



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Desarrollo de férulas para impresión 3D:  
Fase de digitalización y diseño CAD**

**Autor:**

**Ortega Lázaro, Adrián**

**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

**Cotutor: Manso Burgos, José Gabriel**

**Valladolid, junio 2019.**



## RESUMEN:

Actualmente la tecnología 3D se emplea para multitud de aplicaciones. Este proyecto se centra en el desarrollo y prototipado de una férula de inmovilización para una mano haciendo uso de un escáner 3D, procesando el archivo obtenido y su posterior impresión con material biocompatible.

En primer lugar, se tratará la descripción sobre la digitalización 3D así como la verificación de los datos obtenidos. A su vez, se realizará el caso práctico, donde se modificará el archivo que nos proporciona el escáner mediante un software CAD para la obtención de un modelo final. Y por último, se analizarán los resultados obtenidos imprimiendo el molde en PETG, que es el copolímero más utilizado en este tipo de aplicaciones, evaluando los resultados y la precisión dimensional esperada.

## PALABRAS CLAVE:

-  Escáner 3D
-  Luz estructurada
-  Férula
-  CAD
-  PETG



## ÍNDICE DE CONTENIDOS:

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DIGITALIZACIÓN MEDIANTE ESCÁNER 3D:</b> .....	<b>3</b>
2.1	Descripción general:.....	3
2.2	Esquema de funcionamiento:.....	4
2.3	Tipos de escáner 3D: .....	5
2.3.1	Escáner de contacto: .....	5
2.3.2	Escáner sin contacto:.....	6
2.4	Principales aplicaciones escáner 3D:.....	18
2.5	Escáner 3D utilizado: .....	21
2.5.1	Características del escáner:.....	21
2.5.2	Modos del escáner:.....	22
2.6	Verificación de los datos obtenidos con el escáner:.....	23
2.6.1	Factores que afectan al análisis: .....	23
2.6.2	Calibración del escáner: .....	26
2.6.3	Precisión dimensional:.....	28
2.6.4	Gom Inspect: .....	33
<b>3</b>	<b>DISEÑO CAD PARA FÉRULA DE MIEMBRO SUPERIOR:</b> .....	<b>41</b>
3.1	Introducción: .....	41
3.2	Especificaciones férulas: .....	41
3.2.1	Aspectos importantes: .....	41
3.2.2	Materiales con los que trabajar: .....	42
3.2.3	Principales lesiones: .....	42
3.2.4	Objetivos de una férula impresa en 3D:.....	43
3.3	Aspectos importantes durante el diseño para impresión 3D:.....	44
3.3.1	Grosor mínimo de pared:.....	44
3.3.2	Calidad superficial y orientación:.....	44
3.3.3	Soportes:.....	44
3.3.4	Mínimo ángulo de impresión:.....	45
3.3.5	Encastres: .....	46
3.3.6	Espacio correcto entre partes móviles: .....	46

3.3.7	Letras, grabados y detalles: .....	46
3.4	Descripción del modelo de trabajo: .....	47
3.5	Realización del escaneo 3D: .....	48
3.5.1	Digitalización automática: .....	49
3.5.2	Digitalización manual:.....	51
3.5.3	Tratamiento de datos:.....	52
3.6	Análisis y corrección de la malla: .....	54
3.7	Tratamiento con Fusion 360: .....	56
3.7.1	Importación del mallado:.....	56
3.7.2	Análisis y tratamiento de mallas: .....	57
3.7.3	Generación de contornos: .....	59
3.7.4	Generación de superficies:.....	62
3.7.5	Mallado de la superficie: .....	63
3.7.6	Unión del mallado: .....	64
3.7.7	Espesor de la malla:.....	66
3.7.8	Conversión de la malla en sólido: .....	67
3.7.9	Elección de cierres:.....	68
3.8	Principales fabricantes de férulas mediante impresión 3D:.....	73
<b>4</b>	<b>FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D:.....</b>	<b>77</b>
4.1	Funcionamiento de la fabricación por filamento fundido (FFF): .....	77
4.2	Impresora 3D utilizada:.....	79
4.2.1	Características de la impresora: .....	79
4.3	Material usado:.....	80
4.3.1	PETG:.....	80
4.3.2	PVA (Alcohol Polivinílico):.....	81
4.4	Resultados obtenidos de la impresión 3D: .....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES: .....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS: .....</b>	<b>87</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA: .....</b>	<b>89</b>

<b>ANEXOS:</b> .....	<b>91</b>
Anexo 1: Características EinScan-Pro .....	91
Anexo 2: Características Ultimaker 3 Extended: .....	93
Anexo 3: Características y propiedades de los materiales empleados: .....	95
Anexo 4: Especificaciones pie de rey Mitutoyo ©: .....	96
Anexo 5: Medidas tomadas en la mano: .....	97



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1 – Fases del escaneado.....	3
Ilustración 2 – Esquema de funcionamiento escáner 3D .....	4
Ilustración 3 - Palpador 3D con activación por contacto .....	5
Ilustración 4 – Tiempo de vuelo para un impulso láser .....	6
Ilustración 5 - Funcionamiento de un escáner 3D por triangulación .....	8
Ilustración 6 - Principio de un escáner láser basado en diferencia de fase.....	9
Ilustración 7 - Funcionamiento de la holografía conoscópica .....	10
Ilustración 8 – Luz estructurada .....	11
Ilustración 9 - Deformación que se produce cuando la franja de luz proyectada impacta sobre una superficie en 3D .....	12
Ilustración 10 – Análisis de patrones mediante luz estructurada (libro).....	13
Ilustración 11 – Patrón de proyección de 5 bits codificado en binario para imágenes en 3D .....	14
Ilustración 12 – Patrón de codificación de nivel gris .....	14
Ilustración 13 - Cambio de fase con tres patrones de proyección y un ejemplo de una imagen marginal.....	15
Ilustración 14 - Profundidad Z según el valor de la fase.....	16
Ilustración 15 - Combinando código gris con cambio de fase.....	17
Ilustración 16 - Ingeniería inversa .....	19
Ilustración 17 - Escáner 3D de un dinosaurio en el Museo de Naturaleza y Ciencia de Denver .....	20
Ilustración 18 - Escáner EinScan – Pro .....	21
Ilustración 19 - Escaneo manual .....	22
Ilustración 20 - Escaneo automático .....	22
Ilustración 21 - Escaneo fijo .....	22
Ilustración 22 - Espray para digitalizar en 3D.....	25
Ilustración 23 - Plancha de calibración .....	26
Ilustración 24 – Calibración escáner 3D.....	27
Ilustración 25 - Pie de rey Mitutoyo .....	28
Ilustración 26 - Mano con las referencias de medida .....	29
Ilustración 27 - Medida con pie de rey .....	29
Ilustración 28 - Mano sujeto en 3D .....	30
Ilustración 29 - Medida con Fusion 360 .....	31
Ilustración 30 - Logo Gom Inspect .....	33
Ilustración 31 - Interfaz de inicio Gom Inspect .....	34
Ilustración 32 - Importación archivo en Gom Inspect .....	34
Ilustración 33 - Modelo de referencia importado .....	35
Ilustración 34 - Cuerpo CAD y malla en Gom Inspect.....	35
Ilustración 35 - Alineación de los diferentes cuerpos .....	36
Ilustración 36 - Barra de herramientas Gom Inspect.....	37

Ilustración 37 - Comparación de los modelos.....	37
Ilustración 38 - Cuerpo CAD vs Malla 1.....	38
Ilustración 39 - Cuerpo CAD vs Malla 2.....	39
Ilustración 40 - Cuerpo CAD vs Malla 3.....	39
Ilustración 41 - Férula de uso cotidiano.....	43
Ilustración 42 - Material impreso sin soporte.....	45
Ilustración 43 - Regla de los 45°.....	45
Ilustración 44 - Encastre.....	46
Ilustración 45 - Medidas para relieves y grabados.....	46
Ilustración 46 - Logo Fusion 360.....	47
Ilustración 47 - Contraste bajo vs contraste alto.....	48
Ilustración 48 - Digitalización automática.....	49
Ilustración 49 - Alineación con EinScan – Pro.....	50
Ilustración 50 - Digitalización 3D de la mano.....	51
Ilustración 51 - Herramientas software EinScan – Pro.....	52
Ilustración 52 - Selección de la zona de interés.....	52
Ilustración 53 - Generación de la nube de puntos.....	53
Ilustración 54 - Suavizar y afilar el archivo.....	53
Ilustración 55 - Archivo .STL exportado del software del escáner 3D.....	54
Ilustración 56 - Interfaz Meshmixer.....	54
Ilustración 57 - Resultado de aplicar ShrinkSmooth.....	55
Ilustración 58 - Refinamiento con Meshmixer.....	55
Ilustración 59 - Mesh Workspace.....	56
Ilustración 60 - Archivo importado en Fusion 360.....	57
Ilustración 61 - Densidad del mallado.....	58
Ilustración 62 - Plano de corte de la malla.....	58
Ilustración 63 - Zona de interés de la mano.....	59
Ilustración 64 - Create Mesh Section Sketch.....	59
Ilustración 65- Contorno sobre la mano.....	60
Ilustración 66 - Contornos de la mano.....	60
Ilustración 67 - Fit Curves to Mesh Section.....	61
Ilustración 68 - Secciones de la mano (azul).....	61
Ilustración 69 - Generación de superficie mediante varias secciones.....	62
Ilustración 70 - Superficies principales.....	62
Ilustración 71 - Converts BRep faces to a T-Spline face.....	63
Ilustración 72 - Divisiones en el ancho de la superficie.....	63
Ilustración 73 - Mallado de las superficies.....	64
Ilustración 74 - Merge Edge.....	64
Ilustración 75 - Unión del mallado.....	65
Ilustración 76 - Modelo cerrado del mallado.....	65
Ilustración 77 - Molde mallado.....	66
Ilustración 78 - Superposición de T-Splines.....	67
Ilustración 79 - Modelo sólido.....	68

Ilustración 80 - Cierre circular .....	69
Ilustración 81 - Férula con plano de corte .....	69
Ilustración 82 - Combinación férula - cierre.....	70
Ilustración 83 - Férula con cierres circulares.....	70
Ilustración 84 - Plano tangente a la superficie .....	71
Ilustración 85 - Proyección sobre superficie .....	71
Ilustración 86 - Extrusión de la proyección .....	72
Ilustración 87 - Férula con formas aleatorias .....	72
Ilustración 88 - Férula Fiixit .....	73
Ilustración 89 - Férula Xkelet .....	74
Ilustración 90 - Férula Exovite.....	75
Ilustración 91 - Férula para animales.....	75
Ilustración 92 - Férula younext.....	76
Ilustración 93 - Modelado por desposición fundida .....	77
Ilustración 94 - Partes principales de una impresora 3D por FDM .....	78
Ilustración 95 -Churros ovalados para mejorar la adhesión y concentración de tensiones en las capas contiguas.....	79
Ilustración 96 – Impresora 3D Ultimaker 3 Extended.....	80
Ilustración 97 – Parte inferior de la férula con PETG.....	81
Ilustración 98 -Pieza de PLA (ácido poliláctico) con soporte de PVA.....	81
Ilustración 99 - Férulas impresas en 3D .....	82
Ilustración 100 - Férula final .....	83



## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1 – Mediciones de la mano.....	30
Tabla 2 - Medidas con Fusion 360 .....	31
Tabla 3 - Resultados de los errores .....	32
Tabla 4 - Resultados con Gom Inspect.....	40

## ÍNDICE DE ECUACIONES:

Ecuación 1.....	7
Ecuación 2.....	7
Ecuación 3.....	7
Ecuación 4.....	9
Ecuación 5.....	9
Ecuación 6.....	15
Ecuación 7.....	15
Ecuación 8.....	15
Ecuación 9.....	16
Ecuación 10.....	16
Ecuación 11.....	32



## 1 Introducción y objetivos:

---

Hoy en día la impresión 3D está en constante crecimiento, pues se trata de una tecnología relativamente moderna que, junto a los novedosos escáneres 3D, permite obtener geometrías complejas de manera sencilla.

Un ejemplo de ello son las férulas elaboradas mediante impresión 3D, que se adaptan a cada usuario dependiendo de sus necesidades. Esto también es aplicable a distintos productos de apoyo que sirven para facilitar la vida a personas con discapacidad o mayores.

Pocas empresas ofrecen estos servicios, sin embargo, cada vez son más las que trabajan de esta forma, ofreciendo productos a un precio muy competitivo y con resultados adecuados.

Si centramos el uso de la impresión 3D en el ámbito de la salud y el bienestar, se puede obtener férulas y prótesis con la misma función, capacidad y resistencia que las propias escayolas de yeso y férulas tradicionales. Además, es importante destacar que también ofrecen una mejora en la fase de recuperación. Fundamentalmente se aplican para fracturas convencionales, roturas de tendones, tendinitis e inmovilizaciones para prevenir posibles dolencias.

Una de las propiedades más llamativas de este avance tecnológico se centra en las soluciones que ofrece, dado que permite crear modelos adaptados y hechos a medida para los usuarios. Estos modelos presentan ciertas ventajas dado que son transpirables, lavables, ligeros...

Este proyecto forma parte de un grupo de trabajo donde se están desarrollando todos los aspectos necesarios para la fabricación de este tipo de férulas. En mi caso, me he centrado en la parte de digitalización 3D y diseño CAD, obteniendo diferentes prototipos sin tener en cuenta aquello relacionado con la caracterización del material utilizado, ensayos y demás estudios.

El objetivo fundamental es lograr el diseño de un modelo CAD que represente una férula para un usuario, logrando la inmovilización de la zona afectada. Dentro de este propósito principal, existen otros de un interés un tanto menor como:

- Verificación de la precisión dimensional que proporciona el escáner 3D.
- Postproceso y tratamiento de los archivos exportados directamente del escáner para su edición CAD.

- Obtención de una férula que cumpla con las especificaciones establecidas.
- Viabilidad a la hora de realizar una férula mediante una impresora con tecnología FDM ©.

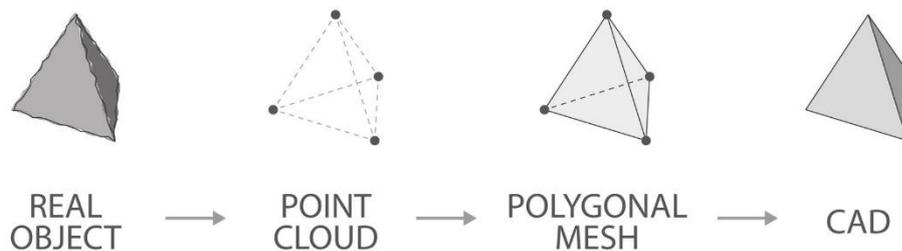
## 2 Digitalización mediante escáner 3D:

---

### 2.1 Descripción general:

Un escáner 3D es un instrumento que permite digitalizar objetos de diferentes tamaños capturando su geometría y a veces su textura, generando un modelo 3D. Este archivo 3D se puede editar mediante software CAD especializados, para obtener una geometría determinada.

El proceso comienza con la obtención de la geometría del objeto con una densa nube de puntos. Los puntos se sitúan en el espacio, referenciados en sus distintos ejes X, Y, Z representando la geometría real. Una vez obtenidos los puntos geométricos se pueden mallar generando así un modelo abierto o cerrado según se desee. Posteriormente este mallado puede ser modificado con un CAD.



*Ilustración 1 – Fases del escaneado*

[\[https://www.cadcrowd.com/architectural-design/point-cloud-modeling-services/\]](https://www.cadcrowd.com/architectural-design/point-cloud-modeling-services/)

Esta tecnología se utilizaba principalmente para la metrología en la industria y el sector automovilístico. Hoy en día, los avances han permitido ampliar el rango de aplicaciones, cobrando importancia en el sector médico, aeronáutica, ingeniería, arquitectura...

Estos equipos tenían unos precios muy elevados, gracias a su desarrollo, podemos encontrarlos a un precio asequible permitiendo ampliar el número de empresas que pueden trabajar con ellos.

## 2.2 Esquema de funcionamiento:

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, el objetivo de un escáner 3D es crear una nube de puntos a partir de la geometría del objeto. De esta forma se reúne información de la posición en el espacio de cada punto de la superficie.

Para obtener la posición de los puntos se define un sistema esférico de coordenadas considerando el origen en el escáner. Cada punto tiene asociado una coordenada  $\varphi$  y  $\theta$ , con una distancia  $r$ . Estas coordenadas muestran la situación tridimensional de cada punto en el modelo, siendo el escáner el sistema de referencia relativo. [1]

Dependiendo de varios factores como la distancia al objeto, la geometría propia, la precisión deseada... suelen ser necesarios varios análisis. Para agrupar los distintos resultados hay que utilizar un sistema de referencia común, este proceso se llama alineación. Se encarga de transformar las coordenadas locales de cada análisis en un sistema de coordenadas generales.

A continuación, se muestra un esquema indicativo funcionamiento que utiliza un escáner 3D:

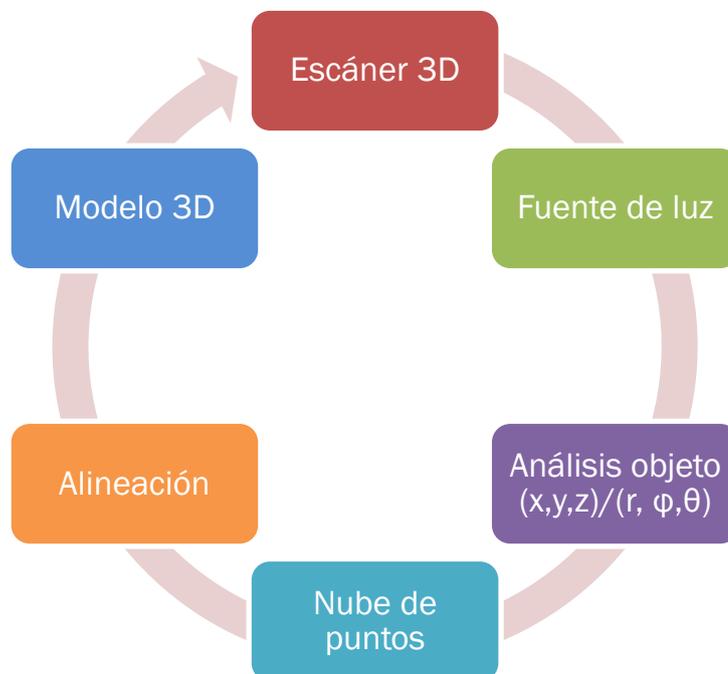


Ilustración 2 – Esquema de funcionamiento escáner 3D

[Elaboración propia]

## 2.3 Tipos de escáner 3D:

Hay gran variedad de escáneres 3D, pero podemos centrarnos en la siguiente división:

- Escáneres 3D con contacto
- Escáneres 3D sin contacto → Activos y pasivos

Para realizar este proyecto se ha utilizado un escáner 3D sin contacto que trabaja con luz estructurada.

### 2.3.1 Escáner de contacto:

Este tipo de escáner utiliza un palpador para examinar la superficie mediante contacto físico con ella. Los palpadores suelen utilizar en su cabezal acero duro, rubí o zafiro para mejorar su precisión. [2]

Cuentan con una gran precisión debido al contacto sobre la superficie, obteniendo buenos resultados.

Presentan una desventaja respecto al escáner sin contacto, se trata de la presión que se crea entre el palpador y la superficie. Si la superficie es muy delicada, puede ser afectada o modificada por el palpador.

También trabaja de forma más lenta que otros tipos de escáner. Es capaz de escanear entre 100 y 1000 puntos por segundo, por lo que se encuentran en un segundo plano respecto a los escáneres sin contacto.



*Ilustración 3 - Palpador 3D con activación por contacto*

[\[https://www.renishaw.es/es/sistema-sprint-con-supascan-42579\]](https://www.renishaw.es/es/sistema-sprint-con-supascan-42579)

### 2.3.2 Escáner sin contacto:

Como su propio nombre indica, este tipo de escáner no toca el objeto a digitalizar. Estos modelos de escáner están divididos en dos subgrupos, activos y pasivos, en función de la radiación que emiten para realizar el análisis.

#### 2.3.2.1 Activos:

Los escáneres activos funcionan emitiendo una señal y analizando su retorno para obtener la geometría de la superficie. Las señales con las que trabajan son electromagnéticas como pueden ser la luz, ultrasonidos, rayos X....

A continuación, se muestran los diferentes tipos que trabajan de esta forma.

##### 2.3.2.1.1 Time of flight (Tiempo de vuelo):

Este tipo de escáner obtiene la distancia de los puntos cronometrando el tiempo que tarda en ir y volver un pulso de luz. Para ello emplea como principio la velocidad de la luz a potencia constante. Es decir, cuenta con un diodo láser que emite un pulso de luz desde el instrumento y calcula el tiempo que tarda en regresar la luz reflejada, captada por un detector. [3]

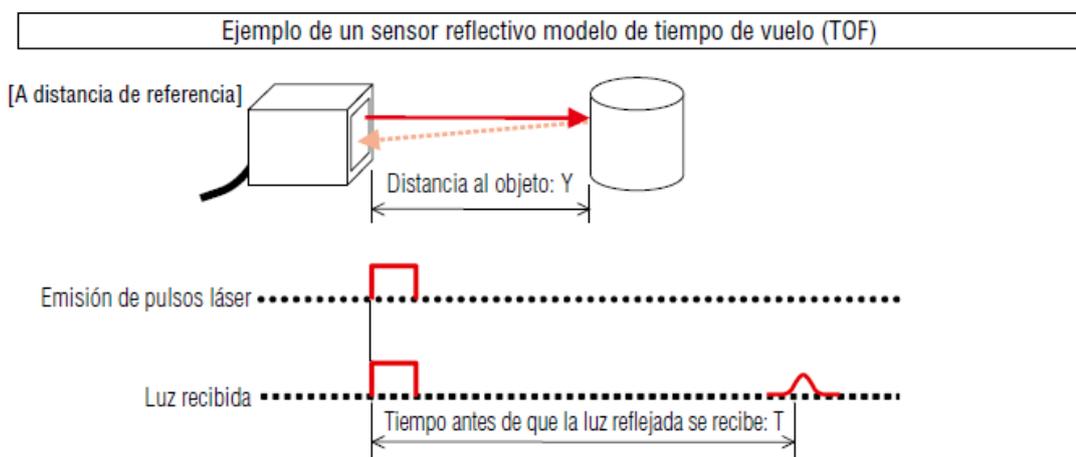


Ilustración 4 – Tiempo de vuelo para un impulso láser

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

Por lo que la distancia se calculará de la siguiente manera, teniendo en cuenta que el tiempo calculado (t) es de ida y vuelta:

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

*Ecuación 1*

Donde:

- $c = \text{velocidad de la luz}$
- $t = \text{tiempo de vuelo completo}$

Si consideramos la velocidad de la luz como 3.108 kilómetros/segundo se obtiene que tarda 3,33 nanosegundos en explorar un metro. Por lo tanto, para obtener una precisión de un milímetro se necesitan medir intervalos de tiempo cerca de 3,33 picosegundos.

Para que no se produzcan mediciones ambiguas, el tiempo medido (t) debe ser mayor que la amplitud del pulso:

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

*Ecuación 2*

O la precisión del reloj (d) tiene que cumplir la siguiente ecuación:

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

*Ecuación 3*

Por ejemplo, si tomamos como  $T_{\text{pulso}} = 10 \text{ ps}$ , la mejor precisión que vamos a obtener es de  $d = 1.5 \text{ mm}$ . La mayoría de los escáneres comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10 milímetros. [22]

Por lo tanto, la fiabilidad de este tipo de escáner 3D depende de la precisión con la que se puede medir el tiempo y es casi independiente de la distancia con la que se trabaja. Cuanto mayor sea la precisión del reloj, mejor es la medida obtenida.

La velocidad de muestreo oscila entre los 10.000 – 100.000 puntos por segundo, por lo que cuentan con un muestreo rápido. Esta capacidad de muestreo le permite generar una alta densidad de puntos.

Se encuentran limitados por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal y la sensibilidad del detector.

### 2.3.2.1.2 Triangulación:

Los escáneres 3D de triangulación utilizan una luz láser que incide en la superficie a examinar, con una cámara se busca la ubicación del punto láser. La cámara recoge los puntos donde el haz del láser se refleja en la superficie del objeto. [2]

Se forma un triángulo entre el punto láser, la cámara y el emisor láser. La distancia del lado del triángulo entre la cámara y el emisor se conoce. También se saben los ángulos que forman tanto el vértice del emisor como el vértice de la cámara. Estos 3 valores permiten resolver las dimensiones restantes del triángulo y la posición de cada punto en el espacio.

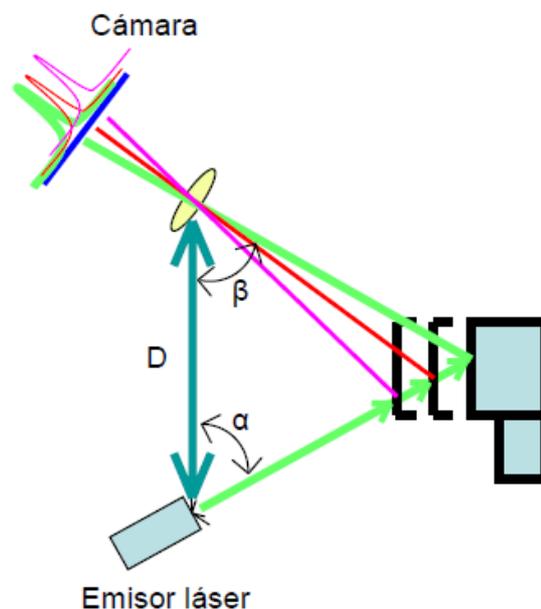


Ilustración 5 - Funcionamiento de un escáner 3D por triangulación

[TFG: Flujo de trabajo en proyectos de modelización 3D con equipo láser escáner – Fabio Romeral Pérez]

Como se puede ver en la foto anterior el ángulo que va a determinar la precisión del aparato es el que se forma en el vértice opuesto al escáner.

Cuanto mayor sea el lado que forman el láser y la cámara (D), menor será el error sobre la medida de profundidad del objeto. Pero esta longitud no puede ser muy grande porque la proyección del láser tendría problemas para ser capturada por la cámara. [1]

Son los más apropiados para el análisis de distancias cortas, menos de 10 metros. Este tipo de escáner solo capta las zonas visibles simultáneamente por el emisor láser y la cámara.

### 2.3.2.1.3 Diferencia de fase:

Este tipo de escáner evita el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz láser. La luz emitida (incoherente) se modula en amplitud y se envía a una superficie. La reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviadas y recibidas, y por tanto la demora.

Los escáneres que trabajan con diferencia de fase modulan su señal utilizando, modulaciones sinusoidales, amplitud modulada (AM), frecuencia modulada (FM), pseudo ruido o modulación polarizada. [1]

La relación entre el desfaseamiento ( $\varphi$ ), la frecuencia modulada ( $fm$ ) y el tiempo de regreso ( $t$ ) está dada por:

$$t = \frac{\varphi}{2\pi \cdot fm}$$

*Ecuación 4*

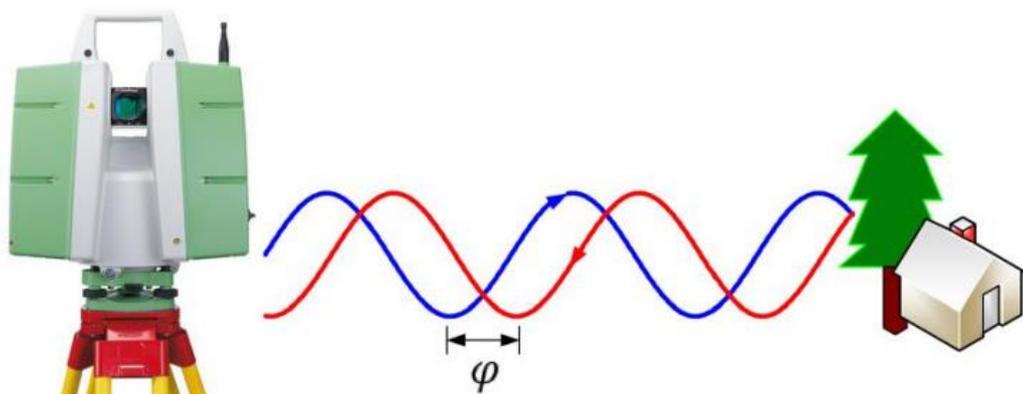
Dado que el escáner láser emplea un haz de luz, es posible calcular la distancia empleando las *ecuaciones 1 y 4*. Por lo tanto:

$$\rho = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot fm}$$

*Ecuación 5*

Este tipo de tecnología permite obtener un muestreo muy rápido, pudiendo capturar hasta 1.2000.000 puntos por segundo, pero no son muy fiables para largas distancias.

Presentan mayor velocidad y mejor resolución que los escáneres de tiempo de vuelo, pero peor precisión.



*Ilustración 6 - Principio de un escáner láser basado en diferencia de fase*

*[Jorge Adán Romero Guerrero / José Luis Cuellar Vázquez – Estudio comparativo entre las tecnologías de escaneo laser terrestre]*

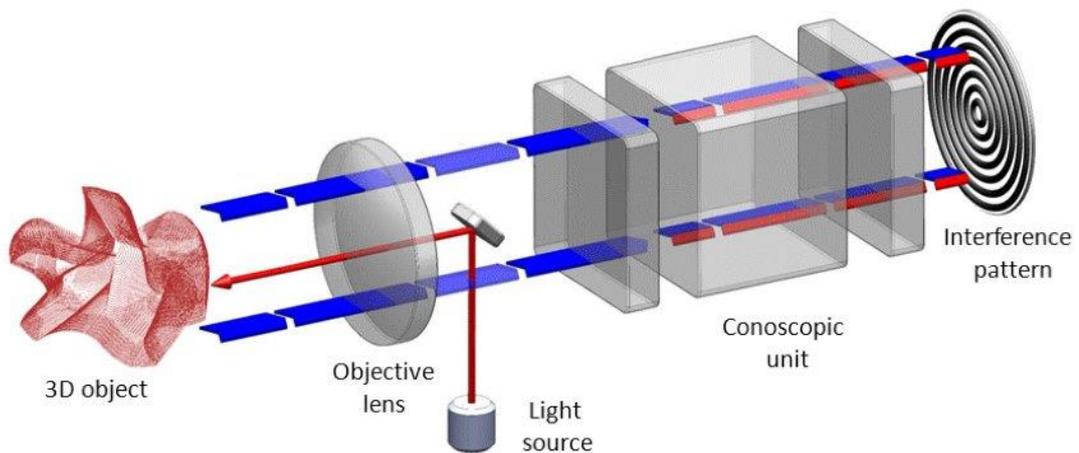
Su precisión se ve limitada por: [1]

- Frecuencia de la señal o modulación.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase → Depende de la fuerza de la señal, el ruido...
- Estabilidad del oscilador de modulación.
- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Variaciones en el índice de refracción del aire.

#### 2.3.2.1.4 Holografía conoscópica:

El funcionamiento de este tipo de escáner se basa en una luz que se refleja en una superficie a través de un cristal con dos índices de refracción, uno fijo en función de la superficie y otro variable en función del ángulo de incidencia del rayo en la superficie del cristal. [2]

Como se puede ver en la *ilustración 7*, se tienen dos rayos paralelos que se hacen interferir utilizando una lente cilíndrica. Esta interferencia es capturada por el sensor de una cámara convencional obteniendo un patrón de franjas. La frecuencia de esta interferencia determina la posición del objeto.



*Ilustración 7 - Funcionamiento de la holografía conoscópica*

[\[http://www.dsipius.es/web/imagenes/ch\\_technology.jpg\]](http://www.dsipius.es/web/imagenes/ch_technology.jpg)

Este tipo de escaneo 3D cuenta con alta precisión y una de sus ventajas es que puede utilizar luz no coherente, basta con que sea monocromática. [5]

### 2.3.2.1.5 Luz estructurada:

#### 2.3.2.1.5.1 Introducción:

La parte práctica de este proyecto se ha realizado con un escáner de luz estructurada. Este tipo de escáner proyecta un patrón de luz en el objeto y analiza la deformación de este producida por la superficie.

Esta tecnología se retorna 45 años atrás con un desarrollo progresivo hasta hoy en día haciendo uso de una fuente de luz y un receptor de esta. Su principal ventaja se centra en la velocidad de muestreo que permite escanear gran cantidad de puntos a la vez.

Antes de realizar el escaneo es necesario realizar una calibración de la cámara y de los proyectores para poder calcular los parámetros que permitan digitalizar resultados óptimos.

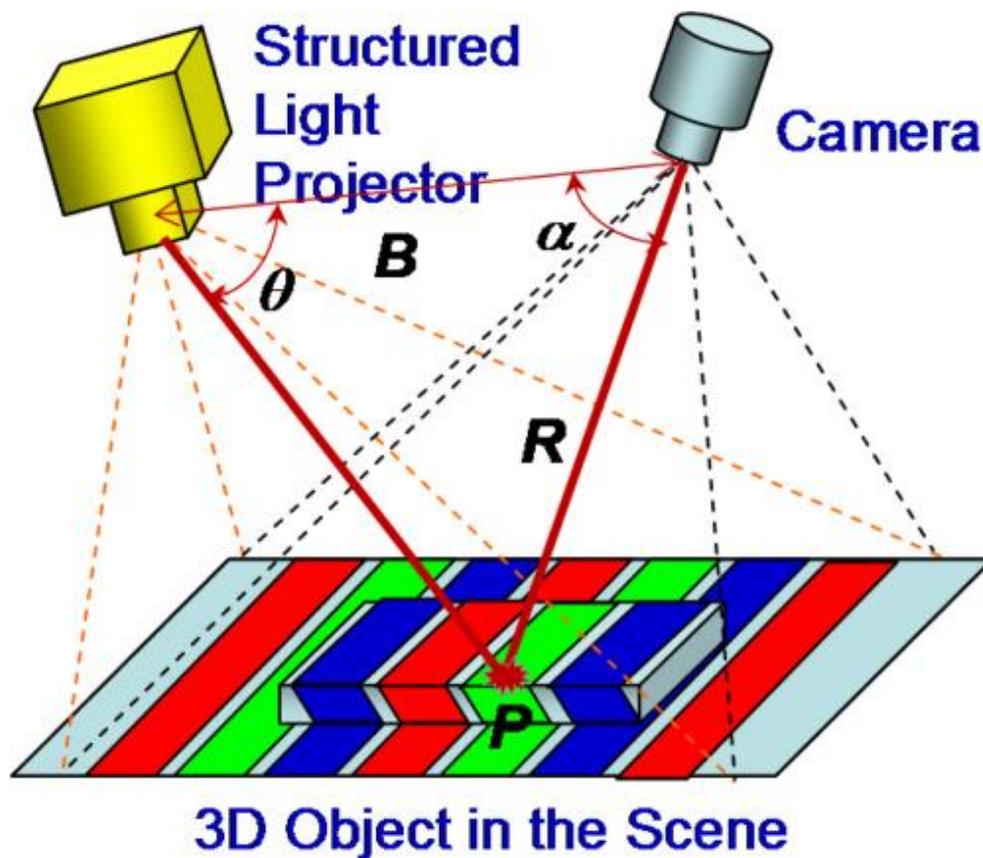


Ilustración 8 – Luz estructurada

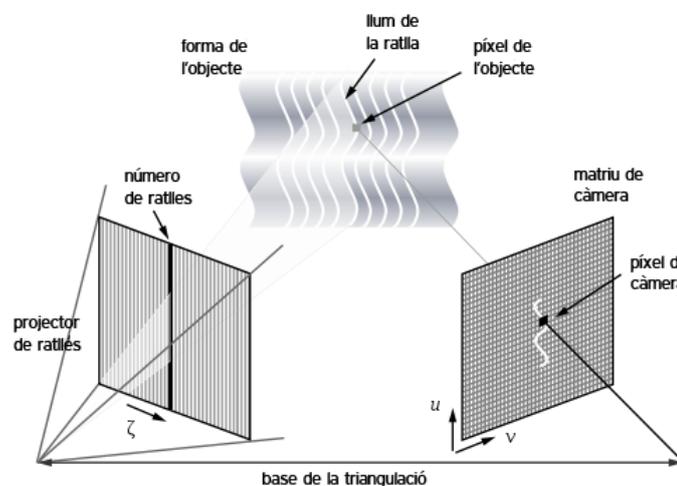
[Jason Geng – Tutorial – Structured-light 3D Surface imaging]

## 2.3.2.1.5.2 Técnica: [7]

El funcionamiento de este tipo de tecnología se centra en el estudio de la deformación que sufre un patrón de luz al ser proyectado en un objeto. Los sistemas de iluminación que utilizan no pueden ser sistemas normales, sino que tienen que trabajar con ondas de diferentes frecuencias provocando que el haz se difumine por todo el entorno.

Al proyectar un patrón de geometría conocida sobre la pieza, con un ángulo de incidencia adecuado a través de una cámara digital, se capturará la deformación que sufre sobre la pieza. Mediante técnicas de procesamiento de imágenes y planteamientos teóricos del comportamiento de la perspectiva, puede analizarse la deformación y construir la geometría de la pieza de estudio. [22]

Permiten escanear múltiples puntos a la vez o un campo de visión entero, lo que reduce o elimina el problema de la deformación producida por el movimiento. Como inconveniente se puede destacar que, en superficies transparentes o reflectantes, la digitalización puede ser errónea.



*Ilustración 9 - Deformación que se produce cuando la franja de luz proyectada impacta sobre una superficie en 3D*

*[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]*

Existen diferentes tipos, que van desde patrones de líneas regulares hasta patrones espacialmente codificados que modulan su frecuencia o su fase en el tiempo para proporcionar una mejor precisión. Los más comunes son los patrones de código binario o código de gray, explicados en el siguiente apartado.

**Análisis de patrones:**

En la siguiente imagen, nos encontramos con los diferentes patrones que se utilizan para la reconstrucción de la imagen a partir de la reflexión que se genera del objeto.

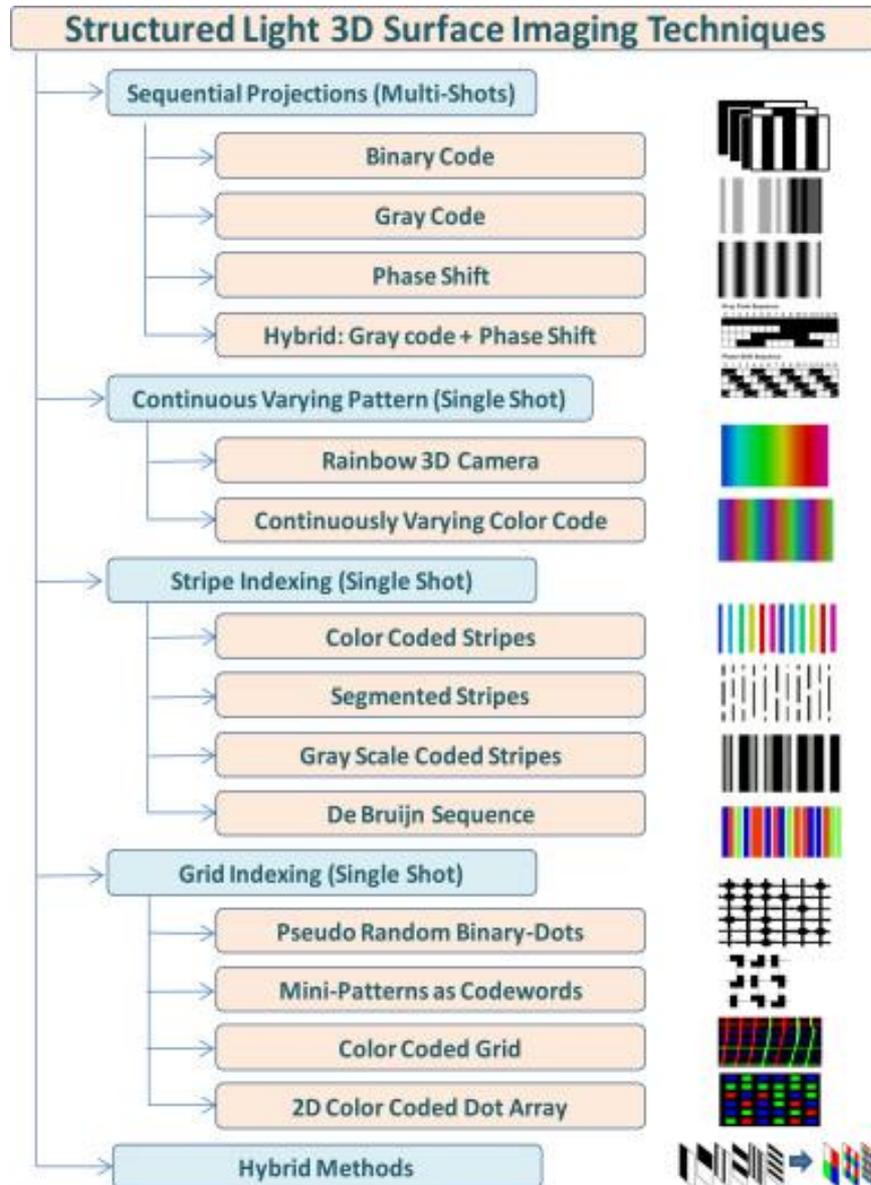


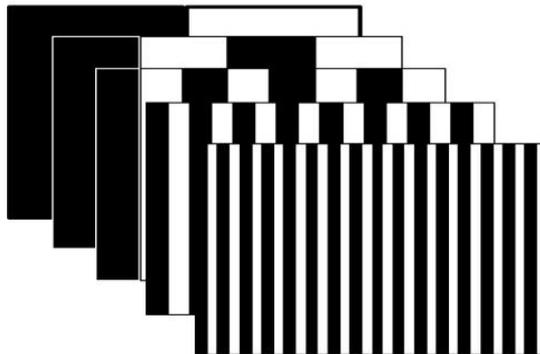
Ilustración 10 – Análisis de patrones mediante luz estructurada (libro)

[Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging]

Se describirán brevemente las técnicas de proyecciones secuenciales de múltiples disparos, que son las que se van a utilizar en este proyecto:

- **Código binario:**

Los patrones de código binario usan rayas blancas y negras, formando una secuencia de patrones de proyección, de forma que cada punto en la superficie del objeto posee un único código binario diferente al del resto de puntos. Esta técnica es bastante fiable y poco sensible a las características de la superficie. Sin embargo, para obtener buenas resoluciones espaciales, se deben proyectar un alto número de patrones. [8]

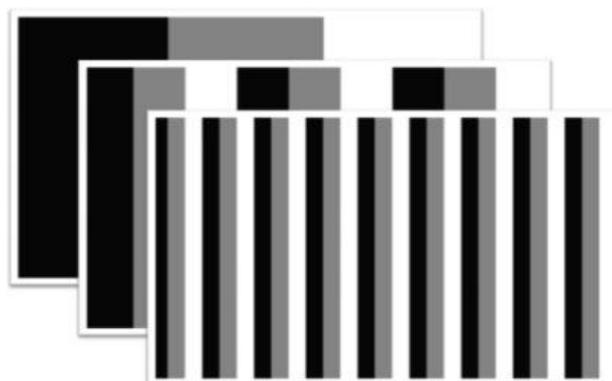


*Ilustración 11 – Patrón de proyección de 5 bits codificado en binario para imágenes en 3D*

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

- **Patrones de nivel gris:**

Este método reduce el número de patrones para obtener una alta resolución de imagen 3D. A diferencia del código binario que sólo puede utilizar dos niveles de intensidad, este patrón puede usar diferentes niveles para generar el código. [8]



*Ilustración 12 – Patrón de codificación de nivel gris*

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

- **Cambio de fase:**

Este método proyecta un conjunto de patrones sinusoidales sobre la superficie del objeto. Las intensidades de luz de cada fleco proyectado vienen dadas por las siguientes ecuaciones: [8]

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

*Ecuación 6*

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

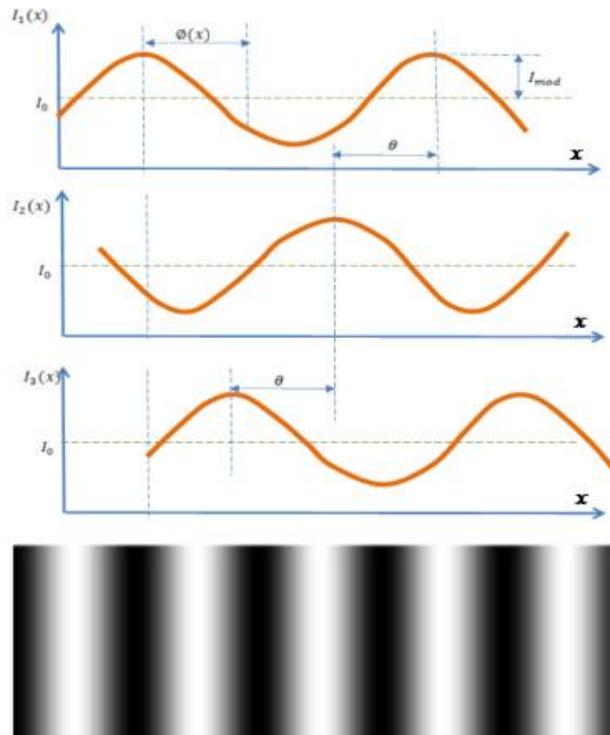
*Ecuación 7*

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

*Ecuación 8*

Donde:

- $I_x$  = intensidades de los 3 patrones de franjas
- $I_0$  = componente continua
- $I_{mod}$  = señal de modulación en amplitud
- $\Phi$  = fase medida
- $\theta$  = ángulo constante de cambio de fase



*Ilustración 13 - Cambio de fase con tres patrones de proyección y un ejemplo de una imagen marginal.*

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

A partir de la fase envuelta, se obtiene la fase absoluta:

$$\Phi' = \arctan\left[\sqrt{3} \cdot \frac{I_1(x,y) - I_3(x,y)}{2I_2(x,y) - I_1(x,y) - I_3(x,y)}\right]$$

Ecuación 9

Las coordenadas 3D se calculan con la diferencia entre la fase medida y el valor de fase desde un plano de referencia:

$$Z = \frac{L}{B} \cdot d = \frac{L}{B} \cdot (\Phi - \Phi_0)$$

Ecuación 10

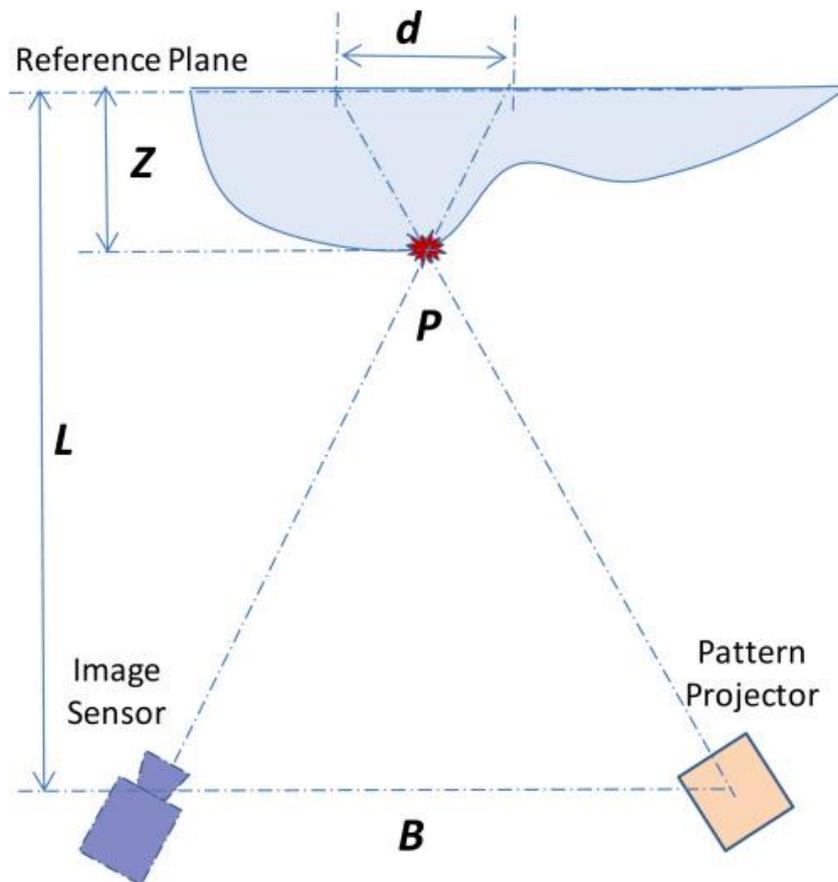


Ilustración 14 - Profundidad Z según el valor de la fase

[\[https://www.osapublishing.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561\]](https://www.osapublishing.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561)

- **Método híbrido: cambio de fase + codificación gris**

Nos podemos encontrar con problemas al emplear las técnicas de cambio de fase, en primer lugar, los métodos basados en obtener la fase envuelta no dan la fase absoluta. En segundo lugar, si dos superficies tienen una discontinuidad de más de  $2\pi$ , ningún método podrá obtener la fase envuelta para reconstruir de forma correcta la superficie. [8]

En la siguiente imagen podemos ver como el código gray determina el rango absoluto de fase, mientras que el código de cambio de fase ofrece resolución de subpíxeles más allá del número de franjas que ofrece el código gray.

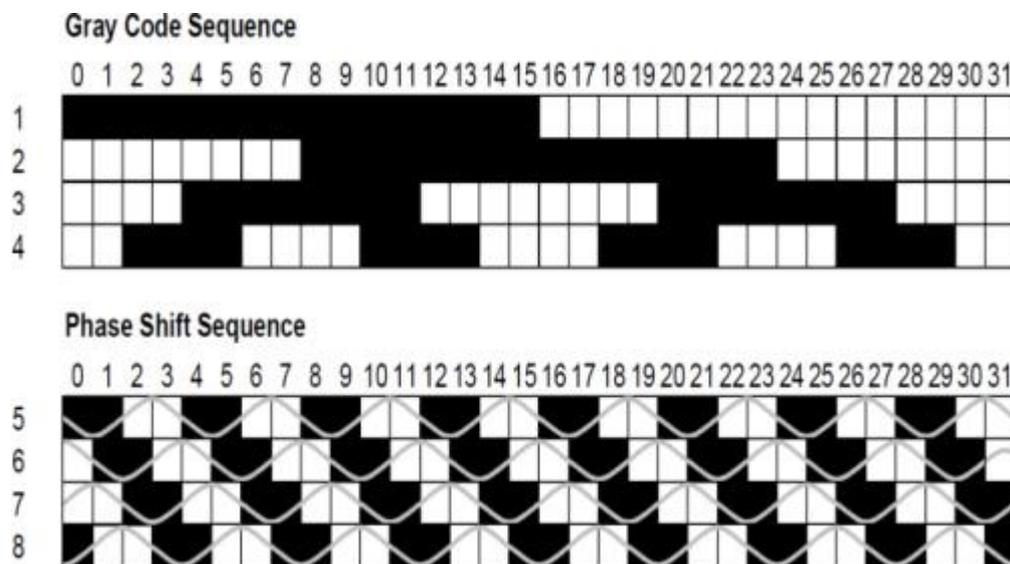


Ilustración 15 - Combinando código gris con cambio de fase

[C. Brenner, J. Boehm y J. Guehring, "Calibración fotogramétrica y evaluación de precisión de un proyector de banda de patrón cruzado", (1998)]

Este método también tiene sus limitaciones, necesita mayor número de proyecciones y no trabaja bien para imágenes en 3D de objetos dinámicos.

### 2.3.2.2 Pasivos:

Los escáneres pasivos no emiten ningún tipo de radiación por sí mismos, pero se fían de detectar la radiación reflejada del ambiente. Es decir, detectan luz visible porque es una radiación ya disponible en el ambiente.

#### 2.3.2.2.1 Estereoscópicos:

Esta tecnología emplea dos cámaras de video separadas poca distancia y orientadas de la misma forma, examinando la misma escena. Conociendo la distancia entre ellas y con las diferencias entre las imágenes vistas por cada cámara, es posible saber la distancia a cada punto en las imágenes. [2]

Los estereoscópicos están basados en la visión estereoscópica humana.

#### 2.3.2.2.2 Silueta:

Este tipo de escáner realiza una sucesión de fotografías alrededor de un objeto tridimensional contra un fondo contrastado. Estas siluetas se estiran y son cruzadas para formar la aproximación visual geométrica 3D del objeto.

Cuentan con un gran inconveniente, esta técnica no consigue detectar las concavidades que podemos encontrar en el objeto que se analiza.

#### 2.3.2.2.3 Con ayuda del usuario:

Este tipo de escáneres 3D trabajan según los principios de la fotogrametría, semejante a la fotografía panorámica tomando las fotos de un objeto en un espacio tridimensional para replicarlo. [2]

### 2.4 Principales aplicaciones escáner 3D:

A continuación, se muestran las principales aplicaciones que se están dando actualmente a los escáneres 3D:

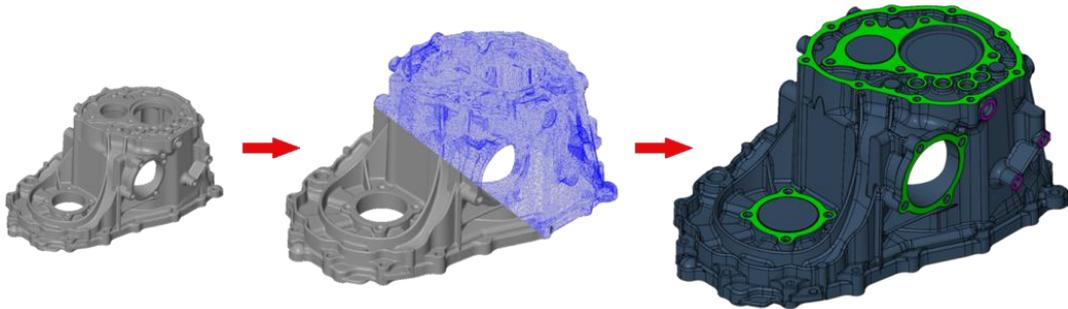
#### 2.4.1 Ingeniería inversa:

La ingeniería inversa se centra en la industria automotriz, aeroespacial, manufactura... Su objetivo es obtener información o un diseño a partir de un modelo existente.

Es una tecnología muy útil, permite analizar fácilmente los datos y modificarlos con programas CAD.

Sus principales aplicaciones se centran en:

- Diseño del producto
- Personalización
- Documentación 3D



*Ilustración 16 - Ingeniería inversa*

[\[https://todo-3d.com/escaneado-3d/\]](https://todo-3d.com/escaneado-3d/)

#### 2.4.2 Diseño industrial y manufactura:

Trabajan para el desarrollo de nuevos diseños, toma de medidas de objetos complejos y en la automatización del trabajo en instalaciones productivas haciendo de todo esto un proceso más sencillo. [9]

Los modelos 3D se pueden calibrar y modificar con programas CAD/CAM para mejorar el diseño del producto, su desempeño o integrarlo en un nuevo sistema de producción.

Sus principales aplicaciones se centran en:

- Control de calidad
- Elaboración rápida de prototipos
- Industria aeroespacial

#### 2.4.3 Cuidado de la salud:

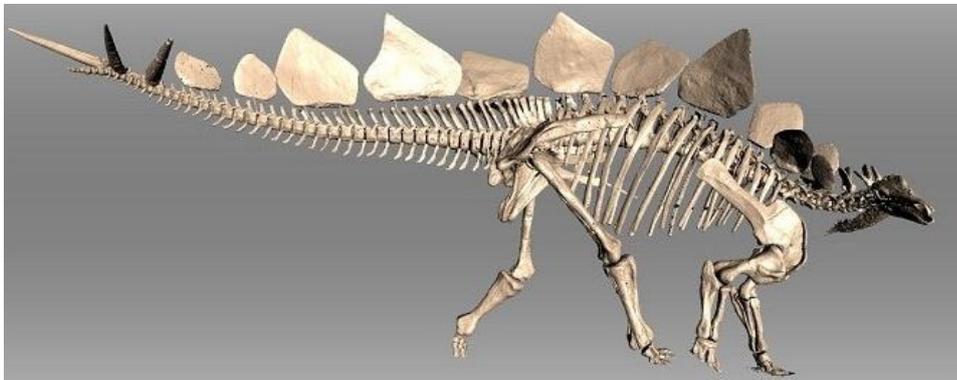
La medicina ha encontrado un gran amigo en esta tecnología, debido a que permite diseñar prótesis a medida, también dispositivos ortopédicos que requieren de una gran precisión y anatomía propia de cada paciente.

Sus principales aplicaciones se centran en prótesis, ortopedia, cirugía plástica, odontología y productos de apoyo.

#### 2.4.4 Ciencia y educación:

Esta tecnología está resultando ser una gran herramienta para las universidades, colegios y laboratorios debido a que permite estudiar distintas geometrías con un gran detalle y sin correr el riesgo de dañar la superficie sobre la que se trabaja.

También está teniendo un gran desarrollo en la industria del cine y de los videojuegos, aunque su principal aplicación se centra en la investigación.



*Ilustración 17 - Escáner 3D de un dinosaurio en el Museo de Naturaleza y Ciencia de Denver*

[\[https://www.artec3d.com/es/cases/3d-scanning-one-piece-dinosaur-skeleton-minute-detail\]](https://www.artec3d.com/es/cases/3d-scanning-one-piece-dinosaur-skeleton-minute-detail)

#### 2.4.5 Arte y diseño:

Los escáneres 3D nos permiten digitalizar monumentos antiguos, estatuas... para preservar copias exactas para la posteridad en caso de que sufran cualquier percance.

Permite a los artistas llevar su imaginación a la realidad, guiando a la industria del cine y de los videojuegos a límites inimaginables.

Sus principales aplicaciones se dan en:

- Preservación del patrimonio histórico
- Arquitectura
- Moda
- CGI → Imágenes generadas por computadora

## 2.5 Escáner 3D utilizado:

Se va a utilizar un escáner 3D proporcionado por el distribuidor *SHINING 3D* ©, que corresponde al modelo **EinScan-Pro**. Se desarrollan a continuación alguna de sus características:

### 2.5.1 Características del escáner:



*Ilustración 18 - Escáner EinScan - Pro*

[\[https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/\]](https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/)

Se adjunta en el Anexo [1] las diferentes características del modelo EinScan-Pro de Shining 3D ©.

Es un escáner 3D multifuncional con diseño modular, que nos va a permitir transformar objetos reales en modelos 3D imprimibles de forma rápida y sencilla.

Este escáner en modo manual es ideal para trabajar desde modelos pequeños hasta modelos grandes con las siguientes dimensiones:

- Modelos pequeños: 150 mm de ancho por 150 mm de largo por 150 mm de alto.
- Modelos grandes: 4000 mm de ancho por 4000 mm de largo por 4000 de alto.

### 2.5.2 Modos del escáner:

Este escáner cuenta con diferentes tipos de escaneado para las piezas en función de su tamaño:

- **Escaneo rápido portátil:**

Realiza un escaneo rápido de 10 tomas por segundo. Se utiliza para geometrías de gran tamaño como puede ser el cuerpo humano y esculturas.

También cuenta con un escaneo portátil de alta definición HD, utilizado para cuerpos con muchos detalles.

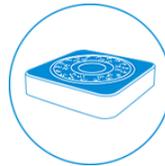


*Ilustración 19 - Escaneo manual*

[\[https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/\]](https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/)

- **Auto escaneo:**

Cuenta con una mesa automática que nos permite realizar un escaneo de 360 grados en un tiempo de un minuto y medio. Su uso principal se da en piezas pequeñas.



*Ilustración 20 - Escaneo automático*

[\[https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/\]](https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/)

- **Escaneo fijo:**

El escaneo fijo se centra en el uso del trípode. Es compatible para distintas alineaciones.



*Ilustración 21 - Escaneo fijo*

[\[https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/\]](https://www.einscan.com/handheld-scanner/einscan-pro/)

## 2.6 Verificación de los datos obtenidos con el escáner:

---

Es necesario realizar una verificación de los datos obtenidos, para poder trabajar con resultados que no falseen la realidad e intentar minimizar los errores que podemos cometer al realizar el escaneado.

Por lo que se van a comentar los principales factores que afectan al trabajo y a sus resultados.

### 2.6.1 Factores que afectan al análisis:

Debemos de tener en cuenta ciertos factores que afectan a los resultados que obtenemos al realizar un escáner. Estos factores pueden ser ambientales, referidos al objeto escaneado o propios de la configuración y calibración del escáner.

A continuación, se comentan aquellos que son más interesantes centrándonos en tres aspectos principales: [14]

#### 2.6.1.1 Factores que afectan al objeto:

- Morfología
- Material de la superficie
- Color de la pieza
- Grado de transparencia
- Brillo
- Refracción
- Reflexión

#### 2.6.1.2 Factores que afectan al ambiente:

- Iluminación
- Viento
- Niebla
- Humo
- Contaminantes
- Humedad

### 2.6.1.3 Factores que afectan al escáner:

- Enfoque y posición del proyector/cámara
- Configuración y calibración del proyector
- Brillo de la cámara
- Distancia de trabajo

Algunos de los factores mencionados anteriormente no tienen gran influencia para nuestro estudio, además el análisis por separado de cada factor y su relación con los demás supondría mucho tiempo de ensayos.

Por lo tanto, podemos considerar despreciables el viento, la niebla, el humo, los contaminantes y la humedad, debido a que el análisis se va a realizar en una sala del laboratorio del Edificio Lucía en el Campus Miguel Delibes en Valladolid.

Las diferentes pruebas que se han realizado con el escáner utilizando sus diferentes modos de escaneo, nos han permitido establecer una serie de condiciones para realizar un escaneo lo más correcto posible.

A continuación, se describen aquellos factores que se han considerado más importantes:

#### **Iluminación ambiental:**

Se trata del factor ambiental más influyente. Debemos de ubicar el escáner en una zona con una iluminación adecuada, donde la intensidad sea media e indirecta. De esta forma evitaremos que se generen sombras sobre el objeto que se quiere analizar, minimizando posibles brillos y reflejos sobre la superficie que nos afecten a la digitalización.

#### **Material del objeto:**

Gracias a las distintas experiencias llevadas a cabo, se ha comprobado que aquellos materiales brillantes o reflectantes son difíciles de escanear debido a que crean brillos cuando el patrón actúa sobre la superficie.

Frente a estos casos se ha utilizado un espray que se aplica sobre la superficie generando una capa de tiza, dotando al objeto de un acabado mate. De esta forma no se producen brillos ni reflejos y los resultados obtenidos son satisfactorios.



*Ilustración 22 - Espray para digitalizar en 3D*

*[Elaboración propia]*

### **Color del objeto:**

Las geometrías con colores oscuros pueden falsear los resultados, esto se produce porque los colores oscuros reflejan menos la cantidad de luz y, por lo tanto, la cámara no capta bien el patrón que índice en la superficie. Es recomendable disminuir el contraste para obtener un resultado definido.

Las geometrías con colores claros pueden generar problemas en zonas de alta luminosidad por lo que es recomendable reducir el brillo hasta conseguir un contraste donde la imagen sea clara.

### **Forma del objeto:**

Otro de los aspectos que más influyen en los resultados obtenidos es la forma del objeto a escanear porque puede contar con zonas ocultas que no se muestran, agujeros o huecos que muestran puntos en zonas donde no existe material.

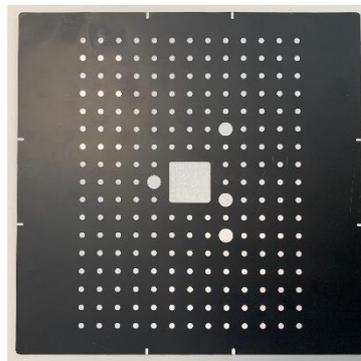
Para solucionar estos problemas podemos hacerlo de dos maneras:

1. Post-procesando el archivo obtenido mediante un software que nos permita limpiar la nube de puntos consiguiendo el mejor resultado posible.
2. Realizar varios escaneos del objeto en diferentes posiciones para obtener aquellas zonas que nos pueden causar problemas y alinearlos posteriormente para representar la geometría completa.

### 2.6.2 Calibración del escáner:

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para obtener un buen resultado, es la calibración. La calibración debe de realizarse cada vez que cambiamos el escáner de entorno, si los resultados de forma sistemática no se corresponden con la realidad, en caso de que la iluminación de la zona de trabajo haya cambiado...

Para el ajuste de nuestro instrumento contamos con una plancha de calibración que nos proporciona el fabricante. Esta plancha nos permite obtener los parámetros tanto intrínsecos como extrínsecos de la cámara y proyector.



*Ilustración 23 - Plancha de calibración*

*[Elaboración propia]*

Los parámetros intrínsecos representan las características propias de la cámara (generalmente fijas) como pueden ser la longitud focal, punto de enfoque, factores de escalado... Los parámetros extrínsecos representan la ubicación espacial de la cámara respecto al sistema de coordenadas real como pueden ser la matriz de rotación, el vector de translación entre el entorno real y el sistema de referencia de la cámara...

Estos parámetros se obtienen mediante la captura y procesamiento de patrones con características conocidas.

El propio software del escáner cuenta con un wizard que nos va guiando en los pasos a seguir para una adecuada calibración:

1. Colocar la plancha de calibración encima de una zona plana, como puede ser una mesa.
2. Seleccionar en el software la pestaña de calibración, tendremos dos opciones, calibración de la cámara y calibración HD. Sólo nos interesa realizar la primera calibración porque es la que afecta a este proyecto.

3. Colocamos el escáner orientado de forma perpendicular a la plancha de marcadores. Este proyecta sobre ella un haz de luz que debemos de situar en la diana del panel que se encuentra en su centro.



*Ilustración 24 – Calibración escáner 3D*

*[Elaboración propia]*

4. Una vez tengamos el escáner orientado a una distancia de unos  $300\text{ mm}$ , debemos de ir alejándonos, respetando la orientación descrita anteriormente hasta una distancia de  $450\text{ mm}$  aproximadamente.
5. De esta forma se proyecta una secuencia patrón que permite obtener al software la posición, la orientación, la distancia a la plancha de marcadores y las características internas de la cámara. De forma análoga se obtienen las características de los proyectores.
6. Este proceso ha de realizarse de forma lenta y respetando la zona de la diana marcada en la plancha.

Los siguientes pasos se realizan de la misma forma, pero cambiando de posición y de inclinación la plancha de marcadores. Para que la calibración sea satisfactoria ha de realizarse siempre de forma perpendicular a la zona base. De esta forma el escáner con la secuencia patrón calcula los distintos parámetros frente a las diferentes orientaciones utilizadas.

### 2.6.3 Precisión dimensional:

Para este apartado vamos a realizar una verificación de la precisión dimensional de los datos que obtenemos del escáner utilizando la mano de un maniquí de un niño. Para tomar las medidas analógicas vamos a utilizar un pie de rey digital, mientras que para las medidas digitales vamos a usar *Fusion 360* (software CAD explicado en el apartado 3.3).

De esta forma una vez que tomemos las medidas, vamos a comprobar si los resultados obtenidos entran dentro de los valores de exactitud que nos proporciona el fabricante. Según el modo de escaneo que empleemos se tiene una exactitud u otra. También se comprobará si el escáner digitaliza correctamente frente a distintos escaneos de un mismo objeto.

#### 2.6.3.1 Medición analógica:

Para la medición analógica se va a utilizar un pie de rey con una precisión de 0,01 mm. Sus especificaciones se muestran en el Anexo [4].



Ilustración 25 - Pie de rey Mitutoyo

[Elaboración propia]

Para poder realizar las mediciones de una forma precisa hemos colocado sobre la mano unos adhesivos con unos pequeños orificios, estos nos permitirán medir la distancia entre ellos utilizando el pie de rey.

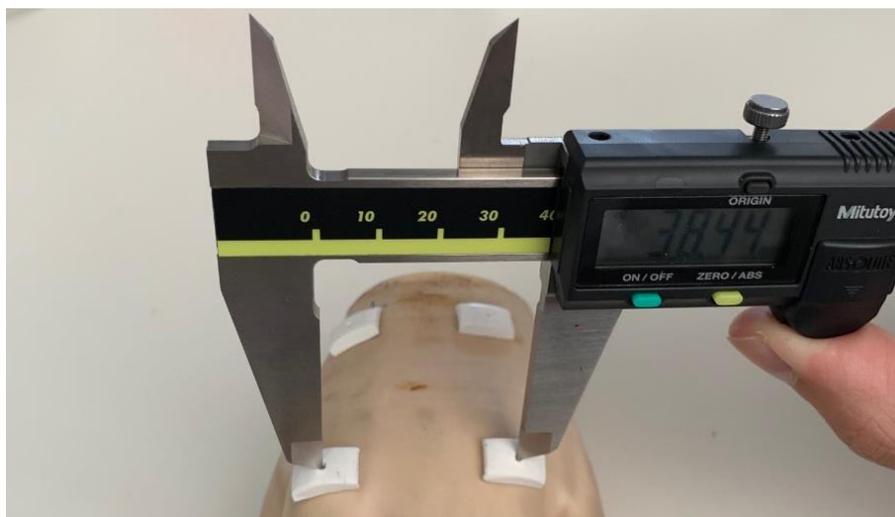
A continuación, se muestra una imagen con las diferentes referencias utilizadas y su colocación:



*Ilustración 26 - Mano con las referencias de medida*

*[Elaboración propia]*

En el Anexo [5] se muestran las distancias que se han analizado con el instrumento de medida.



*Ilustración 27 - Medida con pie de rey*

*[Elaboración propia]*

Se han realizado 5 medidas de cada distancia calculando después el valor medio de ellas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

MEDICIÓN	1	2	3	4	5	VALOR MEDIO
<b>Distancia 1</b>	45,87	45,57	45,67	45,71	45,75	<b>45,71</b>
<b>Distancia 2</b>	32,75	32,79	32,99	32,93	32,39	<b>32,77</b>
<b>Distancia 3</b>	44,29	44,1	44,01	44,25	44,23	<b>44,18</b>
<b>Distancia 4</b>	76,66	76,49	77,01	76,78	76,51	<b>76,69</b>
<b>Distancia 5</b>	115,94	115,76	115,36	115,83	115,38	<b>115,65</b>
<b>Distancia 6</b>	38,34	37,95	37,7	37,84	37,78	<b>37,92</b>
<b>Distancia 7</b>	41,81	42,29	42,3	41,92	42,33	<b>42,13</b>
<b>Distancia 8</b>	38,35	38,24	38,42	38,57	38,61	<b>38,44</b>
<b>Distancia 9</b>	33,35	32,95	32,9	33,08	32,82	<b>33,02</b>
<b>Distancia 10</b>	31,63	31,67	31,58	32,23	31,33	<b>31,69</b>
<b>Distancia 11</b>	48,14	48,05	48,56	47,92	48,11	<b>48,16</b>
<b>Distancia 12</b>	46,21	46,47	46,08	46,03	46,42	<b>46,24</b>

Tabla 1 – Mediciones de la mano

[Elaboración propia]

### 2.6.3.2 Medición escáner 3D:

Para poder verificar los datos que nos proporciona el escáner vamos a realizar tres digitalizaciones en modo manual de la mano. El procedimiento para este modo de digitalización se explicará en el apartado 3.5.

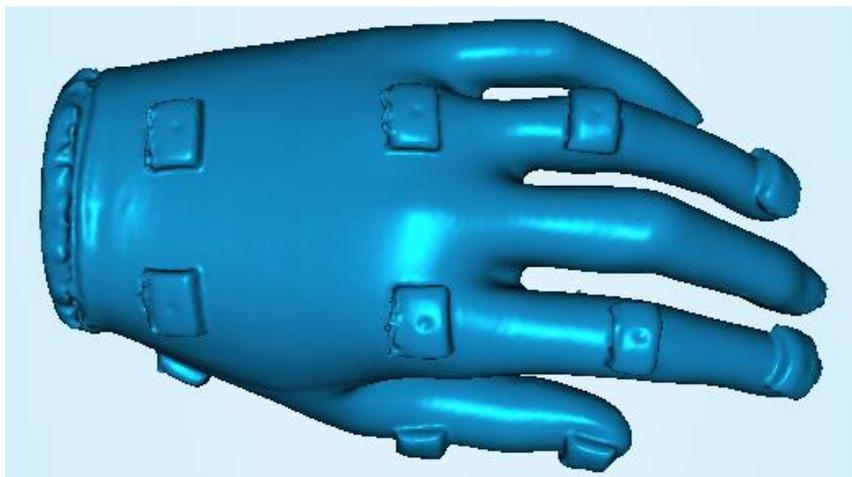
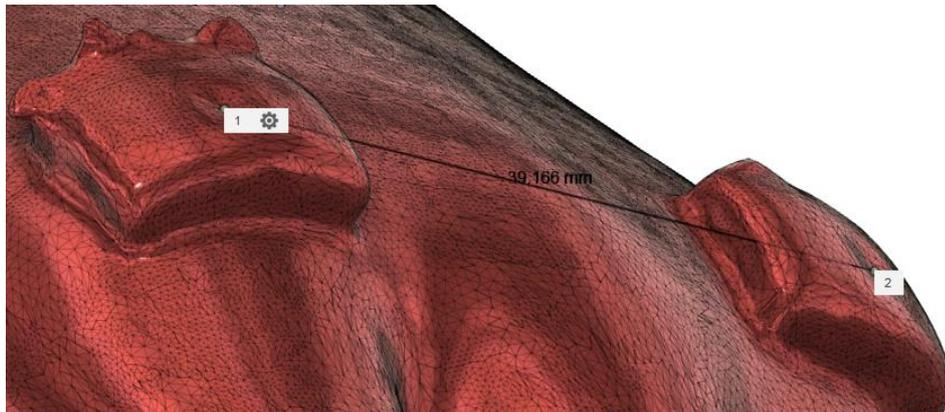


Ilustración 28 - Mano sujeto en 3D

[Elaboración propia]

Para analizar las medidas obtenidas con el escáner vamos a utilizar *Fusion 360* de Autodesk ©. El escáner no es capaz de captar la profundidad de los huecos en las referencias, pero muestra la hendidura generada por ellos. De esta forma, seleccionamos los puntos que se encuentran más hundidos para obtener la distancia.



*Ilustración 29 - Medida con Fusion 360*

*[Elaboración propia]*

Al seleccionar los puntos con el programa CAD cometemos algo de error, por lo que tenemos que hacer uso del zoom para poder obtener las medidas lo más precisas posibles.

Se realizan tres análisis de todas las distancias propuestas obteniendo la siguiente tabla:

<b>MEDIDA CON SOFTWARE</b>				
<b>Escaneo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>VALOR MEDIO</b>
<b>Distancia 1</b>	46,15	45,94	45,98	<b>46,02</b>
<b>Distancia 2</b>	33,04	33,03	32,83	<b>32,97</b>
<b>Distancia 3</b>	44,35	44,71	44,63	<b>44,56</b>
<b>Distancia 4</b>	77,12	76,86	76,77	<b>76,91</b>
<b>Distancia 5</b>	116,34	116,03	116,31	<b>116,23</b>
<b>Distancia 6</b>	38,44	38,27	37,80	<b>38,17</b>
<b>Distancia 7</b>	42,32	41,83	42,28	<b>42,14</b>
<b>Distancia 8</b>	38,53	39,16	38,66	<b>38,78</b>
<b>Distancia 9</b>	33,54	32,87	33,09	<b>33,17</b>
<b>Distancia 10</b>	31,30	31,42	31,29	<b>31,34</b>
<b>Distancia 11</b>	47,89	47,59	48,09	<b>47,86</b>
<b>Distancia 12</b>	46,60	46,27	46,54	<b>46,47</b>

*Tabla 2 - Medidas con Fusion 360*

*[Elaboración propia]*

### 2.6.3.3 Comparación de las medidas tomadas:

Según el fabricante del escáner que corresponde a la empresa Shinning ©, podemos obtener una exactitud media de 0,3 mm o menor en nuestra digitalización. Por lo tanto, vamos a comparar los resultados.

El error absoluto lo calcularemos de la siguiente forma:

$$\text{Error} = |\text{Valor analógico} - \text{Valor software}|$$

*Ecuación 11*

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Distancias	Valor medio de las medidas	Valor medio de las medidas con Software	Error
Distancia 1	45,71	46,02	0,31
Distancia 2	32,77	32,97	0,20
Distancia 3	44,18	44,56	0,39
Distancia 4	76,69	76,91	0,22
Distancia 5	115,65	116,23	0,57
Distancia 6	37,92	38,17	0,25
Distancia 7	42,13	42,14	0,01
Distancia 8	38,44	38,78	0,34
Distancia 9	33,02	33,17	0,15
Distancia 10	31,69	31,34	0,35
Distancia 11	48,16	47,86	0,30
Distancia 12	46,24	46,47	0,23

*Tabla 3 - Resultados de los errores*

*[Elaboración propia]*

Las conclusiones se comentarán en el apartado final del proyecto, pero como podemos ver los resultados son satisfactorios. Debemos de tener en cuenta que nosotros también cometemos error al medir tanto analógicamente como con el software, aunque sea un error mínimo.

Además, sólo hay un resultado en el que el error ha sido mayor a los demás, respecto a este valor podemos decir que se trata de la mayor distancia analizada, en la que hemos podido cometer un error en la medición.

#### 2.6.4 Gom Inspect:

En este apartado, se analizará un modelo de referencia digitalizado con la mesa automática frente a varios modelos obtenidos de forma manual. El objetivo de este apartado es comprobar que, si se realizan diferentes escaneos de un mismo objeto, los resultados deben de ser similares.

Se utiliza la mesa giratoria porque los resultados que proporciona son más exactos que con el modo manual, por lo que elegimos como modelo de referencia esta digitalización. Según el fabricante este modo puede obtener una exactitud media de 0,05 mm.

Para comparar los diferentes resultados con la referencia, utilizamos el software *Gom Inspect* ©, que es un programa que analiza datos de medición 3D.



Ilustración 30 - Logo Gom Inspect

[\[https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html\]](https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html)

Como en esta parte nos centramos en el análisis de los datos digitalizados, no se explicará cómo se obtiene un escaneo automático o manual, se describirá detalladamente más adelante, en el *apartado 3.5*.

Este software cuenta con una versión free que es la que se utilizaremos. En primer lugar, debemos de abrir el programa el cual nos mostrará un panel con diferentes opciones que podemos realizar.

Como aún no hemos creado ningún proyecto, debemos de empezar creando uno nuevo, dónde se realizarán los diferentes análisis.

- Abrir Gom Inspect / Nuevo proyecto

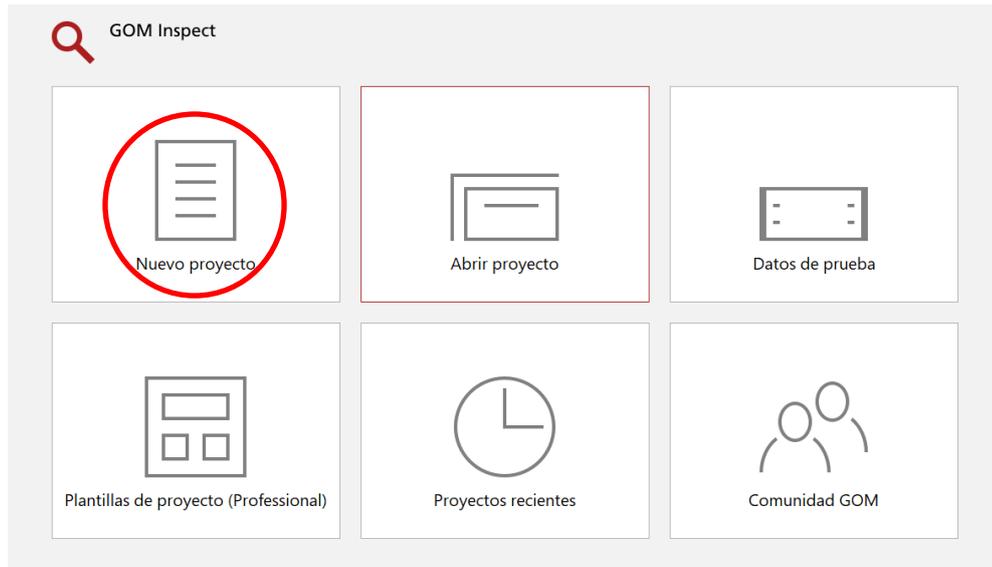


Ilustración 31 - Interfaz de inicio Gom Inspect

[Elaboración propia]

Una vez estemos dentro del proyecto, debemos de importar los archivos con los que vamos a trabajar. Primero hay que importar el archivo que vamos a utilizar de referencia:

- Archivo / Importar / Seleccionamos la digitalización de referencia / Marcamos cuerpo CAD como tipo de elemento de destino.

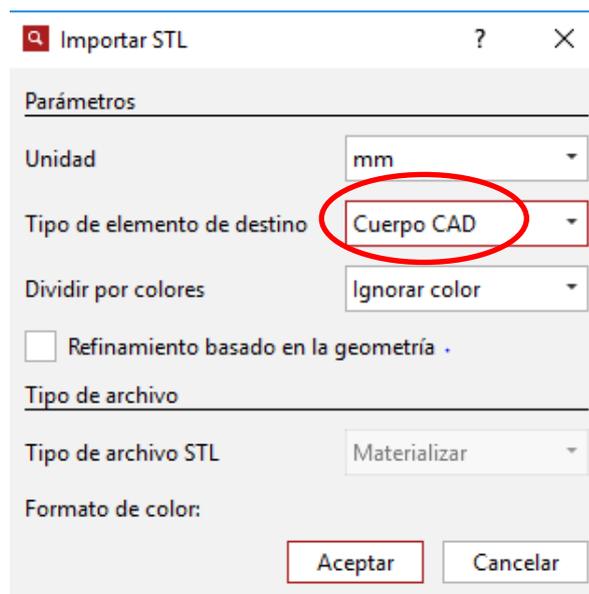
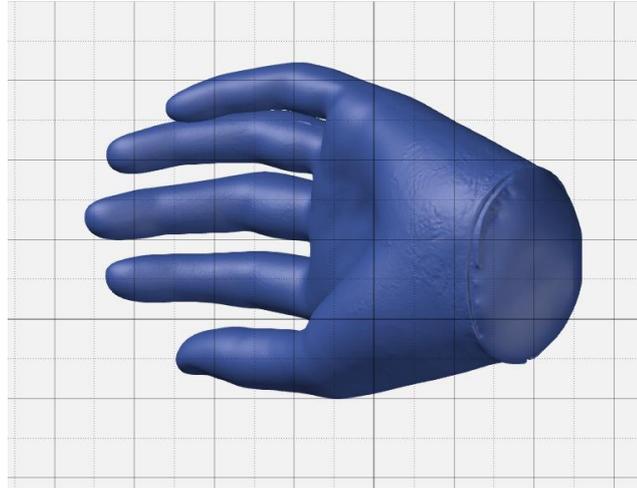


Ilustración 32 - Importación archivo en Gom Inspect

[Elaboración propia]

Después de realizar esta operación, nos deberá de aparecer el archivo de referencia en color azul sobre el grupo de trabajo del software.

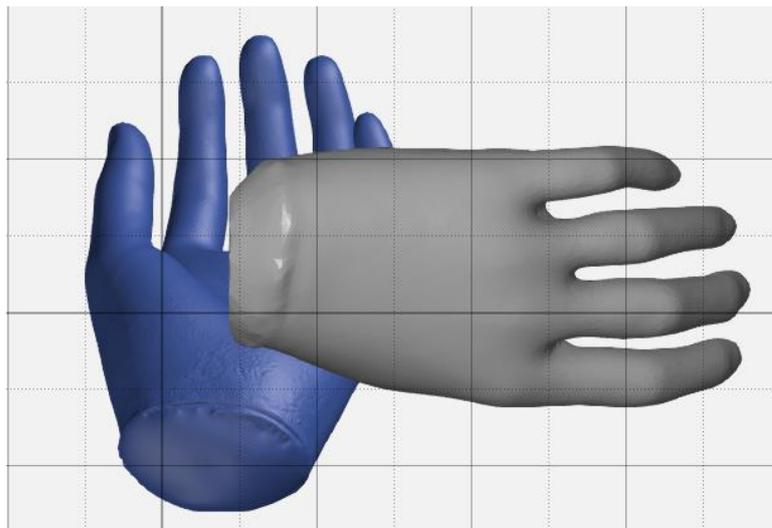


*Ilustración 33 - Modelo de referencia importado*

*[Elaboración propia]*

De forma similar a la operación anterior, importamos los archivos escaneados de forma manual:

- Archivo / Importar / Seleccionamos la digitalización de referencia / Marcamos malla como tipo de elemento de destino.

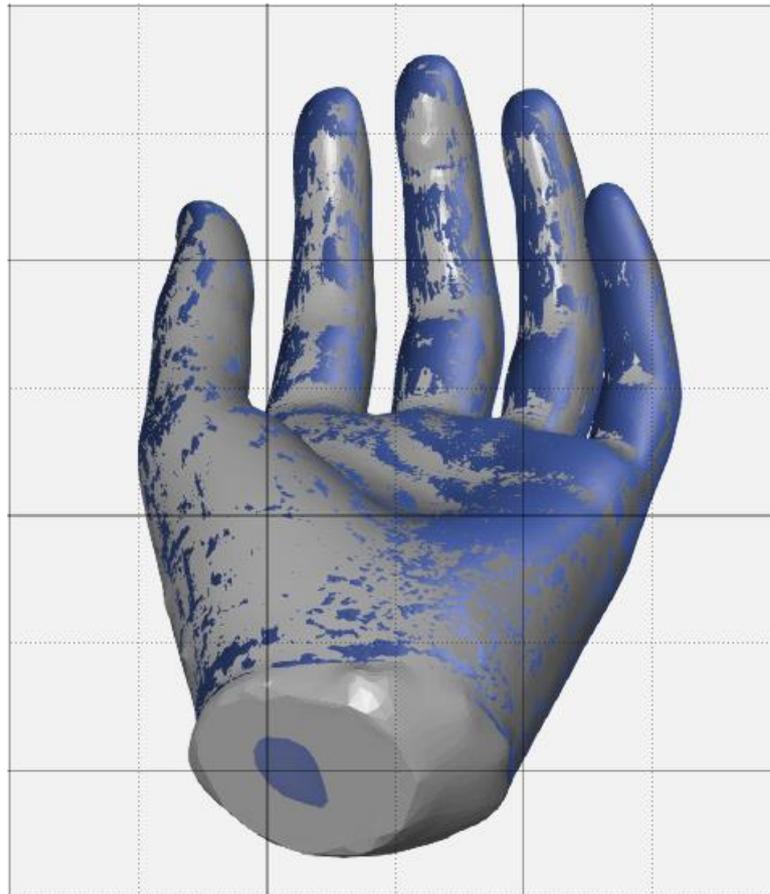


*Ilustración 34 - Cuerpo CAD y malla en Gom Inspect*

*[Elaboración propia]*

Como se puede observar en la ilustración anterior, los diferentes modelos aparecen sin alinear, es decir, sin tener un sistema de referencia común. Para solucionar este problema, realizamos la siguiente operación:

- Borde superior derecho / Alineación principal / Prealineación / Seleccionamos el elemento CAD (modelo de referencia) y el elemento malla (modelo manual).



*Ilustración 35 - Alineación de los diferentes cuerpos*

*[Elaboración propia]*

De esta forma el programa utiliza una serie de algoritmos para identificar puntos clave en los diferentes modelos, superponiendo uno encima de otro con un sistema de referencia común.

El software nos permite determinar el tiempo a emplear en la alineación, seleccionaremos un tiempo medio para obtener un resultado adecuado.

Debemos de realizar esta operación tantas veces como modelos se quieran comparar, tomando siempre como referencia el cuerpo CAD.

Por último, nos queda comparar los archivos digitalizados de forma manual con el digitalizado automáticamente. Para ello, tenemos que ir a la barra de herramientas del panel principal de trabajo:

- Barra de herramientas / Comparativa de superficies / Comparativa de superficies en CAD / 10 mm de distancia máxima



Ilustración 36 - Barra de herramientas Gom Inspect

[Elaboración propia]

Hay que realizar esta operación tantas veces como modelos se quieran comparar. En nuestro caso hemos realizado tres análisis.

El programa nos crea la comparación de los dos archivos, para poder ver el resultado de forma adecuada, ocultamos el modelo referencia y manual desde el árbol de tareas realizadas (zona izquierda).

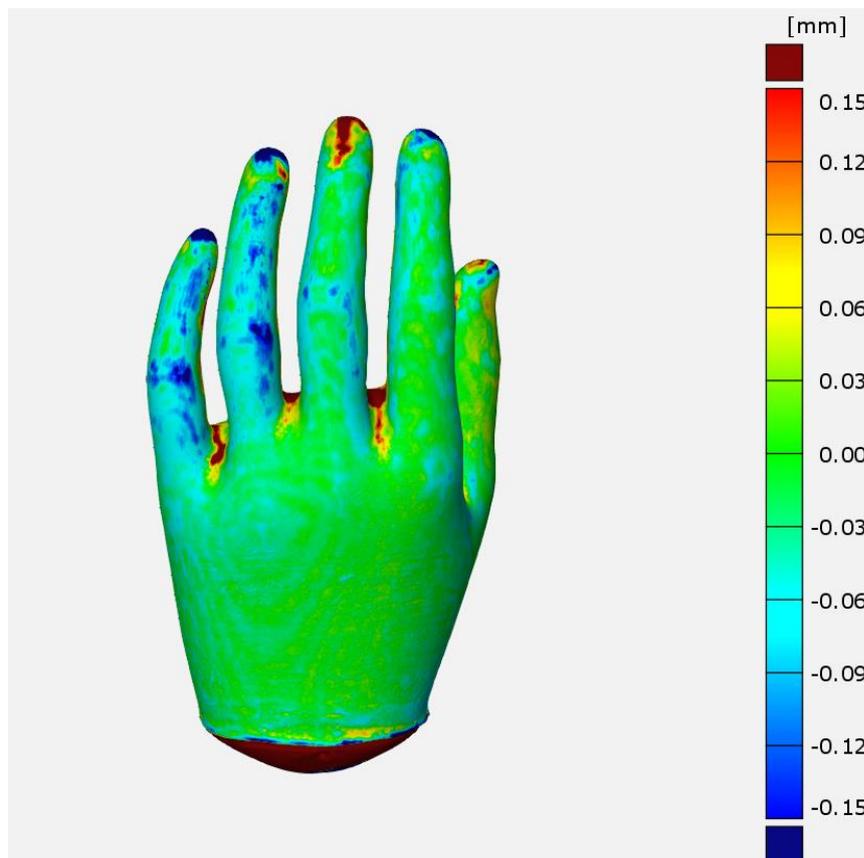


Ilustración 37 - Comparación de los modelos

[Elaboración propia]

El programa nos proporciona las diferentes desviaciones que ha encontrado, para ello nos muestra una escala de colores en función de la desviación calculada.

También nos proporciona un histograma que muestra la curva de Gauss de los datos. Además, nos permite conocer la desviación media, así como los valores máximos y mínimos.

A continuación, se muestran las diferentes comparaciones realizadas. Podemos poner etiquetas en las zonas que nos interese mostrando las diferentes desviaciones:

- Barra de tareas / Inspección / Etiqueta de desviación / Control + Click derecho en la zona de interés

También podemos modificar el rango de la escala en función de nuestro interés, hemos elegido  $\pm 0,3 \text{ mm}$  porque es la exactitud con la que trabaja el modo manual.

### Comparación → Cuerpo CAD vs Malla 1

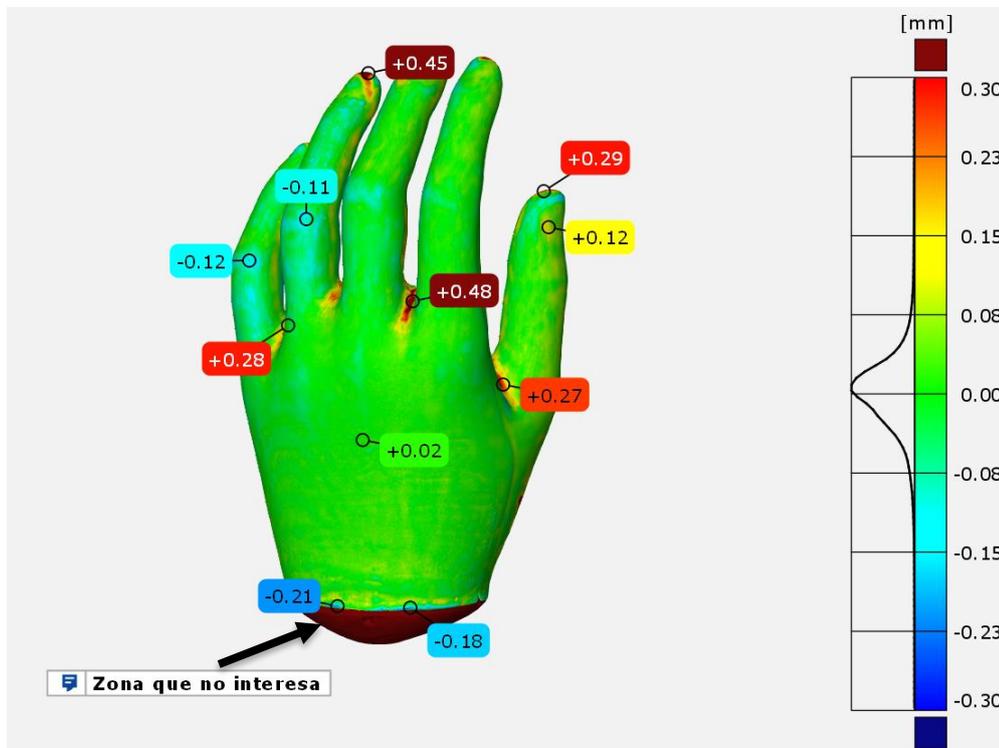


Ilustración 38 - Cuerpo CAD vs Malla 1

[Elaboración propia]

**Comparación → Cuerpo CAD vs Malla 2**

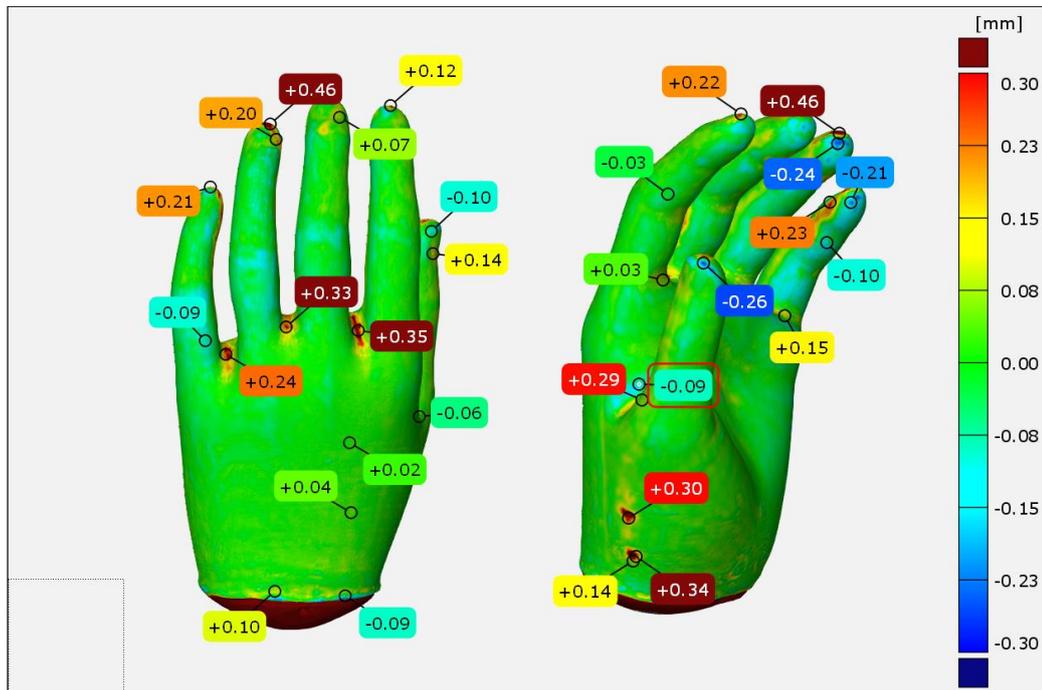


Ilustración 39 - Cuerpo CAD vs Malla 2

[Elaboración propia]

**Comparación → Cuerpo CAD vs Malla 3**

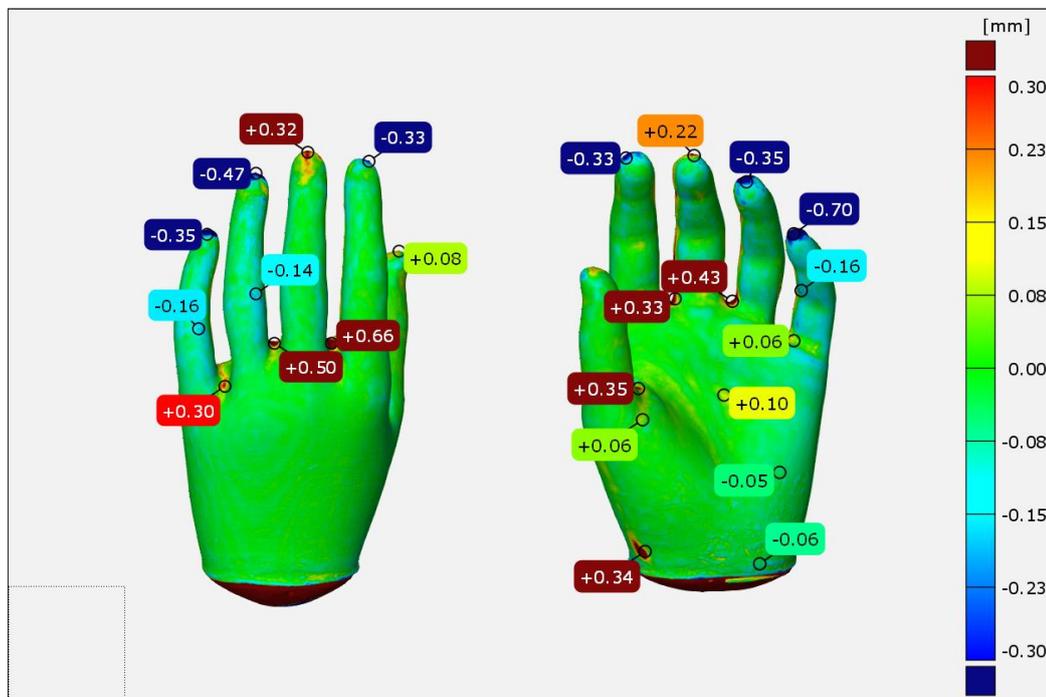


Ilustración 40 - Cuerpo CAD vs Malla 3

[Elaboración propia]

#### 2.6.4.1 Conclusión del análisis con Gom Inspect:

En la siguiente tabla, se muestran los diferentes valores obtenidos en las comparaciones:

<b>COMPARACIONES CUERPO CAD CON MALLA</b>			
<b>Desviación</b>	Media	Máxima	Mínima
<b>Comparación 1</b>	0,0234	0,70	-0,65
<b>Comparación 2</b>	0,0135	0,22	-0,25
<b>Comparación 3</b>	0,0294	0,73	-0,74

Tabla 4 - Resultados con Gom Inspect

[Elaboración propia]

Como se puede ver en los resultados, las desviaciones medias tienen unos valores muy pequeños, esto es debido a que el escáner cuenta con una gran exactitud. Debemos de tener en cuenta que es un valor tan pequeño porque la mayoría de los puntos coinciden u ocupan casi la misma posición que la referencia.

Las desviaciones más altas se dan en zonas donde el patrón no se puede proyectar de forma correcta sobre la superficie, como puede ser el hueco entre los dedos.

No debemos de tener en cuenta la zona de la base de la mano del maniquí. Porque al exportar el archivo desde el propio software del escáner nos cierra el modelo de forma aleatoria en función de los puntos que haya recogido durante la digitalización.

Por lo tanto, podemos determinar que el escáner se comporta de forma adecuada frente a los diferentes escaneos del mismo objeto. También comprobamos que casi todos los valores no superan 0,3 mm de desviación, por lo que se puede verificar al igual que en el apartado anterior que los resultados que vamos a obtener en nuestro caso práctico serán adecuados.

## 3 Diseño CAD para férula de miembro superior:

---

### 3.1 Introducción:

Para poner a prueba todo lo explicado anteriormente vamos a llevar a cabo un caso práctico en el que vamos a diseñar una férula de inmovilización para una mano mediante impresión 3D.

Para ello vamos a coger como modelo de trabajo mi mano, sobre la que hemos realizado un escáner 3D obteniendo la nube de puntos para su posterior tratamiento. Usaremos el propio software del escáner, Meshmixer © y Fusión 360 © de Autodesk para obtener su geometría en formato CAD.

A la hora de diseñar una órtesis debemos de tener en cuenta ciertos aspectos relacionados con sus especificaciones. Hay que tener muy presente que son propias y personales, personalizadas para cada paciente y con una función concreta dependiendo del problema que se intenta abordar.

### 3.2 Especificaciones férulas:

Este proyecto se centra en la inmovilización de la parte de la muñeca para un paciente que sufra una posible lesión o rotura en la zona.

Una férula se centra en inmovilizar, sujetar o sostener las zonas afectadas, pero también se pueden utilizar para alinear y corregir deformidades, mejorando su función. De esta forma se ayuda a una mejor recuperación.

#### 3.2.1 Aspectos importantes:

A la hora de fabricar este tipo de férulas debemos de tener en cuenta una serie de factores, los principales son los siguientes: [16]

- ✚ La edad del paciente.
- ✚ La actividad diaria del paciente, intentando buscar la mayor comodidad posible.
- ✚ Tiempo de uso de la férula, ya sea de uso determinado (varias horas al día) o de uso temporal (semanas o meses).

- ✚ Tiempo y costo de fabricación.
- ✚ Resistencia al esfuerzo.
- ✚ Facilidad para el paciente, es decir, sencillez en su puesta y retirada.
- ✚ Diseño adecuado, según el paciente.
- ✚ Como poder combinar la férula con un programa de ejercicios para mejorar la recuperación, todo supervisado por un terapeuta.
- ✚ Situación en la que se encuentra el paciente.

### 3.2.2 Materiales con los que trabajar:

También podemos combinar distintos tipos de materiales para mejorar la comodidad en el uso de estos métodos. Para ello podemos trabajar con los siguientes materiales buscando el confort del paciente:

- ✚ Materiales plásticos: PLA, PVA, TPU, PETG, ABS, Nylon... En nuestro caso hemos usado PETG, que es un material biocompatible.
- ✚ Acolchados de espuma: se pueden usar con o sin autoadhesivo para mejorar la comodidad en la zona interior de la férula o en aquellas zonas donde se podrían producir heridas o raspones.
- ✚ Velcros: trabajan como unión de las partes o para dar una cierta presión, dependiendo del tipo de férula que se vaya a utilizar.
- ✚ También se utilizan pletinas de aluminio, alambre acerado, elásticos de billetes de distintos grosores, remaches, neopreno, lycra, cuero sintético (tevenil)... pero no nos interesa porque no lo usaremos en este proyecto.

### 3.2.3 Principales lesiones:

En la siguiente lista nos encontramos con las principales lesiones que podemos tratar con este tipo de férulas: [20]

- ✚ Artritis postraumática de muñeca
- ✚ Fractura de radio distal sin desplazamiento
- ✚ Fractura del carpo (escafoides)
- ✚ Fracturas metacarpianas sin desplazamiento
- ✚ Fracturas en rodete
- ✚ Fractura tallo verde
- ✚ Fractura epifisiolisis tipo I-II de radio distal
- ✚ Artritis postraumática de codo
- ✚ Fractura cabeza de radio sin desplazamiento
- ✚ Fractura suprametafisaria
- ✚ Fractura doble de antebrazo sin desplazamiento

- ✚ Rizartrrosis del pulgar (por inmovilización de la articulación trapeciometacarpiana).

Hay que tener presente en el diseño que la zona en la que se va a trabajar es probable que esté hinchada por la lesión, por lo que hay que buscar la comodidad del paciente. Todo esto siempre ha de realizarse con la supervisión de especialistas como traumatólogos, fisioterapeutas, ortopedas...

### 3.2.4 Objetivos de una férula impresa en 3D:

Los variables diseños de las férulas impresas en 3D permiten establecer una serie de objetivos muy diversos que ayudan a mejorar la calidad de vida de las personas.



*Ilustración 41 - Férula de uso cotidiano*

*[Elaboración propia]*

Por lo tanto, podemos establecer una serie de fines que debemos de buscar con el diseño: [21]

- ✚ Que sean **livianas**.
- ✚ Que se puedan **mojar**.
- ✚ **A medida** con una **correcta adaptación** a la anatomía.
- ✚ Que no produzcan irritación ni zonas de picazón.
- ✚ **Personalizadas** al gusto del paciente.
- ✚ Que sean **cómodas**.
- ✚ Que presenten **mayor resistencia** en puntos de interés.
- ✚ Sin bordes que puedan molestar.
- ✚ Que permitan la **circulación del aire**.
- ✚ Que puedan **abrirse y cerrarse** para revisar la evolución de la lesión.
- ✚ Permitir realizar electroestimulación para que el músculo no se atrofie y se mejoren los tiempos de recuperación.
- ✚ Estéticamente **atractivas y novedosas**.

### 3.3 Aspectos importantes durante el diseño para impresión 3D:

En el diseño CAD debemos de tener presentes ciertos factores que nos influyen a la hora de imprimir.

Se describirán brevemente los más importantes, que tendremos que respetar si queremos obtener un buen resultado. [23]

#### 3.3.1 Grosor mínimo de pared:

El espesor mínimo que puede tener una pared debe de estar formado por lo menos de dos contornos de filamento. Como las boquillas del extrusor con el que vamos a trabajar son de  $0,4\text{ mm}$ , el grosor de la pared tiene que ser como poco de  $0,8\text{ mm}$ .

El mínimo espesor recomendado es de  $1,2\text{ mm}$ .

#### 3.3.2 Calidad superficial y orientación:

Como la impresión se realizará capa a capa, la orientación de la pieza desempeñará un factor muy importante determinando su calidad, fuerza y acabado superficial.

- Debemos de intentar que la “base” de apoyo sea la zona más plana de la pieza, para reducir la cantidad de material soporte.
- Dependiendo de la orientación se va a conseguir distintos acabados superficiales. Si se imprime en la dirección del eje z, el acabado superficial tendrá mejor calidad.
- Dependiendo de la orientación las piezas tendrán diferente resistencia mecánica.

#### 3.3.3 Soportes:

La tecnología de FDM © no puede colocar material sobre el aire, para ello se hace uso de material soporte. Cada capa tiene que ser apoyada en la anterior o se caerá sobre la cama de impresión antes de que se enfríe y solidifique.

Las capas que no están en contacto con capas subyacentes o a la plataforma de impresión, se denominan voladizos y estos no pueden ser impresos sin soporte.

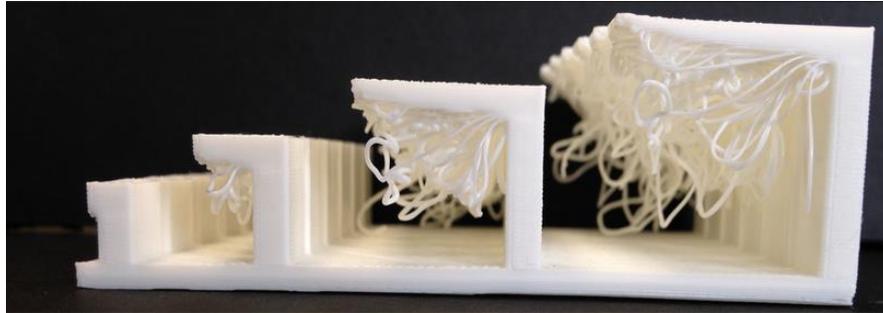


Ilustración 42 - Material impreso sin soporte

[\[https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o\]](https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o)

### 3.3.4 Mínimo ángulo de impresión:

Una alternativa al uso de material soporte es diseñar zonas en las que el ángulo este por debajo de 45°.

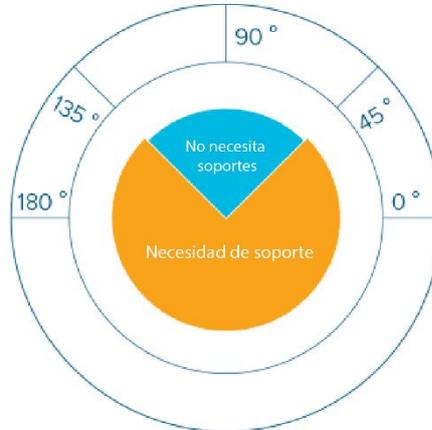


Ilustración 43 - Regla de los 45°

[\[https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o\]](https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o)

Con esto no se quiere decir que el ángulo de 45° sea la zona límite para imprimir sin soporte. Se pueden imprimir zonas con ángulos entre 50° y 60° pero no se garantiza que los resultados obtenidos sean buenos.

### 3.3.5 Encastres:

Para piezas que tengan encastres o que se quieran juntar, es importante dejar cierto juego entre las partes, debido a que el material sufre una pequeña expansión. Por lo tanto, se establece como distancia mínima 0,3 mm para un encastre satisfactorio.

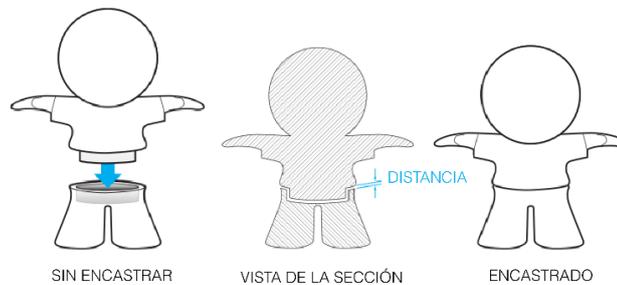


Ilustración 44 – Encastre

[\[https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o\]](https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o)

### 3.3.6 Espacio correcto entre partes móviles:

Cuando se quieren diseñar partes móviles como puede ser una cadena, hay que tener en cuenta la separación entre una superficie y otra. El mínimo espacio entre una y otra vendría dado por 0,4 mm para un buen resultado.

### 3.3.7 Letras, grabados y detalles:

Si se quiere personalizar la pieza con un grabado es recomendable que el trazo de la zona a grabar sea mayor a 1 mm. Mientras que, si se quiere crear un relieve, las piezas podrán ser defectuosas si el trazado es inferior a 2 mm.

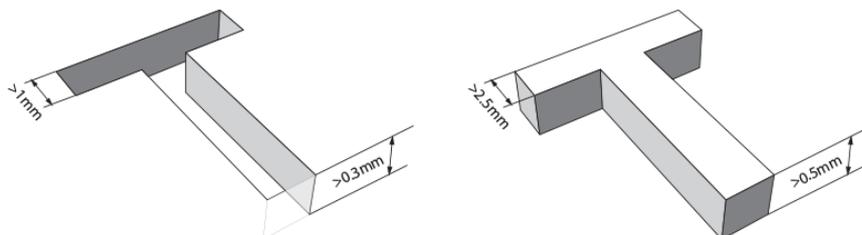


Ilustración 45 - Medidas para relieves y grabados

[\[https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o\]](https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o)

### 3.4 Descripción del modelo de trabajo:

A continuación, se van a describir brevemente los programas con los que vamos a trabajar en este proyecto:

- **Software escáner 3D - EinScan-Pro:** Este programa nos va a permitir crear la nube de puntos deseada, así como eliminar aquellas zonas que no sean de nuestro interés. También permite crear la malla sobre los puntos, pudiendo ser cerrada o abierta. Como último podemos decir que nos permite exportar el archivo en formato .STL para su postproceso, aunque permite exportarlo en otros formatos.
- **Meshmixer:** Es uno de los programas más útiles para editar y modificar archivos de malla de forma rápida. Tiene gran variedad de herramientas que nos permiten trabajar las mallas de forma cómoda para su posterior impresión 3D.
- **Software CAD - Autodesk Fusión 360:** Se trata de uno de los softwares más potentes que se encuentran en el mercado. Permite crear modelos 3D gracias a su gran variedad de herramientas. Es un programa de uso fácil que trabaja con la nube lo que nos permite ver los modelos creados desde cualquier lugar. Su principal uso se centra en el diseño mecánico e industrial. Cuenta con diferentes módulos de trabajo que permite trabajar con sólidos, mallas, superficies... También cuenta con módulo de ensamblaje y análisis geométrico.



AUTODESK®  
FUSION 360™

Ilustración 46 - Logo Fusion 360

[\[https://homeromakers.com.ar/soporte/descargas/autodesk-fusion-360-logo/\]](https://homeromakers.com.ar/soporte/descargas/autodesk-fusion-360-logo/)

### 3.5 Realización del escaneo 3D:

La primera etapa de este proyecto se centra en la toma de datos sobre los que vamos a trabajar. Para ello vamos a utilizar el escáner que hemos definido anteriormente, se trata del modelo EinScan-Pro de SHINNING.

La toma de datos se lleva a cabo en una sala de los laboratorios del Edificio Lucía que se encuentra en el Campus Miguel Delibes de Valladolid, donde se han tenido en cuenta algunos de los factores mencionados en el apartado 3.6.1.

Tendremos en cuenta los siguientes aspectos:

- **Calibración** → Es importante realizar una calibración del instrumento antes de realizar el escaneo para un resultado lo más preciso posible.
- **Iluminación ambiental** → Para obtener unos buenos resultados interesa que la luz tenga una intensidad baja y constante.
- **Color del material** → El color en la digitalización de la mano no presenta problemas en lo referido a la proyección del patrón sobre su superficie para obtener la geometría.
- **Forma del objeto** → La geometría de la mano no presenta problemas para realizar un escaneo en modo manual. Pero es importante que el sujeto se encuentre en una posición estática y no mueva la zona durante el análisis.
- **Parámetros del escáner** → Debemos ajustar el contraste en función de la iluminación de la sala. También hay que elegir la calidad del escaneo, interesa una calidad alta.

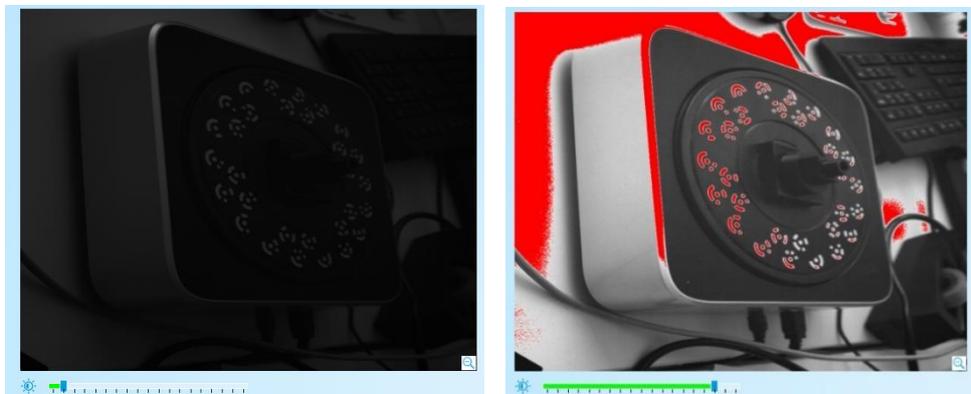


Ilustración 47 - Contraste bajo vs contraste alto

[Elaboración propia]

### 3.5.1 Digitalización automática:

Este modo de digitalización sólo se ha empleado para el apartado 2.6.4. Debemos de situar el escáner sobre el trípode orientándolo hacia la mesa giratoria, dónde se situará el objeto que queremos analizar.

Para saber si nos encontramos a una distancia y orientación adecuada, debemos de seleccionar en el software, modo automático. El proyector lanzará una cruz que debemos de situar sobre la superficie que se quiere escanear.



*Ilustración 48 - Digitalización automática*

[\[https://www.i3datlantico.com/311-thickbox\\_default/einscan-pro.jpg\]](https://www.i3datlantico.com/311-thickbox_default/einscan-pro.jpg)

Podemos realizar una digitalización con la mesa giratoria en movimiento o sin él. Se puede elegir el número de pasos a dar, es decir, cuantos pasos va a realizar la mesa para dar una vuelta completa.

Una vez tengamos la cruz orientada podemos utilizar diferentes tipos de alineación:

- Dianas de la mesa giratoria
- Geometría
- Marcadores
- Marcadores globales

Cuando se trabaja con geometrías que tienen zonas ocultas, o que no se pueden digitalizar con un único escaneo, es necesario realizar varias digitalizaciones. El software alineará automáticamente la nube de puntos cada vez que se añade un escaneo.

A veces, el programa no es capaz de alinear las nubes de puntos, para ello debemos de ir a la barra de herramientas y seleccionar alineación manual. Debemos de marcar tres puntos comunes en las dos nubes, de esta forma alinearemos los resultados a nuestro gusto.

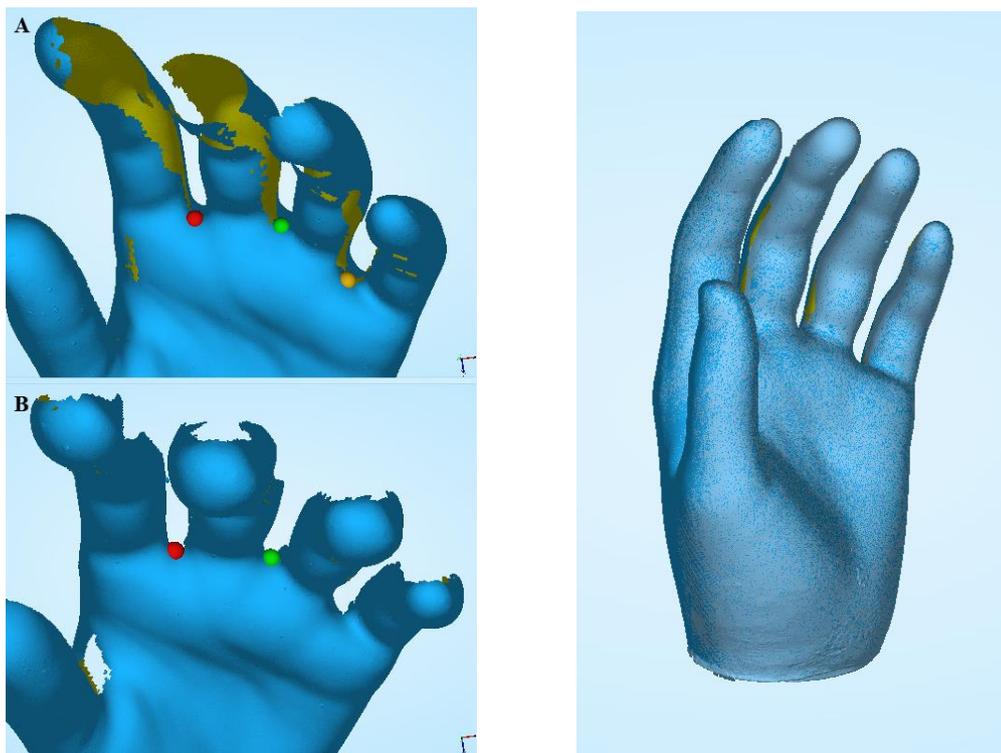


Ilustración 49 - Alineación con EinScan - Pro

[Elaboración propia]

Por último, sólo nos queda mallar el archivo, creando una malla cerrada y exportarla como .STL (formato que representa el modelo 3D con una superficie compuesta por triángulos), para trabajar posteriormente con ella.

### 3.5.2 Digitalización manual:

En primer lugar, debemos de seleccionar el modo manual del escáner. Una vez seleccionado el modo, procedemos a la digitalización.

El programa permite previsualizar antes de empezar a escanear, esto nos permite modificar el contraste para elegir el adecuado antes de empezar. Para iniciar la obtención de la nube de puntos es necesario dar al botón de “play” que se encuentra en el escáner.

Para obtener un buen resultado debemos de guiar el escáner lentamente cogiendo todas las zonas de interés y sin perder la señal de rastreo. En caso de perderla, debemos de buscar la zona donde se dejó de digitalizar para recuperarla.



*Ilustración 50 - Digitalización 3D de la mano*

*[Elaboración propia]*

La zona con la que más problemas se ha tenido es la parte del brazo donde hay más vello, porque este refleja el patrón de luz creando zonas falsas que no corresponden a la realidad.

### 3.5.3 Tratamiento de datos:

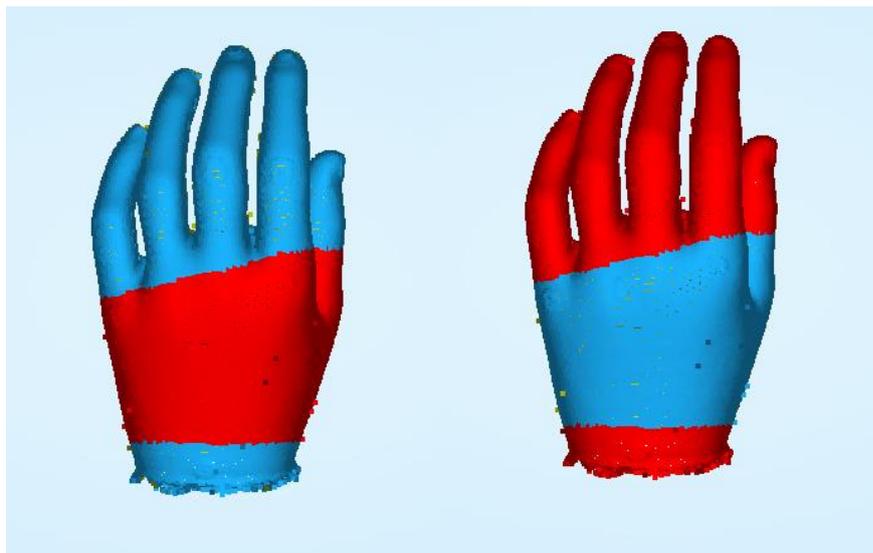
Tras haber realizado la primera digitalización, podemos eliminar aquellas zonas de la nube de puntos que no nos interesen o que hayan salido mal.



*Ilustración 51 - Herramientas software EinScan – Pro*

*[Elaboración propia]*

Estas herramientas nos permiten deshacer, seleccionar la zona de interés, revertir la zona seleccionada o borrar la zona que no nos interese.



*Ilustración 52 - Selección de la zona de interés*

*[Elaboración propia]*

Cuando tengamos seleccionada la parte que nos interesa sólo tenemos que crear la nube de puntos. El programa nos permite priorizar en calidad o en velocidad. Para obtener mejor resultados seleccionamos calidad, aunque el proceso será más lento.

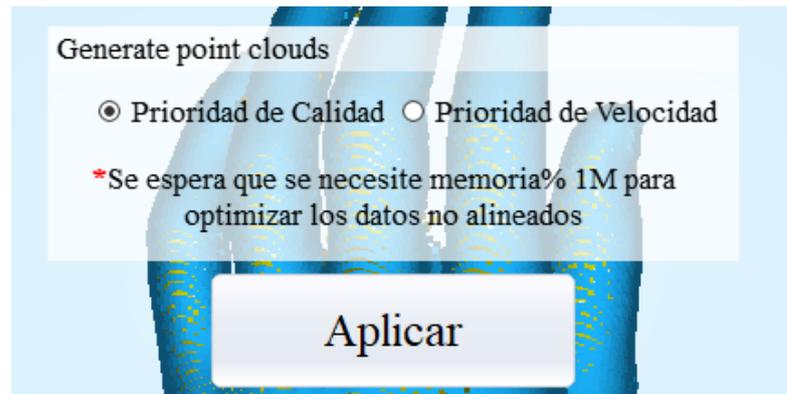


Ilustración 53 - Generación de la nube de puntos

[Elaboración propia]

El software permite cerrar el modelo o dejarlo abierto. Para nuestro estudio esto no nos afecta, aunque elegiremos modelo cerrado para mayor comodidad. Sólo nos queda exportar el archivo, para ello pinchamos en el símbolo de guardar marcando las casillas suavizar y afilar para obtener el mejor acabado posible.

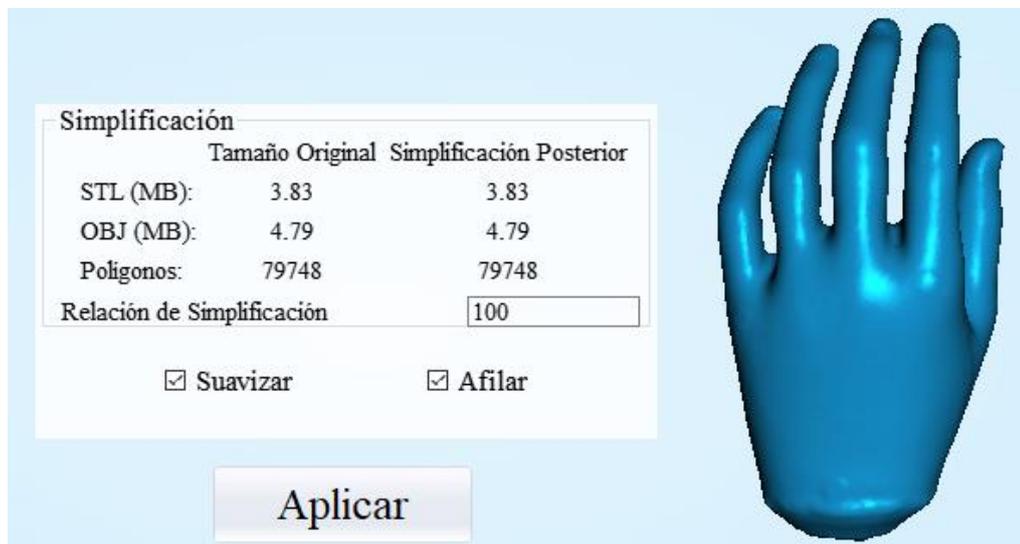


Ilustración 54 - Suavizar y afilar el archivo

[Elaboración propia]

Por último, sólo nos queda marcar la casilla de archivo .STL para poder imprimirlo en 3D directamente o modificarlo con otros programas, como se va a realizar en este proyecto.

### 3.6 Análisis y corrección de la malla:

Para una primera corrección del archivo exportado, hemos utilizado Meshmixer ©, que nos permite obtener un archivo limpio de forma rápida y sencilla.

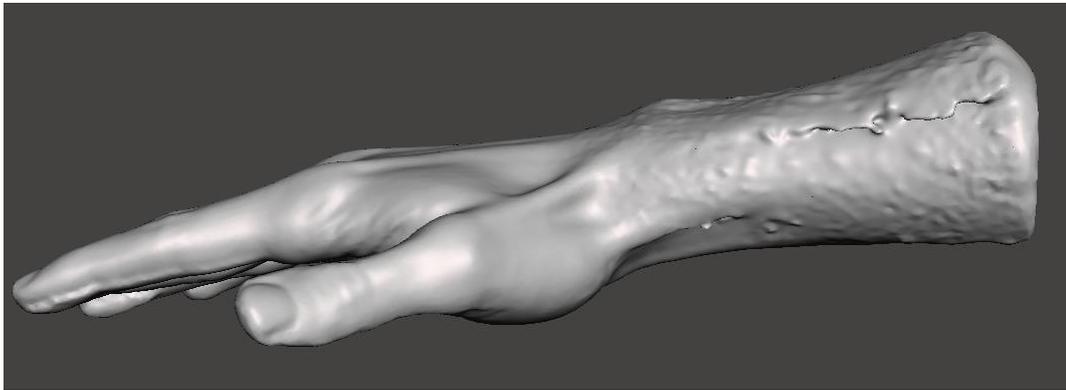


Ilustración 55 - Archivo .STL exportado del software del escáner 3D

[Elaboración propia]

Como se puede apreciar en la imagen, aunque el resultado obtenido del programa del propio escáner es bastante aceptable, vemos que en la zona de la parte inferior del brazo tiene problemas para obtener un resultado adecuado. Esto es debido a lo comentado en el apartado anterior, producido por el vello del brazo.

Para solucionar este problema utilizamos el siguiente comando del programa Meshmixer, dejando por defecto los valores que nos da el programa de fuerza, tamaño y profundidad:

- Sculpt / Brushes / ShrinkSmooth / Recorrer con el pincel las zonas a corregir

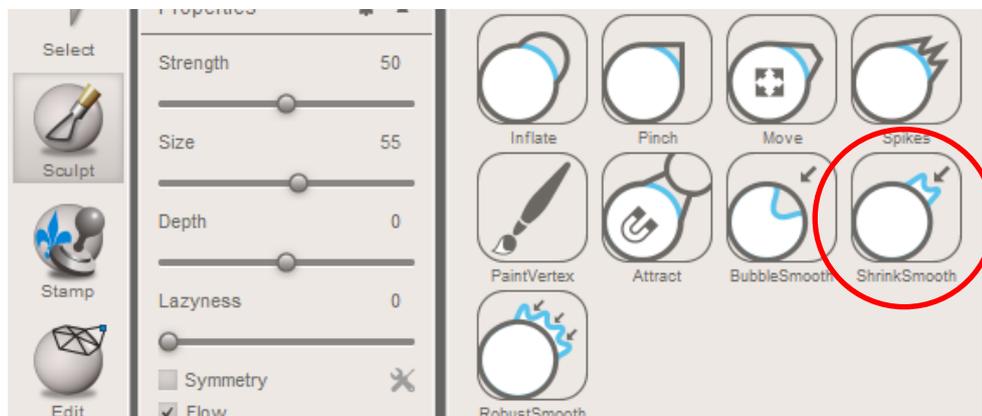
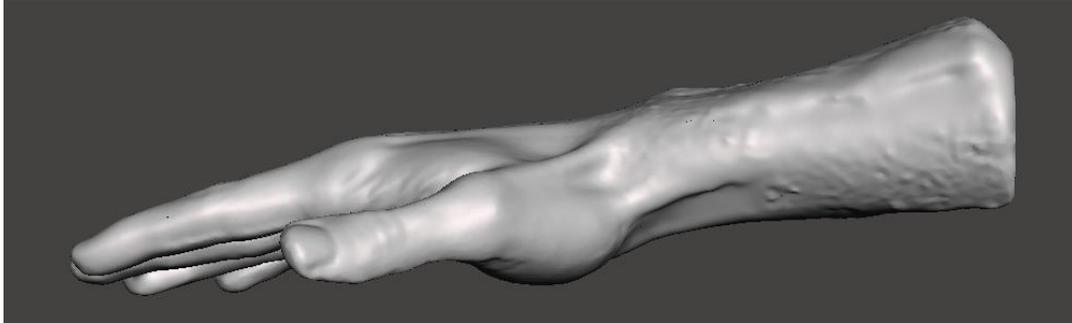


Ilustración 56 - Interfaz Meshmixer

[Elaboración propia]

A continuación, se muestra el resultado de aplicar la corrección en la zona afectada, para alisar aquellas partes que no han salido bien.



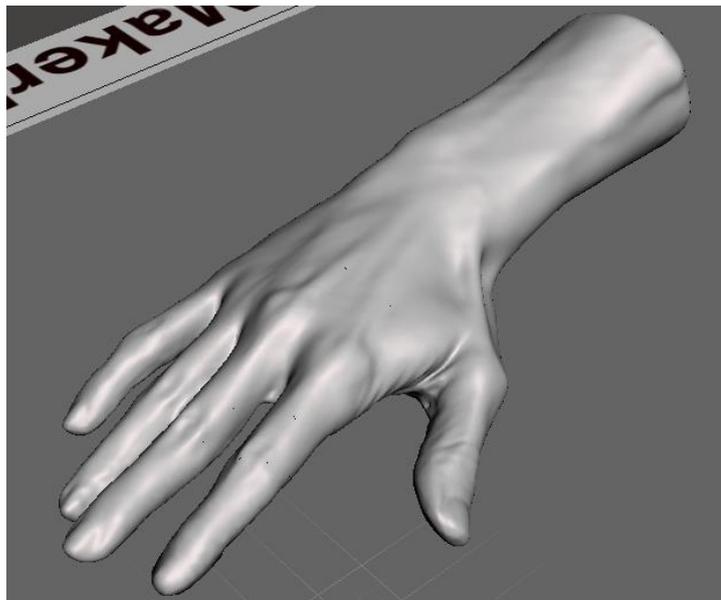
*Ilustración 57 - Resultado de aplicar ShrinkSmooth*

*[Elaboración Propia]*

Todavía podemos mejorar el archivo aplicando un refinamiento de la zona, para ello actuamos de forma similar a la anterior:

- Sculpt / Brushes / Refine / Pasamos el pincel por las zonas a corregir

El resultado obtenido es el siguiente, donde se observa que la zona en la que se había tenido problemas queda lisa y con la geometría deseada:



*Ilustración 58 - Refinamiento con Meshmixer*

*[Elaboración propia]*

### 3.7 Tratamiento con Fusion 360:

#### 3.7.1 Importación del mallado:

A través de Meshmixer obtenemos el archivo en formato STL. corregido, para realizar la primera parte del proceso utilizamos el módulo de Fusion 360 → Mesh.

En primer lugar, tenemos que abrir el archivo con el que vamos a trabajar:

- *Abrir Fusion 360 / File / Open / Open from my computer / Seleccionamos el archivo que deseamos.*

Para seleccionar el módulo Mesh, sólo tenemos que cambiar el espacio de trabajo al que nos interesa.

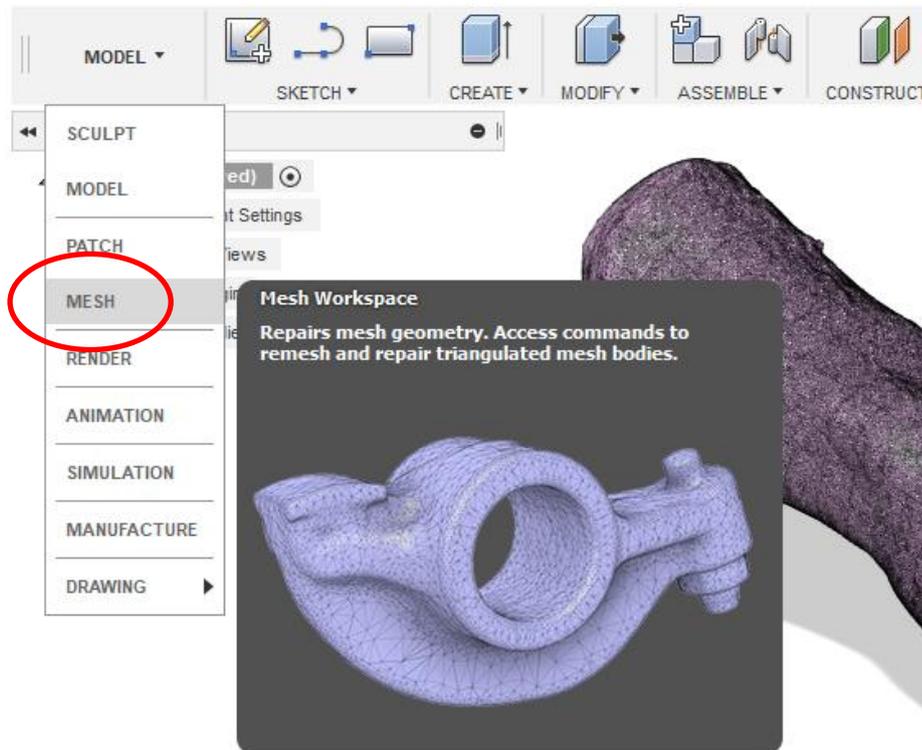


Ilustración 59 - Mesh Workspace

[Elaboración propia]

### 3.7.2 Análisis y tratamiento de mallas:

Una vez importado el archivo, nos encontramos con una malla formada por un gran número de triángulos que representan la mano escaneada:



*Ilustración 60 - Archivo importado en Fusion 360*

*[Elaboración propia]*

En ocasiones la malla con la que trabajamos es demasiado densa por lo que tenemos que reducir el número de triángulos. Esto sirve para poder manipular mejor la malla y reducir su tamaño en referencia a la memoria que necesita el ordenador.

Lo único que tenemos que hacer desde el espacio de trabajo Mesh, es lo siguiente:

- Mesh Workspace / Seleccionar el cuerpo completo / Modify / Reduce.

El programa nos permite seleccionar la densidad con la que se quiere reducir, lo más común es aplicar un valor entre 0,1 – 0,25 de su valor real. Es decir, si aplicamos una densidad de 0,1 nos quedamos con un 10% de los triángulos que teníamos inicialmente.

El programa nos deja elegir el tipo de reducción a aplicar, pudiendo ser de tipo adaptada o uniforme. En nuestro caso nos interesa que sea adaptada para que el resultado sea lo más adecuado posible.

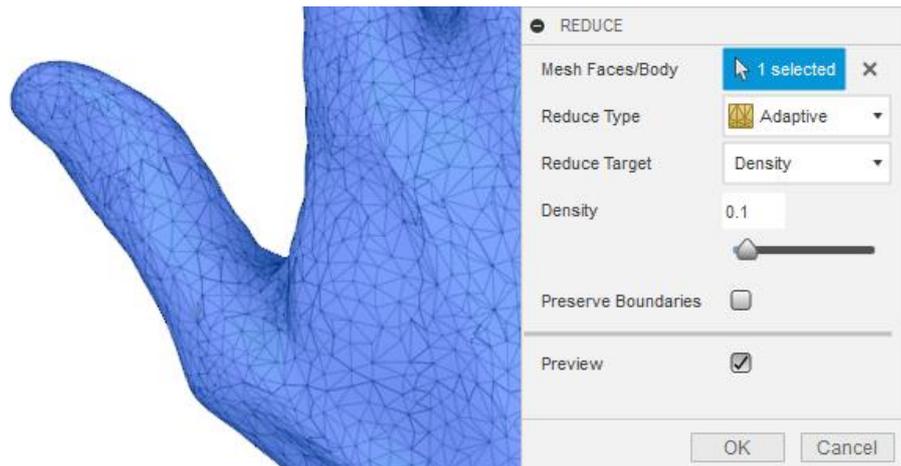


Ilustración 61 - Densidad del mallado

[Elaboración propia]

Una vez hemos reducido la malla, tenemos que cortarla según la zona con la que vamos a trabajar, para ello desde Mesh:

- Mesh Workspace / Modify / Plane Cut

Seleccionamos la malla sobre la que se va a actuar, el tipo de corte que deseamos borrando la parte que no nos interesa y el relleno que se utiliza en el corte.

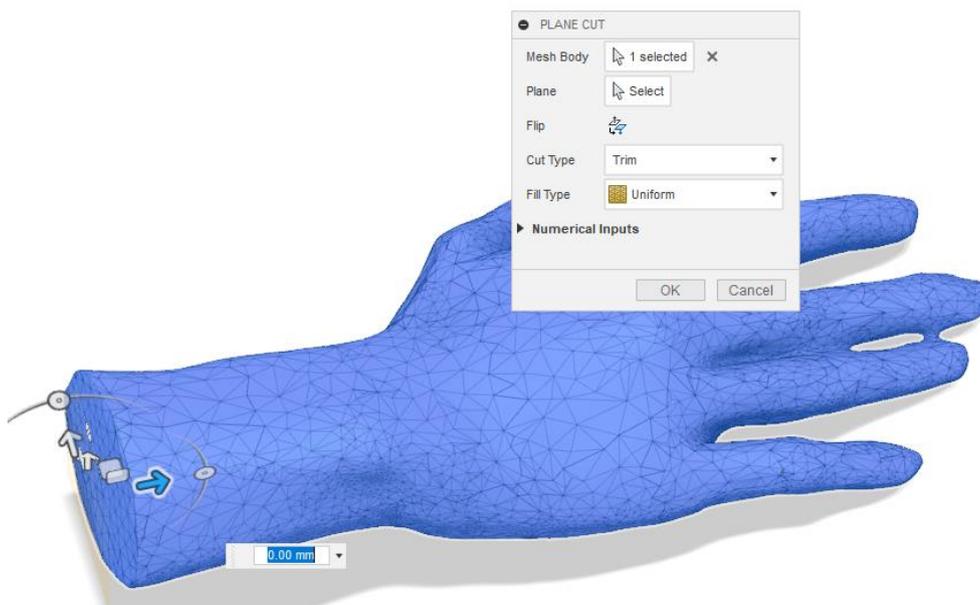


Ilustración 62 – Plano de corte de la malla

[Elaboración propia]

El resultado después de aplicar los planos de corte para quedarnos con la zona de interés es el siguiente:

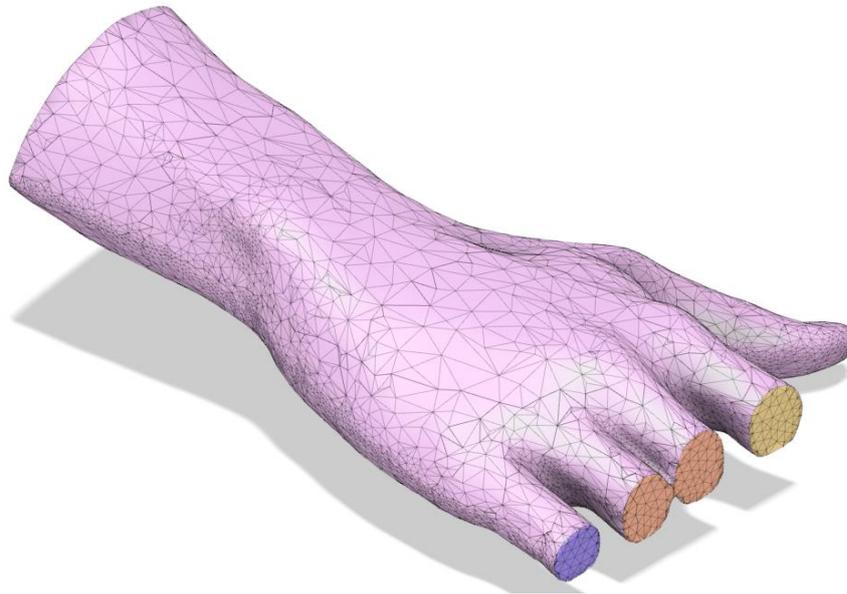


Ilustración 63 - Zona de interés de la mano

[Elaboración propia]

### 3.7.3 Generación de contornos:

Para obtener el contorno sobre el que se va a generar el modelo sólido de la férula tenemos que realizar la siguiente operación:

- Model Workspace / Sketch / Mesh / Create Mesh Section Sketch

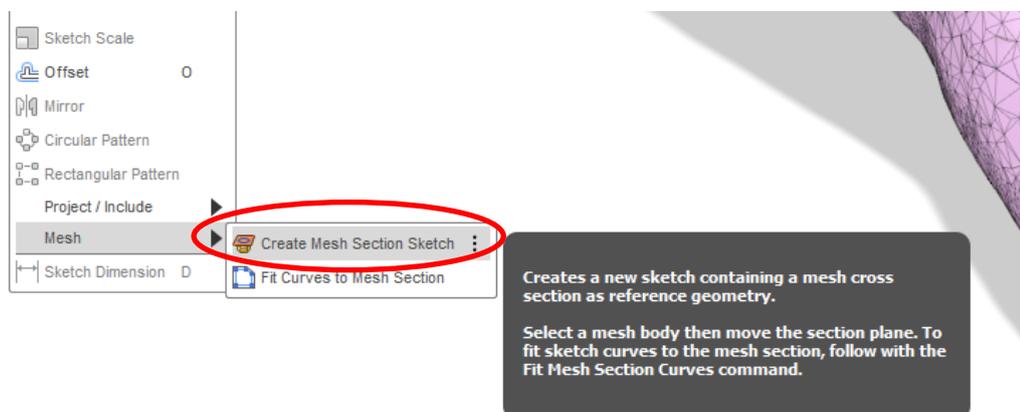
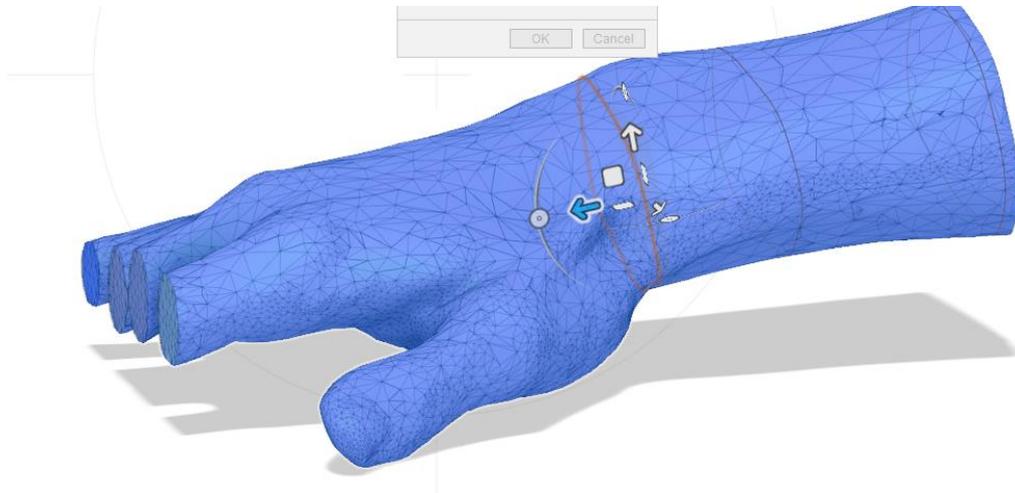


Ilustración 64 – Create Mesh Section Sketch

[Elaboración propia]

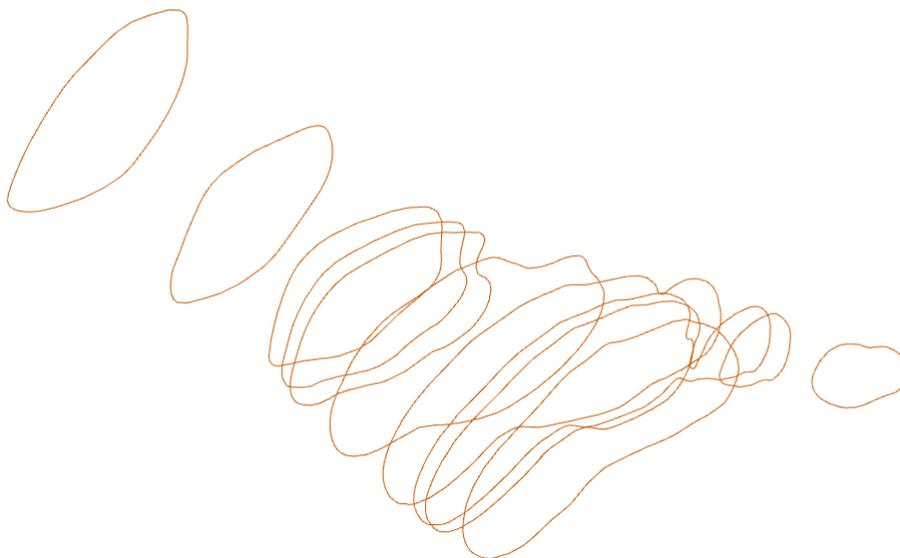
Debemos generar varios contornos para crear la superficie deseada que describa la geometría de la mano en función de nuestro interés:



*Ilustración 65- Contorno sobre la mano*

*[Elaboración propia]*

A continuación, podemos ver los diferentes contornos de la mano que se van a utilizar para diseñar la férula.



*Ilustración 66 - Contornos de la mano*

*[Elaboración propia]*

Una vez tenemos los contornos creados, tenemos que seleccionar aquella parte de ellos que nos sirva para crear la férula. Para ello, seleccionamos los contornos generados en el apartado anterior.

- Model Workspace / Sketch / Mesh / Create Mesh Section Sketch

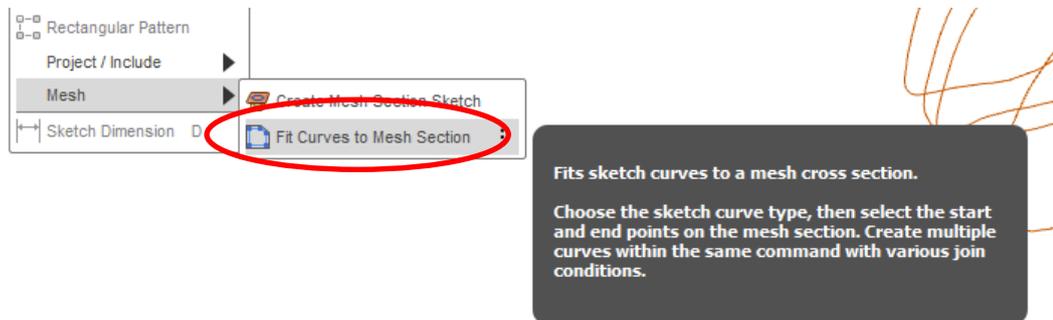


Ilustración 67 - Fit Curves to Mesh Section

[Elaboración propia]

Esta herramienta nos permite seleccionar la parte de los contornos que nos interesa, creando secciones (color azul) cerradas o abiertas. Por ejemplo, en la zona del pulgar nos interesa tener un hueco, por lo tanto, sólo seleccionamos una parte de la sección mediante dos puntos, eligiendo la curva más larga dentro de la sección.

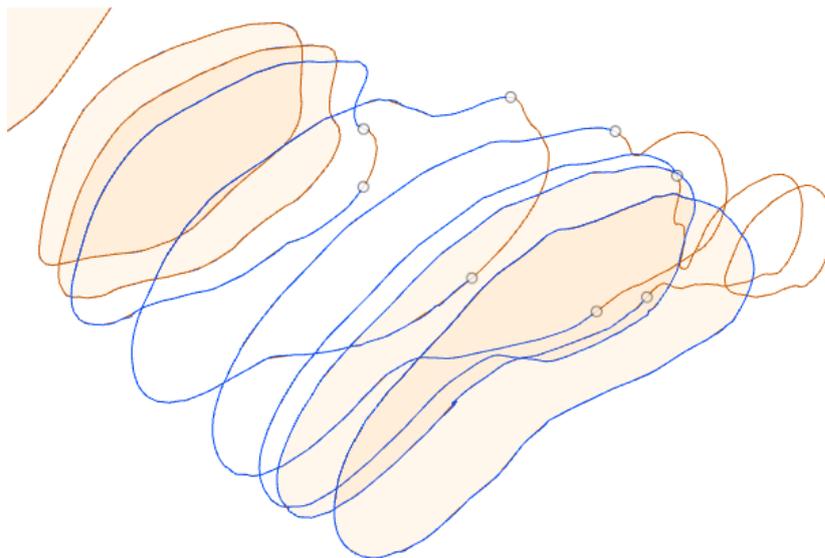


Ilustración 68 - Secciones de la mano (azul)

[Elaboración propia]

### 3.7.4 Generación de superficies:

Para crear el sólido de contacto con la mano, que vendría a representar la superficie de esta, utilizamos el siguiente comando:

- Patch Workspace / Create / Loft / Seleccionamos las secciones de interés

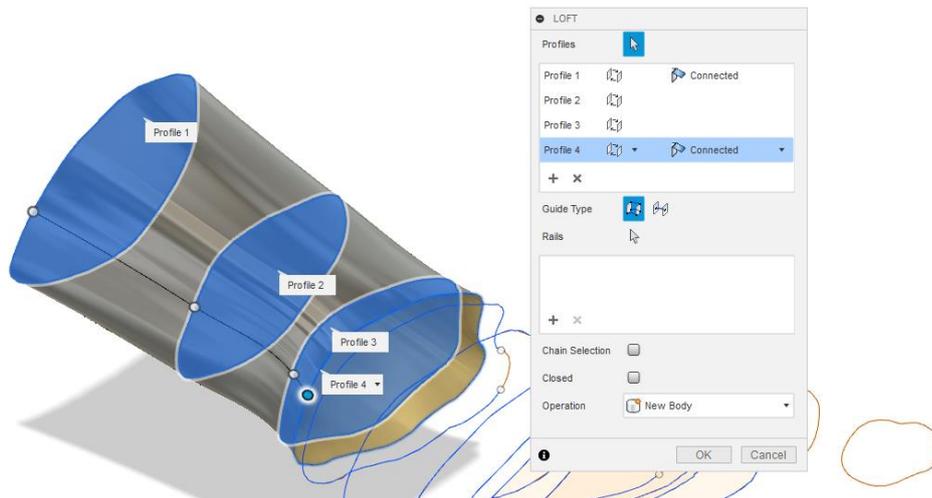


Ilustración 69 - Generación de superficie mediante varias secciones

[Elaboración propia]

Para poder trabajar sin errores, hemos dividido esta operación en tres partes que luego uniremos. Si se intenta hacer todo en esta operación el programa nos dará un error porque no puede unir secciones enteras con curvas de sección abiertas (zona del pulgar).

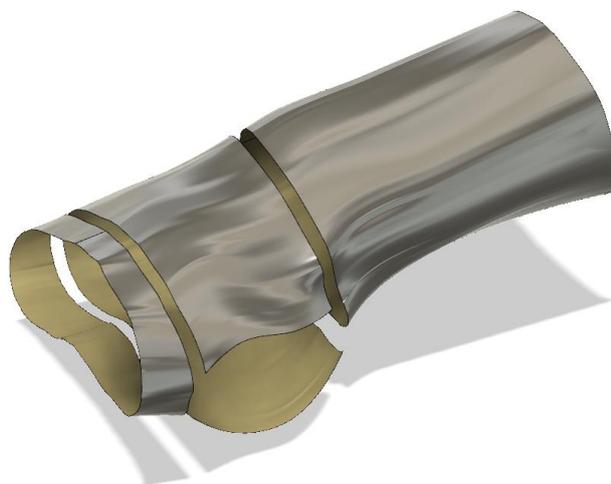


Ilustración 70 - Superficies principales

[Elaboración propia]

### 3.7.5 Mallado de la superficie:

Para poder unir los modelos sólidos generados es necesario convertirlos en múltiples superficies (T-Splines) para poder trabajar de una forma más cómoda con ellos.

Para ello:

- Sculpt Workspace / Utilities / Convert / Converts BRep faces to a T-Spline face / Seleccionamos la superficie

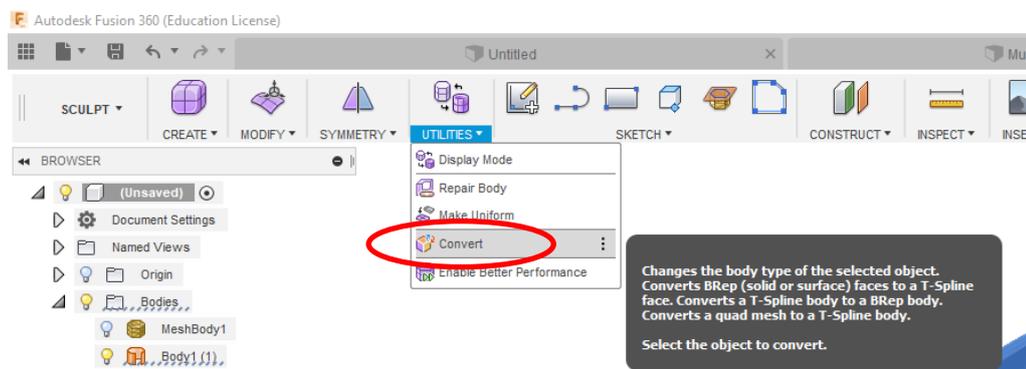


Ilustración 71 - Converts BRep faces to a T-Spline face

[Elaboración propia]

Cuando realizamos esta operación, el programa nos permite determinar el número de mallas en el que se quiere dividir la superficie tanto a lo largo como a lo ancho.

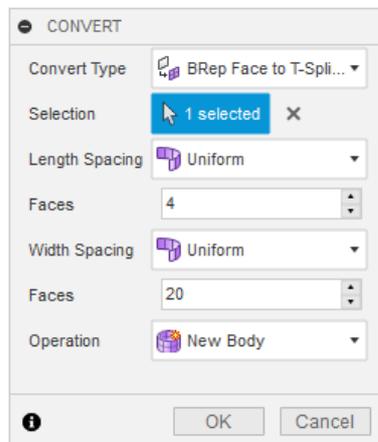


Ilustración 72 - Divisiones en el ancho de la superficie

[Elaboración propia]

Tras varias pruebas, se ha determinado que, con 20 caras a lo ancho de la superficie el resultado es satisfactorio.

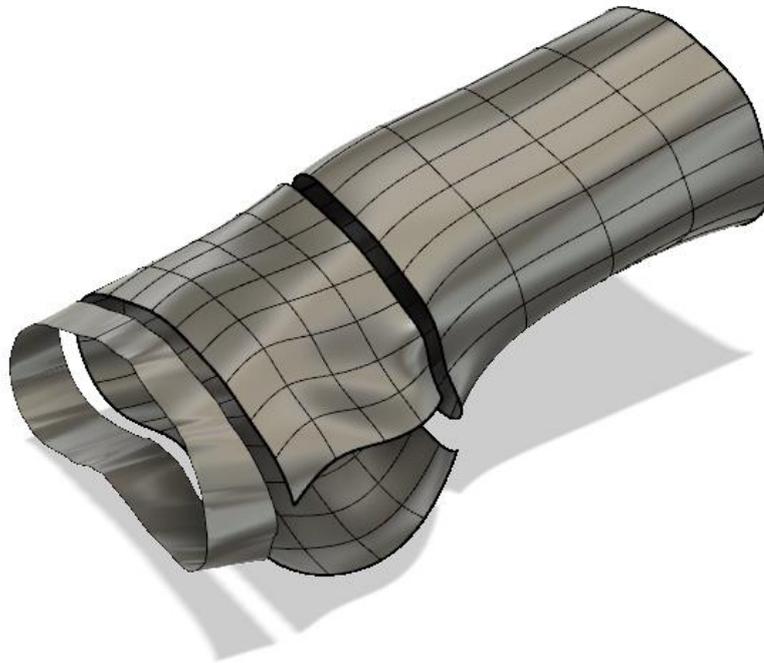


Ilustración 73 - Mallado de las superficies

[Elaboración propia]

### 3.7.6 Unión del mallado:

Para unir las superficies que están separadas tenemos que usar el siguiente comando:

- Sculpt Workspace / Modify / Merge Edge

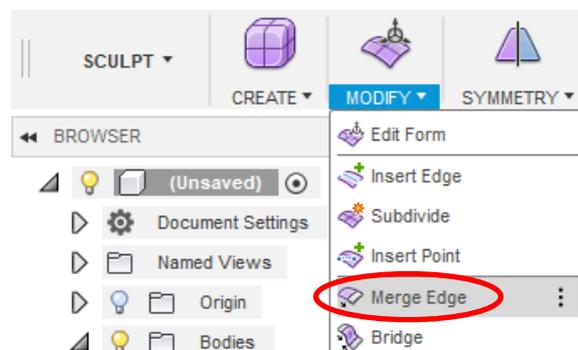
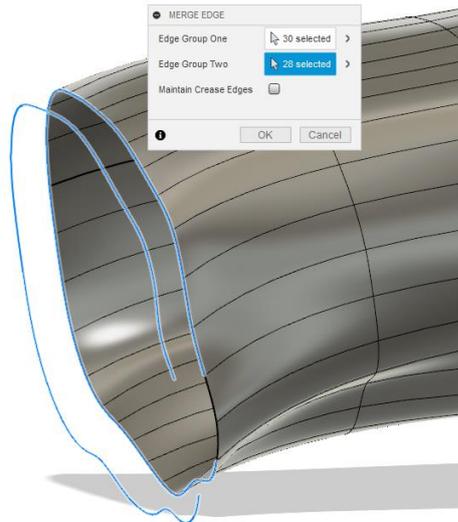


Ilustración 74 - Merge Edge

[Elaboración propia]

La unión se obtiene seleccionando los bordes de las superficies. En primer lugar, seleccionamos los del contorno abierto y después marcamos los del contorno cerrado.

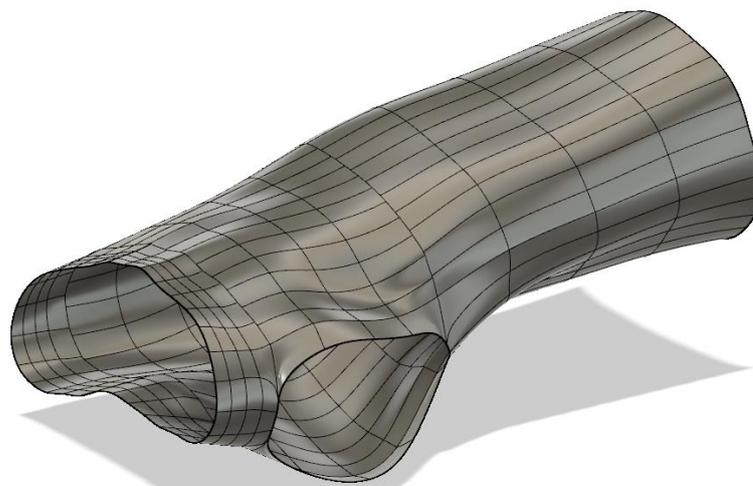
Nos interesa que en la zona del pulgar exista un hueco, por lo que en la parte que se va a unir la sección cerrada con la abierta no debemos de seleccionar todos los puntos, de esta forma el hueco se genera correctamente como se puede observar en la *ilustración 73*.



*Ilustración 75 - Unión del mallado*

*[Elaboración propia]*

Después de realizar la operación con las diferentes superficies el resultado que obtenemos es el siguiente:



*Ilustración 76 - Modelo cerrado del mallado*

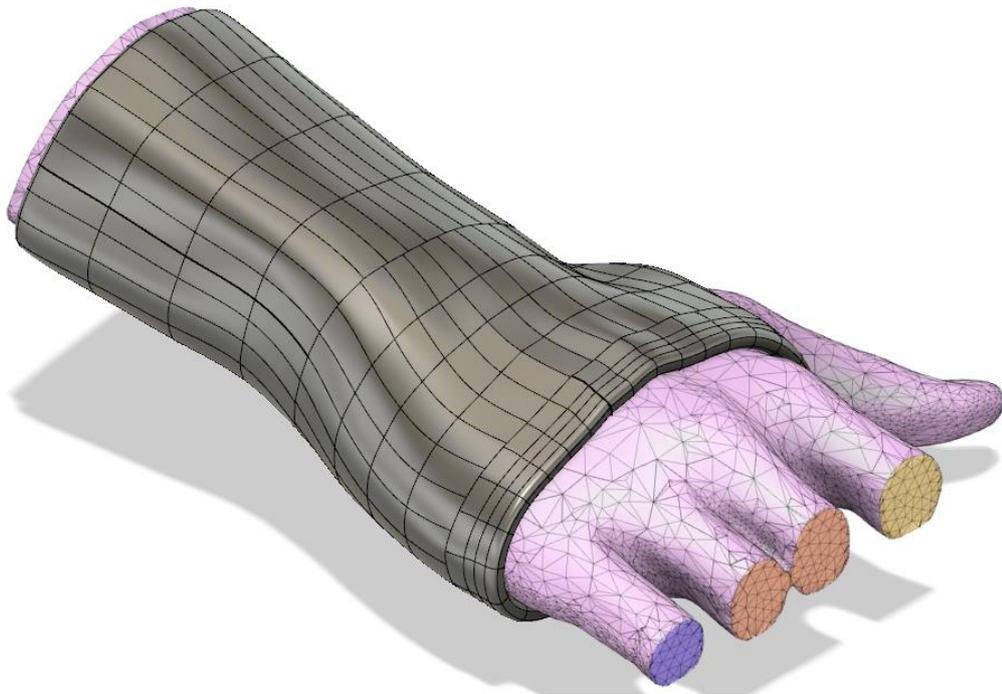
*[Elaboración propia]*

### 3.7.7 Espesor de la malla:

Cuando hemos unido las superficies del modelo, sólo tenemos que dotarlas de un cierto espesor, en nuestro caso serán 5 mm que es una medida óptima para el resultado que queremos obtener.

Para dar el espesor tenemos que utilizar el siguiente comando:

- Sculpt Workspace / Modify / Thicken / Seleccionamos la superficie / Marcamos el espesor desado



*Ilustración 77 - Molde mallado*

*[Elaboración propia]*

El propio programa nos da la opción de que el espesor quede de forma redondeada o de forma rectangular. Se ha dado un espesor redondeado debido a que proporciona un aspecto más estético.

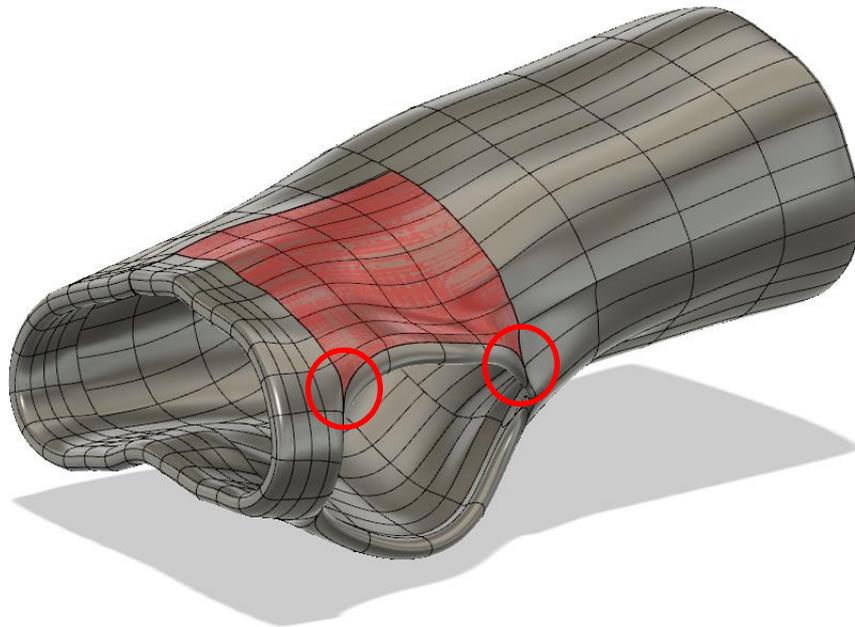
**Nota:** Es conveniente dar un espesor sin relleno de la superficie de unos 2,5 mm y después aplicar el espesor con relleno del material. Este espesor dotará a la férula de una cierta holgura que permitirá colocar una espuma autoadhesiva para mayor comodidad.

### 3.7.8 Conversión de la malla en sólido:

Para poder exportar el archivo en formato .STL debemos de convertir las superficies en sólido:

- Sculpt Workspace / Utilities / Convert / Converts T-Spline face to a BRep face

En ocasiones, el programa no es capaz de realizar esta operación porque al dar el espesor algunas de las superficies se superponen unas con otras, impidiendo crear un sólido completo. Esto lo podemos solucionar subdividiendo los bordes de conflicto que nos determinará el programa o generando contornos más juntos buscando una mayor precisión en la forma.



*Ilustración 78 - Superposición de T-Splines*

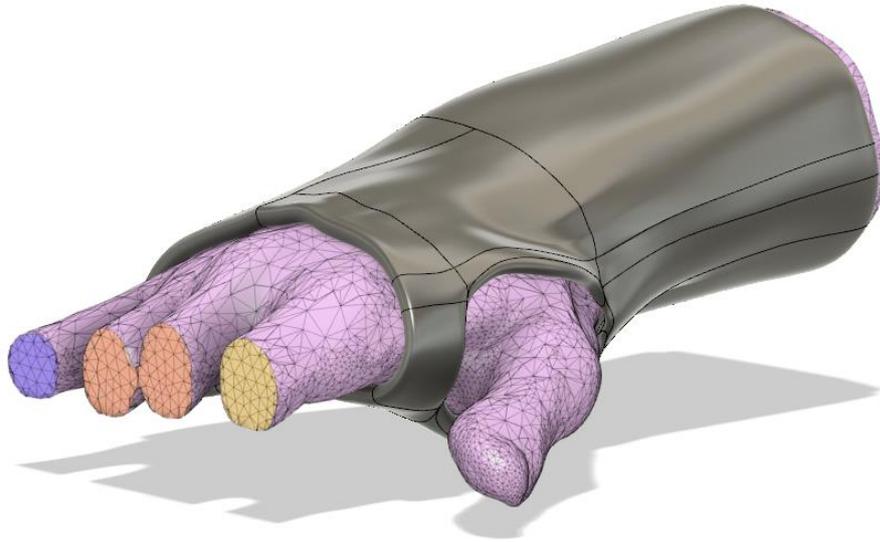
*[Elaboración propia]*

En la *ilustración 76* se muestran los bordes que están superpuestos generando el problema. El comando para subdividir las mallas que nos causan este problema es el siguiente:

- Sculpt Workspace / Modify / Subdivide / Seleccionamos las mallas de conflicto

Una vez hemos subdividido las mallas, repetimos el comando descrito al comienzo de este apartado para obtener el modelo sólido.

Este modelo podría exportarse directamente en .STL para su impresión 3D, aunque en nuestro caso se modificará.



*Ilustración 79 - Modelo sólido*

*[Elaboración propia]*

### 3.7.9 Elección de cierres:

Para poder fijarnos la férula a la mano tenemos que dividirla en dos mitades y montar unos cierres adecuados. Se han diseñado el siguiente modelo que se adapta a nuestros objetivos.

Se explicará con detalle el diseño del cierre que se ha considerado más efectivo.

#### *3.7.9.1 Unión por cierres circulares:*

Estos cierres tienen un diseño sencillo y rápido que nos proporcionan un ajuste adecuado a los objetivos que buscamos.

En primer lugar, tenemos que diseñar el cierre, se trata de una anilla circular que se va a introducir en una zona saliente que se añadirá a la férula.

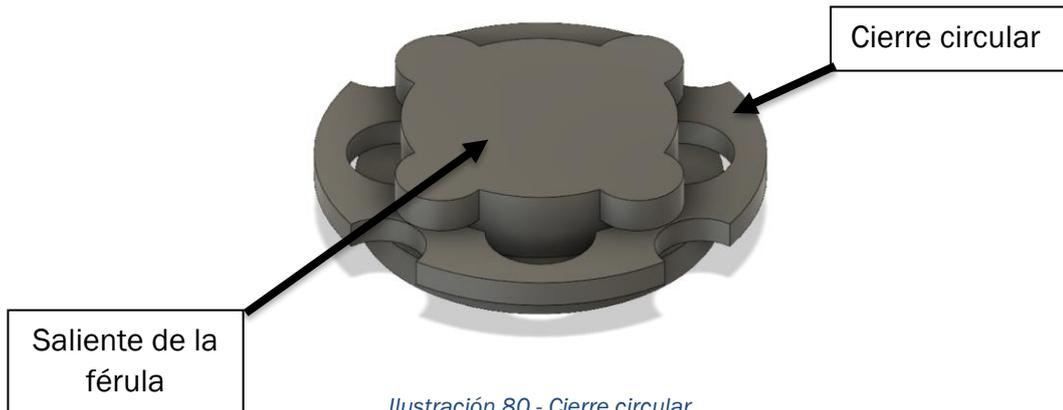


Ilustración 80 - Cierre circular

[Elaboración propia]

El saliente tiene forma circular con unas pestañas que se encargan de bloquear la anilla una vez que se introduce en la rendija y se gira. Sus medidas pueden variar en función de la zona donde se deseen colocar.

Una vez tenemos la zona saliente y el cierre diseñados pasamos a trabajar con el modelo sólido de la férula.

La ventaja que nos ofrecen estos cierres es que nos permiten situarlos en la férula en un mismo plano. Esto es provechoso a la hora de imprimir porque no se necesita material soporte para las primeras capas.

Creamos un plano en la zona media de la férula por donde será dividida en dos con el siguiente comando:

- Model Workspace / Modify / Split Body / Seleccionamos el cuerpo que deseamos cortar y el plano de corte que deseemos.

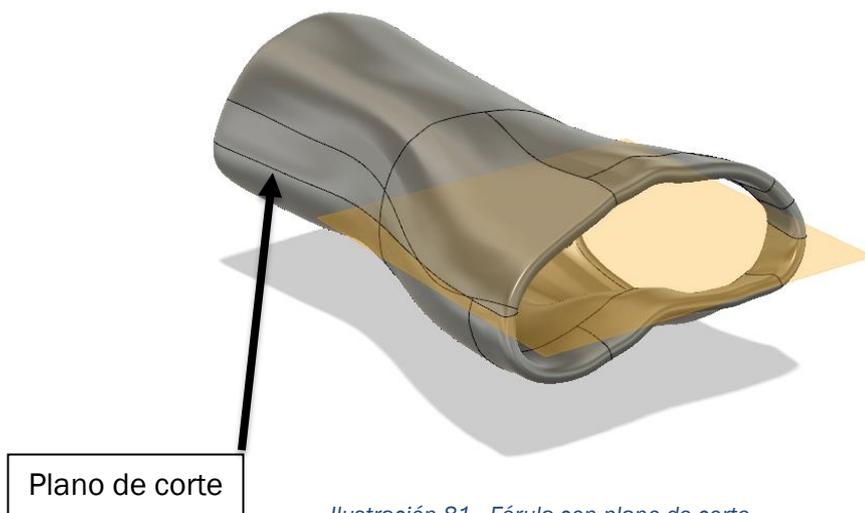
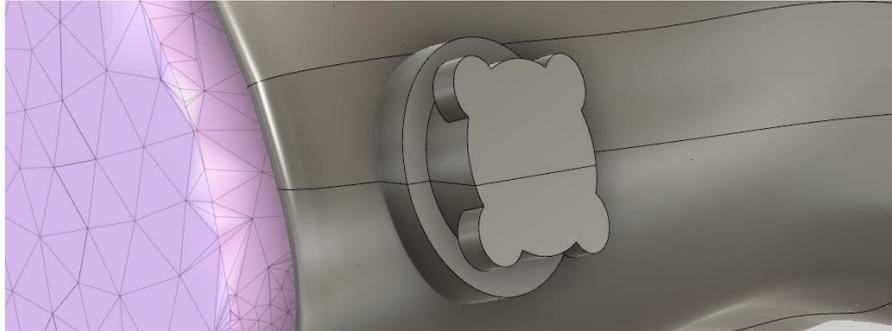


Ilustración 81 - Férula con plano de corte

[Elaboración propia]

Vamos a colocar tres salientes por cada parte. Esta operación se puede realizar de varias formas. Para no complicarnos, hemos copiado el saliente en la misma zona de trabajo de la férula, orientándolo según nuestro interés y lo hemos combinado con ella.

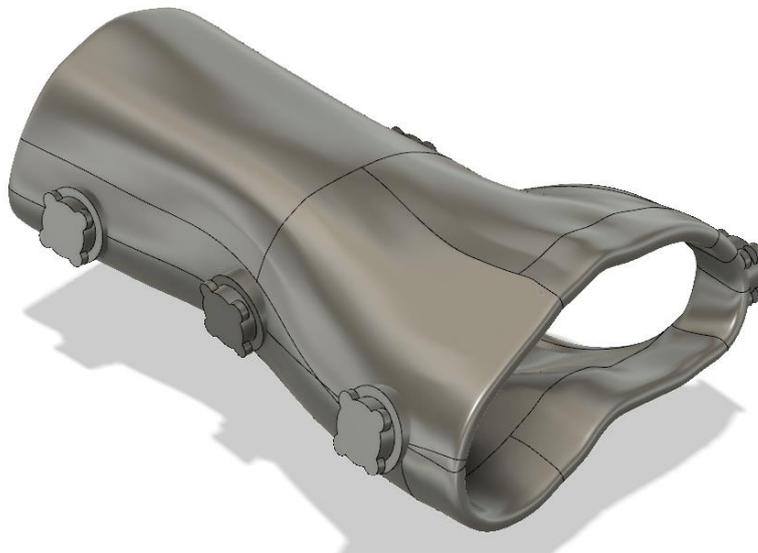
- Model Workspace / Modify / Combine / Seleccionamos los cuerpos que deseamos combinar (férula + saliente).



*Ilustración 82 – Combinación férula - cierre*

*[Elaboración propia]*

El resultado de colocar todos los salientes en la férula en las zonas de interés es el siguiente:



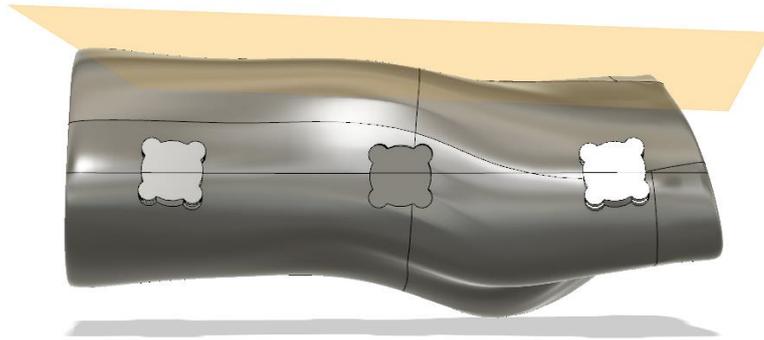
*Ilustración 83 - Férula con cierres circulares*

*[Elaboración propia]*

Por último, sólo nos queda eliminar parte sólida de la férula para obtener un diseño más estético y menos pesado.

Para modelar curvas, polígonos... en una superficie tenemos que llevar a cabo las siguientes operaciones:

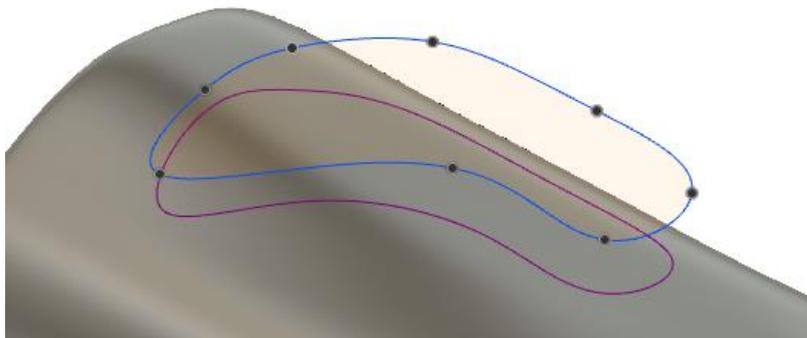
1. Crear un plano lo más tangente posible a la superficie seleccionando: Model Workspace / Construct / Tangent Plane o Offset Plane / Colocamos el plano lo más tangente posible.



*Ilustración 84 - Plano tangente a la superficie*

*[Elaboración propia]*

2. Crear la geometría que nos interesa plasmar en el plano tangente y proyectarla sobre la superficie: Model Workspace / Sketch / Project / Project to surface.



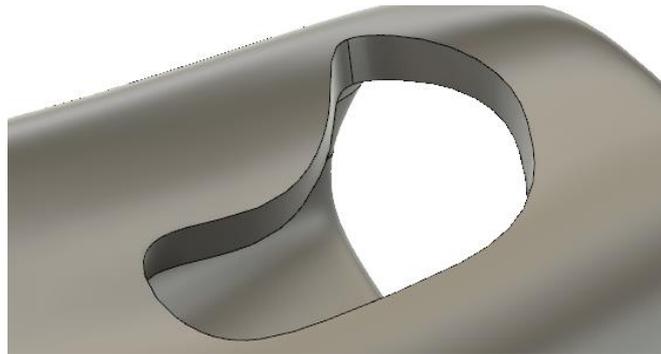
*Ilustración 85 - Proyección sobre superficie*

*[Elaboración propia]*

3. Una vez tengamos las geometrías proyectadas tenemos que hacer que formen parte del sólido: Model Workspace / Modify / Split Face / Seleccionamos el cuerpo y la proyección.

**Nota:** Si se trabajan con diferentes geometrías en los sketches, habrá que realizar la proyección de estos de forma individual uno a uno. Como alternativa se puede realizar una extrusión negativa seleccionando todas a la vez, pero se obtienen peores resultados.

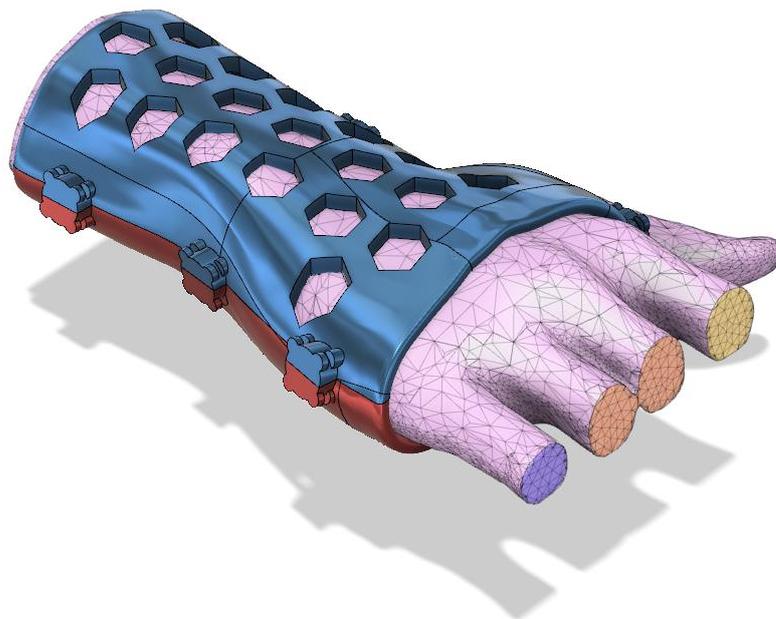
4. Por último, sólo tenemos que hacer una extrusión negativa de la proyección sobre el molde para eliminar el material que no nos interesa: Model Workspace / Modify / Press Pull / Seleccionamos superficie que queremos extruir.



*Ilustración 86 - Extrusión de la proyección*

*[Elaboración propia]*

Se pueden crear distintas formas para hacer la férula más ligera, se muestra a continuación un modelo con panel de abeja.



*Ilustración 87 - Férula con formas aleatorias*

*[Elaboración propia]*

### 3.8 Principales fabricantes de férulas mediante impresión 3D:

A continuación, se describen brevemente los principales fabricantes de este tipo de férulas en España.

#### 3.8.1 Fiixit Orthotic Lab ©:

Se trata de una startup malagueña que está desarrollando férulas de inmovilización con un diseño adaptativo y ergonómico gracias a la impresión 3D.

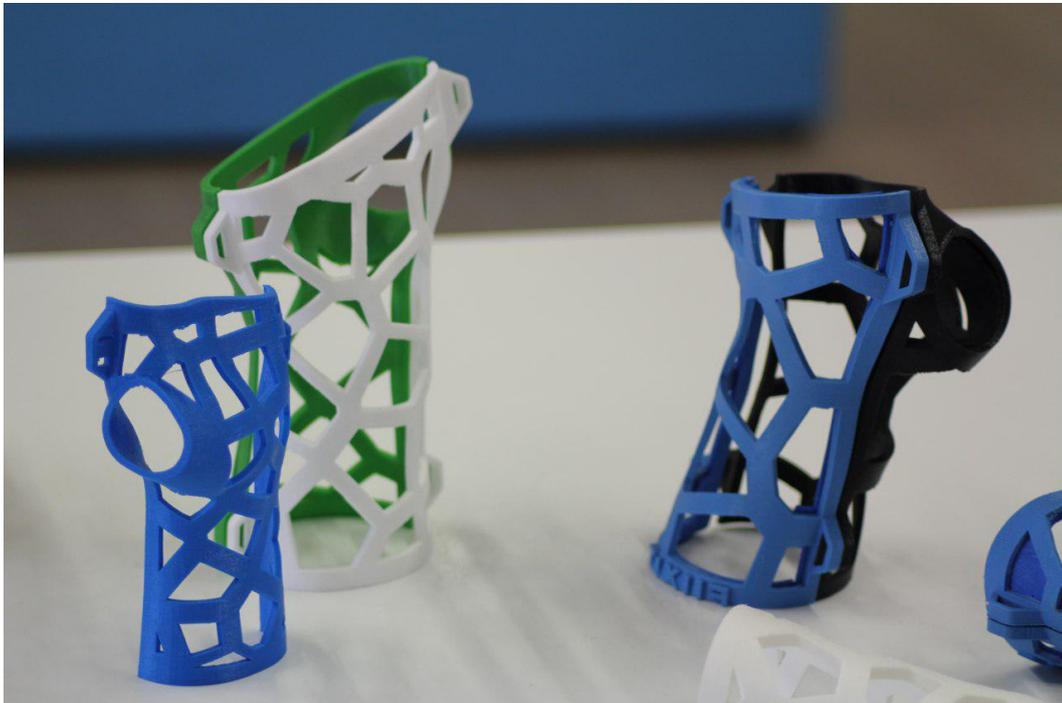


Ilustración 88 - Férula Fiixit

<https://andalucia.openfuture.org/blog/notas-de-prensa/startups-que-innovan-sector-la-salud/>

Las férulas se adaptan a cada paciente, y son personalizables, de un material compatible con el contacto de la piel, transpirables, ligeras y sumergibles. También colaboran con traumatólogos, fisioterapeutas y ortopedas para obtener los mejores resultados posibles. [17]

Podemos destacar que sus procesos cumplen con la norma **ISO 13485**, se trata de una norma acordada internacionalmente que establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad específico para la industria de dispositivos médicos.

### 3.8.2 Xkelet ©:

Xkelet es una empresa catalana que ha desarrollado férulas mediante impresión 3D personalizadas para cada paciente y destinadas para inmovilizaciones post-traumáticas y terapéuticas.

También han desarrollado una app, *XKApp* que facilita el escáner de la extremidad y la conversión del modelo digital a una pieza final de plástico. Esta app permite elegir el sistema de cierre, el color y la disposición de las aberturas para las curas si es necesario.



Ilustración 89 - Férula Xkelet

[\[https://www.xkelet.com/\]](https://www.xkelet.com/)

Para la unión de las dos partes de la férula en caso de que fuera necesario, utilizan O-Ring o junta tórica. Se trata de una junta de forma toroidal, habitualmente de goma, cuya función es asegurar la unión entre las diferentes piezas para la inmovilización.

### 3.8.3 Exovite ©:

Exovite es un grupo de especialistas que trabaja en el desarrollo de férulas ergonómicas adaptadas a las necesidades de cada paciente, siendo cada una única y personalizada garantizando así su comodidad y efectividad. Trabajan con materiales biocompatibles, por lo que son amigables con la piel. [19]



*Ilustración 90 - Férula Exovite*

[\[http://www.exovite.com/es/tag/ferula/\]](http://www.exovite.com/es/tag/ferula/)

Trabajan con su propio programa, Exoscan con el que escanean el área afectada y generan una férula a medida que posteriormente imprimen en 3D.

Esta empresa también está especializada en el desarrollo de férulas para animales, para ayudar en su bienestar.



*Ilustración 91 - Férula para animales*

[\[http://www.exovite.com/es/2017/03/23/exovite-en-iberzoopropet17/\]](http://www.exovite.com/es/2017/03/23/exovite-en-iberzoopropet17/)

#### 3.8.4 Younext Healthcare ©:

Es una empresa de Zaragoza especializada en diseño y fabricación de productos personalizados a través de tecnología en impresión 3D.

Cuenta con uno de los laboratorios de fabricación aditiva más avanzados a nivel mundial. Trabajan con materiales biocompatibles, resistentes al desgaste y biodegradables.



*Ilustración 92 - Férula younext*

[\[https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ferulas-inmovilizadoras-superiores/\]](https://www.younext.es/productos/inmovilizaciones/ferulas-inmovilizadoras-superiores/)

Esta empresa no sólo se centra en la fabricación de férulas, además trabajan en el desarrollo de bio-réplicas de la zona auditiva, zona dental...

Gran parte de su trabajo está orientado a deportistas, fabrican espinilleras de alta resistencia al impacto y espesor mínimo. También fabrican hormas personalizadas para una mayor comodidad de los deportistas.

## 4 Fabricación de prototipos mediante impresión 3D:

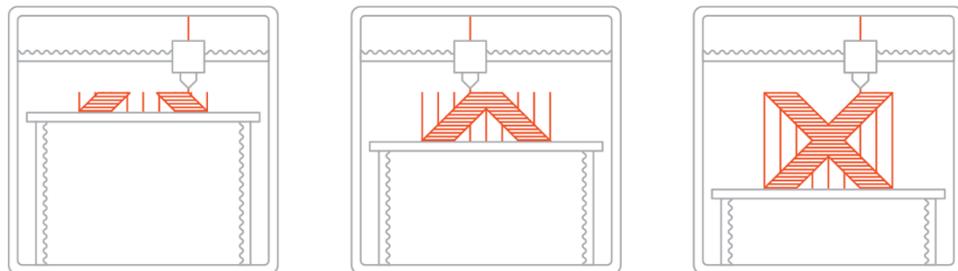
---

Para la realización de este TFG se va a trabajar con una impresora FFF (fabricación con filamento fundido). A continuación, se explica en que consiste este tipo de tecnología.

### 4.1 Funcionamiento de la fabricación por filamento fundido (FFF):

El modelado por deposición fundida es un proceso de fabricación aditiva por capas que se utiliza para el modelado de piezas o prototipos.

Su funcionamiento se basa en un filamento de plástico que se extruye a través de una boquilla que se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material dejándolo semilíquido. El cabezal se puede desplazar en tres direcciones controlados de forma electrónica. Al enfriarse el polímero se solidifica sobre él mismo, hasta conseguir la forma deseada. [10]



*Ilustración 93 - Modelado por desposición fundida*

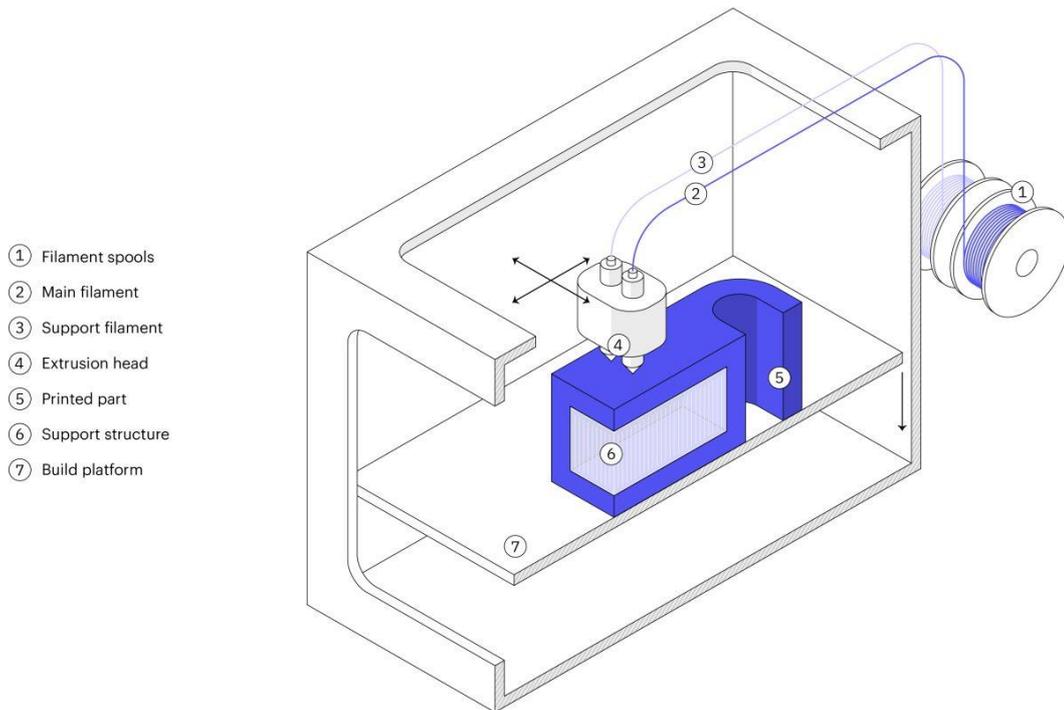
[\[https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/\]](https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/)

Los filamentos son impulsados hasta el extrusor por motores cebadores, nos encontramos con dos tipos:

- **Motor de extrusión directa:** tienen el motor a la entrada del cabezal de extrusión.
- **Motor de extrusión bowden:** tienen el motor alejado del cabezal por lo que se necesitan tubos para llevar el filamento hasta el extrusor.

Cuando las piezas requieran de voladizos, se generará un soporte para el cual es necesario disponer de un extrusor doble que se encargará de imprimir el material que se retirará cuando la pieza esté acabada. Este tipo de cabezal doble también sirve para poder imprimir una pieza en dos materiales diferentes.

A continuación, se muestra las principales partes de las que está formada una impresora 3D que trabaja por filamento fundido con doble extrusor.

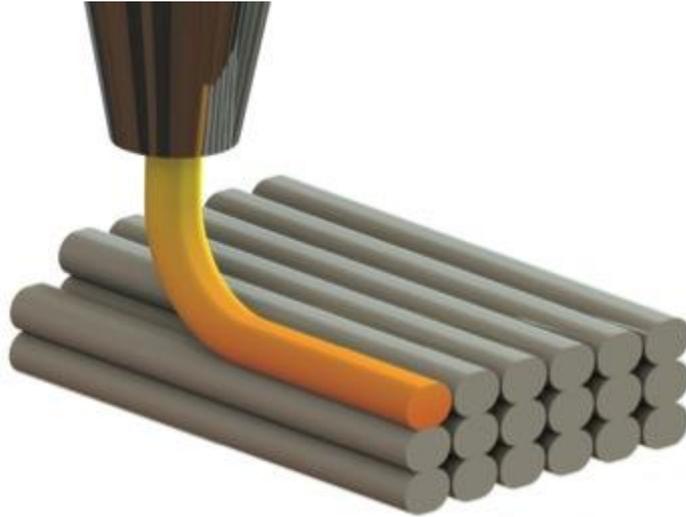


*Ilustración 94 - Partes principales de una impresora 3D por FDM*

[\[https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/#fdm\]](https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/#fdm)

Podemos modificar los parámetros de extrusión del material, de esta forma determinaremos la forma y el tamaño final de la pieza. Para ello debemos de tener en cuenta el diámetro de la boquilla del extrusor, así como el software que nos permite modificar los diferentes parámetros para obtener un resultado óptimo. Estos parámetros sirven para caracterizar el chorro, así como las paredes, el relleno e incluso el soporte que requiere la pieza.

Debemos de tener en cuenta que para mejorar la adhesión entre las capas se recalienta el chorro de la capa anterior y se aplica una presión al chorro de la capa siguiente para obtener una buena unión. En cuanto a la dirección longitudinal de extrusión, el chorro genera radios en los extremos de las paredes donde se forman concentraciones de tensiones actuando en las uniones entre las capas contiguas. [11]



*Ilustración 95 -Churros ovalados para mejorar la adhesión y concentración de tensiones en las capas contiguas*

[\[https://www.frax3d.com/tipos-principales-de-impresoras-3d\]](https://www.frax3d.com/tipos-principales-de-impresoras-3d)

A veces es necesario realizar un postprocesado para mejorar el acabado superficial lijando la pieza, aplicando resinas o para retirar el material soporte que se ha utilizado.

## 4.2 Impresora 3D utilizada:

La impresora 3D con la que vamos a trabajar es el modelo Ultimaker 3 Extended de la empresa Ultimaker ©.

### 4.2.1 Características de la impresora:

En el Anexo 2 se adjuntan las diferentes características y propiedades de la impresora Ultimaker 3 Extended.

Como característica más principal podemos decir que el cabezal de doble extrusor se mueve en los ejes X e Y, mientras que la placa de impresión se mueve en el eje Z.

La impresora puede fabricar piezas de un máximo de 215 mm de ancho, 215 mm de largo y 300 mm de alto.



Ilustración 96 – Impresora 3D Ultimaker 3 Extended

[\[https://ultimaker.tr3sdlan.com/producto/ultimaker-3-extended-impresora-3d-doble-extrusor/\]](https://ultimaker.tr3sdlan.com/producto/ultimaker-3-extended-impresora-3d-doble-extrusor/)

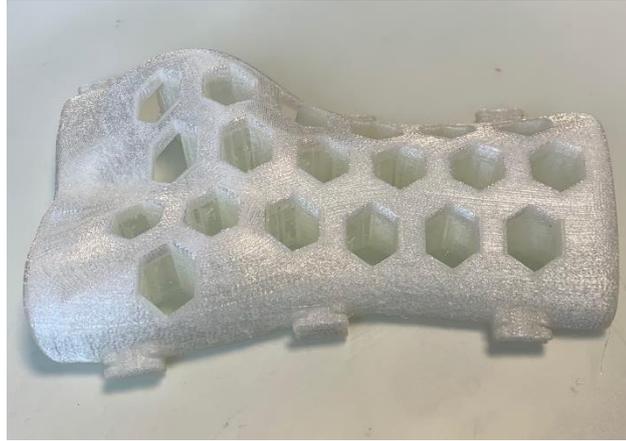
### 4.3 Material usado:

La impresión 3D mediante FDM © cuenta con una gran variedad de materiales con propiedades muy diferentes. Para este proyecto se empleará PETG como material principal y PVA como material soporte. A continuación, se describirán sus características principales.

#### 4.3.1 PETG:

El PETG es un copoliéster termoplástico que no cristaliza al calentarlo, por lo que presenta una gran dureza y flexibilidad. Además, destaca por su gran resistencia química y transparencia.

Este tipo de termoplástico tiene unas propiedades mecánicas similares al ABS, pero a diferencia del ABS, este es igual de fácil de imprimir que el PLA. Por lo que es perfecto para obtener una alta resistencia a tracción, flexión y al impacto. [12]



*Ilustración 97 – Parte inferior de la férula con PETG*

*[Elaboración propia]*

Es perfecto para piezas en las que se quiere obtener una elevada resistencia a agentes químicos. Se acepta para usar en contacto con el uso de productos alimenticios y tampoco emite olores para imprimir.

Presenta una gran resolución de impresión debido a que tiene una baja contracción y se puede imprimir sin cama caliente.

#### 4.3.2 PVA (Alcohol Polivinílico):

El PVA es un material soporte hidrosoluble, es utilizado como material de apoyo para realizar geometrías complejas con la capacidad de disolverse en agua.



*Ilustración 98 -Pieza de PLA (ácido poliláctico) con soporte de PVA*

*[Elaboración propia]*

Como principal característica podemos señalar su estabilidad térmica. También podemos decir de él, que es incoloro y no tóxico.

Como aspecto negativo podemos decir que se trata de un material higroscópico, por lo que tenemos que controlar su humedad para mantenerla por debajo del 55% de humedad relativa. También tenemos que mantener el filamento a una temperatura inferior a 28 ° C. [13]

Para poder tener todos estos aspectos controlados, el laboratorio donde se están llevando a cabo las impresiones 3D, cuenta con unas cajas herméticas para que los filamentos no se vean afectados por lo comentado anteriormente.

#### 4.4 Resultados obtenidos de la impresión 3D:

A continuación, se muestra el resultado obtenido del diseño de la férula descrita en el apartado 2:



*Ilustración 99 - Férulas impresas en 3D*

*[Elaboración propia]*

Esta férula se ha impreso de forma horizontal apoyando el plano de corte en la cama de calor, por lo que se ha necesitado de material soporte. Se ha elegido esta orientación porque si imprimimos en el eje Z se necesita más soporte encareciendo la impresión. Además, los soportes de PVA tendrían que alcanzar mayor altura y causarían problemas.



*Ilustración 100 - Férula final*

*[Elaboración propia]*

Se puede dar por satisfactoria la precisión dimensional esperada porque como se ve en las fotos la férula ajusta perfectamente a la superficie de la mano. Cabe destacar que es preferible dotar a la zona interior de una pequeña holgura que proporcione mayor comodidad al usuario pudiendo añadir una espuma.

Fuera del alcance de este proyecto se han llevado a cabo diferentes tipos de férulas, diseñando distintos prototipos con variedad de cierres evaluando cual es el más apropiado para la fijación de la férula y para la comodidad del usuario.

Además, se han desarrollado férulas que no necesitan de material soporte, de esta forma podemos imprimir en el eje Z obteniendo un mejor acabado superficial y reduciendo el precio de fabricación. Aunque el tiempo de elaboración es mayor porque es necesario reducir la velocidad de impresión y aumentar la velocidad de los ventiladores de los extrusores para que el material solidifique más rápido.



## 5 Conclusiones:

---

En primer lugar, es importante destacar la **viabilidad para la fabricación de férulas** para extremidades superiores mediante el uso de escáner e impresión 3D. Las principales ventajas obtenidas a través de este tipo de fabricación tienen relación con el diseño personalizado para cada paciente, y de menor peso y más higiénicos que las escayolas tradicionales.

Respecto a la digitalización 3D, podemos decir que los datos que proporciona corresponden a la realidad dentro de los parámetros de exactitud que nos da previamente el fabricante. Aunque algunas de las medidas obtenidas están fuera del rango de precisión, podemos decir que la **verificación dimensional es satisfactoria** ya que también hay que considerar que la propia persona comete cierto error al medir. El objeto de este análisis no está centrado en obtener la mejor exactitud posible, únicamente se centra en corroborar que los datos obtenidos son muy similares a la realidad.

A su vez, se ha comprobado que el escáner digitaliza resultados casi idénticos, comparando distintos escaneos de un mismo modelo frente a una digitalización de referencia.

También podemos reafirmar la **versatilidad** que se alcanza con la **impresión por FDM ©**, obteniendo piezas de geometrías complejas pudiendo trabajar con diferentes tipos de materiales. Por tanto, se puede decir que es una de las principales tecnologías que permite fabricar productos ergonómicos y resistentes.

Asimismo, es importante tener presente los **aspectos geométricos en el diseño para impresión 3D**. Nos permiten obtener modelos en los que no es necesario material soporte con mejores acabados superficiales. Por lo que podemos destacar como aspectos más importantes, la **orientación** de la pieza a la hora de imprimir, que nos determinará el acabado superficial y su resistencia mecánica, y la **regla de los 45°** para imprimir sin soporte.

Además, hemos comprobado que el software que nos proporciona Autodesk © permite trabajar con superficies muy complejas y es adecuado para realizar este tipo de férulas, aunque hay otros programas que nos podrían facilitar el trabajo.

Finalmente, **podemos concluir que se cumple el objetivo de esta tecnología, que permite combinar el uso de los datos obtenidos por el escáner 3D con los programas CAD y su posterior impresión.**



## 6 Líneas futuras:

---

A continuación, se proponen algunas de las posibles líneas futuras que se quieren seguir en relación con este proyecto:

- **Proceso alternativo de diseño:** Este proyecto se ha realizado con Fusion 360 de Autodesk ©. En el mercado se cuenta con gran cantidad de softwares que nos permiten trabajar con superficies. Se puede estudiar el modelado de estas superficies exponiendo diferentes alternativas de trabajo.
- **Acortar tiempos de diseño:** La idea es que el desarrollo futuro de estas férulas pueda venir dado de forma automática por el programa. Es decir, a partir de un escáner 3D de la zona afectada de la mano, obtener mediante unos parámetros por defecto una primera férula.
- **Diferentes materiales:** Uso de materiales con diferentes propiedades para poder elaborar distintos tipos de férulas.
- **Optimización del proceso de impresión:** Es interesante poder optimizar el proceso de impresión para trabajar con el menor material soporte posible, obteniendo buenos resultados. El soporte es la parte más cara de la impresión y donde se pueden encontrar los mayores problemas.
- **Parámetros de impresión:** Para este proyecto no hemos realizado un estudio de los diferentes parámetros que podemos modificar para imprimir. Sería interesante realizar un estudio en profundidad de sus parámetros para obtener la combinación más adecuada, conservando su resistencia mecánica.
- **Optimización topológica:** Otro de los aspectos en los que se puede trabajar es en el futuro es como mantener sus propiedades mecánicas reduciendo su masa lo máximo posible.
- **Trabajo con ortopedias:** Si los resultados son satisfactorios, se puede presentar el trabajo a distintas ortopedias.
- **Estructura para el escáner:** Lo ideal para realizar el escaneo de las zonas afectadas, ya sean las extremidades superiores o inferiores, sería tener una estructura controlada por un motor con un par de rotación que permita el giro de 360° para escanear así toda la zona.



## BIBLIOGRAFÍA:

- [1] → 3D RiskMapping, Teoría y práctica del escaneado láser terrestre – Lerma García, J.L.; Biosca Tarongers, J.M. (2008) – Consulta 01/06/2019
- [2] → <https://www.3dhub.es/escaneado-digitalizado-3d/> - Escaneado 3D – Consulta el 15/04/2019
- [3] → Jorge Adán Romero Guerrero / José Luis Cuellar Vázquez – Estudio comparativo entre las tecnologías de escaneo laser terrestre
- [4] → Fabio Romeral Pérez – TFG – Flujo de trabajo en proyectos de modelización 3D con equipo láser escáner – Universidad Politécnica de Madrid
- [5] → Ainara Contreras Echebarria – TFG – Obtención del modelo 3D de la azotea de la escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación de la UPM, mediante tecnología escáner 3D – Universidad Politécnica de Madrid
- [6] → Fernando Manteca Fernández – TFG – Generación de modelos 3D mediante luz estructurada – Universidad de Cantabria
- [7] → 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 Politécnica de Madrid
- [8] → Jason Geng – Structured-light 3D Surface imaging
- [9] → <https://www.artec3d.com/es/cases> - Principales aplicaciones escáner 3D – Consulta el 16/04/2019
- [10] → <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/> - Modelado por deposición fundida – Consulta el 20/04/2019
- [11] → Enrique Pérez Mendoza – TFG – Uso de impresión 3D bicomponente para la fabricación de una empuñadura a medida – Universidad de Valladolid
- [12] → <https://filament2print.com/gb/copolyesters-pet/735-smartfil-petg.html> - PETG de Smartfil – Consulta 21/04/2019
- [13] → <https://ultimaker.com/download/67873/TDS%20PVA%20v3.010-spa-ES.pdf> – PVA de Ultimaker – Consulta 21/04/2019
- [14] → Carlos Morón Alguacil – TFG – Metodología de trabajo conjunto de escaneado e impresión 3D – Universidad Politécnica de Madrid

- [15] → <https://anestesiari.org/2016/la-escopeta-feria-error-aleatorio-sistemico/> - Error aleatorio y sistemático – Consulta 18/05/2019
- [16] → Manual de Órtesis – Hospital del Trabajador ACHS– Terapia Ocupacional (Departamento de Rehabilitación)
- [17] → <https://andalucia.openfuture.org/blog/notas-de-prensa/startups-que-innovan-sector-la-salud/> - Fiixit – Consulta 19/03/2019
- [18] → <https://entresd.es/blog/xkelet-la-alternativa-3d-al-yeso/> - Xkelet – Consulta 19/03/2019
- [19] → <http://www.exovite.com/es/exovite-es/> - Exovite – Consulta 19/03/2019
- [20] → <https://fiixit.es/> - Fiixit – Consulta 30/05/2019
- [21] → <https://trimaker.com/adios-al-yeso-ferulas-impresas-en-3d/> - Trimaker – Consulta 30/05/2019
- [22] → [http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/799/883](http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/799/883) - Técnica de luz estructurada – Consulta 30/05/2019
- [23] → <https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-dise%C3%B1o> – Aspectos de diseño para impresión 3D – Consulta 30/05/2019

## ANEXOS:

## Anexo 1: Características EinScan-Pro

Especificaciones técnicas y propiedades de EinScan-Pro				
Modelo	EinScan-Pro			
Modo de escaneo	Escáner de mano HD	Exploración rápida de mano	Escaneo automático	Escáner fijo
Exactitud de disparo único	0.1 mm	0.3 mm	0.05 mm	0.05 mm
Velocidad de escaneo	90,000 puntos / seg	550,000 puntos / seg	Escaneo único: <2s	Escaneo único: <2s
Distancia del punto	0.5 - 3 mm	0.7 - 3 mm	0.16 mm	0.16 mm
Tamaño recomendado del objeto escaneado	30 - 4000 mm	150 - 4000 mm	30 - 150 mm	30 - 4000 mm
Modo Alinear	Marcadores	Característica, Marcadores	Marcadores, Característica, Plato giratorio, Manual, Objetivos codificados	Marcadores, característica, alineación manual
Escaneo de textura	No	Sí (con Color Pack)	Sí (con Color Pack)	Sí (con Color Pack)
Operación al aire libre	No (Evite la luz solar directa)			
Objeto de escaneo especial	Para un objeto transparente, reflejante u oscuro, rocíe con polvo antes de escanear			
Rango de escaneo único	210 x 150 mm			
Fuente de luz	LED de luz blanca			
Salida de datos imprimibles	Sí			
Formato de archivo	OBJ, STL, ASC, PLY			
Capacidad de carga de la placa giratoria	5 kg			

<b>Peso de cabeza de escaneo</b>	0.8 kg
<b>Soporte del sistema OS</b>	Windows 7, 8 o 10, 64 bits
<b>Compatibilidad con Sketchfab</b>	Sí
<b>Tarjeta gráfica</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 Ultimaker 3 Extended:

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y PROPIEDADES</b>	
<b>Tecnología</b>	Fabricación con Filamento Fundido (FFF)
<b>Cabezal de impresión</b>	Doble extrusor, con mecanismo retráctil en el segundo extrusor. Extrusores fácilmente intercambiables.
<b>Bandeja de impresión</b>	Boquilla Izquierda: 213 x 213 x 300 mm. Boquilla Derecha: 213 x 213 x 300 mm. Doble extrusor: 197 x 215 x 300 mm.
<b>Diámetro del filamento</b>	2.85mm.
<b>Resolución de capa</b>	Boquilla 0.4mm: 20-200 micras
<b>Precisión X, Y, Z</b>	12.5, 12.5, 2.5 micras
<b>Velocidad de recorrido del cabezal</b>	30 – 300 mm/s.
<b>Velocidad del flujo de material</b>	0.40: 16mm <sup>3</sup> /s
<b>Materiales Ultimaker</b>	PLA, PVA, ABS, CPE y Nylon
<b>Diámetro de boquilla</b>	0.4mm.
<b>Temperatura de boquilla</b>	180 – 280 °C
<b>Temperatura bandeja de impresión</b>	20 – 100 °C
<b>Tiempo de calentamiento de boquilla</b>	< 2 minutos
<b>Tiempo de calentamiento bandeja</b>	< 4 minutos (20 – > 60 °C)
<b>Nivel de ruido</b>	50 dBA
<b>Cambio de boquilla extrusor</b>	Sistema push & clic: fácilmente intercambiables
<b>Sistema de Filamento</b>	Abierto, con soporte para 2 bobinas de 750g incluido. Sistema NFC para detectar automáticamente el tipo de material (compatible con bobinas Ultimaker)
<b>Conectividad</b>	WiFi, Ethernet y USB
<b>Nivelación de bandeja de impresión</b>	Sistema de nivelación automático
<b>Cámara de vídeo</b>	Integrada

**DIMENSIONES FÍSICAS**

Impresora con accesorios montados	49,3 x 33,8 x 68,8 cm.
Impresora sin accesorios montados	35,3 x 33,8 x 48,8 cm.
Peso Neto	11,3 Kg.
Peso de envío	16,2 Kg.
Dimensión de caja de envío	40,0 x 39,0 x 68,0 cm.

**REQUISITOS ELÉCTRICOS**

Input	100 – 240V
	4A, 50-60Hz
	221 W max.
Output	24 V DC, 9.2 A

**CONDICIONES AMBIENTALES**

Condiciones de trabajo ambiental	15 – 32 °C, 10 – 90% de humedad relativa sin condensación. Consulte las especificaciones técnicas de material para las óptimas condiciones de trabajo.
Condiciones de almacenamiento	0 – 32 °C

**SOFTWARE ULTIMAKER 3 Extended**

Software suministrado	Cura 2 – Software Oficial de Ultimaker
Sistemas Operativos soportados	Windows, Mac, Linux
Tipo de archivos	STL, OBJ, 3MF
Transferencia de archivos	Impresión directa desde Cura vía Network/WiFi, Impresión mediante conector USB

### Anexo 3: Características y propiedades de los materiales empleados:

#### PETG (Copolímero) de Smartfil ©:

<b>PETG de Smartfil ©</b>		
	Valor típico	Método de ensayo
<b>Especificaciones del filamento</b>		
Diámetro	1,75 mm ±0,03mm 2,85 mm ±0,05mm	
Peso neto del filamento	750g	
<b>Propiedades mecánicas</b>		
Resistencia a rotura (Izod)	32 KJ/m <sup>2</sup>	ASTM (D256)
Resistencia a tracción	480 Kg/cm <sup>2</sup>	ASTM (D638)
Dureza (Rockwell)	101 MPa	ISO 2039-1
Resistencia térmica	85 °C	ISO 306
Densidad	1,27 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Resistencia a flexión	745 Kg/cm <sup>2</sup>	ISO 178

#### PVA (Polivinilo de alcohol) de Ultimaker ©:

<b>PVA de Ultimaker ©</b>		
	Valor típico	Método de ensayo
<b>Especificaciones del filamento</b>		
Diámetro	2,85 ±0,1mm	
Desviación de redondez máxima	0,1 mm	
Peso neto del filamento	750g/330g	
Longitud del filamento	~ 96 m/~ 45 m	
<b>Propiedades mecánicas</b>		
Módulo de elasticidad a tracción	3860 MPa	ISO 527 (1mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	78 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	9,90%	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la prueba de impacto Charpy, sin mella (a 23 °C)	1,6 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
<b>Propiedades térmicas</b>		
Índice de fluidez (MFR)	17-21 g/10 min	(190 °C, 21,6 kg)
Temperatura de reblandecimiento Vicat a 10 N	60,2 °C	ISO 306
Temperatura de fusión	163 °C	ISO 11357

#### Anexo 4: Especificaciones pie de rey Mitutoyo ©:

Calibre electrónico con un display de 7 mm de alto que permite medidas de interior, exterior y profundidad.

El display cuenta con la puesta a cero del instrumento. Este punto se memoriza incluso si el dispositivo se apaga.

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

### Anexo 5: Medidas tomadas en la mano:

A continuación, se muestran las distancias que se han medido con el pie de rey para la validación dimensional:







