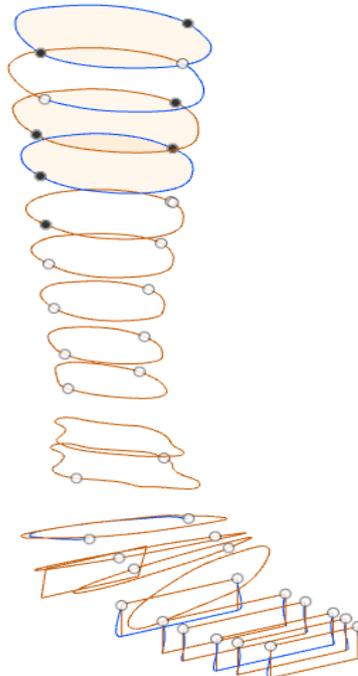


Ilustración 67-Resultado tras usar la herramienta "Fit Curves to Mesh Section". Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Con las secciones que hemos obtenido, generaremos diferentes superficies que corresponderá con el contorno de nuestra malla. Este proceso se realizará en el espacio de trabajo “Patch”.

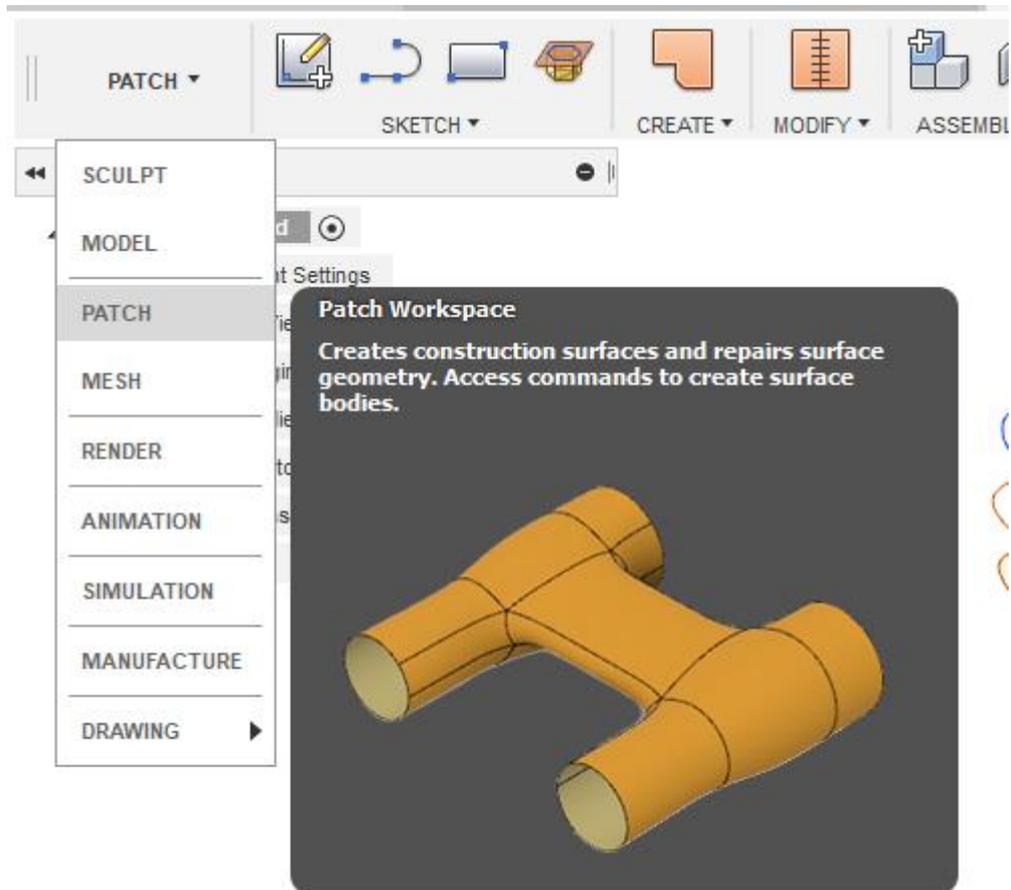


Ilustración 68-Espacio de trabajo “Patch”. Elaboración propia.

Mediante la herramienta “Loft” dentro del grupo de herramientas “Create” generamos la superficie.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

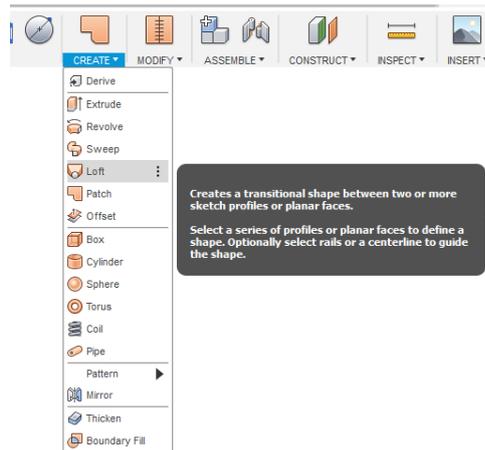


Ilustración 69- herramienta "Loft".

Elaboración propia.

Trabajando en este espacio de trabajo obtenemos el siguiente resultado.



Ilustración 70-Resultado espacio de trabajo "Patch". Elaboración propia.

Una vez generadas la superficie cambiamos al espacio de trabajo "Sculp".

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

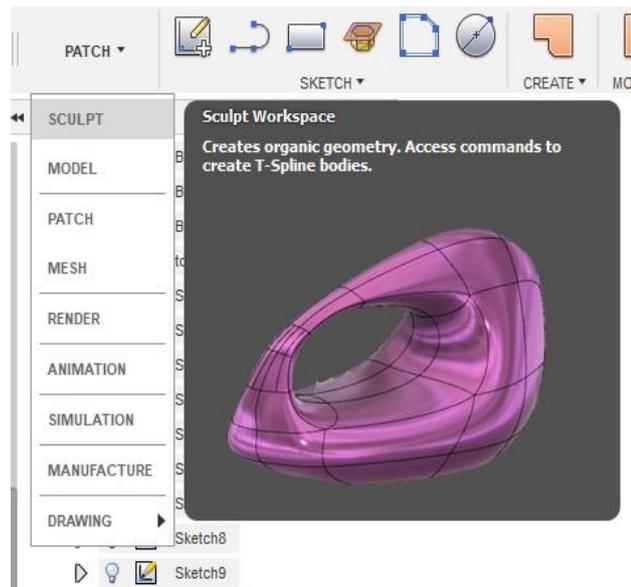


Ilustración 71-Espacio de trabajo "Sculpt". Elaboración propia.

En este espacio de trabajo creamos un "T-Spline" a partir de las superficies generadas anteriormente. Lo realizaremos con el bloque de herramientas "Utilities", con la herramienta "Convert".

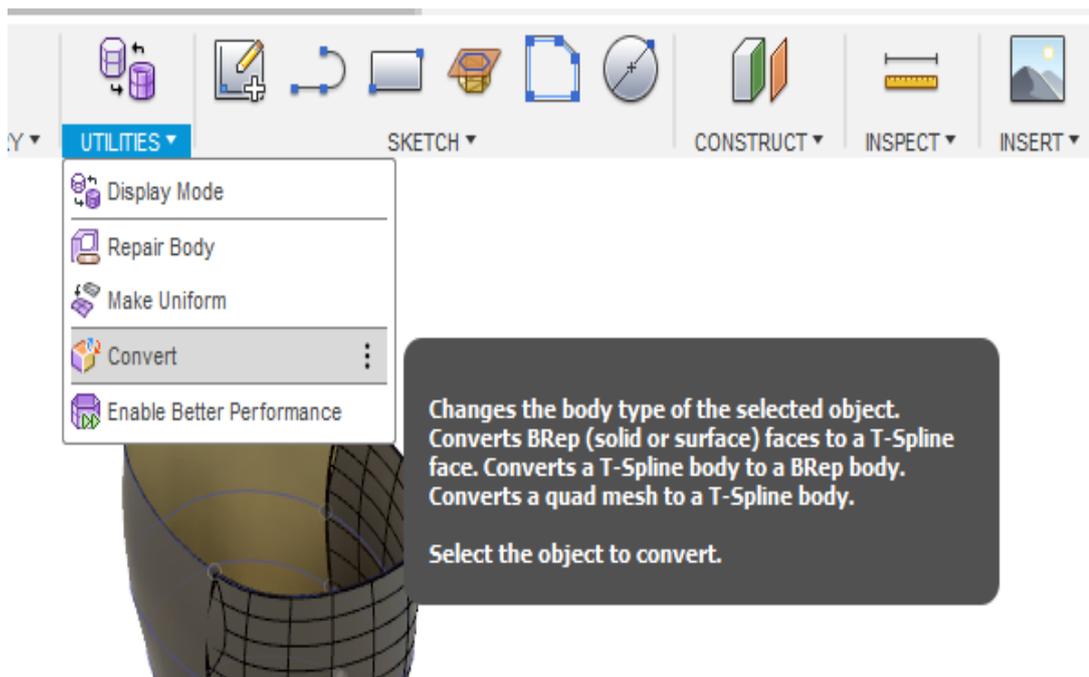


Ilustración 72-Bloque de herramientas "Utilities". Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

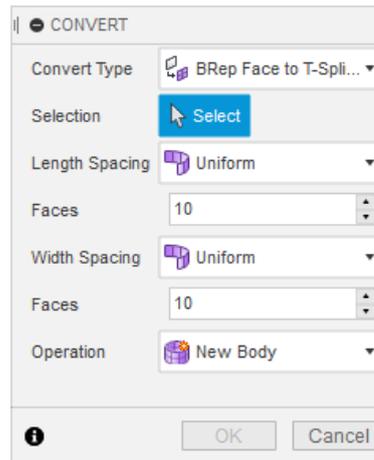


Ilustración 73- Herramienta "Convert". Elaboración propia

Al convertir las superficies a "T-Spline" obtenemos la siguiente pieza.

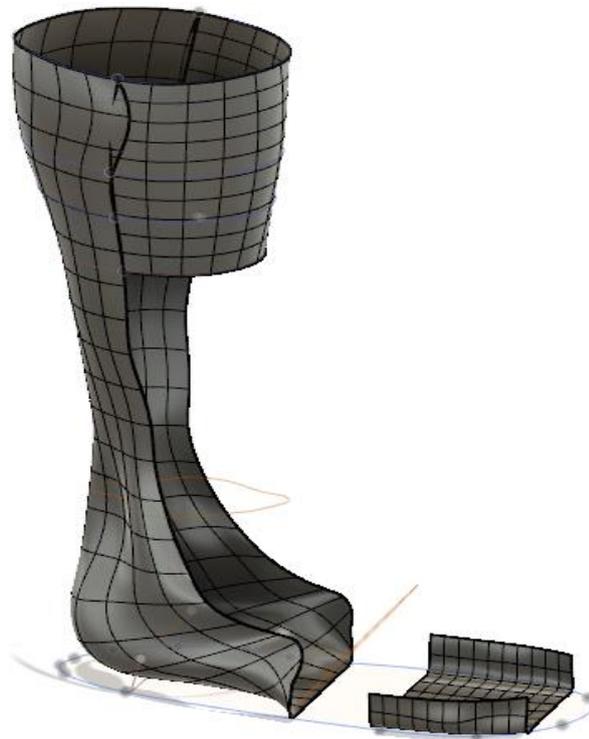


Ilustración 74- Resultado al usar "Convert". Elaboración propia.

Una vez convertido las superficies a "T-Spline" las uniremos en un único cuerpo mediante la herramienta "Merge Edge".

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

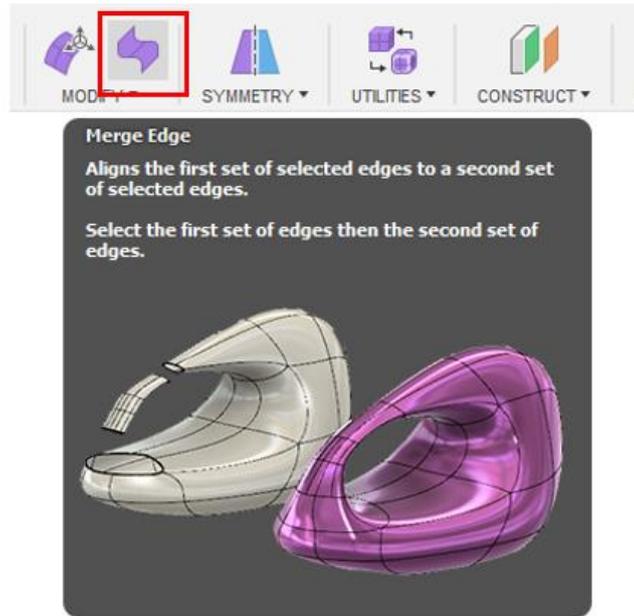


Ilustración 75-Herramienta "Merge edge". Elaboración propia.

Con esta herramienta obtendremos el siguiente resultado:

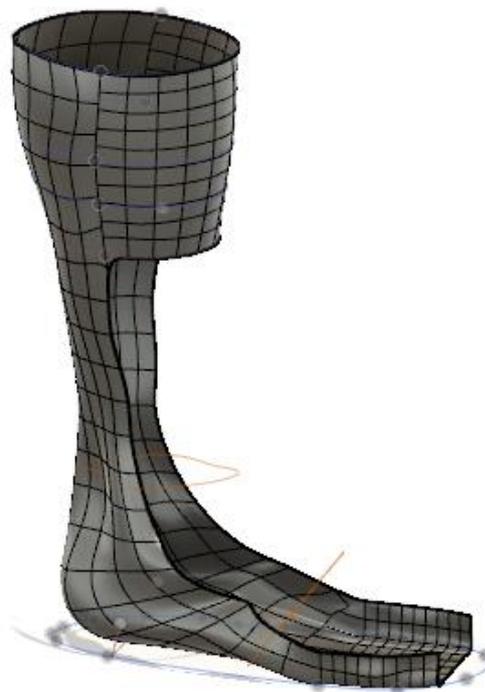


Ilustración 76-Resultado "Merge edge". Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La conversión de las superficies a “T-Spline” es necesaria, ya que en este espacio de trabajo podemos modificar la forma adaptándola a nuestras necesidades con la herramienta “Edit Form”.

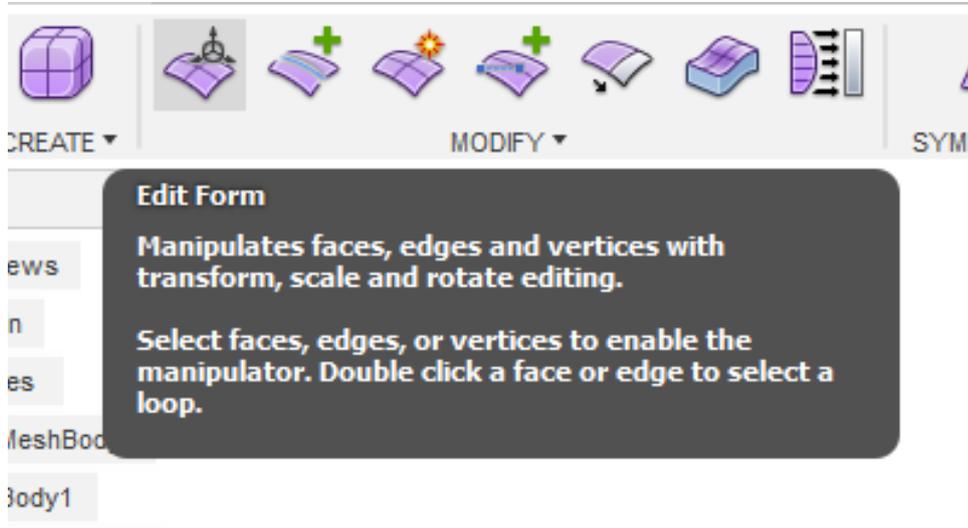


Ilustración 77- Herramienta "Edit form"1. Elaboración propia.

Con esta herramienta podremos modificar el “T-Spline”, adaptándolo si fuera necesario a la malla o alejándolo de zonas en las que el contacto con la órtesis genere molestias, como pueden ser los tobillos, o tengamos previsto colocar espumas para mejorar el confort.

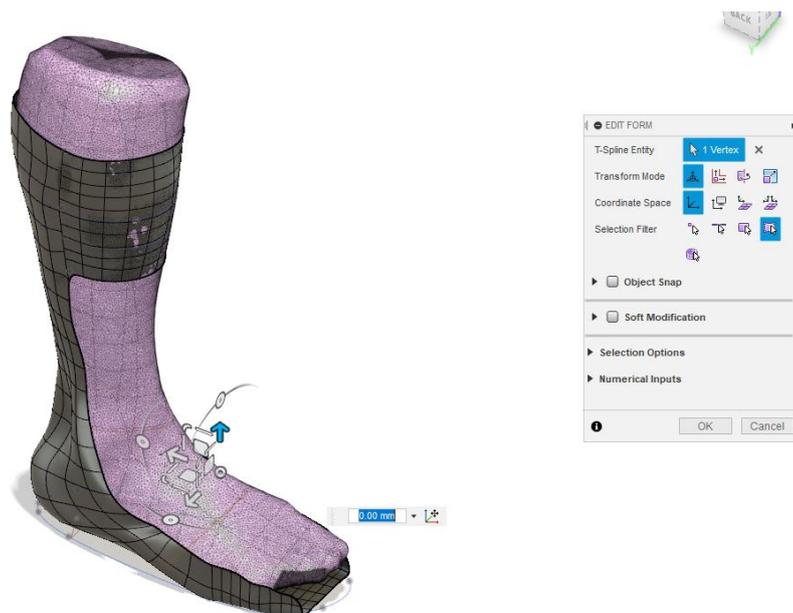


Ilustración 78-Herramienta "Edit form"2. Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Una vez adaptado el cuerpo “T-Spline” a la malla de la forma que queremos, le daremos un espesor con la herramienta “Thicken”. En este proceso le daremos volumen a la pieza. Debido al procedimiento de fabricación de esta pieza por modelado por deposición fundida, este espesor debe ser lo suficientemente robusto para evitar fluctuaciones en la pieza durante su fabricación que nos generarían imperfecciones y fallos de precisión a la hora de depositar el filamento fundido sobre la pieza.



*Ilustración 79-Fallo en la impresión de prototipo con espesor de 2mm. Elaboración propia.*

En general los espesores con los que desarrollaremos las piezas estarán entre los 3.5 y los 5 mm de espesor. Además, a la hora de dar un espesor a la pieza, escogeremos que los bordes que se generen sean redondeados para evitar molestias o posibles roces con la piel.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

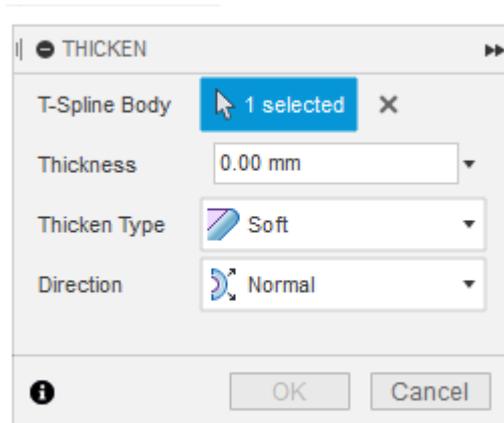


Ilustración 80-Opciones en la herramienta "thicken". Elaboración propia.

Con el espesor generado, transformaremos el cuerpo "T-Spline" en un cuerpo sólido para el programa a través de la herramienta "Convert", utilizada anteriormente. En esta herramienta seleccionaremos la opción "T-Spline to BRep".

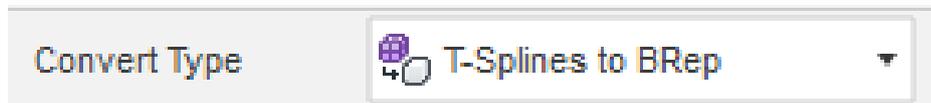


Ilustración 81-Convert Type T-Splines to BRep. Elaboración propia.

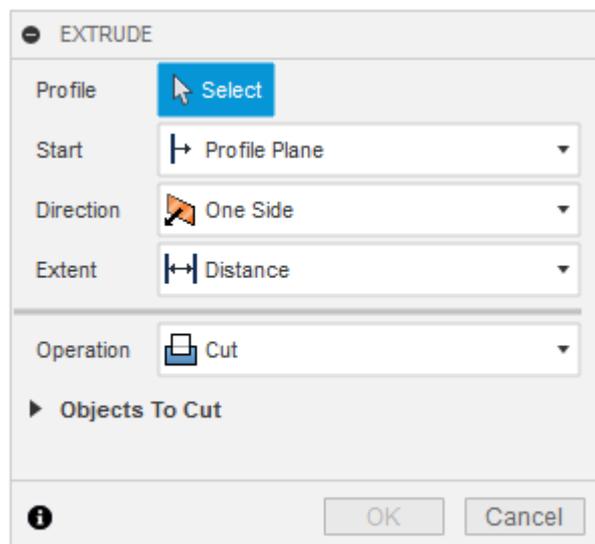
Al realizar este cambio en la pieza, podemos realizar modificaciones eliminando partes de la pieza o añadiéndolas, operando en el espacio de trabajo "Model". Para este modelo, con apoyo en la parte superior de la espinilla, necesitamos recortar parte de órtesis para poder introducir la pierna. Esta operación la realizaremos con un "Sketch" en un plano que colocaremos en el medio de la órtesis.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 82-Plano colocado en la mitad de la órtesis dividiendo al mismo en dos. Elaboración propia*

Una vez generado el “Sketch”, extruiremos el mismo con la herramienta “Extrude” con la opción “Cut” seleccionada.



*Ilustración 83-Herramienta Extrude. Elaboración propia.*

Con esta operación, eliminaremos la parte trasera del cuerpo, que habíamos generado anteriormente, permitiendo así que la pierna entre cuando fabriquemos la pieza. Con esta operación el resultado será el siguiente.

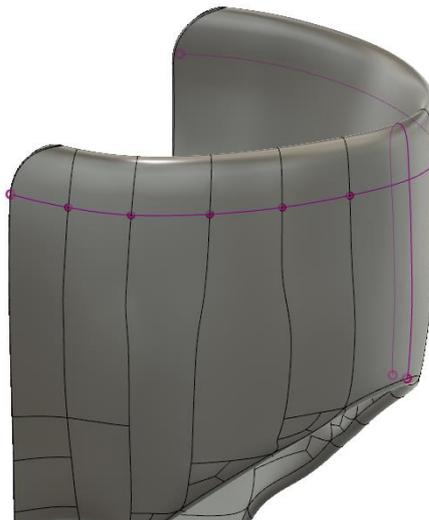
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 84-Resultado de la eliminación de la parte trasera de la órtesis. Elaboración propia.*

En la actualidad, las órtesis convencionales generan problemas de transpiración a sus usuarios, además de problemas en el movimiento debido a su elevado peso. El problema de la transpiración y parte del problema del peso lo podemos solucionar en esta fase generando pequeños orificios, con forma de círculo de 5mm de diámetro en la pieza, que permitan la circulación del aire y aligeren la pieza sin reducir sus propiedades resistentes.

Para desarrollar esta idea de forma sencilla obtendremos los contornos verticales y horizontales de la pieza, a través de la intersección de la pieza con dos planos en las posiciones que nos interesan obtener.



*Ilustración 85-Obtención de contorno de la pieza. Elaboración propia.*

Ahora haremos un “Sketch” de una circunferencia, en el lateral de la pieza, y extruiremos el “Sketch” sobre la órtesis eliminando así el material que se encuentre la extrusión.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

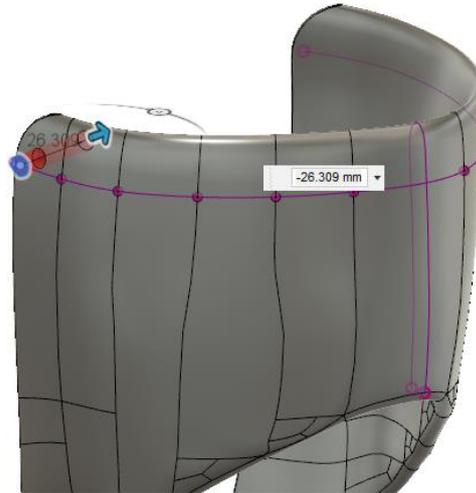


Ilustración 86-Extrusión de la circunferencia sobre la órtesis. Elaboración propia.

Con la extrusión hecha, aprovechamos los “Sketch” de los contornos de las piezas para desarrollar diferentes patrones que nos reproduzcan la extrusión de la circunferencia por la órtesis.

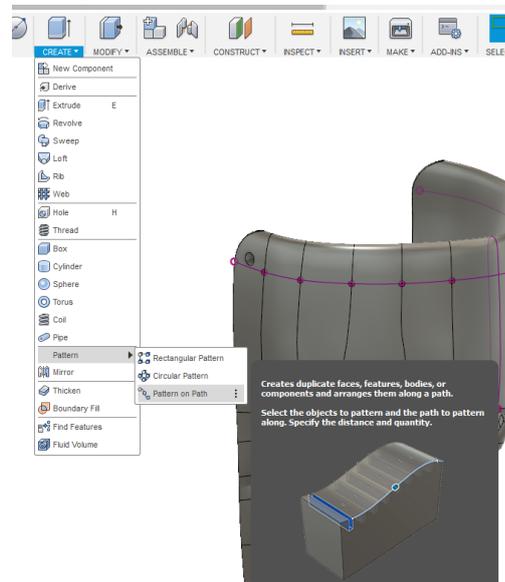
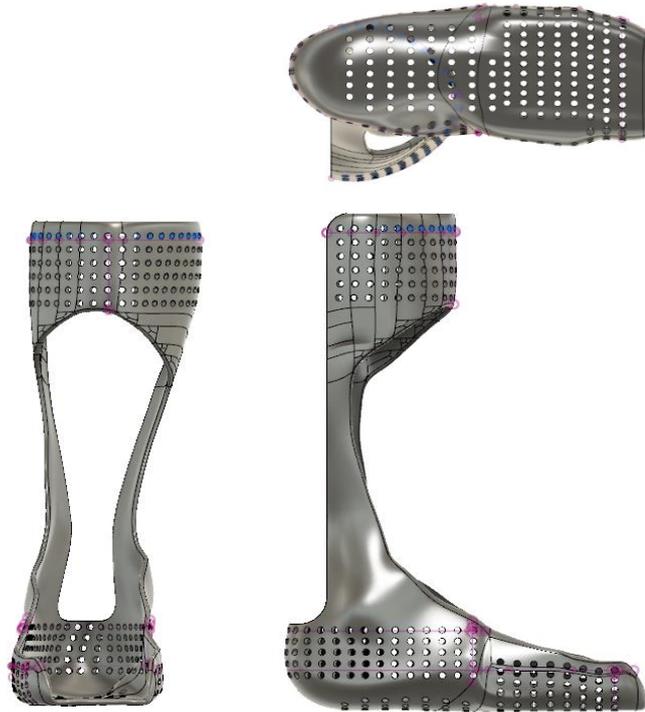


Ilustración 87-Herramienta para realizar patrones siguiendo un “Path”. Elaboración propia.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Una vez realizada esta operación por las distintas partes de nuestra órtesis, el resultado que hemos obtenido es el siguiente:



*Ilustración 88-Pieza aligerada mediante la realización de patrones "Path" en diferentes puntos. Elaboración propia.*

Como hemos mencionado anteriormente, la impresión 3D de grandes dimensiones y de gran altura puede tener problemas a la hora de imprimir, ya que el movimiento de los extrusores, al dejar el material, genera fluctuaciones en la posición de la pieza, generando irregularidades y un mal acabado. Para aumentar la rigidez de la pieza al imprimirse añadiremos nervios a la órtesis. De esta manera además aumentaremos la resistencia de la órtesis durante su vida útil.

Para realizar estos nervios, utilizaremos la herramienta "Pipe". Previamente a la utilización de esta herramienta, necesitamos obtener nuevamente los contornos de la órtesis, que serán los que utilicemos para desarrollar los nervios a través de la herramienta "Pipe".

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

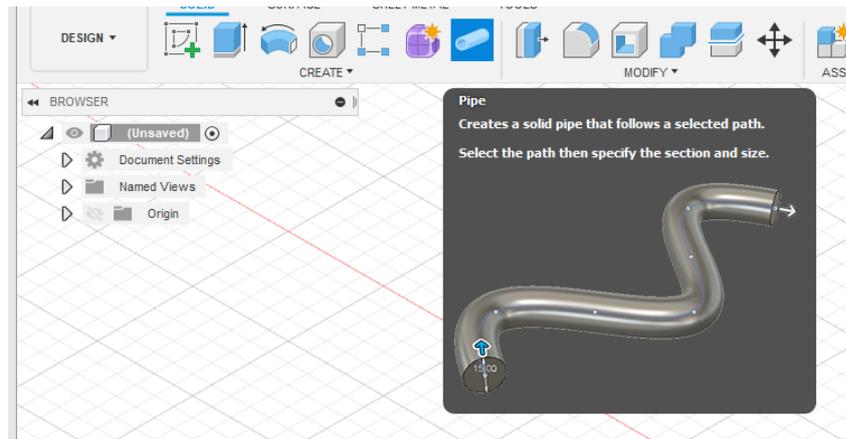


Ilustración 89-Herramienta pipe1. Elaboración propia.

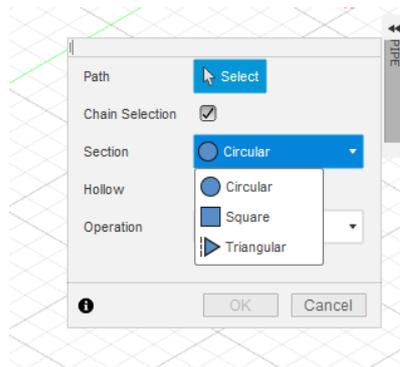


Ilustración 90-Herramienta pipe2. Elaboración propia.

La herramienta “Pipe” nos permite crear los nervios con diferentes geometrías. Escogernos una geometría cuadrada con una sección de 5mm.

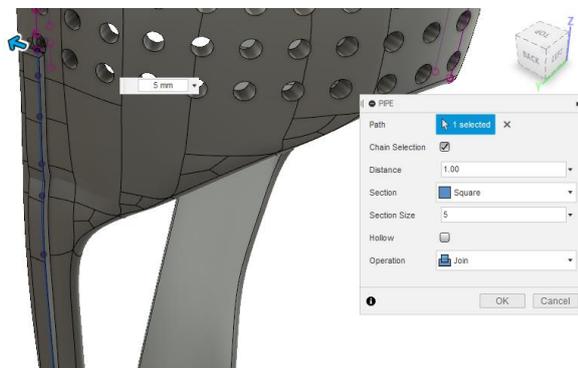


Ilustración 91-Construcción nervio cuadrado con la herramienta "Pipe". Elaboración propia.

Para facilitar la impresión y evitar que se imprima en el aire, modificamos el extremo inferior del nervio, redondeándolo con un radio de 2,5mm utilizando la herramienta “Filet”.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

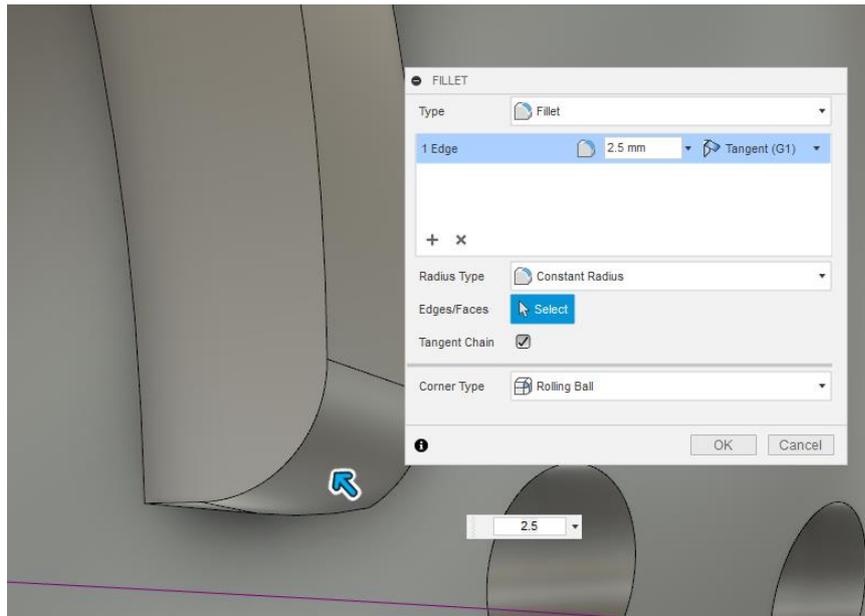


Ilustración 92-Herramienta "Fillet". Elaboración propia.

Con los nervios ya colocados, insertamos las hebillas en la órtesis que utilizaremos para ajustarla a la pierna mediante correas con velcros. Para ello realizamos un nuevo cuerpo con el diseño de las hebillas que queremos.

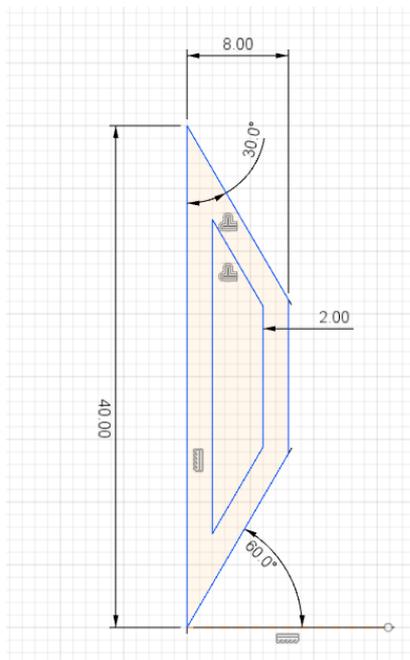


Ilustración 93-Medidas de las hebillas de ajuste. Elaboración propia.

A partir de este cuerpo, que crearemos realizando una extrusión de 5mm sobre el "Sketch" de la hebilla. Creamos diferentes hebillas en la órtesis copiando y pegando el cuerpo original. Debemos tener cuidado a la hora de colocar las hebillas, para evitar posibles molestias al caminar. Por ejemplo, esta órtesis

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

está siendo diseñada para la pierna derecha, por lo tanto, las hebillas superiores deben ser colocadas a la derecha de la órtesis, para evitar que al caminar rocen la otra pierna.



Ilustración 94- Colocación de la hebilla. Elaboración propia.

Una vez colocada la hebilla la uniremos al resto de la órtesis con la herramienta “Combine” con lo que obtendremos un único cuerpo.

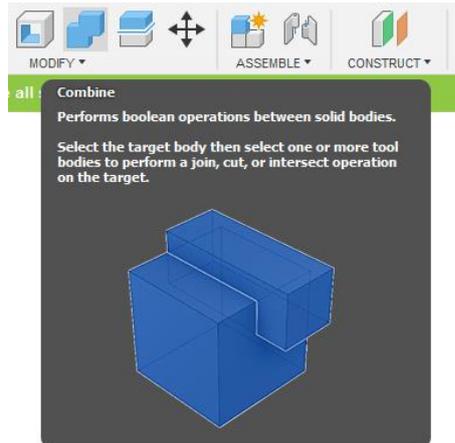


Ilustración 95-Herramienta “Combine”. Elaboración propia.

Además de colocar las hebillas, también crearemos una serie de huecos en la órtesis a la misma altura que las hebillas para amarrar las cintas del velcro. Estos huecos tendrán una forma determinada, siendo realizados en un “Sketch” con la herramienta “Slot”, con lo que obtendremos las siguientes geometrías, con las siguientes medidas.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

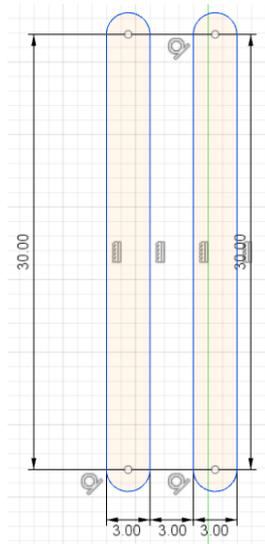


Ilustración 96- Medidas de los huecos para las correas. Elaboración propia.

Este “Sketch” será extruido sobre la órtesis generando el hueco que necesitamos para introducir las cintas.

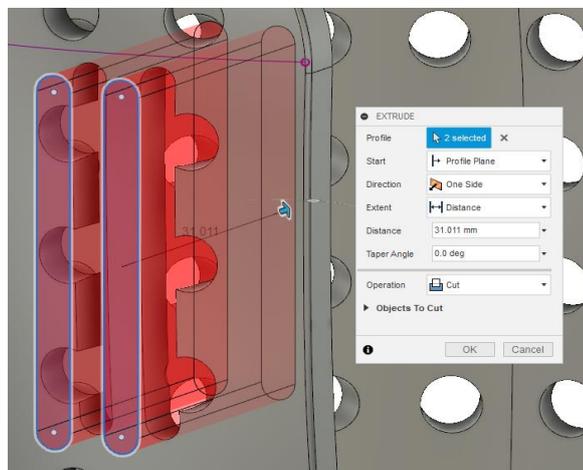


Ilustración 97-Extrusión de corte sobre la órtesis. Elaboración propia.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

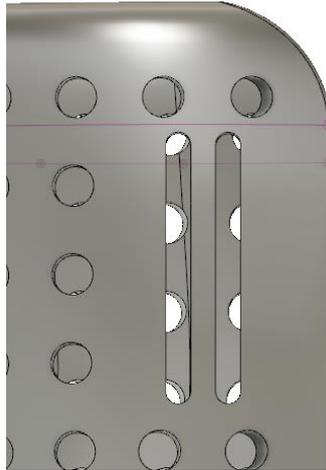


Ilustración 98-Resultado de la extrusión sobre la órtesis. Elaboración propia.

Una vez colocadas todas las hebillas y realizados todos los ajustes sobre la órtesis para que pueda ser utilizado, guardaremos el archivo como un archivo. STL que posteriormente podremos abrir en un programa de “Slicer” o laminador para la posterior impresión en 3D.

#### 4.5 Principales fabricantes de órtesis por F.D.M:

➤ Wide©:

**Wide** es una empresa letona dedicada al diseño de software que permita la fabricación de órtesis personalizadas y a medida mediante la impresión 3D. De esta forma han creado un software de personalización que permite el ajuste individual de prótesis y órtesis. Mediante este software los terapeutas pueden atender a un mayor número de pacientes.



Ilustración 99- Órtesis Wilde. <https://www.instagram.com/p/BsqcT3YHH7A/>

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La personalización de las piezas se realiza de manera automática a partir de los datos obtenidos por el escaneo 3D. Mediante esos datos, el software diseña un modelo de órtesis digital a medida, que posteriormente será fabricado mediante modelado por deposición fundida.

➤ [Younext©:](#)

**Younext Healthcare** es una empresa, filial de la empresa aragonesa Podoactiva, especializada en el diseño y fabricación de productos personalizados a través de las tecnologías de impresión 3D.

Cuentan con algunas de las instalaciones más avanzadas de impresión 3D y fabricación aditiva del mundo, gracias a las cuales fabrican productos personalizados con altas prestaciones y calidad.



*Ilustración 100- Órtesis Younest. <https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ortesis-antiequino/>*

Entre sus productos podemos encontrar órtesis para pie y tobillos para tratar las siguientes lesiones: [25]

- Pacientes afectados de una limitación de la dorsiflexión del pie.
- Hemiplejía por accidentes vasculares-cerebrales (ictus).
- Secuelas de parálisis flácidas.
- Retracción del tendón de Aquiles en parálisis cerebral infantil.
- Lesiones del nervio ciático poplíteo externo.

Entre los clientes y usuarios de los productos de esta empresa destacan equipos de la Liga Profesional de Fútbol © como el Real Madrid o el Real Betis.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

➤ [Fiixit ©](#):

**Fiixit©** es una empresa malagueña dedicada a la fabricación de férulas de inmovilización para las extremidades superiores e inferiores a partir de la tecnología 3D.

Las férulas se adaptan a las extremidades del paciente y se personalizan a su gusto. Para su fabricación se utilizan materiales biocompatibles, transpirables, ligeros y sumergibles.



*Ilustración 101- Órtesis Fiixit- <https://fiixit.es/recuperacion-del-tendon-aquiles/>*

Estas férulas se diseñan en colaboración con traumatólogos, fisioterapeutas y ortopedas, ya que colaboran con algunos clubes de fútbol.

Gracias a su labor han sido reconocidos con el Sello de Excelencia de la Comisión Europea o premios como La Medalla al Mérito Civil entregada en junio de 2019.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

## **5 Fabricación mediante impresión 3D: método de moldeado por deposición fundida o fabricación por filamento fundido.**

Para la fabricación de la órtesis, que hemos desarrollado en apartados anteriores, utilizaremos una impresora 3D que emplea la tecnología de moldeado por deposición fundida (siglas en inglés F.D.M.) o también llamada fabricación por filamento fundido (F.F.F.).

A continuación, expondremos los aspectos más importantes a la hora de fabricar la órtesis por este método:

### **5.1 Funcionamiento de la tecnología F.F.F.:**

El funcionamiento de las impresoras F.D.M. tiene tres componentes clave:

#### **1. Cama de impresión:**

Consiste en una plancha plana sobre la que se imprimen las primeras capas de material. Está fabricada a partir de materiales que soportan altas temperaturas, en nuestro caso la cama será de aluminio. Su temperatura es regulable, en función del material que vayamos a imprimir. Es de vital importancia su limpieza, nivelación y buen estado, ya que es imperativo que las primeras capas se adhieran correctamente a la cama para evitar el desplazamiento de la pieza durante la impresión. Para esta tarea podemos aplicar lacas sobre la cama que contribuyan a la adherencia del material.

#### **2. Bobina de filamento:**

La bobina será el lugar donde almacenemos el material antes de ser extruido. Es necesario aplicar ciertas medidas a la hora de almacenar estas bobinas, ya que los materiales de impresión se pueden ver afectados por los elementos ambientales como pueden ser la humedad o la luz. Además, es importante que el bobinado se realice de forma correcta para evitar nudos que dificulten el desbobinado y afecten a la extrusión del material. Las bobinas de material las podemos encontrar de multitud de materiales compatibles para la extrusión y de multitud de colores.



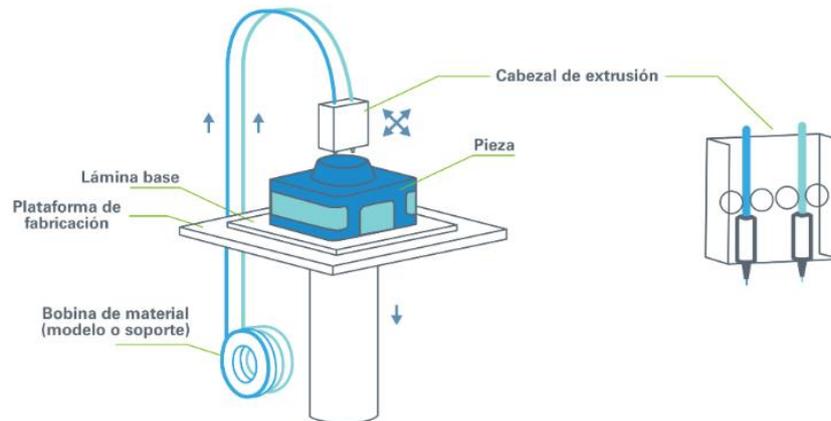
*Ilustración 102- Bobinas de material para imprimir.*

<https://sakata3d.com/es/-packs/89-pack-12-bobinas-pla4032-3mm.html>

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEZIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**3. Cabezal de extrusión:**

Está compuesto por el extrusor y el “hotend”. El cabezal extrusor varía en función del material a extruir. El extrusor cuenta con una rueda dentada que arrastra el material hasta el “hotend”, que se encarga de fundir el material. Tanto la velocidad del extrusor como la temperatura del “hotend” son variables. Ambas cualidades están ligadas entre sí dependiendo una de la otra. Además, las dos dependen del material con el que se esté imprimiendo.

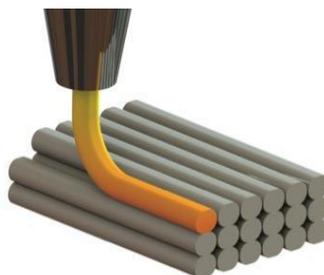


*Ilustración 103- Partes principales de una impresora F.D.M.*

<http://mizaradditive.com/fused-deposition-modeling/>

El procedimiento de fabricación consiste en la deposición de capas planas, de material fundido (en nuestro caso termoplásticos) superpuestas entre sí para lograr un objeto con volumen. [19]

El material se deposita formando las capas cuyo tamaño dependerá de la boquilla o tobera del extrusor, y su altura dependerá de los parámetros programados. Una vez realizada la capa, el extrusor se retraerá y subirá en el eje z la altura suficiente para realizar la nueva capa, encima de la anterior. El proceso continuará de esta forma hasta finalizar la pieza. [17]



*Ilustración 104- Deposición de filamento fundido.*

<https://www.frax3d.com/tipos-principales-de-impresoras-3d>

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Para solidificar de forma efectiva el filamento y evitar que se caiga de la capa, el extrusor, cuenta con un ventilador y un sistema de canalización del aire que desemboca en el filamento. De esta forma el aire se propulsa contra el filamento depositado y fundido disminuyendo su temperatura y provocando su solidificación.

## 5.2 Parámetros variables en la fabricación por filamento fundido:

Para optimizar el proceso de fabricación, y algunas características de la pieza impresa, podemos modificar parámetros desde el programa que usemos para controlar la fabricación.

Para la impresión en 3D por filamento fundido, los programas que se utilizan son los denominados slicer o laminadores. Para la elaboración de las piezas desarrolladas en este trabajo final de grado, se emplearán los programas laminadores CURA© y Simplify 3D©. Estos programas se encargaran de laminar en capas la pieza que hayamos exportado en un archivo .Stl para generar un archivo .Gcode. A partir de este archivo .Gcode, la impresora realizará la fabricación de la pieza siguiendo diferentes parámetros que podremos modificar en el programa de laminado.

Los parámetros más importantes a la hora de imprimir en 3D con filamento fundido son:

### ➤ Dimensiones del material extruido:

Podemos modificar tanto la altura de capa como el ancho de las capas extruidas. Sus valores dependen del tamaño de la tobera del cabezal extrusor. La altura de capa no tiene por qué ser constante en toda la pieza. Según las recomendaciones del programa de laminado CURA©, esta capa se adhiere mejor a la cama de impresión cuanto mayor sea la altura de capa.

La altura de capa condiciona los detalles de impresión. Una altura de capa pequeña nos da mayor resolución en los detalles impresos. El reducir la altura de capa también provoca un aumento en el tiempo de fabricación. Para la fabricación de nuestra órtesis se ha elegido una altura de capa de 0,3 mm, valor con el que conseguimos que no se distorsionen los detalles y que los tiempos de impresión no sean excesivos (entre 14 y 16 horas en función de la cantidad de material extruido).

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Calidad		
Altura de capa	 	0.3 mm
Altura de capa inicial		0.27 mm
Ancho de línea		0.35 mm
Ancho de línea de pared		0.35 mm
Ancho de línea de la pared exterior		0.35 mm
Ancho de línea de pared(es) interna(s)		0.3 mm

Ilustración 105-Dimensiones modificables en el software CURA®.

Elaboración propia.

### ➤ Temperatura de impresión:

Se puede controlar la temperatura del hotend y de la cama de impresión en función del material y de las capas que se esté imprimiendo (inicial, intermedia o final). Es importante dar la temperatura adecuada a cada material y que no se degrade al extrudirlo.

Temperatura de impresión predeterminada	200	°C
Temperatura de impresión	200	°C
Temperatura de impresión de la capa inicial	205	°C
Temperatura de impresión inicial	190	°C
Temperatura de impresión final	185	°C
Modificador de la veloci...amiento de la extrusión	0.7	°C/s
Temperatura predetermi... la placa de impresión 	60	°C
Temperatura de la placa de impresión 	60	°C

Ilustración 106-Temperaturas modificables en el software CURA®.

Elaboración propia.

### ➤ Flujo de material:

Lo normal es que sea inferior al 100%, aunque en elastómeros es ligeramente superior. Nos indica la cantidad de material que ceba el motor de extrusión en relación con el material extruido. [17]

### ➤ Retracción:

Evita que el material quede colgando del extrusor cuando este esté imprimiendo. Actúa retrayendo el material cada vez que cambia de capa o se mueva en vacío. Es importante controlarlo para las zonas visibles, o para nuestro caso, las zonas que queden en contacto con la piel, ya que una mala

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

retracción puede generar una superficie rugosa que roce la piel o distorsione los detalles.

➤ **Velocidad de impresión:**

Velocidad con la que se mueve el cabezal extrusor en el plano X/Y. Esta velocidad la podemos modificar en función de las partes de la pieza que estemos imprimiendo. Para la fabricación de piezas esbeltas como la nuestra es importante tener la velocidad controlada a un nivel bajo, ya que a altas velocidades el extrusor, al moverse, puede generar oscilaciones en la pieza que impida una buena deposición de una capa sobre la otra. Para este trabajo se ha trabajado con velocidades de 60 mm/s.

Velocidad		
Velocidad de impresión	50	mm/s
Velocidad de relleno	60	mm/s
Velocidad de pared	26	mm/s
Velocidad de pared exterior	18	mm/s
Velocidad de pared interior	26	mm/s
Velocidad superior/inferior	26	mm/s
Velocidad de desplazamiento	250	mm/s
Velocidad de capa inicial	20	mm/s
Velocidad de impresión de la capa inicial	20	mm/s
Velocidad de desplazamiento de la capa inicial	75.0	mm/s
Velocidad de falda/borde	20	mm/s
Velocidad máxima de Z	0	mm/s

*Ilustración 107- Opciones de velocidad en el software CURA®.*

*Elaboración propia.*

➤ **Soporte:**

Para aumentar la estabilidad en la pieza o soportar las partes de la pieza que queden en voladizo, utilizaremos soportes generados por el programa de laminado. El soporte actuará como un andamio construido al mismo tiempo que la pieza capa a capa. Al finalizar la impresión este soporte se retirará de la pieza.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 108- Órtesis impresa con soportes.*

*Elaboración propia.*

El soporte nos dará estabilidad al imprimir la zona superior esbelta de nuestra pieza y nos permitirá imprimir de forma correcta la zona inferior con la forma de la planta del pie.

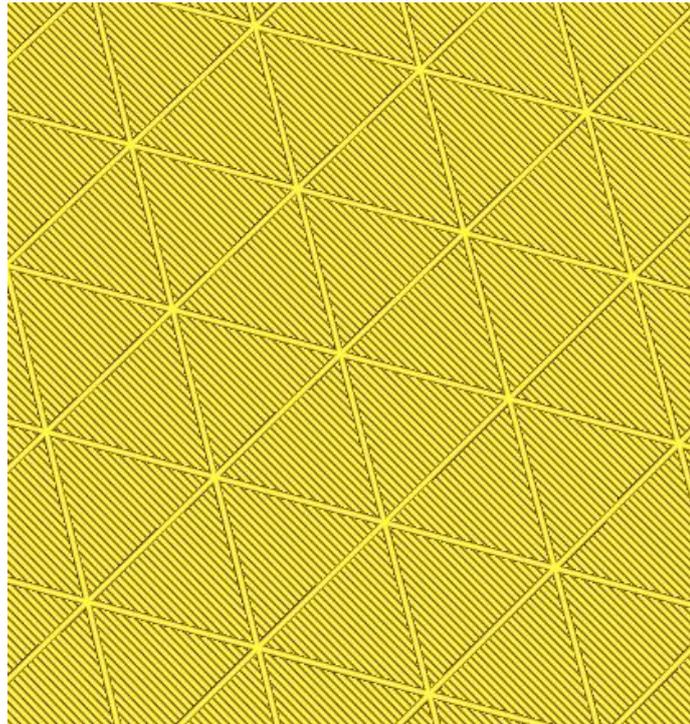
Para la construcción de los soportes tenemos la opción de realizarlos en el mismo material que la pieza que se está construyendo o utilizar P.V.A., material soluble en agua que nos mejorará la deposición de las capas, ya que podremos darle una mayor densidad al soporte, al retirarse fácilmente.

➤ **Relleno y perímetro:**

Uno de los objetivos que buscamos para nuestra órtesis es que sea ligera y resistente. Para aumentar estas cualidades en la órtesis trabajaremos con el programa de laminado modificando la densidad del relleno y las líneas de pared.

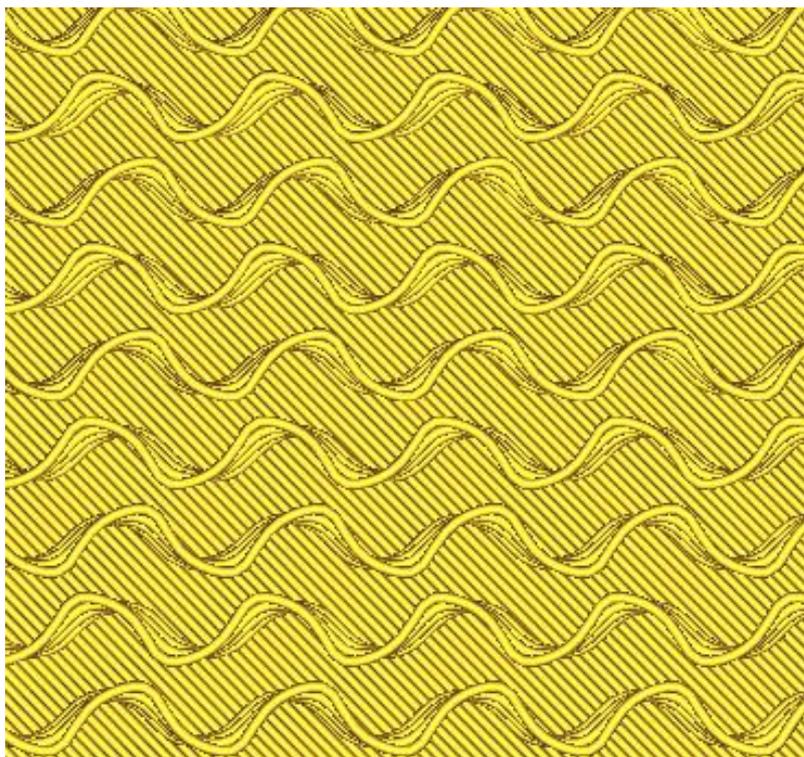
La densidad de relleno nos permite hacer una pieza semi-hueca variando su valor entre el 100% (pieza maciza) y el 0% (pieza hueca por completo). Para valores de la densidad de relleno intermedios la pieza se llena con un patrón determinado, que podremos seleccionar en el programa de laminado. Para el desarrollo de nuestra pieza hemos utilizado los patrones triangular y giroide, ya que nos proporcionaban una mayor estabilidad y mejores acabados al imprimir, y una densidad de relleno del 15%.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 109- Patrón triangular.*

*Elaboración propia.*

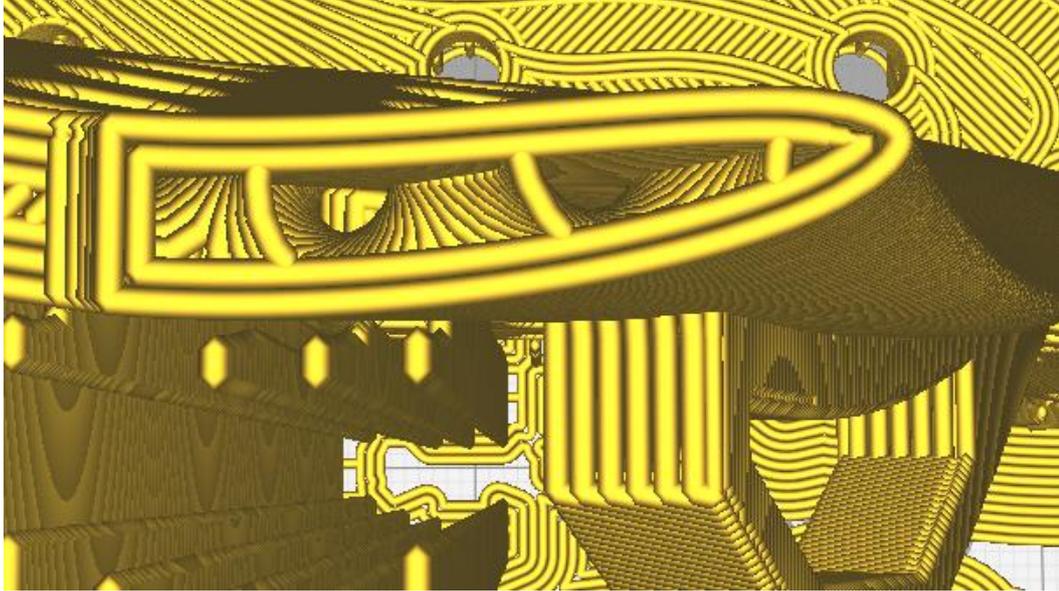


*Ilustración 110-Patrón giroide.*

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

*Elaboración propia.*

El número de líneas de pared nos dará la posibilidad de modificar el número de líneas que se colocan en el contorno de cada capa. Con esta opción, también podemos hacer la pieza maciza si ponemos un número suficiente de líneas. Para la fabricación de la órtesis hemos colocado dos líneas de pared.



*Ilustración 111- Líneas de pared.*

*Elaboración propia.*

### 5.3 Impresora utilizada

La impresora 3D con la que vamos a fabricar nuestra órtesis es el modelo 4070 Industrial de la marca Wasp©.

***Características de la impresora:***

En el Anexo 2 se adjuntan las diferencias características y propiedades de la impresora 4070 Industrial de la marca Wasp©.

Como características principales podemos destacar que es una impresora tipo delta, que se mueve el cabezal en los ejes X, Y, Z mientras que la cama de impresión permanece fija.

La impresora tiene una placa tipo elíptica, cuyas medidas de los ejes son 400 mm por 400 mm, y es capaz de imprimir piezas de hasta 700 mm de alto.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 112- Impresora 4070 Industrial.*

<https://www.personalfab.it/en/shop/industrial-3d-printer-deltawasp-40-70-industrial/>

## **5.4 Material utilizado**

Para realizar impresiones 3D por modelado por deposición fundida tenemos una amplia variedad de materiales con una amplia gama de propiedades y colores disponibles. Para el desarrollo de este proyecto se han empleado P.L.A. y P.E.T.G. que describiremos a continuación.

### **5.4.1 P.L.A. (ácido poliláctico):**

El **ácido poliláctico** es un biopolímero termoplástico proveniente del ácido láctico, obtenido a partir de recursos naturales renovables como son el almidón de maíz o de la caña de azúcar.

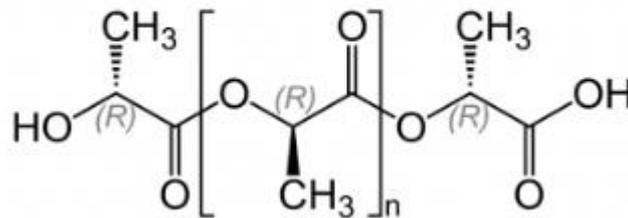
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA

Es un material fácil de imprimir y que aporta buenas características mecánicas.

El origen de sus componentes obtenidos de materiales orgánicos hace que el P.L.A. sea mal considerado biodegradable, ya que el proceso de degradación de este plástico dura en torno a 80 años, tiempo relativamente corto para la degradación de un plástico, pero suficiente para la vida útil de nuestras órtesis.

Las características de degradación, de reciclado y biocompatibilidad del ácido poliláctico hace que sea uno de los plásticos idóneos para la fabricación, teniendo en cuenta la situación medioambiental en la que nos encontramos. [22]

## Acido Poliláctico



*Ilustración 113- Molécula Acido Poliláctico.*

<https://bitfab.io/es/blog/pla-vs-abs/>

### 5.4.2 P.E.T.G. (treftalano polietileno glicol): [1]

El **P.E.T.G.** es un poliéster termoplástico que no cristaliza al calentarse. Gracias a esta cualidad presenta una gran dureza y flexibilidad lo que lo hace idóneo para la fabricación de elementos resistentes. Además, cuenta con una gran resistencia química y no reacciona al contacto con la piel, lo que es de especial interés a la hora de fabricar productos ortopédicos.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA



*Ilustración 114- Órtesis para pie y tobillo fabricada en P.E.T.G.*

*Elaboración propia.*

Las características mecánicas de este tipo de termoplásticos son muy similares a las características del A.B.S., sin embargo el P.E.T.G. tiene unas características de impresión similares al P.L.A. lo que le hace que sea fácil de imprimir. Las características mecánicas de este poliéster les dan a las piezas fabricadas con él una alta resistencia a tracción, a flexión y al impacto.

### **5.5 Resultados obtenidos de la fabricación por filamento fundido:**

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos al fabricar la órtesis de pie y tobillo cuyo diseño ha sido expuesto en apartados anteriores.

La ortesis ha sido impresa de forma vertical, con la zona en la que se colocará el pie colocada sobre la cama de impresión. Se imprimirá en P.L.A. de color rojo, suministrado en una bobina de 1kg y en P.E.T.G. de color amarillo, suministrado en bobinas de 750g.

Para dar estabilidad a la pieza durante la impresión y para que la zona inferior no quedara en voladizo, se han añadido soportes del mismo material con el que se ha impreso la órtesis dando un patrón de líneas al soporte y una

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

densidad del 20% para mejorar el acabado de la pieza en la zona inferior, pero a la vez poder eliminar el soporte de forma sencilla.



*Ilustración 115- Órtesis colocada en la pierna para la que ha sido diseñada.*

*Elaboración propia.*

En cuanto a la precisión de las medidas tomadas con el escáner y posterior tratamiento de los datos, obtenemos un resultado correcto, ya que la órtesis se adapta perfectamente a la pierna y al pie. En cuanto la calidad superficial, hemos tenido algunos resultados no deseados debido a la retracción del material. Este problema ha sido de fácil solución en el pos tratamiento, donde los defectos superficiales se han quitado de forma rápida y sencilla con unos alicates y una lija.

## **6 Conclusiones**

La tecnología de escaneo y de impresión 3D permite realizar un amplio abanico de diseños y utilización de materiales para una misma aplicación. Durante la elaboración de este Trabajo Final de Grado se ha colaborado en distintos proyectos, como han sido el diseño de una férula para la mano o la construcción de un brazo protésico, en los que el escaneo 3D y la impresión 3D han reducido los tiempos de toma de datos, fabricación y costes.

En cuanto a la utilización de la tecnología de escaneo 3D por luz estructurada, hemos podido comprobar cómo los resultados obtenidos son satisfactorios. Gracias a esta tecnología podemos obtener un modelo digital del objeto real escaneado con un error mínimo y una apariencia idéntica al objeto real. Además de la exactitud en los datos tomados, mejoramos los tiempos de adquisición de medidas, ya que el escaneo se realiza en unos minutos; mientras que las técnicas utilizadas actualmente por las ortopedias precisan de más tiempo y utilizan productos que pueden llegar a irritar la piel.

En la parte de diseño de la órtesis debemos destacar la idoneidad del programa **Fusion 360©** para trabajar con los datos obtenidos en forma de malla y permitimos crear cuerpos que se adaptan perfectamente a su superficie exterior. En este aspecto, también logramos mayor precisión que en el sistema convencional (cuyo diseño es manual y puede llevar varios días), puesto que en este proyecto, con el programa Fusion 360© y los modelos digitales, podemos obtener el C.A.D. de una órtesis en unas horas y controlar las dimensiones con precisión.

Por último, hemos realizado la órtesis mediante el procedimiento de fabricación por filamento fundido. Gracias a la versatilidad de este procedimiento hemos podido obtener 3 órtesis con formas, materiales y colores diferentes.

En este apartado, de nuevo superamos a la fabricación de órtesis convencional, ya que reducimos los tiempos de fabricación de días a un total de entre 14 y 16 horas. Además, con este sistema de fabricación podemos obtener piezas más cómodas para los pacientes, al fabricarlas con el archivo C.A.D. diseñado anteriormente con las medidas precisas de la pierna. Igualmente es indicado su uso por la ligereza de las piezas, al no ser macizas y estar compuestas por materiales ligeros y compatibles con el contacto con la piel humana.

Por estas razones, podemos concluir que hemos cumplido con los objetivos de este trabajo final de grado.

## **7 Líneas futuras:**

A continuación, se proponen algunas ideas que se pueden desarrollar a partir de este trabajo final de grado:

- **Acortar tiempos de diseño:** La idea es realizar el diseño de la órtesis de forma automática. A partir de los datos obtenidos por el escáner un Software realice las mismas operaciones que nosotros hemos realizado en Fusion 360© y nos proporcione un archivo. Stl que podamos imprimir.
- **Utilización de diferentes materiales:** Uso de materiales distintos para realizar las férulas y obtener más propiedades.
- **Articular la zona del tobillo:** los pacientes con pie equino no precisan de una inmovilización completa. La articulación del tobillo con rotulas impresas en 3D realizadas en materiales elásticos como puede ser el T.P.U. pueden mejorar la calidad de vida de las personas que sufren esta lesión.
- **Optimización del proceso de impresión:** sería interesante estudiar diferentes tipos de impresión que nos den propiedades mecánicas distintas, aligeren la pieza o reduzcan el tiempo de impresión y la cantidad de material utilizado.
- **Colocación de una espuma en el interior:** para aumentar la sujeción de la pieza a la pierna y mejorar el confort de la órtesis se podría imprimir una estructura que se adapte a la pierna por un lado y a la órtesis por el otro, de un material elástico, mejorando sus prestaciones.

## Bibliografía:

- [1]. Adrián Ortega Lázaro- TFG – Desarrollo de férula para impresión en 3D: Fase de digitalización y diseño C.A.D.- Universidad de Valladolid.
- [2]. Fabio Romeral Pérez – TFG – Flujo de trabajo en proyectos de modelización 3D con equipo láser escáner – Universidad Politécnica de Madrid.
- [3]. Fernando Manteca Fernández – TFG – Generación de modelos 3D mediante luz estructurada – Universidad de Cantabria.
- [4]. Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging
- [5]. Manual de Órtesis – Hospital del Trabajador ACHS– Terapia Ocupacional (Departamento de Rehabilitación).
- [6]. <https://www.cadcrowd.com/architectural-design/point-cloud-modeling-services>- Encuentre servicios de modelado de nube de puntos independientes bajo demanda- Consultado 23/09/2019.
- [7]. Carlos Morón Alguacil – TFG – Metodología de trabajo conjunto de escaneado e impresión 3D – Universidad Politécnica de Madrid.
- [8]. <https://www.renishaw.es/es/sistema-sprint-con-supascan--42579>- ¿Qué es y para qué sirve un escáner 3D?- Consultado 25/09/2019
- [9]. <https://www.digitalizacion-3d.com/generar-modelos-3d-por-fotogrametria/> - Generar modelos 3D por fotogrametría- consultado 20/09/2019.
- [10]. Jorge Adán Romero Guerrero / José Luis Cuellar Vázquez – Estudio comparativo entre las tecnologías de escaneo láser terrestre.
- [11]. <https://es.wikipedia.org/wiki/Estereoscopio> - Estereoscopio - Consultado 25-09-2019.
- [12]. Miguel Ángel Morillo Romero – TFG - Digitalización 3D con escáner de luz estructurada aplicada al área de la gestión de calidad y la conservación del patrimonio histórico artístico – Universidad de Sevilla.
- [13]. <https://www.artec3d.com/es/cases> - Principales aplicaciones escáner 3D – Consultado 25/09/2019
- [14]. <https://www.einscan.com/einscan-applications/> - Aplicaciones escáner 3D de luz estructurada – Consultado 25/09/2019.
- [15]. <https://www.3dnatives.com/es/3D-compare/scanner/einscan-> Escáner 3D Einscan-Pro©- Consultado 26/09/2019.
- [16]. <https://www.scheckandsiress.com/wp-content/uploads/2016/08/AFO-Plastic-espanol-JM.pdf> - AFO (órtesis pie y tobillo)- Plástico – Consultado 8/08/2018.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTEISIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

- [17]. Eduardo Valverde Lorenzo – TFG - Análisis de la influencia de la temperatura de la cámara en piezas fabricadas por impresión 3D por la tecnología FFF – Universidad de Valladolid.
- [18]. <https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o> – Aspectos de Diseño- Consultado 2/09/2019.
- [19]. <https://itfabricacion.com/las-tecnologias-de-impresion-3d/> - Las tecnologías de la impresión 3D- Consultado 30/09/2019.
- [20]. <https://www.impresion3daily.es/anatomia-del-extrusor-y-hotend-de-una-fdm/> - Anatomía del extrusor y del hotend de una FDM- Consultado el 30/09/2019.
- [21]. Enrique Pérez Mendoza – TFG – Uso de impresión 3D bicomponente para la fabricación de una empuñadura a medida – Universidad de Valladolid.
- [22]. <https://bitfab.io/es/blog/pla-vs-abs/>- ¿Es tan” ecológico” el filamento de PLA?- Consultado 1/10/2019.
- [23]. <https://www.digitalizacion-3d.com/> ¿Qué es y para qué sirve un escáner 3D? -Consultado 20/9/2019.
- [24]. <https://fiixit.es/precios-ferulas/> Férulas impresas en 3D- Consultado 8/082019.
- [25]. <https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ortesis-antiequino/> Prótesis anti equina. Consultada el 23/09/2019.

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**Anexos:****Anexo 1: especificaciones del escáner:**

<b>Especificaciones técnicas y propiedades del escáner Einscan-Pro</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Einscan-Pro</b>			
<b>Modos de escaneado</b>	Escáner de mano HD	Exploración rápida de mano	Escaneo automático	Escáner fijo
<b>Exactitud del disparo único</b>	0.1mm	0.3mm	0.05mm	0.05mm
<b>Velocidad de escaneado</b>	90.000 puntos/s	500.000 puntos/s	Escaneo único < 2s	Escaneo único < 2s
<b>Distancia del punto</b>	0.5-3 mm	0.7-3 mm	0.16 mm	0.16 mm
<b>Tamaño recomendado para el objeto</b>	30-4000 mm	150-4000 mm	30-150 mm	30 - 4000 mm
<b>Modo Alinear</b>	Marcadores	Características, marcadores	Marcadores, Característica, Plato giratorio, Manual, Objetivos codificados	Marcadores, característica, alineación manual
<b>Escaneo de texturas</b>	No	Si con Color Pack	Si con Color Pack	Si con Color Pack
<b>Operación al aire libre</b>	No (Evite la luz solar directa)			
<b>Objeto de escaneo especial</b>	Para un objeto transparente, reflejante u oscuro, rocíe con polvo antes de escanear			
<b>Rango de escaneo único</b>	210 x 150 mm			

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

<b>Fuente de luz</b>	LED de luz blanca
<b>Salida de datos imprimibles</b>	Si
<b>Formatos de archivo</b>	OBJ, STL, ASC, PLY
<b>Capacidad de carga mesa giratoria</b>	5kg
<b>Peso cabeza de escaneo</b>	0.8 kg
<b>Soporte del sistema OS</b>	Windows 7, 8 o 10, 64 bits
<b>Tarjeta grafica</b>	Tarjeta de pantalla: NVIDIA GTX660 o superior - Memoria de pantalla:> 2 GB, Procesador: 15 o superior, Almacenamiento de memoria: 8 GB o más

**Anexo 2: características de la impresora Wasp® 4070 Industrial.**

Especificaciones técnicas	
Volumen de construcción	Ø 400 mm x 700 mm
Cámara de impresión	Cerrada y aislada
Altura mínima de capa	100 micras
Velocidad de desplazamiento máxima	200 mm/s
Extrusor utilizado	Extrusora WASP SPITFIRE RED
Diámetro boquilla	0.7 mm
Diámetro filamento utilizado	1.75 mm
Materiales imprimibles	PLA, ABS, TPU, PETG, PVA.
Interface	Tarjeta SD, pantalla lcd
Dimensiones físicas	85cm x 77 cm x 195 cm
Peso maquina	90 kg
Potencia absorbida extrusor	60 W max
Potencia absorbida cama caliente	1300 W max
Potencia absorbida calentador cámara de impresión	1500 W max
Requisitos electricos entrada	220/240 V - 50/60 Hz
Temperatura de trabajo	20- 30 °C

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**Anexo 3: Propiedades de los materiales de impresión:**

PLA de Smartfil ©		
	Valor típico	Método de ensayo
Especificaciones del filamento		
Diámetro	1.75 ±0.03 mm	
Peso filamento	1000 g	
Propiedades mecánicas		
Resistencia a rotura (Izod)	5.1 KJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
Resistencia a tracción	45.6 MPa	ISO 527
Resistencia térmica	60 °C	ISO 306
Densidad	1.27 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Resistencia a flexión	103.0 MPa	ISO 178

PLA de Smartfil ©		
	Valor típico	Método de ensayo
Especificaciones del filamento		
diámetro	1.75 ±0.3 mm	
Peso filamento	750 g	
Propiedades mecánicas		
Resistencia a rotura (Izod)	32 KJ/m <sup>2</sup>	ASTM (D256)
Resistencia a tracción	47.1 MPa	ISO 527
Resistencia térmica	85 °C	ISO 306
Densidad	1.27g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Resistencia a flexión	73.1 MPa	ISO 178

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR  
DEPOSICIÓN FUNDIDA**Anexo 4: Especificaciones pie de rey Mitutoyo®**

DATOS DEL PRODUCTO	
Tipo de calibre	Digital
Tipo de display	Digital
Rango de medida	0 - 150 mm
Resolución	0.01 mm
Error instrumental	±0.02 mm
Temperatura de almacenamiento	-10/60 °C
Rango de temperaturas	0 / 40°C
Batería	SR44
Protección	IP66

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS PARA PIE Y TOBILLO MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

**Anexo 5: Posición marcadores pie escaneado.**

A continuación, se mostraran las posiciones de los marcadores colocados para realizar las mediciones de precisión del escáner:

