



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

# Diseño y fabricación de un dedo protésico articulado mediante impresión 3D

Autor: Garrido Sánchez, Gonzalo

Tutor: Mansilla Gallo, Alberto

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

Valladolid, Septiembre 2019



## RESUMEN

La estereolitografía (SLA) es una técnica de fabricación aditiva que mediante la luz y una resina fotosensible se consigue realizar piezas con una exactitud y precisión excelente y con diversas propiedades mecánicas.

El proyecto se dividirá en tres partes, en la primera se expondrá el funcionamiento teórico de una impresora SLA, así como una comparación con otro método de impresión 3D más común, el modelado por deposición fundida (FDM).

La segunda parte consta de un estudio para determinar cómo cambian las propiedades mecánicas de las piezas en función del método de curado posterior y el tiempo y la exposición a la luz una vez curada la pieza.

La tercera parte supondrá una aplicación práctica para fabricar un dedo protésico articulado como inicio de un proyecto más grande que consiste en crear una prótesis de miembro superior de bajo coste.

## PALABRAS CLAVE

Impresión 3D

SLA

Ensayo a tracción

Resina fotopolimérica

Dedo protésico articulado



## ABSTRACT

Stereolithography (SLA) is an additive manufacturing technique that uses light and a photosensitive resin to produce parts with excellent precision and accuracy and various mechanical properties.

The project will be divided into three parts, the first part will show the theoretical operation of an SLA printer, as well as a comparison with another more common 3D printing method, the molten deposition modeling (FDM).

The second part consists of a study to determine how the mechanical properties of the parts change depending on the subsequent curing method and the time and light exposure after the part has cured.

The third part will be a practical application to fabricate an articulated prosthetic finger as the start of a larger project to create a low-cost upper limb prosthesis.

## KEYWORDS

3D printing

SLA

Tensile test

Photopolymer resin

Articulated prosthetic finger



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	3
PALABRAS CLAVE .....	3
ABSTRACT .....	5
KEYWORDS .....	5
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	11
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	13
2. IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA.....	15
2.1. Fundamentos de la impresión SLA .....	15
2.2. Componentes y tipos de impresoras SLA.....	16
2.2.1. Lado derecho hacia arriba (Right-Side Up SLA) .....	17
2.2.2. Impresora invertida (Upside-Down SLA) .....	18
2.3. Funcionamiento de una impresora SLA .....	19
2.3.1. Software .....	20
2.3.2. Impresión 3D.....	21
2.3.3. Post-procesamiento .....	21
2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA IMPRESIÓN SLA .....	25
3. SLA VS. FDM: Comparación de las tecnologías de impresión 3D.....	27
3.1. Calidad de impresión y precisión.....	27
3.2. Materiales utilizados (Termoestables vs. Termoplásticos) .....	28
3.3. Isotropía vs. Anisotropía .....	28
3.4. Costos de impresión .....	30
3.5. Velocidad de impresión .....	31
3.6. Resumen y conclusiones .....	33
4. IMPRESORA 3D SLA UTILIZADA.....	37
4.1. Materiales para la impresión 3D .....	38
4.1.1. Resinas estándar .....	38
4.1.2. Resinas de ingeniería.....	39
4.2. Comparación entre resinas .....	43
5. ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN SLA .....	47

5.1.	Método de ensayo .....	47
5.1.1.	Probetas empleadas.....	47
5.1.2.	Máquina de ensayo.....	48
5.2.	Importancia del curado posterior .....	50
5.2.1.	Tipos de probetas a ensayar .....	51
5.2.2.	Resultados experimentales .....	51
5.2.3.	Conclusiones de los resultados.....	54
5.3.	Propiedades frente al tiempo y la exposición de luz .....	55
5.3.1.	Tipos de probetas.....	56
5.3.2.	Resultado experimentales.....	57
5.3.3.	Conclusiones del ensayo .....	60
6.	FABRICACIÓN DE UN DEDO PROTÉSICO ARTICULADO.....	63
6.1.	Diseño del dedo protésico .....	64
6.2.	Precisión dimensional requerida en el diseño 3.....	67
6.3.	Elección del material.....	69
6.4.	Funda de dedo.....	73
7.	CONCLUSIONES .....	77
8.	LÍNEAS FUTURAS .....	79
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	81
10.	ANEXOS.....	83
	Anexo 1: Especificaciones técnicas de la impresora 3D Form 2. ....	83
	Anexo 2: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Clear .....	87
	Anexo 3: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Durable.....	88
	Anexo 4: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Tough .....	89
	Anexo 5: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Elastic .....	90
	Anexo 6: Planos de las falanges que forman el dedo protésico .....	91
	Anexo 7: Planos de los distintos diseños realizados .....	94
	Anexo 8: Plano de la funda de la falange distal .....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Pasos del proceso de fotopolimerización.....	15
Figura 2: Impresora 3D Right-Side Up.....	17
Figura 3: Impresora 3D Upside-Down SLA.....	18
Figura 4: Proceso de impresión de una impresora 3D por estereolitografía.....	19
Figura 5: Ejemplo de una pieza lista para imprimir.....	20
Figura 6: FormWash de Formlabs.....	22
Figura 7: Kit de acabado final de Formlabs.....	23
Figura 8: FormCure de Formlabs.....	24
Figura 9: Comparación calidad superficial FDM y SLA.....	27
Figura 10: Vista microscópica de una impresión 3D FDM.....	29
Figura 11: Vista microscópica de una impresión 3D SLA.....	29
Figura 12: Dedo protésico a imprimir en Form 2 (SLA).....	31
Figura 13: Dedo protésico impreso en Ultimaker 3 (FDM).....	31
Figura 14: Dedo protésico impreso en Ultimaker 3 (FDM) con la altura de capa de la tecnología SLA.....	32
Figura 15: Comparación calidad superficial y precisión de impresión 3D FDM y SLA.....	34
Figura 16: Impresora 3D Form 2 de Formlabs.....	37
Figura 17: Pieza impresa con resina Clear para sustituir un engranaje de un microscopio.....	39
Figura 18: Rótula fabricada con la resina Durable suministrada por Formlabs.....	40
Figura 19: Cadena realizada con la resina Tough a la que ha sido sometida a un ensayo para conocer el peso máximo soportado.....	41
Figura 20: Arteria fabricada con la resina Elastic suministrada por Formlabs.....	43
Figura 21: Curvas de tensión-deformación de distintos tipos de resina.....	43
Figura 22: Gráfica comparación elongación-máxima resistencia a tracción....	44
Figura 23: Gráfica comparación de distintas resinas en función de la resistencia al impacto IZOD y la elongación.....	45
Figura 24: Comparación entre las resinas de ingeniería.....	46
Figura 25: Probeta ASTM D638 Tipo IV.....	47
Figura 26: Organización de las probetas en la impresora.....	48
Figura 27: Máquina de ensayos.....	49
Figura 28: Probeta pintada y colocada en la máquina de ensayo. Foto del programa GOM Snap 2D.....	50
Figura 29: Curva esfuerzo-deformación del Nylon-6,6.....	56
Figura 30: Diseño 1.....	65
Figura 31: Diseño 2.....	65
Figura 32: Diseño 3.....	66

Figura 33: Detalle dedo protésico no articulado con resina Durable por el relleno de las holguras entre falanges.....	67
Figura 34: Detalle impreso con resina Tough de la holgura existente entre falanges.....	68
Figura 35: Detalle impreso con resina Tough con la holgura mínima de 0.25 mm.....	69
Figura 36: Diseño 1 (detrás) y diseño 3 (delante) impreso con resina Clear.....	70
Figura 37: Diseño 1 (detrás) y diseño 2 (delante) impreso con la resina Durable.....	71
Figura 38: Impresión con resina Tough de los tres diseños: Diseño 1 (fondo), Diseño 2 (derecha) y Diseño 3 (izquierda).....	72
Figura 39: Diseños finales impresos con distintas resinas: Diseño 1 (detrás) con resina Clear, diseño 2 (medio) con resina Durable, diseño 3 (delante) con resina Tough.....	73
Figura 40: Diseño de la funda de la falange distal del dedo protésico.....	74
Figura 41: Orientación funda falange en el software Preform, pieza lista para su impresión.....	75
Figura 42: Posición inicial de la funda de la falange distal impresa con resina Elastic.....	75
Figura 43: Posición final de la funda de la falange distal impresa con resina Elastic.....	76

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Diagrama Tensión Deformación curado en FormCure.....	52
Gráfica 2: Diagrama Tensión Deformación curado en horno de luz.....	52
Gráfica 3: Diagrama Tensión Deformación curado en horno de calor.....	53
Gráfica 4: Diagrama Tensión Deformación curado al aire libre.....	53
Gráfica 5: Diagrama esfuerzo-deformación probetas Clear ensayadas 2 meses después de su curado.....	55
Gráfica 6: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 24 horas.....	58
Gráfica 7: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 3 días.....	58
Gráfica 8: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 1 semana.....	59
Gráfica 9: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 2 semanas al Sol la mayor parte del día.....	59
Gráfica 10: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 1 mes al aire libre.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen con las principales características de las impresoras 3D SLA.....	19
Tabla 2: Tabla resumen con las principales características de las dos tecnologías de impresión 3D.....	33
Tabla 3: Resultados experimentales de los ensayos a tracción de las probetas curadas con distintos métodos.....	51
Tabla 4: Resultados experimentales de las probetas ensayadas en distintos tiempos de reposo.....	57



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La impresión 3D ha experimentado un auge en los últimos 10 años debido a que los precios, tanto de las impresoras como de los materiales, se han reducido hasta el punto de ser accesibles de forma individual y para uso doméstico.

Dentro de los distintos procesos de impresión 3D, hemos elegido para la realización de este trabajo, la estereolitografía (SLA). El proceso de estereolitografía se basa en la utilización del principio de fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensibles a los rayos UV. Esta resina se solidifica capa por capa mediante el paso de una láser, dotando de mayor calidad a los modelos fabricados mediante esta tecnología.

Desde el punto de vista histórico, la estereolitografía fue la primera tecnología conocida dentro de la impresión 3D, cuando en 1986 Chuck Hull, fundador de 3D Systems, registra la primera patente comercial, una tecnología de fotopolimerización de una resina a través de un láser. Más tarde, surge la tecnología DLP, misma técnica, pero usando la luz generada por un proyector, similar a los proyectores de vídeos convencionales, para endurecer la resina. En el desarrollo de las impresoras de estas tecnologías destacan empresas como Formlabs o Stratasys.

El objetivo de este trabajo de fin de grado es la fabricación de un dedo protésico articulado utilizando, para ello, las distintas resinas técnicas de esta tecnología y el estudio de esas resinas para conocer cuál de todas ellas se adecúa mejor a la aplicación.

El diseño del dedo protésico articulado se ha basado, sobre todo, en poder conocer cuál es la precisión dimensional que se puede alcanzar con cada resina que utilizaremos para su fabricación. Se seleccionó un dedo protésico compuesto por tres falanges (distal, media y proximal) que permita el movimiento entre ellas.

Este proyecto es el inicio de un proyecto mayor que consiste en realizar una prótesis de miembro superior. Es de suma importancia este proyecto, pues se realizará un análisis de las distintas resinas adquiridas y se decidirá cuál es la mejor para cada aplicación, ya que a manufactura de la prótesis se realizará por medio de esta tecnología aditiva con el fin de no tener limitaciones con la obtención de ciertas formas, tales como geometrías complejas, irregularidades o agujeros con trayectorias curvas presentes en la geometría de la prótesis y aprovecharnos de las múltiples propiedades mecánicas que tienen estas resinas fotosensibles.



## 2. IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA

Las impresiones que se van a realizar en este Trabajo de Fin de Grado se harán exclusivamente mediante el método de estereolitografía (SLA) que explicaremos en este capítulo.

### 2.1. Fundamentos de la impresión SLA

La impresión 3D por estereolitografía (SLA) se fundamenta en el proceso de fotopolimerización para la obtención de piezas impresas en 3D. La polimerización es el proceso por el cual las moléculas pequeñas se unen para formar una molécula de mayor tamaño.

La fotopolimerización es la tecnología de impresión 3D más antigua, consiste en un fotopolímero líquido en una cubeta que se endurece selectivamente capa a capa mediante la polimerización activada por luz.

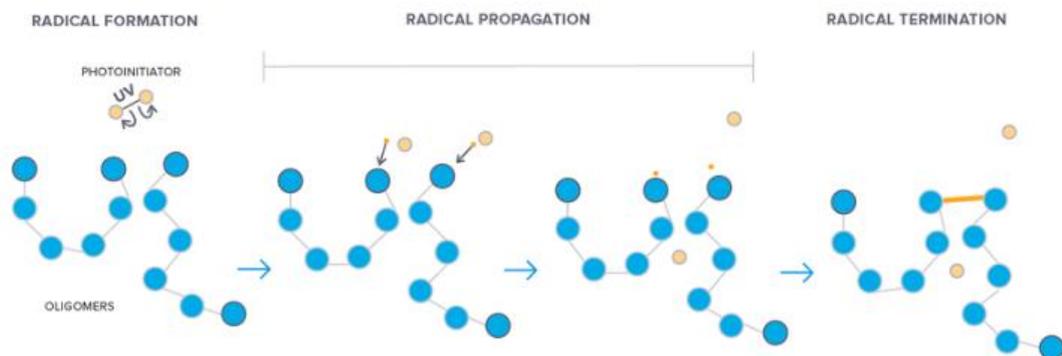


Figura 1: Pasos del proceso de fotopolimerización ([https://archive-media.formlabs.com/upload/SLA\\_Guide.pdf](https://archive-media.formlabs.com/upload/SLA_Guide.pdf))

Las cadenas de oligómeros tienen grupos activos en sus extremos. Al exponerse a la luz UV, la molécula fotoindicadora se divide en dos, y el enlace que la une se convierte en dos radicales muy reactivos que se transfieren a los grupos activos de los oligómeros, reaccionando a su vez con otros grupos activos. Las cadenas se van haciendo más grandes y, así, la resina comienza a solidificarse. Todo este proceso se lleva a cabo en milisegundos.

Las resinas son plásticos compuestos de cadenas cortas de carbono. Cuanto más corta es la cadena, menos sólido es el plástico. Aunque la resina tiene

todos los componentes del plástico, aún no está polimerizado y cuando se expone a la luz UV, las cadenas se unen para crear otras cadenas más largas y rígidas. Al unirse suficientes cadenas, el resultado es una parte sólida en la resina.

Las resinas utilizadas en esta tecnología consisten en diferentes combinaciones de monómeros largos y cortos, oligómeros, fotoindicadores y aditivos. Esto proporciona a las empresas una gran libertad para crear diversas formulaciones con una amplia gama de propiedades ópticas, mecánicas y térmicas.

## 2.2. Componentes y tipos de impresoras SLA

Entre los diversos componentes de una impresora 3D por estereolitografía se encuentran:

- Un tanque lleno de un fotopolímero líquido o resina, que suele ser un termoplástico líquido y normalmente transparente. En la impresora de Formlabs, este tanque de resina se mueve según el eje X.
- Una plataforma sumergida o no en el tanque, que se puede mover en el eje Z (arriba/abajo) de acuerdo con el proceso de impresión.
- Un láser ultravioleta UV de alta potencia que es capaz de actuar en toda la superficie del tanque de resina.
- Una interfaz informática, que gestiona tanto la plataforma y el tanque de resina como los movimientos del láser.

Todos estos componentes son comunes en cualquier tipo de impresora SLA, sin embargo, existen unas diferencias que hacen que estas impresoras se engloben en dos grupos. La principal diferencia entre estas impresoras reside en la disposición de los componentes en la impresora, tanto la fuente de luz, como la plataforma de construcción y el tanque de resina.

### 2.2.1. Lado derecho hacia arriba (Right-Side Up SLA)

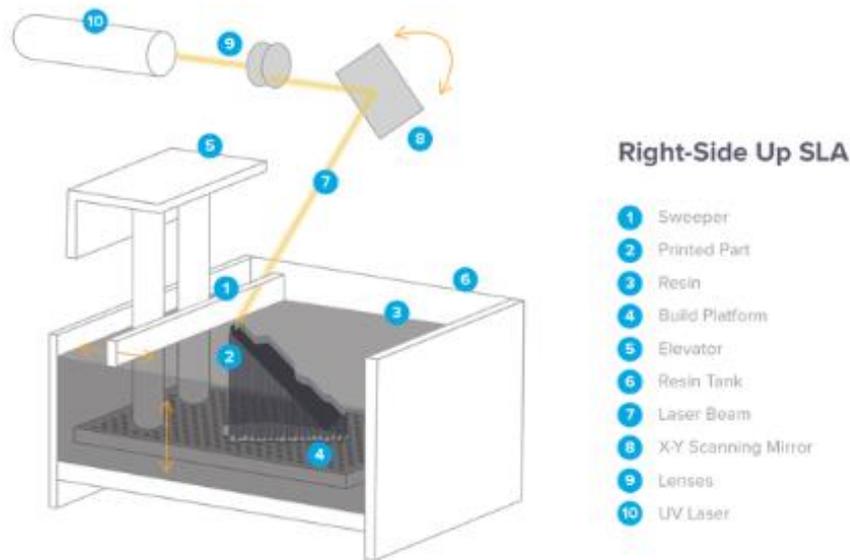


Figura 2: Impresora 3D Right-Side Up

([https://archive-media.formlabs.com/upload/SLA\\_Guide.pdf](https://archive-media.formlabs.com/upload/SLA_Guide.pdf))

Antes de la aparición de los sistemas de escritorio, era el enfoque estándar de la esterolitografía. El láser se enfoca en la superficie de la resina, trazando una sección transversal del modelo. La plataforma de construcción, que se encuentra perforada para permitir el paso de la resina, desciende una distancia igual al espesor de la capa y una hoja, que actúa como un limpiaparabrisas, barre el tanque para remover el tanque con material fresco. Entre sus ventajas se encuentra uno de los volúmenes más grandes de impresión (1500 x 750 x 550 mm), poca fuerza requerida en las piezas durante su impresión y un gran detalle y precisión. Sin embargo, la mayor desventaja es que requiere una inversión inicial muy alta, debido a que todo el tanque debe ser llenado con resina, gastando de 10 a 100 litros de resina.

Normalmente, solo las impresoras industriales utilizan este método de impresión, ya que sería un precio excesivo para las impresoras de uso doméstico. Impresoras de las empresas Stratasys o la impresora 3D ProX 800 pertenecen a este grupo de impresoras industriales.

### 2.2.2. Impresora invertida (Upside-Down SLA)

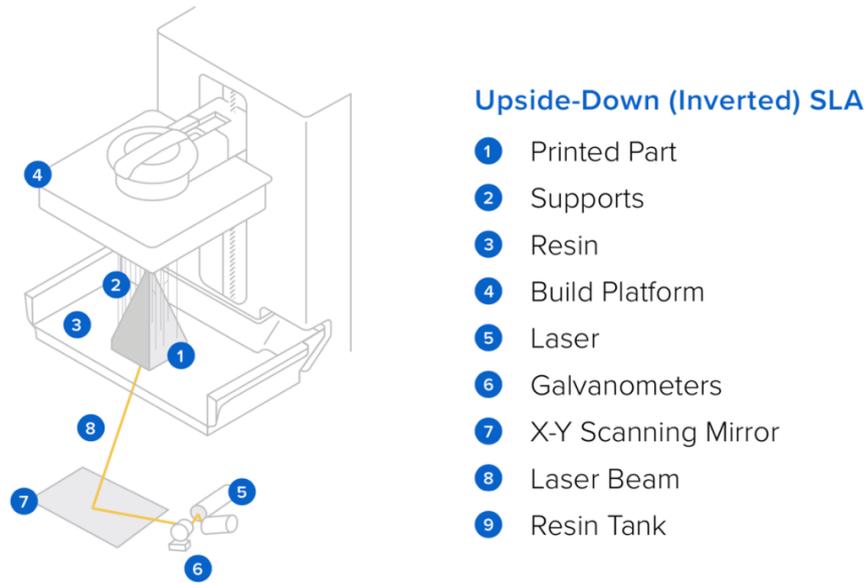


Figura 3: Impresora 3D Upside-Down SLA (<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#materials>)

Este método de impresión 3D por estereolitografía utiliza un tanque de resina con fondo transparente y superficie antiadherente, que será el lugar donde se lleve a cabo la curación de la resina. La plataforma de construcción baja al tanque de resina, dejando una distancia igual a la altura de capa entre la plataforma o última capa impresa y el fondo del tanque. Una vez impresa una capa, la plataforma se mueve hacia arriba y el limpiador hará una pasada por todo el tanque de resina para homogeneizarla. El proceso se repite hasta que la pieza está completamente impresa.

Su mayor ventaja es que la impresora solo requiere suficiente material como para mantener el fondo del tanque cubierto de líquido, lo que influye positivamente a la limpieza, mantenimiento y costo del tanque y de la resina. Por el contrario, su mayor desventaja es el volumen de construcción limitado que tiene y que los soportes serán más grandes, ya que serán necesarios para mantener la pieza fija en la plataforma de construcción.

La mayoría de las impresoras 3D de escritorio utilizan este método de impresión. La impresora 3D de Formlabs, que es utilizada para el proyecto, es de este tipo de impresoras.

A continuación, en la tabla 1 se podrá observar una comparación de los dos tipos de impresoras 3D por estereolitografía:

	<b>Impresora de escritorio: invertida</b>	<b>Impresora industrial: lado derecho hacia arriba</b>
<b>Precio</b>	A partir de 3.000 €	Entre 70.000 – 90.000 €
<b>Volumen de impresión</b>	Hasta 145 x 145 x 175 mm	Hasta 1500 x 750 x 550 mm
<b>Pros</b>	Asequible y fácil de usar Bajo mantenimiento Fácil intercambio de materiales	Gran volumen de fabricación Alta tasa de producción Amplias opciones de materiales
<b>Contas</b>	Volumen de construcción medio-bajo	Maquinaria y mantenimiento costoso

*Tabla 1: Resumen con las principales características de las impresoras 3D SLA*

### 2.3. Funcionamiento de una impresora SLA

El fundamento de la fabricación aditiva consiste en la creación de piezas mediante la adición de material capa a capa, de esta forma, lo primero que debemos hacer es dividir la pieza en capas. Estas capas se imprimen por orden consiguiendo solidificarse y unirse unas con otras hasta conseguir formar la pieza completa.



*Figura 4: Proceso de impresión de una impresora 3D por estereolitografía*

(<https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/estereolitografia>)

### 2.3.1. Software

Como en cualquier técnica de impresión 3D, lo primero que se necesita es un archivo digital en 3D, es decir, un archivo del software CAD. Este archivo se exporta a un archivo STL, que describe la geometría de la superficie del objeto 3D sin tener en cuenta otros atributos como el color o la textura, y se envía a la máquina donde un software rebanador, como el Cura (Ultimaker, FDM) o el Preform (Formlabs, SLA), realiza el corte del modelo en capas delgadas de impresión con un espesor fijo. Dichas plataformas son responsables de generar el código G (gcode), el lenguaje nativo de las impresoras 3D.

El software laminador utilizado en este proyecto es el Preform, diseñado por Formlabs. Con este software, patentado y con configuraciones predefinidas para cada material probadas previamente para garantizar la tasa de éxito más alta posible de impresión, podemos preparar los modelos en minutos, cargándolos en la impresora y dejando que se construya. Tiene una opción de impresión con un clic que permite orientar, generar soportes y diseñar automáticamente los modelos.

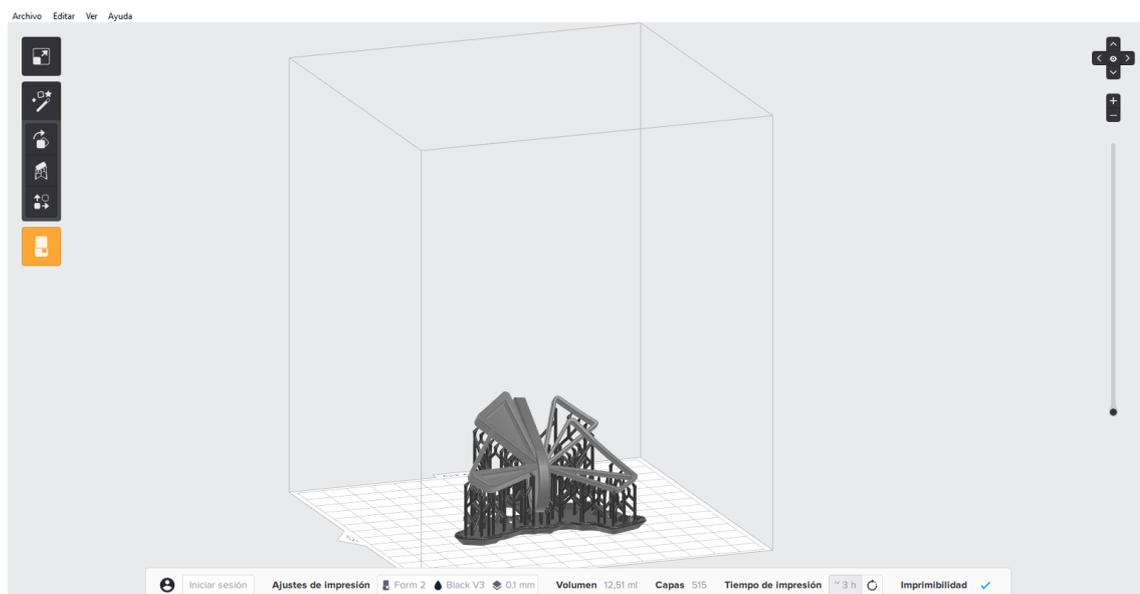


Figura 5: Ejemplo de una pieza lista para imprimir. (Elaboración propia)

Los parámetros del programa laminador Preform son muy inferiores a los parámetros de otros programas, como Cura. Los parámetros más importantes que podemos controlar gracias a nuestro software son:

- **Altura de capa.** Nos indica la altura de cada capa, que según el material que utilicemos, podemos tener una altura de capa desde 25 micras (resina gris) hasta 100 micras, o incluso 300 micras (Draft Resin). Cuanto mayor es la altura de capa, más rápido se imprimirá la pieza, pero menos resolución tendrá la pieza impresa.

- **Soportes.** Como solo se puede utilizar un material durante el proceso de impresión, cuando la pieza tiene geometrías difíciles y voladizos es necesario unos soportes que sirvan como base para que la pieza se pegue y no se desprenda de la plataforma de impresión. Esto puede suponer un problema, porque para piezas pequeñas que utilicen poca resina, pero con geometrías difíciles, será necesario más cantidad de resina para los soportes que para la fabricación de la pieza. Sin embargo, para reducir la cantidad de resina que se utiliza en los soportes, con el software podemos controlar la densidad y el tamaño de los puntos de contacto de los soportes.
- **Orientación y organización.** Es importante que las piezas se orienten de la forma más adecuada para la impresión y que se reduzca al mínimo posible la cantidad de soportes a utilizar. También hay que tener en cuenta la organización de las piezas a lo largo de la vida útil del tanque de resina. Debemos organizar las piezas de manera que se utilice al máximo la superficie del tanque y se reduzca el desgaste del mismo y evitar su enturbiamiento, que produce regiones nubladas en la capa elástica del tanque. Este proceso se produce por la exposición repetida al láser o la actividad de impresión.

### 2.3.2. Impresión 3D

Después de una confirmación rápida de la configuración correcta, comienza el proceso de impresión y la impresora debe funcionar sin supervisión hasta que la pieza esté completamente impresa.

El rayo láser, dirigido a las coordenadas apropiadas mediante un espejo controlado por computador, barre la superficie de la resina fotosensible líquida. Una vez que la primera capa de material sea solidificada, la plataforma se mueve un nivel en el eje Z, correspondiente al grosor de una capa de impresión, y una nueva sección se solidifica. Habrá tantos ciclos como capas para obtener el volumen completo de la pieza. La resina que no es tocada por el láser permanece en el tanque y se puede reutilizar.

### 2.3.3. Post-procesamiento

Cuando una pieza termina de imprimirse, permanece en la plataforma de construcción en un “estado verde”, que, aunque las partes han alcanzado su

forma final, la reacción de polimerización aún no se ha completado y no se han alcanzados las propiedades mecánicas completas. Mediante un proceso de lavado y posterior exposición a una combinación de luz y calor, se pasa del “estado verde” al “estado post curado”, cuyas piezas tienen las propiedades mecánicas óptimas.

### 2.3.3.1. Lavado de resina

Después de la impresión, pasamos a la etapa de limpieza con un disolvente, alcohol isopropílico o isopropanol (IPA), que elimina el exceso de resina no curada de la superficie de la pieza impresa. Existen dos opciones a utilizar cuando queremos realizar la etapa de limpieza de una pieza.

La primera opción sería utilizar la FormWash de Formlabs, de forma que se automatiza la limpieza de piezas. Una vez finalizada la impresión, extraemos la plataforma de construcción y podemos meterla directamente en la máquina de lavado o utilizar una espátula para separarla de la pieza. Solo es necesario configurar el tiempo e introducir el IPA, y una vez completado el lavado, FormWash extrae automáticamente las piezas, evitando impresiones remojadas. Por último, las partes se secan al aire y están listas para su siguiente proceso.



Componentes:

- Montaje en plataforma
- Cesta y cesta de montaje
- Tapa exterior e interior
- Contenedor de capacidad máxima de 8.6L de IPA
- Monitor para visualizar la configuración
- Ruleta para seleccionar configuración
- Almacenamiento de herramientas
- Fuente de alimentación: 24V, 2A.

Figura 6: FormWash de Formlabs

(<https://formlabs.com/wash-cure/>)

La segunda opción sería utilizar el Kit de Acabado de Form 2, que viene incluido al comprar la impresora 3D. Está compuesto por los siguientes elementos:

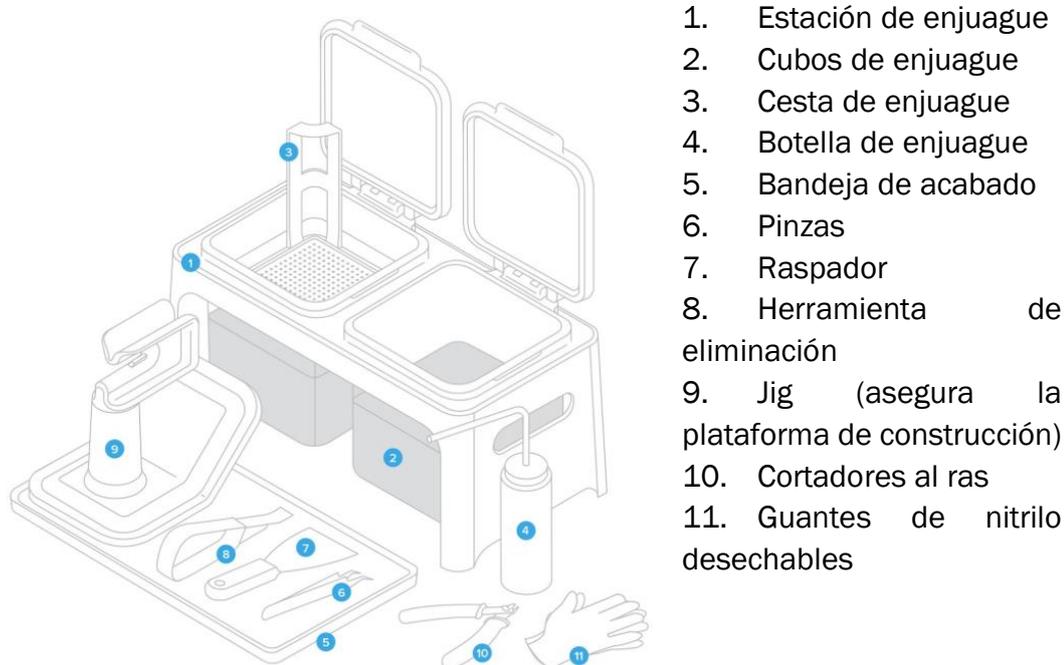


Figura 7: Kit de acabado final de Formlabs ([https://support.formlabs.com/s/article/Form-2-Finish-Kit-Setup?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Form-2-Finish-Kit-Setup?language=en_US))

Una vez que la pieza ha terminado de imprimirse, debemos retirar la plataforma de construcción y ponerla en la plantilla o jig. Con las herramientas de eliminación, separamos la pieza de la plataforma de construcción. Cuando tenemos la pieza suelta, abrimos el primer cubo de enjuague y colocamos la pieza en el baño de alcohol utilizando la cesta de enjuague para agitar la pieza dentro del baño. Después de agitar la pieza, cerramos la tapa del cubo de enjuague y dejamos que las partes de remojen durante aproximadamente la mitad del tiempo total recomendado. Repetimos con un segundo enjuague y una vez terminado, la pieza ya estaría preparada para su posterior curado, si fuera necesario.

### 2.3.3.2. Curado de resina

Una vez eliminado el exceso de resina, algunos materiales necesitan un curado posterior, que transforma las propiedades mecánicas de la pieza. Aunque la pieza haya alcanzado su forma final, aún no se han alcanzado las propiedades mecánicas completas. Mediante la exposición a una combinación de luz y calor, se finaliza el proceso de fotopolimerización y se consigue la máxima fuerza y resistencia del material.

Para el proceso de curado, Formlabs ha diseñado la FormCure, que consta de los siguientes elementos:



- Paredes dobles para aislar la cámara y superficie interna que refleja la luz.
- Calentador de cámara de hasta 80 °C
- Conjunto de 13 LEDs de longitud de onda de 405 nm
- Placa giratoria que garantiza un postcurado equilibrado
- Monitor que muestra las configuraciones
- Ruleta para seleccionar las configuraciones
- Fuente de alimentación: 24V, 6A.

Figura 8: FormCure de Formlabs (<https://formlabs.com/wash-cure/>)

Basta con insertar las piezas lavadas y secas dentro de la cámara y ajustar el tiempo y temperatura de post-curado para lograr las propiedades óptimas del material de acuerdo con su ficha de especificaciones recomendadas.

Aunque la FormCure sea la cámara de curado que recomienda Formlabs para el post-tratamiento de las piezas, existen muchos métodos para el post-curado, desde el curado con luz solar, salones de uñas UV o cajas de bricolaje hechas por uno mismo.

Para determinar cuál es la mejor solución de post-curado, hay que considerar: los materiales utilizados, Formlabs solo trabaja con materiales que utilizan láseres de 405 nm en el proceso de impresión; las aplicaciones previstas, si son aplicaciones poco precisas es posible utilizar opciones de curado más simples; el tamaño y complejidad de las piezas, para piezas grandes es necesario proporcionar una exposición uniforme; y la eficiencia, ya que el calor acelera y optimiza el proceso de curado.

Después del lavado y del curado, los soportes se pueden quitar fácilmente de las piezas mediante cortadores de enjuague y las marcas de soportes se lijan para obtener un acabado final limpio y suave.

## 2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA IMPRESIÓN SLA

Ventajas:

- SLA es una de las técnicas de impresión 3D más precisas del mercado.
- Los prototipos se pueden crear con una calidad extremadamente alta, con características finamente detalladas y formas geométricas complejas.
- SLA proporciona las tolerancias dimensionales más estrictas de cualquier tecnología de fabricación aditiva.
- Las superficies de impresión son lisas.
- Los volúmenes de compilación pueden ser tan altos como 50 x 50 x 60 cm<sup>3</sup> sin sacrificar la precisión.

Inconvenientes:

- La impresión suele llevar mucho tiempo.
- Las pendientes empinadas y los voladizos requieren estructuras de soporte durante el proceso de construcción. Dichas piezas pueden colapsarse durante las fases de impresión o curado. En piezas pequeñas con voladizos o geometrías complicadas, se gasta más resina en los soportes que en la pieza.
- Las piezas no son reciclables. Los soportes que quitamos de las piezas no se pueden reciclar ni usar para otra aplicación.
- SLA ofrece una selección limitada de materiales y colores. Cada empresa de impresión 3D realiza sus propias resinas, con sus propias propiedades, por lo que no pueden intercambiarse entre impresoras de diferentes marcas.
- Los costos de impresión de SLA son altos. Las resinas de impresión suelen rondar en torno a los 200 euros.



### 3. SLA VS. FDM: Comparación de las tecnologías de impresión 3D

La fabricación aditiva ha permitido reducir los costes, ahorrar tiempo y trascender los límites de los procesos de fabricación a la hora de desarrollar productos. En los últimos años, estas impresoras han reducido su precio y ahora son más asequibles, más sencillas y más confiables. Las impresoras de escritorio se han convertido en herramientas esenciales para las empresas; sin embargo, es necesario conocer las tecnologías antes de utilizarlas. Analizaremos dos de las tecnologías más populares en el mercado para la impresión 3D de plásticos: Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Estereolitografía (SLA).

#### 3.1. Calidad de impresión y precisión

Las impresoras 3D FDM producen partes capa por capa depositando plástico fundido. Mediante este proceso, la resolución de la pieza viene definida por el tamaño de la boquilla del extrusor y existen huecos entre las líneas de filamento depositado (anisotropía). Así, las capas no se adhieren completamente y el proceso carece de la capacidad de reproducir detalles precisos como con la tecnología de impresión 3D SLA. Mediante la tecnología SLA, la resina se cura con láser, lo que supone una alta precisión y logra detalles más finos. Esto es posible por el uso de luz en lugar del calor para imprimir la pieza. Cuando se imprime a temperatura ambiente, la pieza no sufre el efecto de expansión y contracción térmica, como ocurre en el proceso de impresión FDM. Además, la impresión SLA crea enlaces químicos mediante la reticulación de fotopolímeros, mientras que FDM crea enlaces mecánicos entre capas.



Figura 9: Comparación calidad superficial FDM (izquierda) y SLA (derecha).  
(<https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-compare-types-of-3d-printers/>)

### 3.2. Materiales utilizados (Termoestables vs. Termoplásticos)

Las resinas de fotopolímero de las impresiones SLA son plásticos termoestables, a diferencia de los termoplásticos propios de las impresoras 3D por FDM. La principal diferencia física es que los termoplásticos pueden fundirse en un estado líquido y enfriarse varias veces para formar varias formas, mientras que los plásticos termoestables permanecen en un estado sólido permanente después del curado.

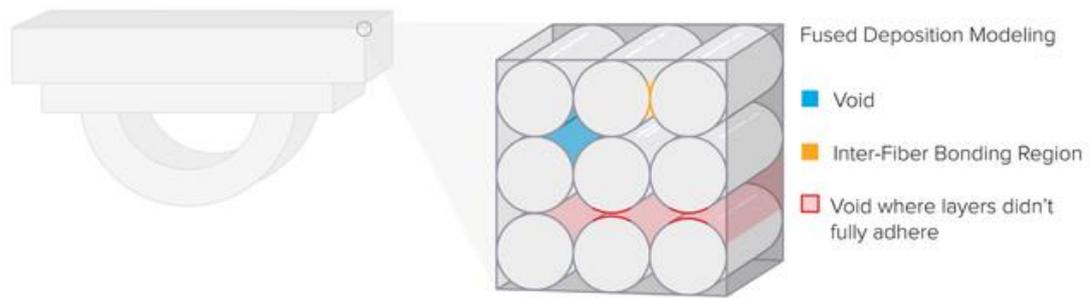
Los polímeros en plásticos termoestables se reticulan entre sí durante el proceso de curado para formar un enlace químico irreversible. Sin embargo, las piezas termoplásticas se ablandan y se vuelven fluidas cuando se calientan, y el proceso es complementemente reversible, ya que no se produce ninguna unión química.

Esta es la razón por lo que las resinas utilizadas en esta tecnología no sean reciclables o sean difícilmente reciclables. Al ser termoestables, no es posible fundir las piezas para que vuelvan a su estado inicial, ya que si se calienta el polímero no se ablandará, sino que se fracturará y acabará por romperse.

### 3.3. Isotropía vs. Anisotropía

La anisotropía se define como tener propiedades físicas que varían con respecto a la dirección, es decir, un objeto impreso en 3D puede tener diferentes alargamientos de rotura o rigidez en las direcciones X, Y y Z.

Las impresoras FDM funden capas de plástico en la parte superior de las capas ya fundidas y solidificadas. Esto crea una adherencia mecánica (no química), es decir, las superficies de capa no están complementemente adheridas entre sí. Así, las piezas impresas tendrán distintas propiedades mecánicas en función de la dirección en que la tensión mecánica los está impactando. Esta es también la razón por la que es difícil producir objetos impermeables, ya que las impresiones FDM están constituidas de hueco y agujeros microscópicos.

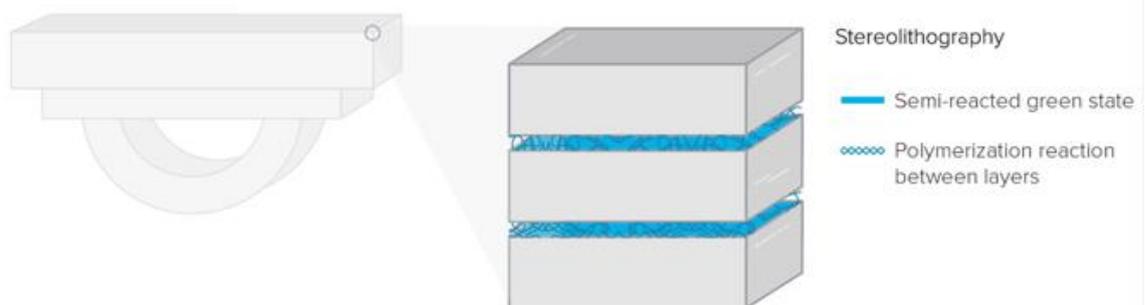


*FDM 3D printers form layers by depositing lines of PLA or ABS. This process means that layers are not bonded together as strongly as the lines (filament extrusion) themselves; there are voids in between the rounded lines and it's possible that layers may not fully adhere to one another.*

**Figura 10: Vista microscópica de una impresión 3D FDM**  
<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#materials>

Dado un patrón de deposición de línea particular, la parte será más fuerte en la dirección de la línea depositada y menos fuerte a lo largo de los ejes que se componen principalmente de estas regiones de enlace entre fibras, es decir, los dos ejes espaciales ortogonales al eje de línea.

Por el contrario, en la impresión 3D SLA no hay diferencia entre los enlaces químicos que forman las capas y las fuerzas que mantienen esas capas juntas. A medida que se forma y se cura cada capa, la reacción de polimerización también incluirá a los grupos de la capa anterior, formando enlaces covalentes no solo lateralmente, sino también con la capa anterior. Esto significa que hay poca diferencia entre el eje Z y el plano XY. Tampoco hay huecos o fisuras microscópicas, por lo que las impresiones son impermeables y completamente densas.



*In SLA prints, there is no difference between the Z-axis and the XY plane in terms of chemical bonds; each continuous part printed on an SLA machine is a continuous polymer network.*

**Figura 11: Vista microscópica de una impresión 3D SLA**  
<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#materials>

En conclusión, podemos afirmar que las impresiones 3D mediante FDM producen piezas finales anisotrópicas, cuyas propiedades quedan relacionadas con la dirección de impresión, mientras que todas las piezas impresas con SLA son isotrópicas, impermeables y densas.

### 3.4. Costos de impresión

Una de las principales ventajas de la impresión 3D FDM es el bajo costo de la máquina. Una impresora 3D convencional para uso doméstico puede costar unos 300€, pero suele ser poco confiable. Las impresoras 3D FDM de escritorio profesionales pueden oscilar entre los 2000€ y los 6000€. Sin embargo, aunque estas impresoras producen piezas funcionales, las impresoras SLA ofrecen una gama de aplicaciones más amplias y mejor calidad de impresión. Estas impresoras SLA rondan entre los 3000€ hasta los 10000€, como es el caso de la impresora Form3L.

En relación a los materiales, los filamentos FDM tiene un costo relativamente bajo. Los materiales como el PLA o ABS básico tienen un coste de unos 17€/Kg. Otros materiales más especializados pueden costar unos 50-75€/kg y los materiales de soporte solubles como el PVA cuesta unos 125€/Kg. Estos filamentos en comparación con las resinas de la impresión 3D son relativamente baratos, ya que las resinas de Formlabs oscilan entre los 150-200€/L.

Por último, hay que hacer hincapié en los costos laborales. Aunque la impresión FDM es relativamente barata, esta requiere un procesamiento más prolongado que la impresión SLA. Los parámetros que hay que controlar en el software para la impresión FDM son inmensamente superiores a los del software de SLA, que ya tiene configuraciones predefinidas para cada material. Esto supone que el operario tendrá que ocupar más tiempo en la configuración del software para impresión en la FDM que en la SLA (más tiempo, más dinero). Aunque las piezas de SLA requieren un post-tratamiento, este curado y lavado se puede realizar de forma automática, que minimiza el tiempo de trabajo. Sin embargo, las piezas FDM que requieran un acabado de alta calidad requieren un post-procesamiento manual prolongado.

### 3.5. Velocidad de impresión

Las máquinas FDM pueden controlar el espesor de capa y el relleno de la pieza, esto da como resultado impresiones más rápidas. Además de no ser necesario un post-procesamiento para piezas simples sin soportes. Esto es ideal para la creación rápida de prototipos y permite evaluar el éxito rápidamente. En las figuras 12 y 13 se puede observar el tiempo de impresión de una misma pieza en la impresora Form 2 (SLA) y en la Ultimaker 3 (FDM), respectivamente.

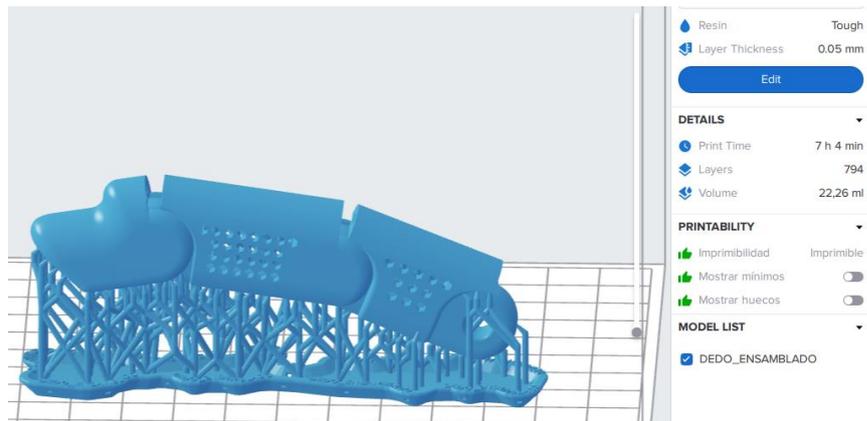


Figura 12: Dedo protésico a imprimir en Form 2 (SLA). (Elaboración propia)

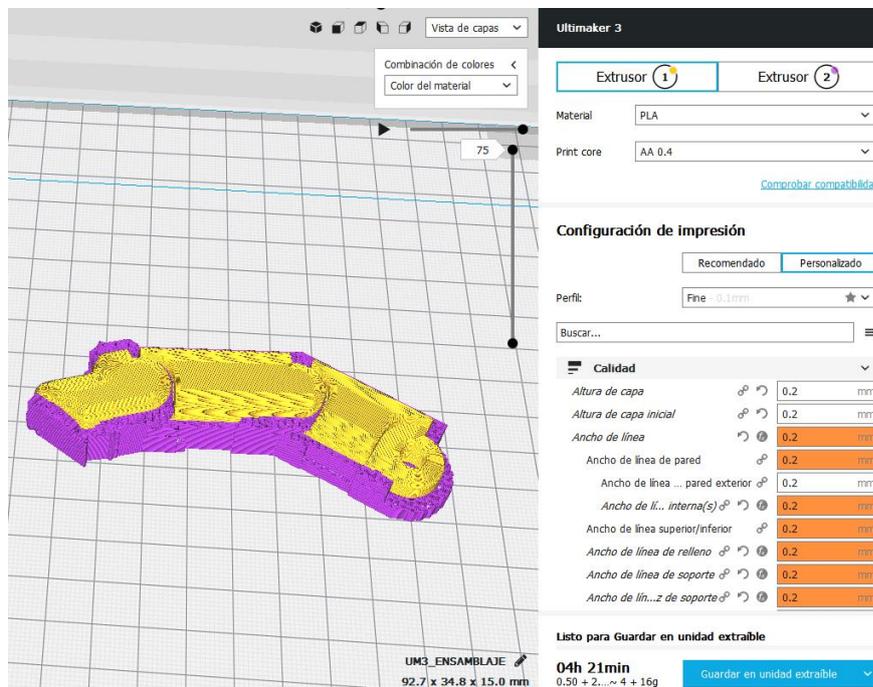


Figura 13: Dedo protésico impreso en Ultimaker 3 (FDM). (Elaboración propia).

Aunque tarde menos las impresiones FDM, si queremos conseguir una calidad comparable con la SLA, las piezas requerirán una altura de capa muy baja, lo que supone aumentar el tiempo de impresión, y un post-procesamiento que requiera tiempo para mejorar el acabado superficial de la pieza.

La figura 14 muestra el tiempo de impresión para una pieza impresa en la Ultimaker 3 (FDM) utilizando la altura de capa propia de la tecnología SLA (0.05mm). El resultado es una impresión que tarda día y media en realizarse, por lo que, para realizar impresiones con una altura de capa muy pequeña, es mejor realizarlo mediante la tecnología SLA.

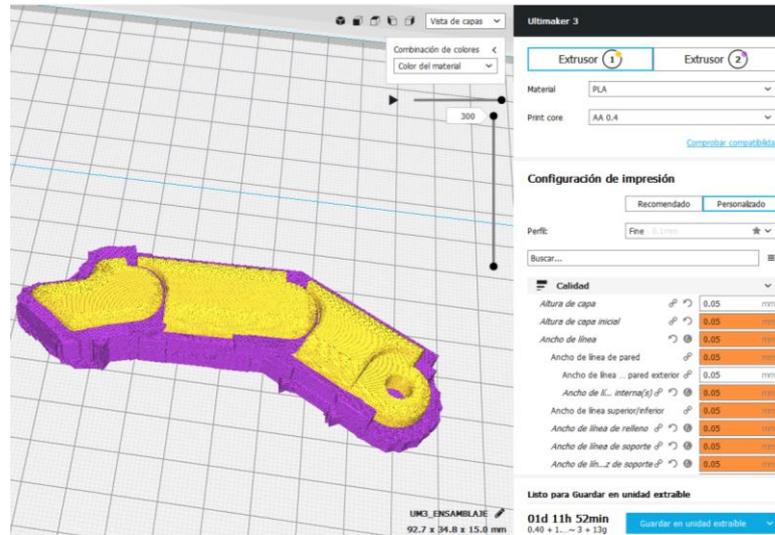


Figura 14: Dedo protésico impreso en Ultimaker 3 (FDM) con la altura de capa de la tecnología SLA. (Elaboración propia).

### 3.6. Resumen y conclusiones

En la siguiente tabla, veremos que cada tecnología de impresión 3D tiene sus puntos fuertes, debilidades y requisitos y si es adecuada para diferentes aplicaciones y negocios.

	<b>Modelado por deposición fundida (FDM)</b>	<b>Estereolitografía (SLA)</b>
<b>Resolución</b>	★☆☆☆☆	★★★★★
<b>Exactitud</b>	★★★★☆	★★★★★
<b>Acabado superficial</b>	★☆☆☆☆	★★★★★
<b>Rendimiento</b>	★★★★☆	★★★★☆
<b>Diseños complejos</b>	★★★☆☆	★★★★☆
<b>Facilidad de uso</b>	★★★★★	★★★★★
<b>Pros</b>	Máquinas y materiales de consumo rápido y bajo costo	Alta precisión, resolución y acabado superficial.
<b>Contras</b>	Baja precisión y detalles. Compatibilidad de diseño limitada	Sensible a la exposición prolongada a la luz UV.
<b>Aplicaciones</b>	Prototipado rápido de bajo costo. Modelado básico de prueba de concepto.	Creación de prototipos funcionales.
<b>Volumen de impresión</b>	Hasta 200 x 200 x 300 mm (impresoras de escritorio)	Hasta 145 x 145 x 175 mm (impresoras de escritorio)
<b>Materiales</b>	Termoplásticos estándar, como ABS, PLA y sus diversas mezclas	Variedades de resina (temoestables) con propiedades muy diferentes.
<b>Formación</b>	Capacitación menor en la configuración de la construcción, operación de la máquina y acabado.	Capacitación menor sobre la configuración de construcción, el mantenimiento, la operación de la máquina y el acabado
<b>Requisitos de instalación</b>	Ambiente con aire acondicionado o con ventilación personalizada para máquinas de escritorio	Las máquinas de escritorio son adecuadas para un entorno de oficina.

<b>Equipos auxiliares</b>	Sistema de extracción de soportes para máquinas con soportes solubles, herramientas de acabado	Estación de lavado de piezas, cámara de curado y herramientas de acabado
<b>Costos de equipo</b>	Impresoras de escritorio desde \$2.000 y los sistemas industriales desde \$15.000	Impresoras de escritorio a partir de \$3.500 y máquinas industriales desde \$80.000
<b>Costos de materiales</b>	\$50-\$150/kg para mayoría filamentos y entre \$100-200/kg para materiales de soporte	\$150-\$200/L para mayoría de resinas estándar y de ingeniería
<b>Necesidades laborales</b>	Eliminación manual de soporte. Se requiere un post-procesamiento prolongado para un acabado de alta calidad	Lavado y post-curado. Post-procesamiento simple para eliminar marcas de soporte.

*Tabla 2: Tabla resumen con las principales características de las dos tecnologías de impresión 3D.*

En la figura 15, podemos apreciar la calidad de cada proceso de fabricación. La mayor calidad de la SLA viene determinada por el punto óptico del láser; además, apreciamos unas superficies más lisas debido a que no hay aplicación de fuerzas (para la polimerización solo es necesario la luz).



*Figura 15: Comparación calidad superficial y precisión de impresión 3D FDM y SLA. ([http://www.jvasconcellos.com.br/fat/FAT\\_TI/wp-content/uploads/2017/08/SLA\\_Guide.pdf](http://www.jvasconcellos.com.br/fat/FAT_TI/wp-content/uploads/2017/08/SLA_Guide.pdf))*

En definitiva, las dos tecnologías tienen características similares y complementarias. Muchas empresas han optado por usar ambas impresoras obteniendo el beneficio de ambas tecnologías: la creación rápida de prototipos de bajo costo y la obtención de piezas funcionales de alta calidad para distintas aplicaciones.

En el desarrollo de un producto, las piezas realizadas mediante FDM son ideales para empezar a realizar los primeros modelos e iterar rápidamente. A medida que el proyecto avanza en su desarrollo, la impresión SLA es ideal para prototipos detallados o funcionales que requieran mejor calidad y/o propiedades.



## 4. IMPRESORA 3D SLA UTILIZADA

Se va a utilizar la impresora Form 2, de la empresa Formlabs. A continuación, se desarrollan algunas de sus características.

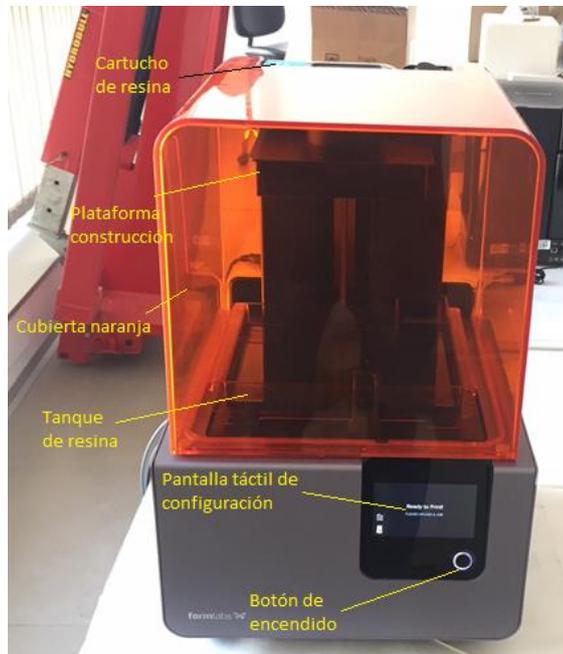


Figura 16: Impresora 3D Form 2 de Formlabs. (Elaboración propia)

Se adjuntan en el anexo 1 las distintas características de la impresora Form2.

Durante la impresión, la plataforma de construcción se mueve sobre el eje Z, el tanque de resina se mueve en el eje X y los espejos del láser se mueven a lo largo de todo el tanque de resina. Al principio de la impresión, la plataforma de construcción baja hasta la altura equivalente a una capa (25, 50 o 100 micras) y va subiendo a medida que la pieza se va imprimiendo.

La cubierta naranja, fabricada por inyección en policarbonato (alta resistencia al impacto) es de color naranja para evitar que la resina dentro del tanque se cure por la luz UV ambiental y para evitar al usuario la exposición del láser de la impresora.

Se pueden hacer piezas de hasta 145 mm de ancho, 145 mm de largo y 175 mm de alto.

## 4.1. Materiales para la impresión 3D

Como hemos mencionado anteriormente, cada empresa tiene sus propias resinas con sus propias propiedades mecánicas, ópticas y térmicas.

Nos vamos a centrar en las resinas creadas por Formlabs, puesto que son las resinas compatibles con nuestra impresora 3D, Form2. A continuación, se van a enumerar los materiales más importantes que se han utilizado para la impresión 3D, así como las características de las resinas que se recogen los anexos del 2, 3, 4 y 5 para las resinas Clear, Durable, Tough y Elastic, respectivamente.

### 4.1.1. Resinas estándar

Las resinas estándar proporcionan una alta resolución con capacidad de capturar las características más finas del modelo y un acabado superficial suave justo al salir de la impresora. Aunque se recomienda el post-curado, no es obligatorio ya que las piezas salen con un excelente acabado superficial listo para convertirse en un producto final. Estas resinas son capaces de imprimir piezas robustas y precisas, por lo que son ideales para la creación rápida de prototipos, desarrollo de productos y aplicaciones de modelado general.

Existen cuatro tipos de resinas de esta clase, la única diferencia significativa es su color, ya que las propiedades mecánicas y la calidad de impresión son las mismas. Su nombre define el color de las resinas, distinguiendo la resina transparente, blanca, gris y negra.

La resina Clear o transparente, que es la que vamos a utilizar, es ideal para piezas que requiera translucidez o que muestre las características internas de la pieza. Está formada por una mezcla de ésteres de ácido metacrílico, fotoiniciadores, pigmentos propios y aditivos.



*Figura 17: Pieza impresa con resina Clear para sustituir un engranaje de un microscopio. (Elaboración propia)*

#### 4.1.2. Resinas de ingeniería

Simulan una gama de plásticos moldeados por inyección, ayudando a los ingenieros y diseñadores de productos a conceptualizar, crear prototipos, probarlos y fabricar productos finales. Se suelen usar para crear piezas funcionales, desde ensamblajes hasta moldes de inyección, superficies suaves al tacto y productos de consumo debido a su funcionalidad avanzada, resistencia al estrés y estabilidad en el tiempo.

Todas estas resinas necesitan un posterior curado para obtener las propiedades mecánicas y térmicas óptimas.

Aunque haya una gran cantidad de resinas de ingeniería como la resina rígida, flexible y de alta temperatura, solo nos vamos a centrar en las tres con las que hemos trabajado.

##### 4.1.2.1. Resina duradera (Durable Resin)

Este material tiene un alto alargamiento y una alta resistencia al impacto, por lo que produce piezas con un acabado suave y alta resistencia a la deformación. Imita las propiedades del polipropileno (PP) o las del polietileno de alta densidad (PEAD) y se utiliza para aplicaciones que requieran una fricción y desgaste mínimo y para piezas que se encuentren en temperatura ambiente.

No es apta para imprimir detalles muy precisos, puesto que se pueden rellenar los huecos si son muy pequeños, ni tampoco para su utilización en ambientes con altas temperaturas y cargas continuas.

Tiene la mayor resistencia al impacto de todas las resinas y su bajo módulo y alto alargamiento lo hacen altamente resistente a la deformación, por lo que es un material excelente para el prototipado de envases de consumo como los dosificadores.

En lo referente al tratamiento posterior a su impresión, es necesario lavar durante 20 minutos en IPA las piezas impresas, pero no se pueden dejar más de ese tiempo porque una exposición excesiva afecta a la calidad de la pieza. Una vez lavada y seca, la pieza se somete a un proceso de curado con una exposición continua de luz y calor. Formlabs recomienda el curado de esta resina en una cámara de luz a 60 °C y una exposición de luz con una longitud de onda de 405 nm durante 60 minutos, ya que existe una ganancia significativa de las propiedades de la pieza entre los 30 y los 60 minutos de curado.



*Figura 18: Rótula fabricada con la resina Durable suministrada por Formlabs.  
(Elaboración propia)*

#### *4.1.2.2. Resina dura (Tough Resin).*

Imita la sensación y muchas de las propiedades mecánicas del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Una de las propiedades más importantes es su tenacidad, que es la capacidad del material de absorber energía antes de fracturarse. Este material ofrece un

buen equilibrio entre resistencia y ductilidad, ya que, aunque posee menos rigidez que las resinas estándar, soporta más alargamiento.

Por su gran resistencia al impacto, este material es perfecto para piezas que necesitan volver a su forma original después de aplicar la fuerza durante un breve período de tiempo.

Esta resina puede mecanizarse una vez impresa, por lo que permite realizar buenos ajustes a presión con geometrías precisas necesarios para ensamblajes complejos.

Una vez impresa la pieza, es necesario refinarla mediante un lavado en alcohol isopropílico (IPA) durante 20 minutos, y al igual que la resina Durable no se debe dejar más tiempo del recomendado, puesto que la impresión puede volverse flexible y débil. En cuanto a su posterior curado, las piezas se deben dejar en la cámara a 60 °C durante al menos 60 minutos. Pasado ese tiempo, las propiedades solo aumentan un 5% hasta estabilizarse.

En la figura 19 se puede observar una cadena impresa con la resina Tough, esta cadena se ha conectado a un dinamómetro y a un gancho y se ha procedido a tirar del gancho hasta que la pieza rompe. El resultado de este experimento es que la cadena Tough resiste hasta un peso máximo de 14,2 Kg, como indicaba el dinamómetro una vez que el experimento había acabado.



*Figura 19: Cadena realizada con la resina Tough a la que ha sido sometida a un ensayo para conocer el peso máximo soportado (Elaboración propia).*

#### 4.1.2.3. *Resina elástica (Elastic Resin).*

Este material elastómero, con una dureza Shore 50A, es adecuado para prototipos de piezas con partes flexibles blandas que normalmente se producen con silicona. Las piezas impresas con esta resina se doblarán, estirarán, comprimirán y mantendrán ciclos repetidos sin rasgarse, debido a su alta resistencia al desgarro, así como un alto alargamiento y retorno de energía.

Normalmente, los materiales elastoméricos no suelen fabricarse mediante impresión 3D, ya que las piezas deben ser lo suficientemente fuertes como para no romperse durante la impresión, y a su vez, elásticas (propiedades generalmente opuestas). A diferencia de la fabricación de materiales elásticos por moldes, mediante la tecnología SLA podemos producir piezas flexibles y blandas con la capacidad de hacer cambios en su forma.

Sin embargo, la impresión con esta resina es mucho más difícil y laboriosa que con las otras resinas debido a su propiedad elástica. Esta resina requiere una densidad de soportes mayor que para cualquier otra resina, además, estos soportes no pueden medir más de 20 mm de longitud porque podrían dar fallos de impresión.

Las piezas que requieran imprimirse con esta resina también deben tener unas especificaciones de diseño concretas. Deben tener un grosor de pared mayor de 600 micras, los diámetros de los agujeros deben ser mayor de 800 micras y hay que orientar la pieza de forma que no haya áreas que empiezan a imprimirse por separado y luego se fusionan durante la impresión.

El post-tratamiento requiere el lavado de la pieza durante 20 minutos en alcohol isopropílico y un curado a 60 °C durante otros 20 minutos.

Respetando estos parámetros, las impresiones suelen ser exitosas y las piezas obtenidas poseen unas propiedades elásticas similares a las piezas elásticas fabricadas por moldes.



Figura 20: Arteria fabricada con la resina Elastic suministrada por Formlabs.  
(Elaboración propia)

#### 4.2. Comparación entre resinas

Como se ha comentado anteriormente, existen varios tipos de resinas, cada una con unas características distintas, que las hacen óptimas para aplicaciones concretas. A continuación, se hará un análisis con gráficos sacados de los ensayos realizados por el fabricante para comparar las características entre las resinas.

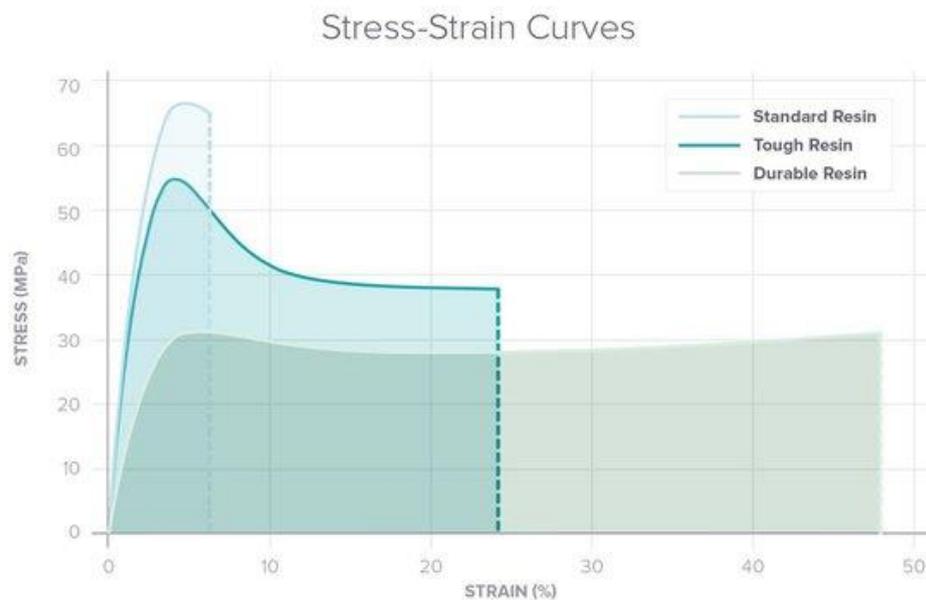


Figura 21: Curvas de tensión-deformación de distintos tipos de resina  
(<https://formlabs.com/materials/engineering/>)

Podemos visualizar en la figura 21 los resultados de un ensayo de tracción de tres de las distintas resinas que hemos descrito anteriormente. La resina Estándar es la menos elástica, aunque es la que más tensión soporta, no tiene apenas deformación y rompe aproximadamente a los 7 % de deformación. La resina Tough tiene unas propiedades de tensión-deformación intermedia entre la resina Estándar y la Durable. Y, por último, la resina Durable es la más flexible, ya que acepta una gran deformación sin romper, pero no soporta mucha tensión, menos de la mitad que la resina estándar.

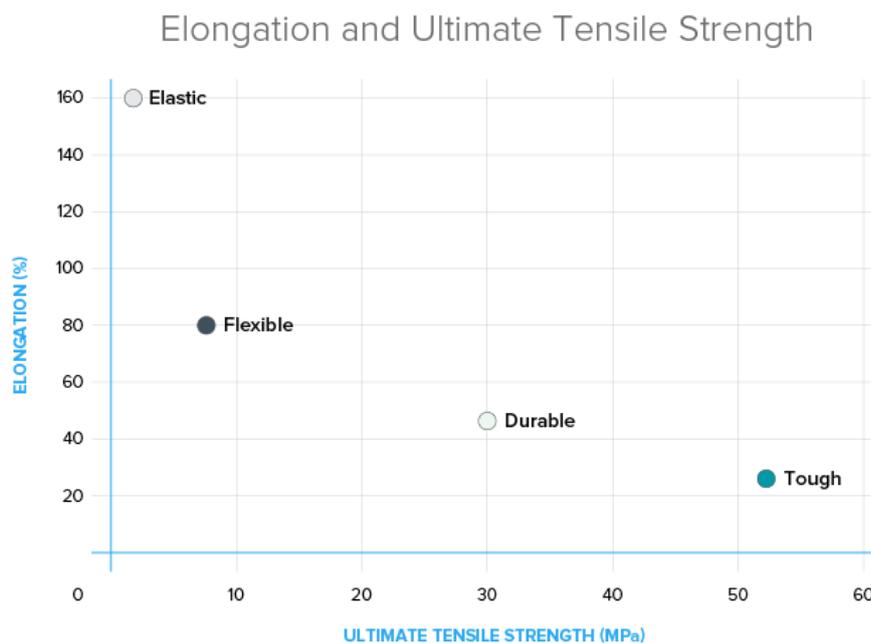


Figura 22: Gráfica comparación elongación-máxima resistencia a tracción  
(<https://formlabs.com/materials/engineering/>)

En la figura 22 podemos apreciar una comparación de los materiales entre su elongación y su máxima resistencia a tracción, o resistencia de rotura. Se puede observar que la resina Elástica, como su nombre indica, es la más elástica de todas las resinas; sin embargo, rompe con mucha facilidad (no llega a 5 MPa), Flexible y Durable tiene un buen comportamiento frente a la resistencia a rotura y la elongación, y con la resina Tough es necesario aplicar una tensión de unos 55 MPa hasta que rompa, pero tiene la menor elongación de todas las resinas de la gráfica aun teniendo un 23% de elongación.

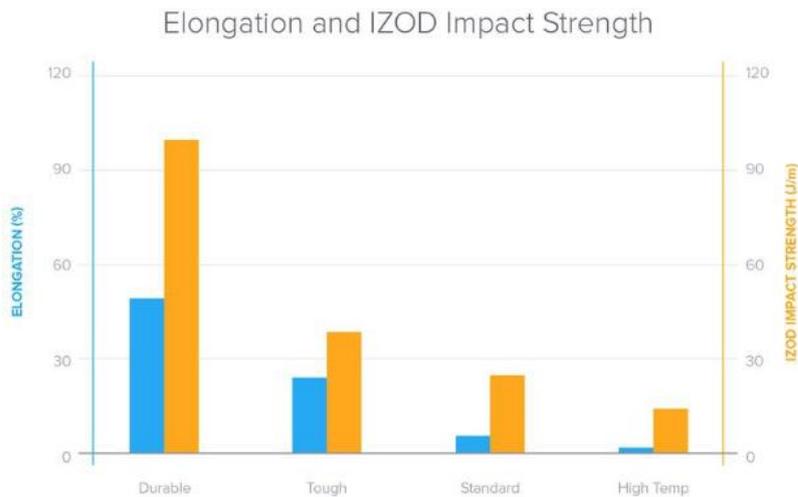


Figura 23: Gráfica comparación de distintas resinas en función de la resistencia al impacto IZOD y la elongación.

(<https://formlabs.com/materials/engineering/>)

En la figura 23 se compara otra vez cuatro tipos de resina de ingeniería en función de su elongación y la resistencia al impacto. El método de resistencia al impacto IZOD mide la cantidad de fuerza que un material puede aguantar sin romperse y el ensayo consiste en un martillo pendular que golpea una probeta. Se puede observar que la resina Durable es la que mayor resistencia al impacto posee, es por esto que la hace una resina excelente para piezas que puedan recuperarse después de recibir un impacto, como los parachoques de los vehículos. La resina Tough, que también ofrece una buena resistencia al impacto, aunque no sea comparable con la resina Durable, también es una solución válida para piezas que necesitan volver a su forma original después de aplicarle una fuerza y que requieran una alta resistencia a la tracción.

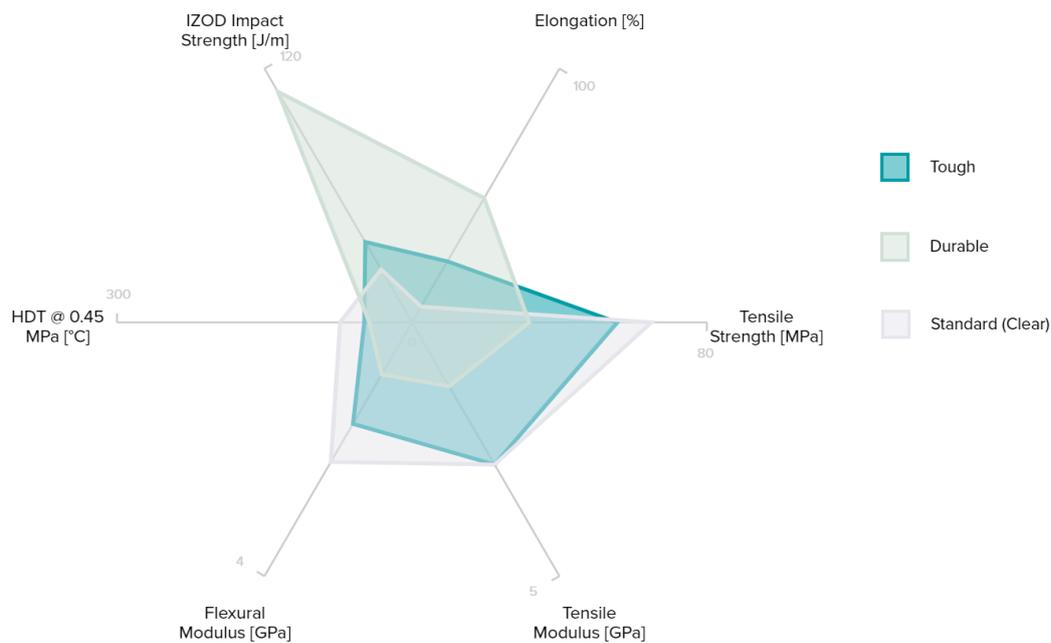


Figura 24: Comparación entre las resinas de ingeniería.  
[\(https://formlabs.com/materials/engineering/\)](https://formlabs.com/materials/engineering/)

Por último, en la figura 24 se observa un gráfico donde se puede resumir todas las anteriores gráficas, se observa claramente el punto fuerte de cada una de las resinas que hemos descrito anteriormente. Sabiendo las características de cada resina, se podrá elegir correctamente cada resina para su uso óptimo dentro de cada campo de la ingeniería.

## 5. ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN SLA

El propósito de este estudio es investigar cómo influye el método de curado en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante SLA y el cambio de estas propiedades a lo largo del tiempo y el tiempo de exposición a la luz solar.

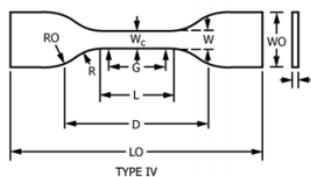
Se va a proceder a ensayar probetas normalizadas según la norma americana ASTM D638-14 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, que es la norma con la que el fabricante ha realizado la caracterización de las distintas resinas con las que trabaja, para obtener los parámetros de tensión máxima, tensión de rotura, deformación máxima y el límite elástico en caso de la resina Durable.

### 5.1. Método de ensayo

La probeta se somete a tracción a lo largo de su eje longitudinal, a una velocidad cuasi-constante hasta que la probeta rompe. Se mide la carga que va soportando la probeta y su deformación a medida que se realiza el ensayo.

#### 5.1.1. Probetas empleadas

En cuanto a la geometría de las probetas se ha seleccionado las del tipo IV de la norma ASTM D638 (Figura 25). Hemos elegido este tipo de probetas por ser las de menor tamaño, para que el gasto de material sea lo mínimo posible.

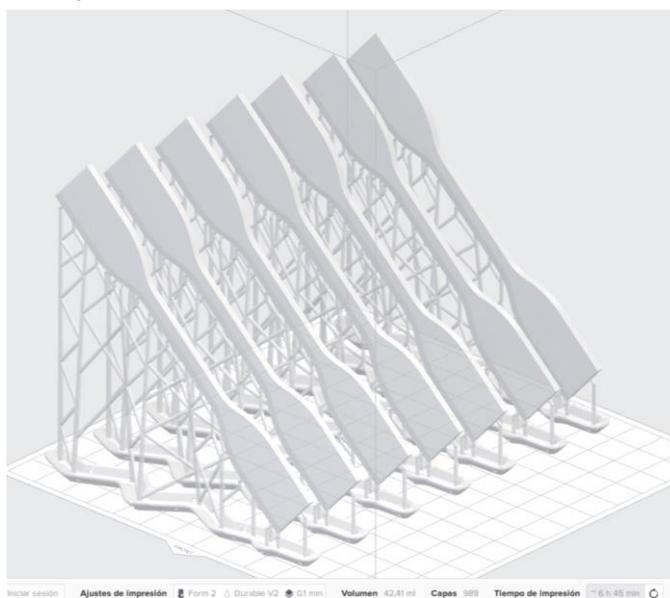


Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, $T$ , mm (in.) <sup>A</sup>					Tolerances
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>	
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>R,C</sup>
$L$ —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>C</sup>
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25$ ( $\pm 0.010$ ) <sup>C</sup>
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13$ ( $\pm 0.005$ )
$D$ —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	$\pm 5$ ( $\pm 0.2$ )
$R$ —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ ) <sup>C</sup>
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ )

Figura 25: Probeta ASTM D638 Tipo IV

(<http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>)

Estas probetas se imprimirán en la Form 2 de la forma exactamente igual, con la misma orientación y mismos soportes, respetando al máximo posible la exactitud de la prueba y desechando las probetas defectuosas. Se van a imprimir 6 probetas de cada tipo para su posterior ensayo y los resultados finales serán la media aritmética de los valores obtenidos de cada ensayo. A continuación, en la figura 26 se muestra cómo están organizadas las probetas cuando se van a imprimir.



*Figura 26: Organización de las probetas en la impresora (Elaboración propia)*

### 5.1.2. Máquina de ensayo

Para llevar a cabo los ensayos se ha empleado el modelo MARK-10 equipada con una célula de carga capaz de medir fuerzas de hasta 1kN conectada a través de la tarjeta de adquisición de datos al ordenador.

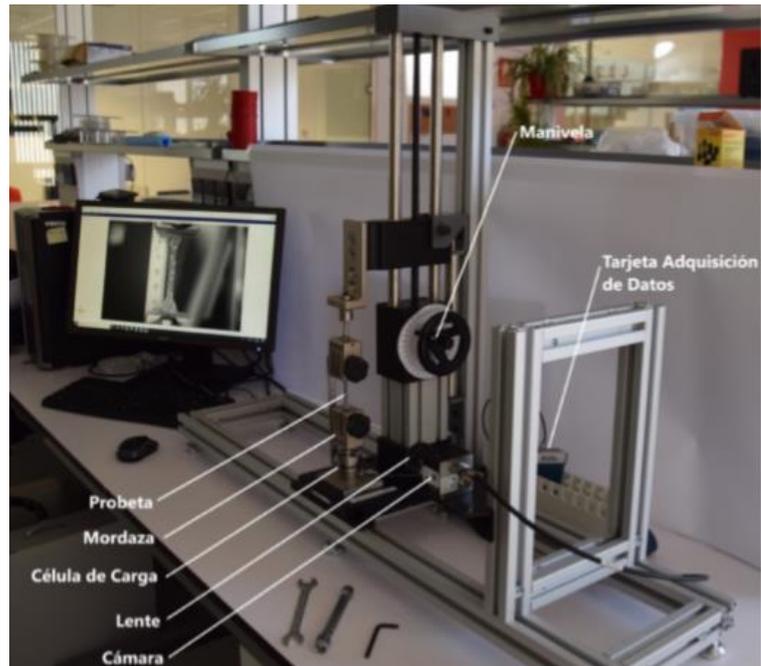


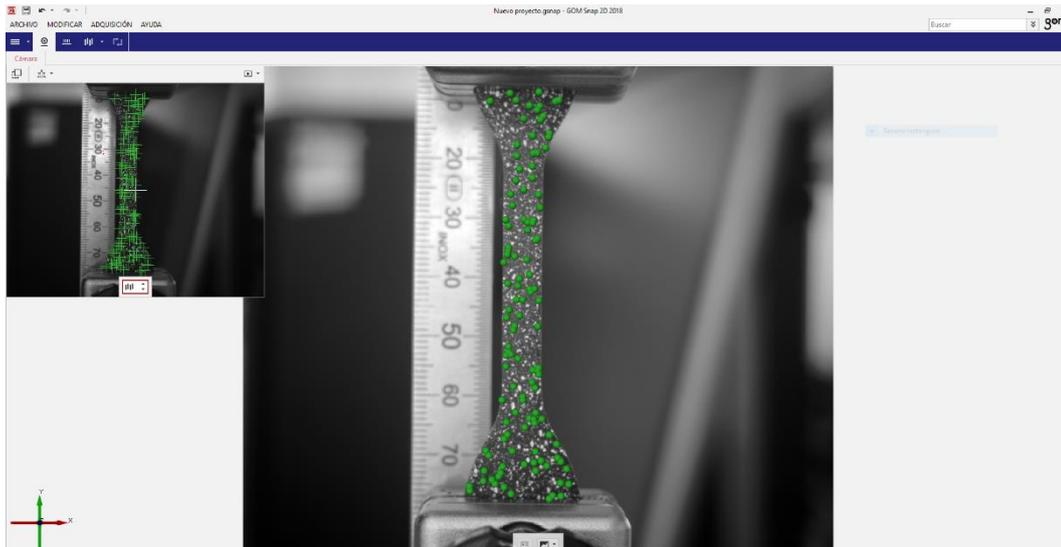
Figura 27: Máquina de ensayos (TFG Jorge Valentín-Gamazo García)

La célula de carga nos proporciona los valores de la tensión necesaria para romper la probeta, estos valores de carga aplicada son medidos mediante el software Labview a una frecuencia de 20 Hz, una vez ensayada la probeta, los datos son exportados a un fichero Excel.

Mediante la cámara y con el uso de correlaciones de imágenes digitales (DIC) podemos observar los valores de la deformación de la probeta hasta el punto de rotura. Este método óptico de medición sin contacto permite medir coordenadas para evaluar la deformación producida a partir de imágenes tomadas durante el ensayo.

Al ser un método óptico, es necesario que a las probetas se le someta a un proceso de pintado de una superficie negra con un moteado aleatorio de color blanco para obtener el máximo contraste.

Para la toma de imágenes se ha empleado el software GOM Snap 2D, permite obtener imágenes a una frecuencia de 20 Hz durante el tiempo que dure el ensayo. Así, si el ensayo dura unos 20 segundos, se obtendrá un total de 400 imágenes. Las imágenes deben ser procesadas mediante el software GOM Correlate, que selecciona un intervalo de imágenes desde el estado inicial, que sirve como referencia, al estado de rotura, donde la deformación es máxima.



*Figura 28: Probeta pintada y colocada en la máquina de ensayo. Foto del programa GOM Snap 2D (Elaboración propia)*

El ensayo no es del todo exacto, ya que, para hacer subir la mordaza, utilizamos una manivela accionada manualmente. Al ser un movimiento no controlado, no podemos asegurar la exactitud de la prueba, sin embargo, esta se ha hecho respecto al máximo la prueba y la velocidad de rotación de la manivela se ha intentado realizar lo más uniforme posible.

## 5.2. Importancia del curado posterior

Los modelos fabricados por fotopolimerización o estereolitografía se forman mediante la impresión de capas superpuestas curadas o solidificadas mediante radiación ultravioleta. Las propiedades mecánicas dependerán del correcto curado entre las capas. Sin embargo, una exposición prolongada a esta radiación produce cambios en las propiedades de los materiales, por lo cual su estudio y análisis es importante para evitar estos cambios de propiedades.

El objetivo del post-curado es vincular la mayor cantidad de grupos sin reaccionar para que al unirse, se alcancen las máximas propiedades del material.

Un post-curado óptimo es una combinación óptima de luz y calor en una cámara. El aumento de temperatura, aumenta la energía, por tanto, aumenta la movilidad de las moléculas en la red de polímeros, necesaria para que los grupos reactivos se encuentren y se unan con mayor probabilidad.

Una vez alcanzada la temperatura óptima, es el momento adecuado para activar la luz. Los grupos reactivos, que están demasiado cerca como para

tocarse, forman enlaces con los radicales generados por los fotoinciadores (activados mediante los fotones de la luz) y la red de polímeros se forma con la unión de estos enlaces entrecruzados.

### 5.2.1. Tipos de probetas a ensayar

Todas las probetas se han diseñado con según la norma ASTM D638 Tipo IV, descrita anteriormente. Aunque todas van a ser lavadas 20 minutos en IPA, el método de curado va a ser distinto, en total se van a imprimir cuatro tipos de probetas a ensayar, que junto con las seis probetas que se imprimen de cada tipo, hacen un total de 24 probetas:

- 6 de ellas se van a curar a 60 °C en la cámara de curado de Formlabs, FormCure durante 30 minutos
- 6 serán curadas otros 30 minutos en un horno de luz con temperatura ambiente dentro de él
- Otras 6 se curarán en un horno de calor a 60 °C durante otros 30 minutos
- Las últimas 6 probetas se someterán a un curado al aire libre, dejándolas al Sol durante el mismo tiempo que las demás.

Todas las probetas después de su curado se dejaron 24 horas encima de la mesa del laboratorio, se pintaron y se ensayaron en la máquina de ensayo Mark-10.

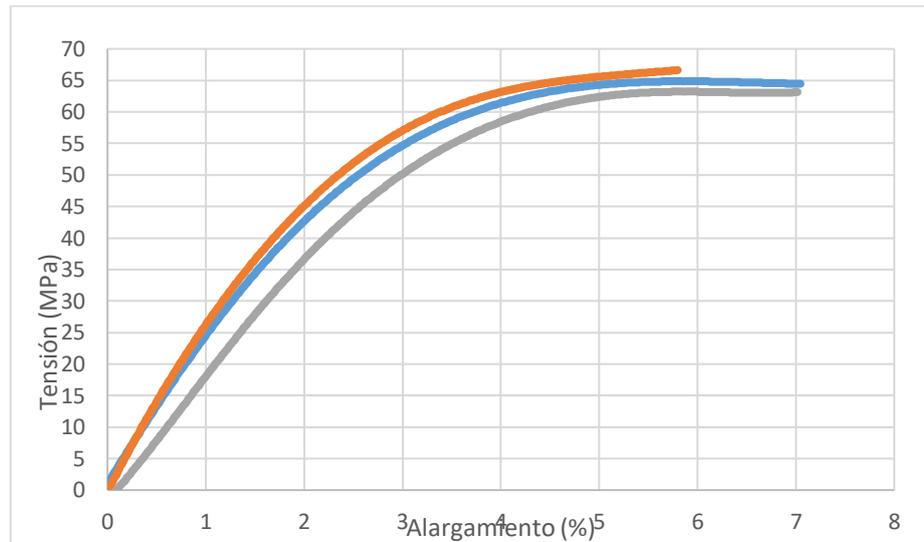
### 5.2.2. Resultados experimentales

A continuación, se muestra la tabla 3 con los resultados completos obtenidos del ensayo a tracción de las distintas probetas. Estos resultados son la media aritmética de las 6 probetas que se han ensayado para cada tipo de curado.

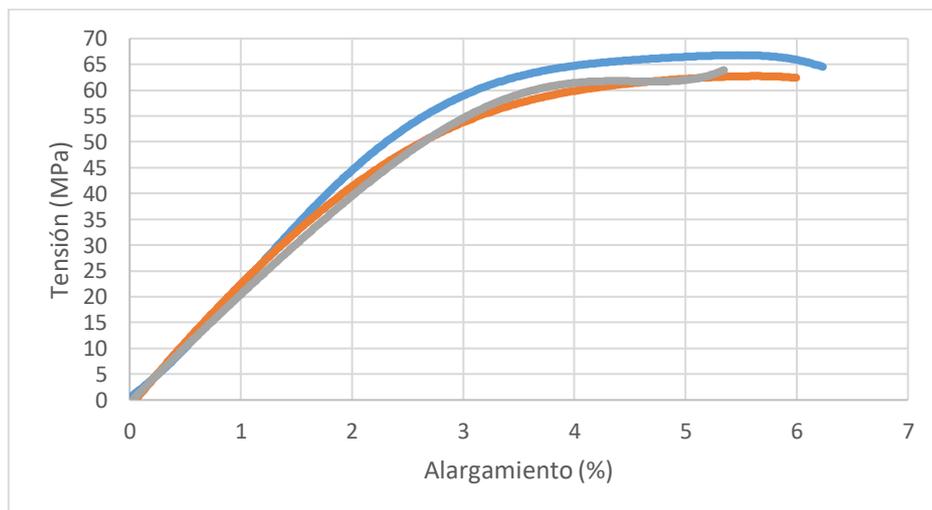
Propiedad	Método de curado			
	FomCure	Horno de luz	Horno de calor	Aire libre
Tensión máxima (MPa)	66,9339	67,3334	70,9244	65,1885
Tensión a rotura (MPa)	64,892	29,7499	45,7943	38,9049
Deformación máxima (%)	7,0482	6,2341	7,143	7,5489

*Tabla 3: Resultados experimentales de los ensayos a tracción de las probetas curadas con distintos métodos.*

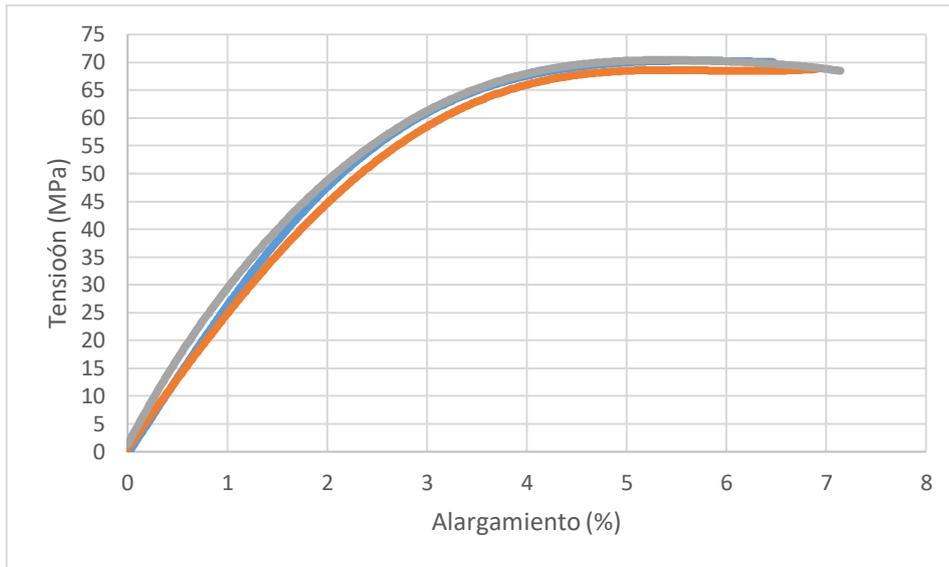
Las siguientes gráficas corresponden a los diagramas de tensión deformación de los resultados obtenidos en los ensayos. De las 6 probetas que se han ensayado en cada método de curación, se han elegido 3 de ellas para insertarlas en la gráfica para que se pueda observar con la mayor claridad posible. Como los resultados obtenidos del ensayo de cada probeta se parecen mucho, se han elegido las que más difieren unas de otras.



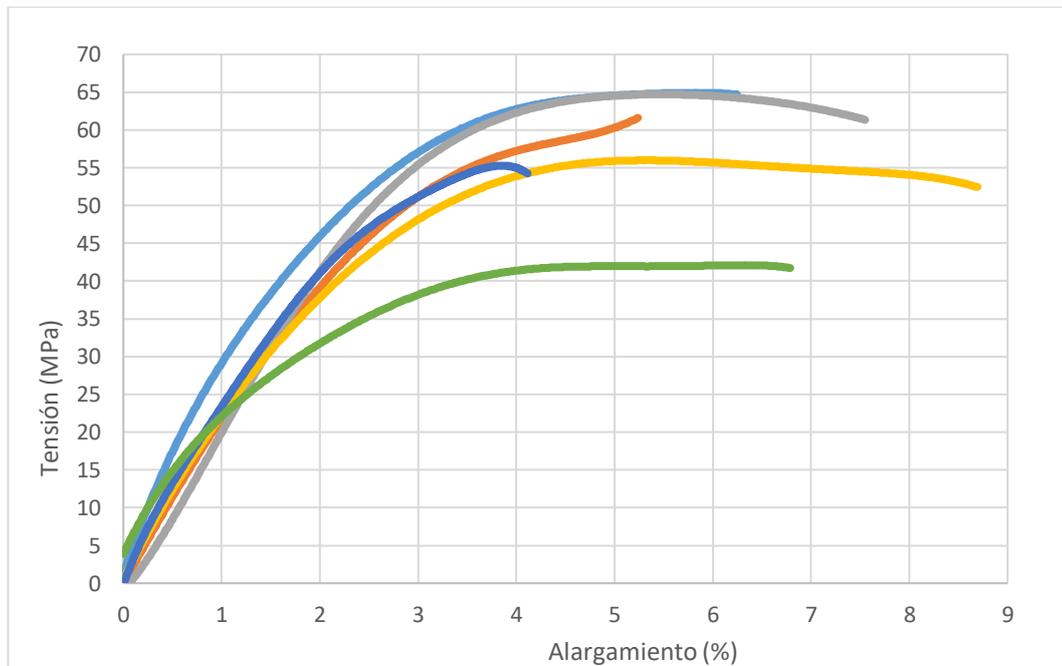
Gráfica 1: Diagrama Tensión Deformación curado en FormCure



Gráfica 2: Diagrama Tensión-Deformación curado en horno de luz



Gráfica 3: Diagrama Tensión-Deformación curado en horno de calor



Gráfica 4: Diagrama Tensión-Deformación curado al aire libre

### 5.2.3. Conclusiones de los resultados

De los resultados obtenidos, se puede comprobar que con el curado en la cámara de curado de Formlabs, FormCure, se obtienen los mismos resultados de tensión máxima que en la hoja de especificaciones que nos suministra el fabricante, sin embargo, el alargamiento es un poco mayor que los 6.2 % que aparece en dicha hoja.

Comparando los resultados, el curado de las piezas en el horno de luz nos da unos valores menores que para el curado en la FormCure, esto es debido a que no existe un aumento de temperatura en la pieza necesaria para que el proceso de fotopolimerización se complete.

El curado en el horno de calor produce una tensión máxima mayor que con la cámara de Formlabs, unos 70 MPa, no obstante, se produce una elongación igual que con dicha cámara, esto puede ser porque el calor influye directamente en la elongación del material.

Por último, los ensayos de las probetas curadas al aire libre nos dan unos resultados no homogéneos. No existe parecido en las propiedades mecánicas entre ninguna probeta de las ensayada, aunque todas se hayan curado a la vez en el mismo lugar. Se ha decidido meter todos los ensayos que se han realizado para observar que ninguna de ellas tiene propiedades parecidas. Esto puede ser debido a que la luz solar irradiada a las probetas no es igual para cada probeta y que la temperatura a la que están sometidas las probetas no es suficiente para que dé lugar la movilidad de las moléculas en la red del polímero.

Como esta resina constituye a las resinas estándar, y para estas no es necesario su curado, las propiedades de los distintos métodos de curado no difieren mucho. Sin embargo, en las resinas de ingeniería es muy importante llegar a una temperatura óptima para que se pueda producir el efecto de movilidad de las moléculas y una vez que las moléculas están en movimiento, activar la luz que hace que las moléculas se empiecen a unir unas con otras.

Aunque la FormCure, de Formlabs, es la combinación perfecta para aquellos que usen su impresora 3D, su elevado precio puede suponer un problema (700€ cuesta la cámara de curado) para los que estén interesados en la impresora para uso recreativo. Existe la solución de hacer uno mismo su propia cámara de curado, lo único que se necesita es una luz de 405 nm, un regulador de temperatura y temporizador y una placa giratoria para que la exposición de luz sea lo más uniforme posible.

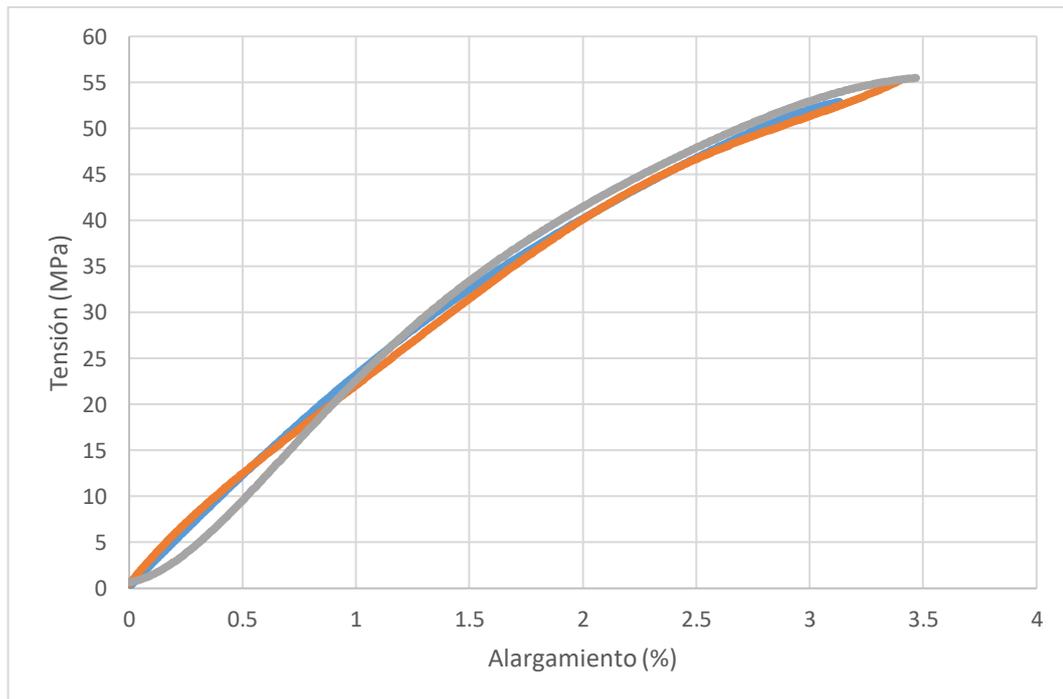
### 5.3. Propiedades frente al tiempo y la exposición de luz

Como se ha mencionado anteriormente, algunas resinas no han sido diseñadas para la exposición continua de luz y calor. A medida que pasa el tiempo, las resinas pueden perder las propiedades mecánicas que las caracterizaban, volviéndose de peor calidad o incluso fracturarse con el uso.

Mediante este ensayo, vamos a comprobar que las propiedades de las resinas pueden cambiar debido a la exposición prolongada de luz.

Para comprobar esta teoría, se utilizó la resina Clear utilizada anteriormente, las probetas una vez impresas, se lavaron, se curaron en el horno de luz y se dejaron 3 meses en una mesa de laboratorio a temperatura ambiente y con poca exposición a los rayos de Sol.

Los resultados obtenidos se reflejan en la gráfica 5. Comparándola con la gráfica 2 del ensayo anterior, las propiedades del material se redujeron considerablemente, llegando la elongación máxima de las probetas en reposo 3 meses a reducirse hasta casi la mitad de la elongación de las probetas ensayadas 24 horas después de su curado. La tensión también disminuye y no existe un período de estabilidad de esfuerzo mientras la probeta se deforma.



*Gráfica 5: Diagrama esfuerzo-deformación probetas Clear ensayadas 2 meses después de su curado*

Aunque esta resina pierda las propiedades para las que estaba diseñado, no quiere decir que todas las resinas con las que trabaja Formlabs les pase lo mismo. Existe la resina Durable, mencionada anteriormente, que es ideal para

productos que requieran larga vida útil. A continuación, vamos a comprobar esta teoría mediante el ensayo a tracción de probetas impresas en resina Durable que se han dejado en reposo hasta su ensayo durante distintos tiempos y exposiciones de luz.

Es importante tener en cuenta que cuando a la resina Durable, que es un polímero termoestable y elastómero, se le aplica una fuerza externa, tiene lugar una deformación elástica y plástica ligado a la forma en que las cadenas del polímero se mueven entre sí. El ensayo a tracción para obtener la deformación de estos polímeros depende del tiempo que se está aplicando la carga y la rapidez con la que se aplica dicha carga. Así, la figura xx muestra una curva característica de esfuerzo-deformación de un polímero termoplástico típico bajo la aplicación de una carga. Esta curva tendrá gran similitud con los diagramas que obtendremos de los resultados de los ensayos de las probetas Durable.

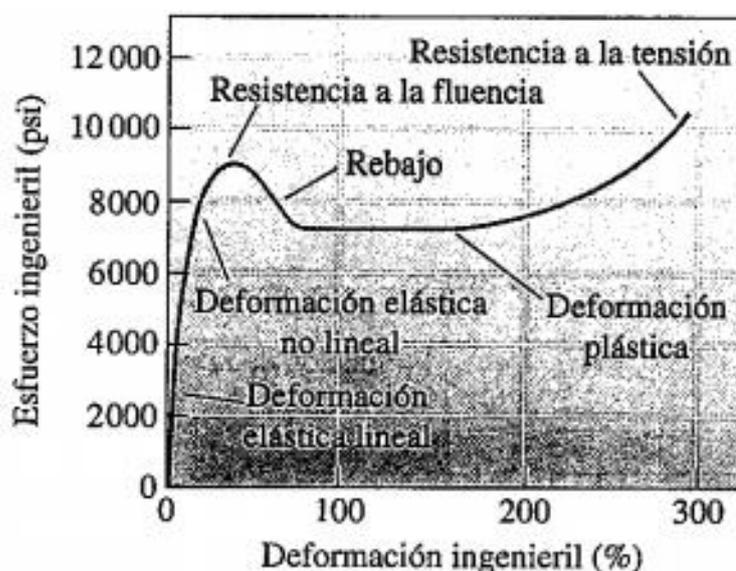


Figura 29: Curva esfuerzo-deformación del Nylon-6,6. (Ciencia e Ingeniería de los materiales, Donald R. Askeland, 6ª edición)

### 5.3.1. Tipos de probetas

El ensayo consiste en diversas probetas impresas con resina Durable (100 micras de altura de capa) y curadas exactamente igual (1 hora a 60°C) que se han ido ensayando en distintos períodos de tiempo. En total son cinco clases de seis probetas cada clase, haciendo un total de 30 probetas:

- 6 probetas se han ensayado pasadas 24 horas después de ser curadas
- Otras 6 se ensayaron pasados 3 días
- 6 serán ensayadas 1 semana después de su curación

Todas estas probetas han estado en reposo encima de una mesa en una habitación de laboratorio, con poca o nula exposición de luz. Para obtener el caso extremo en que las piezas impresas con esta resina se sometían a largos períodos de exposición al aire libre, se han añadido otras dos clases de probetas.

- 6 probetas han estado en reposo al aire libre durante 1 mes en un lugar donde van a estar a la sombra la mayor parte del día, con una exposición de luz solar de media tarde.
- Las últimas 6 permanecerán en reposo durante 2 semanas y se colocarán en un lugar con una exposición de luz solar de toda la mañana y parte de la tarde.

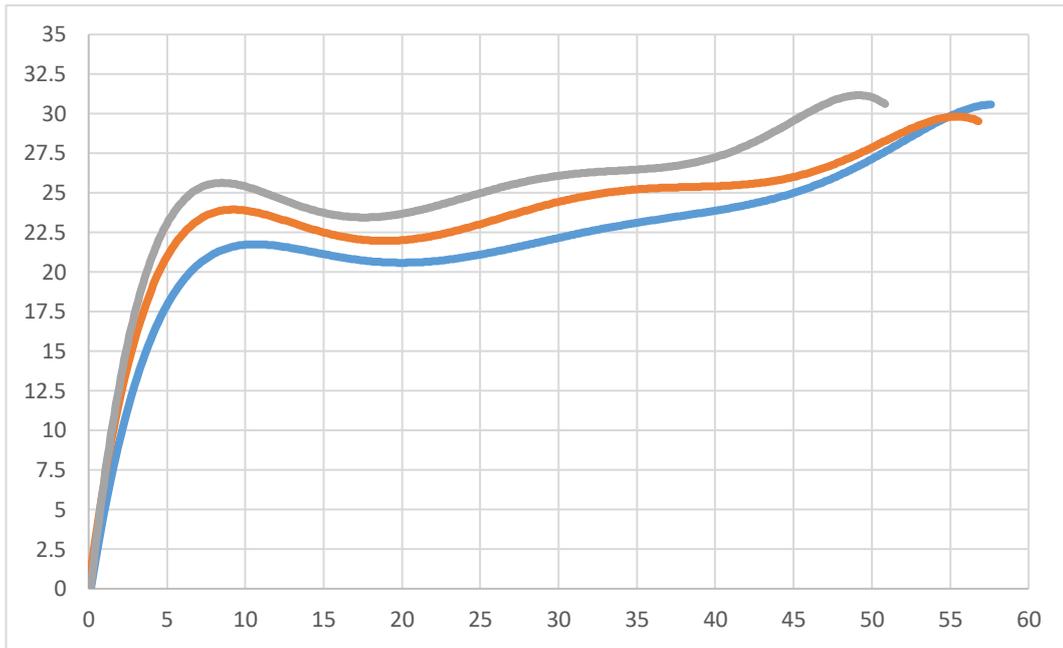
### 5.3.2. Resultado experimentales

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos del ensayo a tracción de las probetas de resina Durable en la siguiente tabla, hemos tenido en cuenta el esfuerzo máximo, la tensión de rotura, el límite elástico y la deformación máxima que se producen una vez ensayadas las probetas:

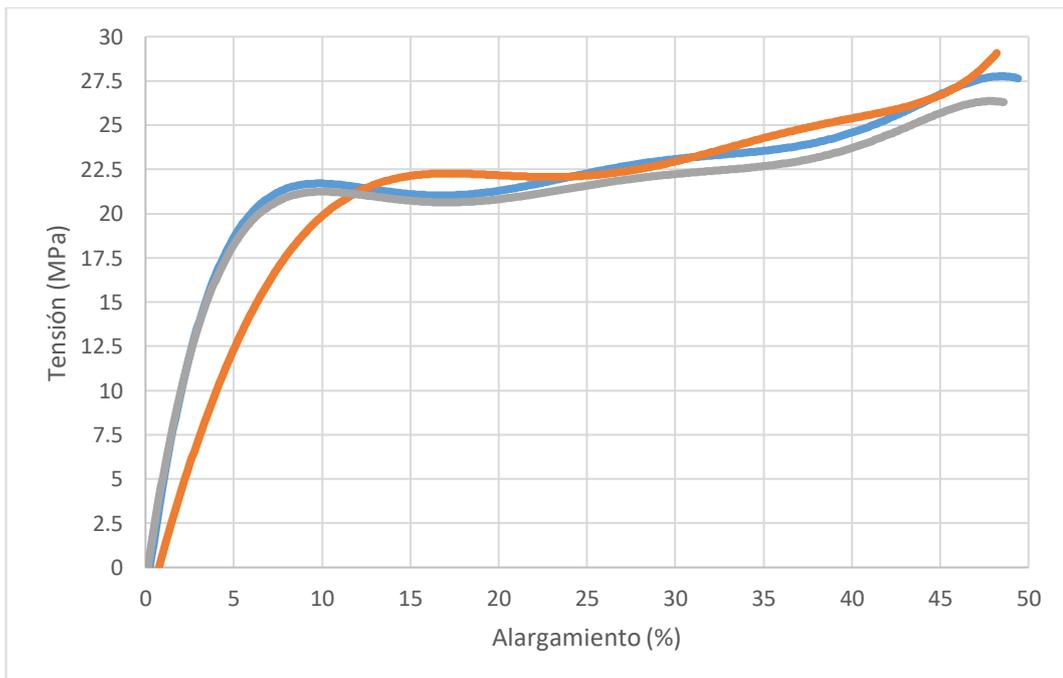
Propiedad	Tiempo de reposo				
	24 horas	3 días	1 semana	2 sem. al Sol	1 mes aire libre
Tensión máxima (MPa)	31,6138	28,4941	25,6303	29,6647	29,1413
Tensión a rotura (MPa)	29,3006	27,0105	24,8527	22,4473	21,5977
Límite elástico	24 MPa	22 MPa	22,5	21,5	25
Deformación máxima (%)	57,6074	49,4031	45,53	54,0371	47,8912

*Tabla 4: Resultados experimentales de las probetas ensayadas en distintos tiempos de reposo.*

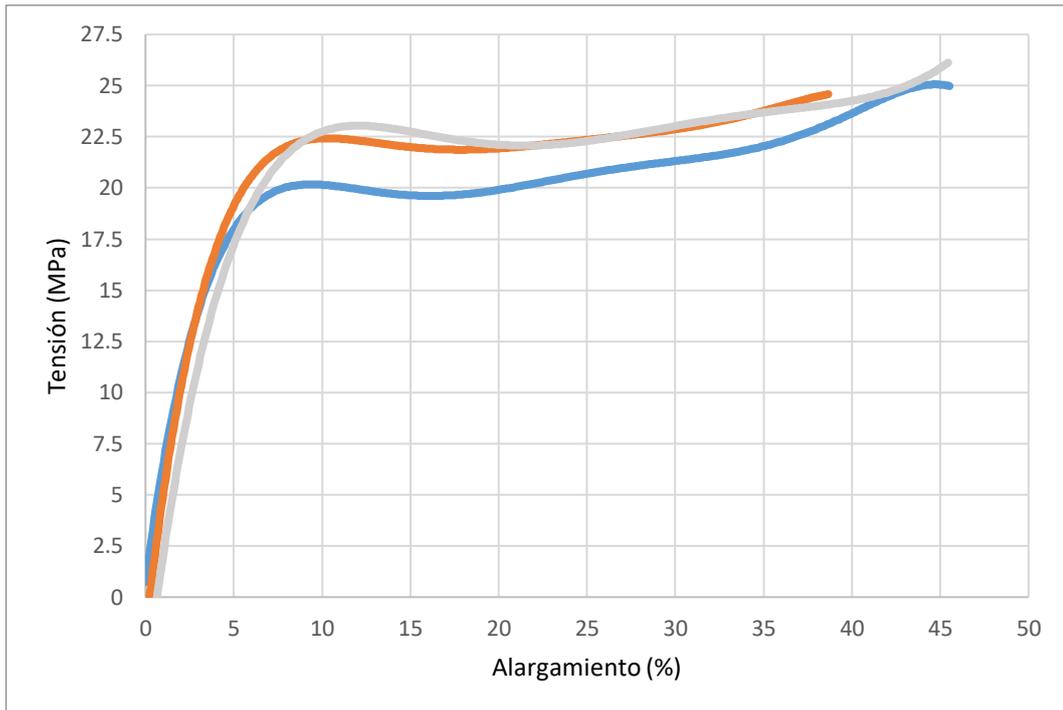
Los diagramas obtenidos de los distintos ensayos van a tener una curva similar a la de la figura 29, sin embargo, en la zona de deformación plástica no existe un esfuerzo constante en el que aumente la deformación, a medida que se va deformando la probeta, el esfuerzo va aumentando progresivamente hasta alcanza el punto de rotura. Los siguientes diagramas proceden de los resultados obtenidos por las distintas probetas a ensayar en la máquina de tracción:



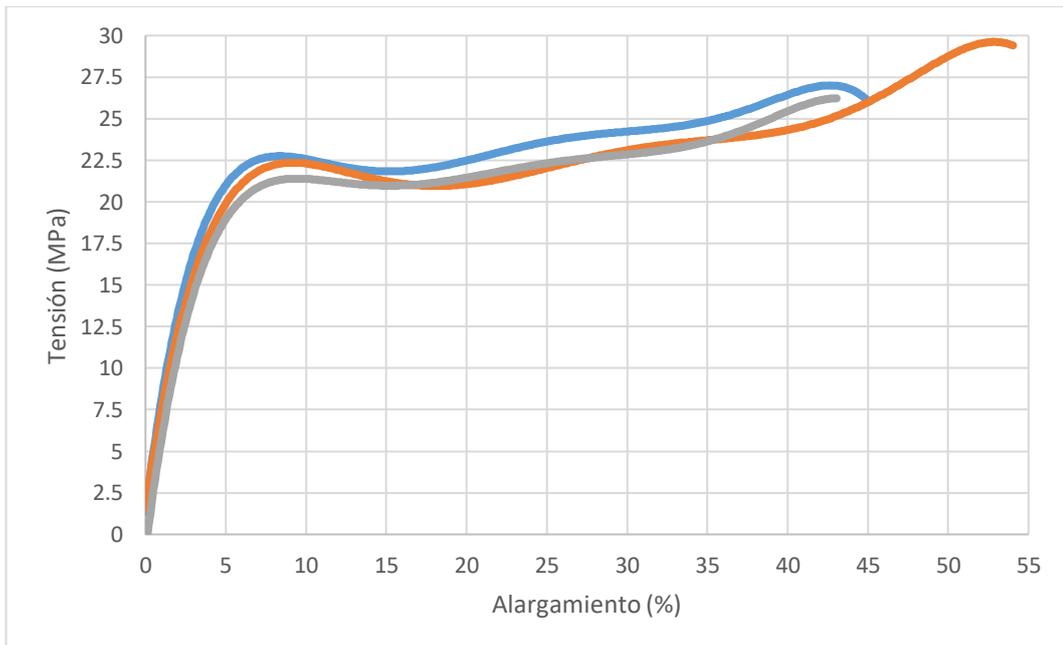
Gráfica 6: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 24 horas



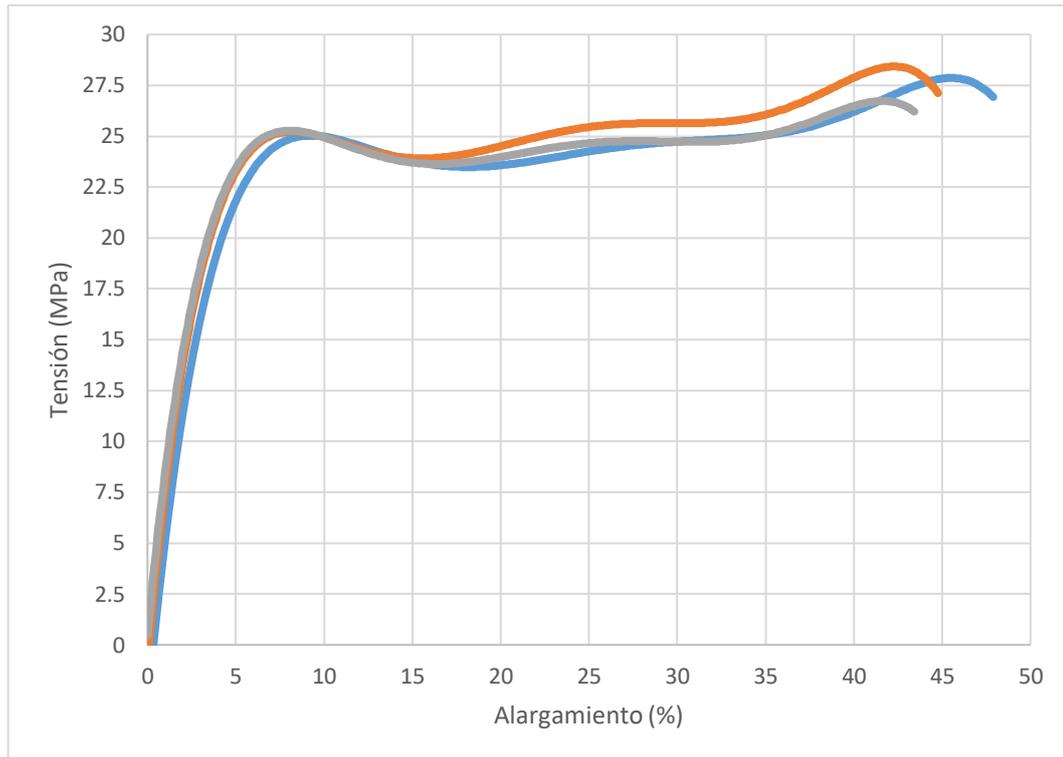
Gráfica 7: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 3 días



Gráfica 8: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 1 semana



Gráfica 9: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 2 semanas al Sol la mayor parte del día



Gráfica 10: Diagrama esfuerzo-deformación reposo 1 mes al aire libre

### 5.3.3. Conclusiones del ensayo

Los resultados experimentales obtenidos del ensayo a tracción nos permiten conocer cómo se comporta la resina Durable frente al tiempo y al grado de exposición de luz.

En un principio, las piezas curadas y ensayadas 24 horas después tienen un alargamiento de casi el 60%, muy superior a cualquier otro ensayo posterior y superior al de la hoja de especificaciones de Formlabs, debido a que las propiedades de la pieza todavía no se han estabilizado. El límite elástico se encuentra en torno al 9% de su elongación y unos 24 MPa, después del límite, el rebajo es acentuado y se entra en la zona plástica en 17% de elongación y 22,5 MPa de esfuerzo. Esta zona irá incrementando el esfuerzo a medida que aumenta la deformación hasta su rotura.

Pasados tres días del curado, las piezas obtienen tanto un alargamiento como un esfuerzo menor que para las ensayadas 24 horas después, pero el límite elástico llega hasta el 10% y el rebajo hasta entrar en la zona plástica es menos acentuada.

Las probetas que permanecieron una semana en una habitación y se ensayaron han reducido sus propiedades mecánicas, tanto alargamiento como

esfuerzo (45% y 25 MPa). Cuanto más pase el tiempo, las propiedades irán disminuyendo hasta que se consigan estabilizarse en el tiempo.

Las probetas que se dejaron en reposo durante 2 semanas al Sol contienen unas propiedades similares a las probetas en reposo 1 semana (45% y 27,5 MPa), las propiedades se van estabilizando hasta que llegan las probetas ensayadas al mes de curarlas. Estas probetas tienen las propiedades estabilizadas hasta conseguir un alargamiento del 45 % y un esfuerzo necesario para su rotura de 27,5 MPa.

Mediante estos ensayos a tracción hemos podido comprobar que la resina Durable apenas cambia sus propiedades a lo largo del tiempo. Gracias a esta característica de durabilidad de las propiedades frente al tiempo y el grado de exposición de luz, esta resina es la idónea para la posterior aplicación del dedo protésico articulado y para cualquier otra pieza que requiera un uso constante sin que sus propiedades varíen con el tiempo.



## 6. FABRICACIÓN DE UN DEDO PROTÉSICO ARTICULADO

La tecnología de impresión 3D está en auge en los últimos años debido a su bajo costo y su versatilidad en su rango de aplicaciones, que va desde el sector de la medicina hasta el sector de la automoción. Las empresas utilizan este método de fabricación para la realización de prototipos funcionales con un precio reducido. Nuestra empresa, 4inn, se dedica a la fabricación de órtesis de miembros superiores e inferiores y actualmente, se está ocupando de la creación de una prótesis de miembro superior mediante esta tecnología de impresión 3D por estereolitografía.

Este proyecto constituye una introducción al proyecto de creación de miembro superior, pues es obligatorio conocer las características de los materiales y de la impresora para obtener el mejor rendimiento al producto funcional. El objetivo de este proyecto es diseñar y fabricar un dedo protésico ensamblado y articulado, de modo que una vez finalizada la impresión el dedo sea capaz de moverse y una vez lavado y curado, el dedo esté listo para usarse.

La mayoría de los dedos protésicos creados hasta ahora se fabrican por partes y, posteriormente se ensamblan para que quede una sola pieza; sin embargo, es necesario que utilicemos piezas externas como tornillos o pasadores. El objetivo de este proyecto consiste en conocer la precisión dimensional de las distintas resinas para fabricar de una sola impresión una falange articulada mediante cuerdas.

Hay que tener en cuenta que las resinas no son iguales, cada una tiene sus propios parámetros de impresión y distintas propiedades. Lo primero que debemos estudiar son las especificaciones de la aplicación a realizar para utilizar la resina que optimice el resultado.

Las especificaciones que debe tener una falange impresa mediante tecnología SLA son las siguientes:

- Deben ser livianas: una mano puede tener un peso medio de unos 700 gramos, si suponemos que la palma pesa tres cuartas partes del peso de la mano, nos queda que el peso de cada dedo no debe superar los 35 gramos. Mediante el diseño del modelo CAD, podemos vaciar el interior del dedo haciendo que este pueda llegar a pesar un 50% menos de lo que pesa un dedo humano.
- Deben ser resistentes: la mano es fundamental para ejecutar acciones tanto en el campo laboral como en el entretenimiento y deporte, pudiendo realizar actividades básicas hasta otras muy especializadas que requieran de un esfuerzo alto.
- Deben ser duraderas: el uso continuo y diario de los dedos y las manos hace que esta especificación sea especialmente importante. Es

necesario obtener un dedo que sea estable a lo largo del tiempo y que sus propiedades no cambien a medida que se vayan utilizando.

- Deben tener superficies suaves y con buen agarre: una de las ventajas de la impresión SLA es su calidad superficial, capaz de fabricar unas superficies lisas y agradables al tacto. Sin embargo, esta característica suele ser contraria al agarre. Cuanto más rugosa es una pieza, mejor agarre tiene. Para solucionar este problema se ha optado por fabricar una funda que cubra la superficie del dedo de manera que haga la función de piel.

El primer paso en la fabricación del dedo es el diseño de un modelo CAD ya ensamblado. Este ensamblaje se convierte en archivo STL que consigue transformarlo en una sola pieza lista para la impresión. A continuación, se detalla con precisión cuales fueron los pasos realizados al diseñar y al fabricar el dedo y las soluciones adoptadas para conseguir el resultado final.

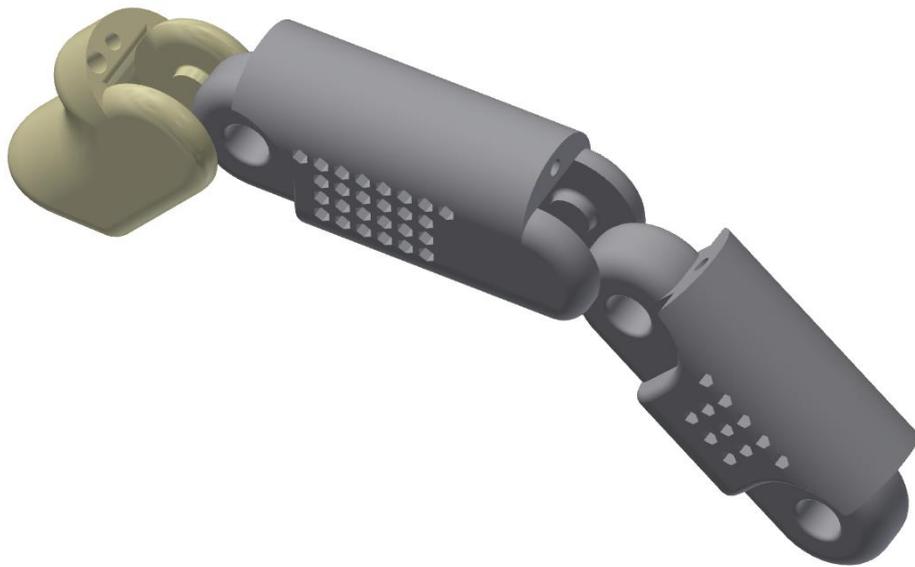
### 6.1. Diseño del dedo protésico

El diseño del dedo ensamblado se ha realizado partiendo de la especificación de precisión dimensional que podemos lograr mediante esta tecnología de impresión 3D. Se han elegido tres diseños a fabricar: un diseño en el que se impriman las distintas falanges por separado y, posteriormente, se ensamblen dichas partes mediante pasadores metálicos (diseño 1); otro de impresión de falanges por separado incluyendo la función de los pasadores en el diseño y su posterior ensamblaje evitando elementos externos de la impresión (diseño 2); y un último diseño en que las falanges se impriman ya ensambladas unas con otras, permitiendo su rotación una vez finalizada la impresión (diseño 3). Los planos que contienen la información del diseño de las distintas falanges y su ensamblaje se recogen en el anexo 6 y los planos de los distintos ensamblajes se recogen en el anexo 7.

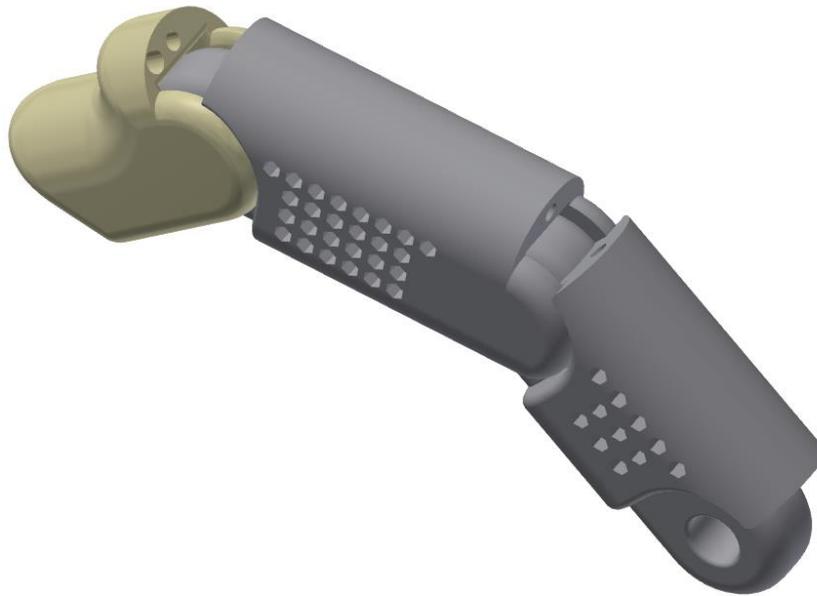
A continuación, se muestran las imágenes de los distintos diseños descritos anteriormente:



*Figura 30: Diseño 1*



*Figura 31: Diseño 2*



*Figura 32: Diseño 3*

Cada diseño posee sus ventajas y desventajas. Respecto al diseño 1, la desventaja supone tener que depender de elementos externos para realizar su ensamblaje; sin embargo, la unión queda firme y sin holgura entre piezas. Es necesario un post-procesado final como el lijado de las partes en contacto con otras hasta que quede una superficie suave sin apenas rozamiento.

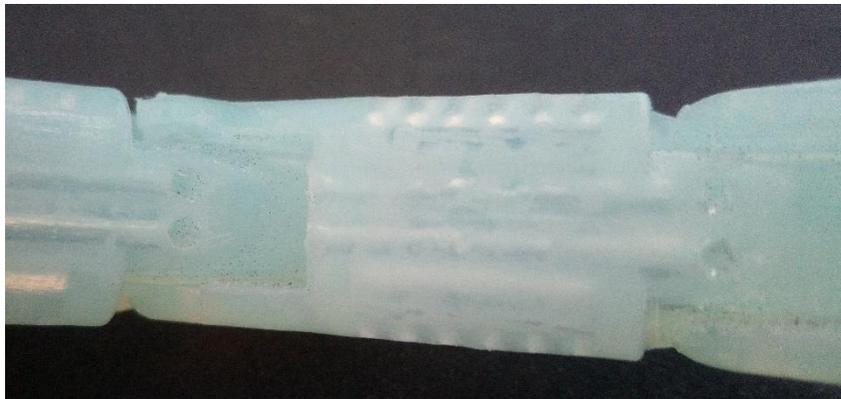
El diseño 2 es muy parecido al primero, pero sin utilizar elementos externos como pasadores, la función de pasador lo hace el propio diseño de las falanges. Así, el modelo se ensamblará una vez acabada el curado de la pieza. Este ensamblaje debe ser rápido e inmediatamente después del curado, cuando la pieza se encuentra todavía caliente y maleable, y no se debe forzar la pieza más de lo necesario porque podría generar problemas en la forma del ensamblaje final.

Por último, la ventaja del diseño 3 es que las piezas ya están ensambladas al acabar la impresión y solo es necesario el tratamiento de lijado para pulir la pieza completa y no las partes en contacto. Su mayor desventaja es la holgura existente entre partes, necesaria para que el ensamblaje se imprima correctamente. Esta holgura, aunque es sumamente pequeña, 0.25mm entre superficies de contacto, es suficiente para que no se produzca fricción entre las distintas falanges que componen el dedo protésico.

## 6.2. Precisión dimensional requerida en el diseño 3

Una vez obtenidas las especificaciones y el diseño del dedo de la mano, es necesario conocer cuál de las resinas es la óptima para su fabricación. En un principio, se puede observar claramente que la resina más adecuada para esta aplicación es la resina Durable, debido a su capacidad de resistencia al impacto y la deformación. Con esta resina se puede fabricar un dedo duradero, resistente y liviano, con la capacidad de resistir a fatiga y un acabado superficial liso y brillante. Además, según los resultados del ensayo a tracción en referente a la exposición de luz, no se alteran apenas las propiedades de la pieza a medida que pasa el tiempo.

Aunque este material es el idóneo en lo referente a sus propiedades, no es capaz de satisfacer la precisión dimensional necesaria para imprimir el diseño del dedo ensamblado (diseño 3). En teoría, esta resina no es adecuada para realizar piezas con mucha exactitud dimensional, las impresiones realizadas con esta resina confirman dicha teoría. Se ha realizado una impresión del dedo articulado completo dejando una separación entre partes de 0.75 mm y una vez impreso, la resina se había expandido en el proceso de impresión y ha rellenado los huecos existentes para que permita el movimiento del dedo, por lo que no había separación entre las diferentes falanges, como se puede observar en la figura 33.



*Figura 33: Detalle dedo protésico no articulado con resina Durable por el relleno de las holguras entre falanges (Elaboración propia).*

Como no fue posible realizar el dedo con la resina Durable por la poca precisión dimensional que hace que la resina al solidificarse, se expanda y rellene los huecos entre la holgura de las falanges y, por ende, no esté articulado, se decidió utilizar otra resina con buenas propiedades respecto a las especificaciones del dedo protésico y con buena exactitud dimensional. Esta resina es la resina Tough (Dura). Posee unas propiedades adecuadas para los requerimientos del dedo y su calidad dimensional supera con creces la de la resina Durable. Con el mismo diseño que antes, se imprimió el dedo con una

holgura entre partes de 0.5 mm y el resultado fue exitoso. El dedo impreso con resina Tough se imprimió correctamente, pero la excesiva distancia de separación entre las distintas falanges (0.5 mm) hizo que el resultado quedara más suelto de lo normal al no haber ningún rozamiento entre piezas.



*Figura 34: Detalle impreso con resina Tough de la holgura existente entre falanges. (Elaboración propia)*

Como hemos podido comprobar que con 0.5 mm de holgura entre superficies de contacto se puede realizar la impresión del ensamblaje de las distintas falanges con éxito, es necesario conocer cuál es la holgura mínima con la que se puede imprimir el dedo articulado. Esta holgura mínima, 0.25 mm, permite que las distintas falanges roten entre ellas, pero sin generar el ligero movimiento de traslación de las uniones.



*Figura 35: Detalle impreso con resina Tough con la holgura mínima de 0.25 mm. (Elaboración propia).*

### 6.3. Elección del material

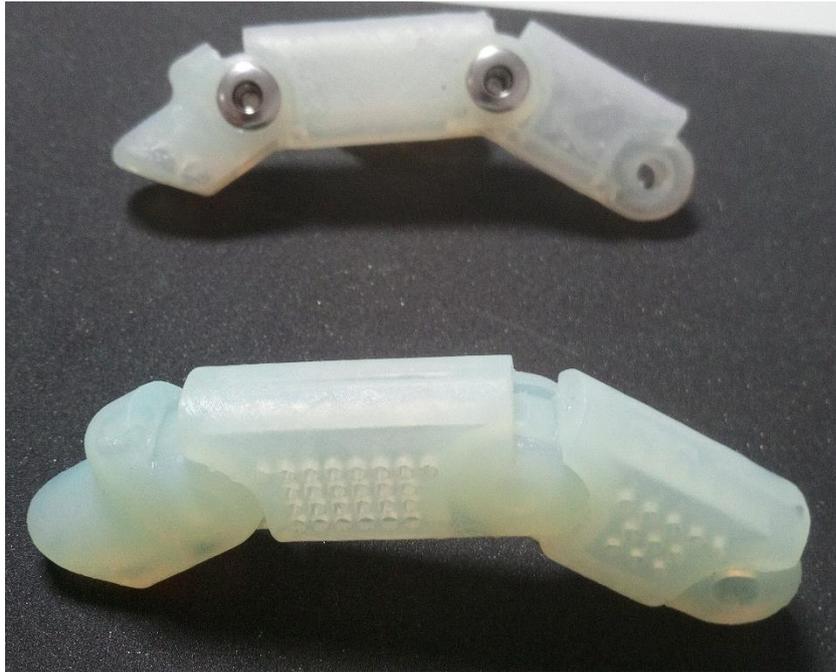
Como se ha explicado anteriormente, algunas resinas no son válidas para realizar algunos de los diseños descritos debido a que no satisfacen los requerimientos necesarios para la impresión o el posterior ensamblaje de la pieza.

La resina Clear, que nos proporciona una alta resolución además de tener unas propiedades equivalentes a la resina Tough, puede ser una buena solución para la fabricación de los diseños del dedo protésico. Se probó la resina Clear con los distintos diseños y tanto la precisión dimensional como la calidad superficial de las impresiones son superiores a las resinas, Durable y Tough, mencionadas anteriormente. Así, el diseño 1 y el diseño 3 del dedo protésico se imprimieron con la exactitud dimensional requerida para que el dedo pueda moverse con la fricción justa para que no quede suelto ni para que cueste mucho esfuerzo articularlo. El diseño 2 no se pudo realizar con esta resina debido a las propias propiedades de esta. Al tener una elongación muy baja, a la hora del ensamblaje después del curado, la pieza caliente permanecía rígida, sin posibilidad de deformar elásticamente las pestañas para encajar las falanges. Cuando se intentó ensamblar las falanges, se produjo la rotura de una de las pestañas antes de poder encajar las piezas. Esta es la razón por la que se desechó realizar el diseño 2 con la resina Clear.



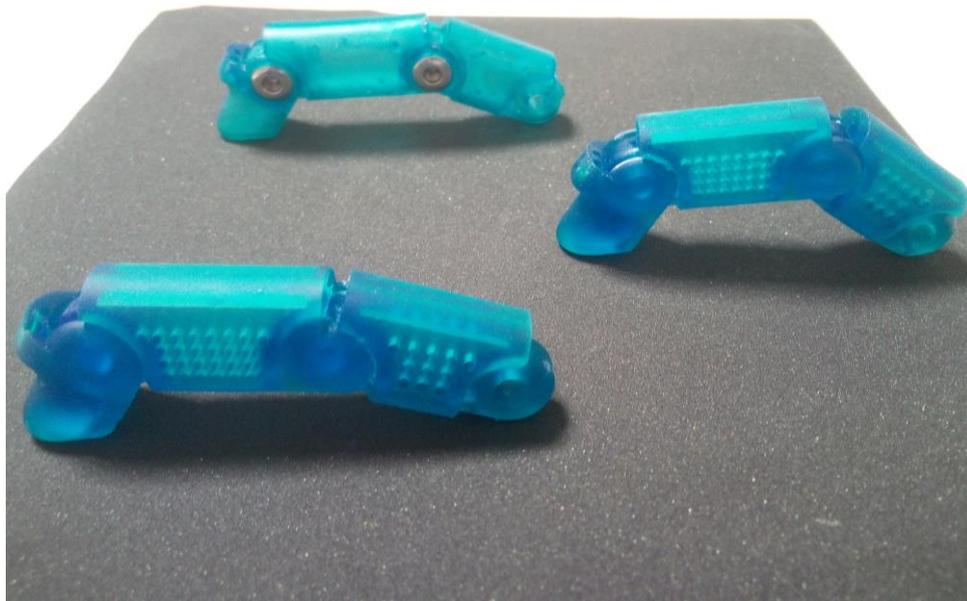
*Figura 36: Diseño 1 (detrás) y diseño 3 (delante) impreso con resina Clear. (Elaboración propia)*

Con la resina Durable no se consiguió realizar el diseño 3 del dedo protésico debido a su baja precisión dimensional, que hacía que la resina se curara entre la holgura de las falanges. Pese a esto, sigue siendo el material idóneo para realizar una prótesis de un dedo una mano por su estabilidad de las propiedades a lo largo del tiempo. Esta propiedad es la causa de que se siga realizando los demás diseños con esta resina. El diseño 1 del dedo se imprimió correctamente, sin embargo, la fricción entre piezas es demasiado grande y es necesario realizar un esfuerzo elevado para conseguir mover las falanges. Por último, se tuvo que rediseñar el diseño 2, dejando una holgura superior a la impresión con otras resinas, para que encajaran correctamente las falanges en sus ejes.



*Figura 37: Diseño 1 (detrás) y diseño 2 (delante) impreso con la resina Durable. (Elaboración propia)*

Por último, la resina Tough resultó ser la solución a todos los diseños. Aunque el diseño 1 ha sido posible imprimirse con cualquier resina, el dedo realizado con la resina Tough presentó el mejor movimiento de las articulaciones. Con un movimiento fluido y sin una fricción excesiva entre superficies de contacto, hacen de este modelo una excelente solución al diseño 1 del dedo protésico aún sin tener la calidad superficial que tiene el diseño impreso con resina Clear. El diseño 2 se pudo realizar correctamente puesto que cuando sale de la cámara de curado, la pieza se deforma fácilmente y es posible realizar un ensamblaje sencillo sin apenas esfuerzo. Una vez que la pieza se ha enfriado, el encaje es firme y se consigue buen movimiento de las falanges. Por último, el diseño 3 que se ha logrado imprimir con la resina Tough consta con de una holgura de mínima de 0.25 mm. Al dejar esa holgura, no existen partes en contacto con las otras falanges, por lo que el movimiento es fluido y sin fricción.



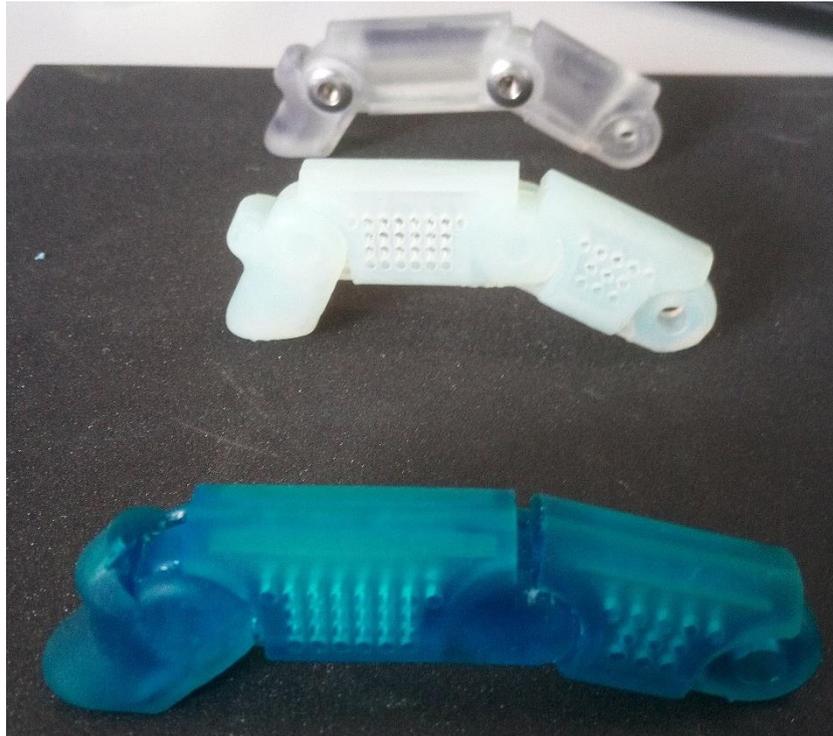
*Figura 38: Impresión con resina Tough de los tres diseños: Diseño 1 (fondo), Diseño 2 (derecha) y Diseño 3 (izquierda). (Elaboración propia)*

De las tres resinas a utilizar para la impresión de los distintos diseños del dedo protésico se ha elegido una para cada diseño. Se han impreso todos los diseños en cada una de las resinas y hemos podido comprobar que algunas resinas son más asequibles que otras para realizar cada diseño. Así, para el diseño 1 hemos optado por imprimirlo con resina Clear o en su defecto, con resina Tough. Se ha desechado la resina Durable porque tenía una fricción suficiente como para crear un gran esfuerzo a la hora de articularlo mediante cuerdas. Con las otras dos resinas, la unión entre falanges por medio de pasadores es fija y el deslizamiento de las superficies de contacto de cada falange se realiza sin esfuerzo alguno (es necesario un esfuerzo menor con la resina Tough que con la resina Clear).

Para el diseño 2, se optó por utilizar la resina Durable, ya que, al haber un poco de holgura entre las falanges, las superficies de contacto no tocan del todo la otra pieza y el movimiento entre falanges se puede realizar correctamente. Se ha optado por este material porque es el que mejores propiedades tiene para las especificaciones del dedo protésico, pero también se ha podido realizar con la resina Tough, que al tener una calidad superficial mejor que la resina Durable, el deslizamiento es cómodo y sin esfuerzo alguno.

Por último, el diseño 3 se ha realizado con la resina Tough, es la única resina que al solidificarse mientras se imprime no crea una expansión de la pieza que pueda suponer un problema a la hora de articular el dedo una vez impreso.

Con la resina Clear también ha sido posible imprimir el dedo, no obstante, ha sido necesaria una holgura mucho mayor que para la impresión con resina Tough, puesto que esta también se expande al solidificarse (no tanto como con la resina Durable).



*Figura 39: Diseños finales impresos con distintas resinas: Diseño 1 (detrás) con resina Clear, diseño 2 (medio) con resina Durable, diseño 3 (delante) con resina Tough. (Elaboración propia).*

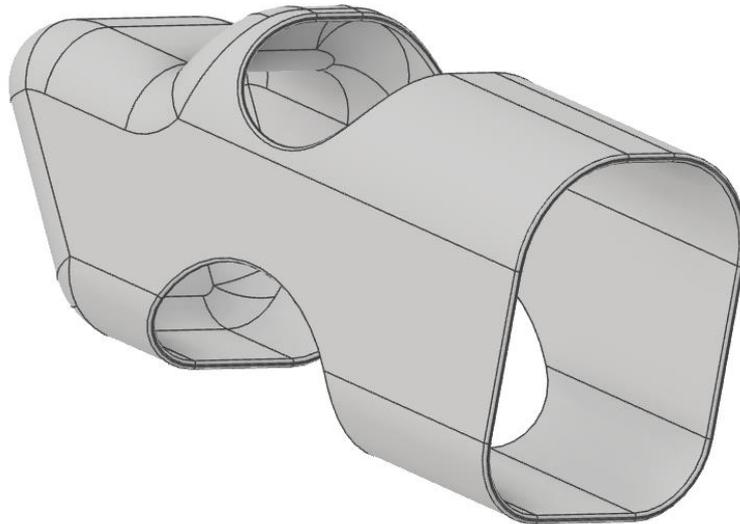
#### 6.4. Funda de dedo

Uno de los requerimientos que debe tener un dedo protésico es que tenga buen agarre a la hora de coger objetos, por ello es necesario imprimir las falanges, sobre todo la falange distal, con una superficie lisa que tenga la suficiente fricción para sujetar un objeto sin pueda escurrirse.

Para resolver este problema, se ha adoptado la solución de imprimir con una resina elástica (flexible) una funda para las falanges, que permita el movimiento entre ellas además de conseguir la fricción deseada asemejándose a la piel humana.

El diseño de la funda de la falange distal se ha realizado siguiendo la superficie de la falange distal, de forma que encaje perfectamente con un agarre firme y sin posibilidad de soltarse. En el anexo 8 encontramos el plano correspondiente al diseño.

A continuación, se puede observar el diseño de la funda de la falange distal en la figura 40.



*Figura 40: Diseño de la funda de la falange distal del dedo protésico.  
(Elaboración propia)*

La resina utilizada para imprimir este diseño de funda es la Elastic Resin. Esta resina es muy diferente a las otras resinas que hemos trabajado, al ser una resina muy elástica, la impresión suele dar fallos a menos que la pieza tenga una densidad de soporte adecuada y una longitud de los soportes menor que 20 mm. Teniendo en cuenta las especificaciones de diseño anteriormente explicadas en el apartado 4.1.2.3 Resina Elástica, la impresión de piezas no debería suponer ningún problema.

Así, en la figura 41 podemos observar cómo se ha orientado la pieza en la impresora. Se eligió esta orientación para evitar al máximo posible los soportes internos de la pieza. Estos soportes, que tienen un punto de contacto pequeño (0.5mm), al desprenderse de la pieza, suelen quedar restos de ellos y la superficie no está del todo pulida. Es necesario lijar las piezas para que quede una superficie suave al tacto, sin embargo, debido a su característica elástica, el lijado de estas piezas suele ser dificultoso. Esta orientación evita que la parte de arriba, que soportará el mayor esfuerzo, se fusione con otras partes que se hayan impreso antes.

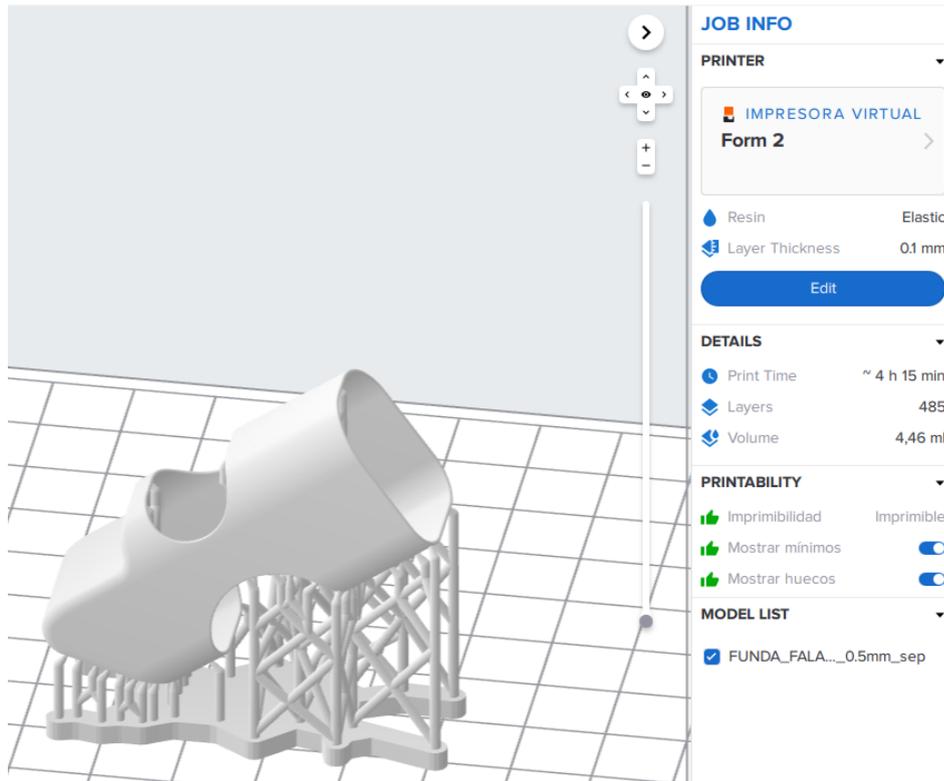


Figura 41: Orientación funda falange en el software Preform, pieza lista para su impresión. (Elaboración propia)

En un principio, el diseño de la funda tenía un espesor de pared de 0.25 mm, sin embargo, cuando se procedió a la impresión del diseño, fue imposible separar la pieza de los soportes por el poco espesor que tenía esta. Se optó entonces por un espesor de pared de 0.5 mm, aunque eso supuso que hubiera más resistencia a la hora de mover las falanges.

El resultado final es una funda elástica con capacidad de resistir varios ciclos de uso sin rasgarse. Se adapta al dedo, de forma que no es necesario ninguna operación de ensamblaje con el dedo protésico y la propia fricción que crea la funda es suficiente como para coger objetos sin posibilidad de que se caiga.



Figura 42: Posición inicial de la funda de la falange distal impresa con resina Elastic. (Elaboración propia).



*Figura 43: Posición final de la funda de la falange distal impresa con resina Elastic. (Elaboración propia)*

## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha comprobado la viabilidad de crear piezas funcionales en impresión 3D para aplicaciones tales como prótesis, órtesis, ortopedia o incluso modelos dentales. Esto supone un avance para el paciente, pues no es necesario gastar una elevada cantidad de dinero para conseguir beneficiarse de las ventajas de los productos funcionales que se imprimen mediante esta tecnología. Las prótesis impresas en 3D contienen todas las especificaciones de las prótesis en el mercado, con la ventaja de ser livianas, baratas y adaptarse a las características del paciente.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción de probetas, se ha obtenido el mejor proceso de curado de las piezas, además de encontrar la resina adecuada para la posterior fabricación de una prótesis funcional de miembro superior. Mediante el modelado y la fabricación de un prototipo de dedo funcional articulado, se comprobó que la resina Durable no era la más adecuada para realizar impresiones con alto grado de precisión dimensional, ya que durante el proceso de fotopolimerización, la resina al solidificarse, se expande y esas micras que se expande el material es suficiente como para que la pieza no encaje al ensamblarlo. Se decidió utilizar la resina Tough para evitar esta expansión a la hora de imprimir y con ello se resolvió el problema de precisión dimensional del diseño del dedo protésico ensamblado.

En el ámbito personal, se han adquirido amplios conocimientos de la impresión 3D por estereolitografía, que junto con los adquiridos previamente de impresión 3D FDM, constituyen una buena base para seguir ampliando conocimientos de la fabricación aditiva.



## 8. LÍNEAS FUTURAS

La fabricación del dedo protésico articulado es solo el principio de un proyecto extenso que nuestra empresa, 4inn, está realizando: Una mano para Luis.

Luis es un chico de Valladolid que nació con malformaciones en todas sus articulaciones, el proyecto que estamos realizando con él es construir una prótesis de miembro superior a medida y de bajo precio para que Luis pueda hacer una vida normal.

Con este proyecto, se ha conseguido elegir los materiales necesarios para la posterior fabricación de los distintos elementos que constituyen la prótesis de miembro superior.

Aunque la resina Durable no es la adecuada para fabricar el dedo protésico articulado por la elevada precisión dimensional necesaria, no quiere decir que no se pueda utilizar para la fabricación de otra parte del ensamblaje final. Al ser una resina que sus propiedades permanecen cuasi constantes a lo largo del tiempo, es el material idóneo para la creación del codo o del grupo anterior que conecta el hombro con el codo.

De esta forma, el antebrazo que tiene que ser rígido puede fabricarse con la resina Tough, al igual que los dedos, y si queremos realizar algún diseño estético de alguna pieza, como por ejemplo la palma de la mano, lo mejor sería que se fabricara en la resina Clear, que da una calidad superficial suave y con alta resolución.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

### Impresión 3D:

[1] Kai Chua, Chee (2017): 3D Printing and additive manufacturing; World Scientific; ISBN: 978-981-3146-76-1

[2] <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#materials> – Impresión 3D SLA – Consulta el 3/05/2019

[3] Gibson, Ian (2015): Additive Manufacturing Technologies; Springer; ISBN: 978-1-4939-2112-6.

### SLA vs. FDM:

[4] <https://www.3dnatives.com/es/fdm-o-sla-impresion-3d-131220172/> - FDM vs. SLA – Consulta el 8/06/2019

[5] FORMLABS WHITE PAPER (July 2019): FDM vs. SLA: Compare the two most popular types of 3D Printers – Suministrado por <https://formlabs.com/>

### Resinas SLA:

[6] <https://formlabs.com/materials/standard/> - Resinas estándar - Consulta el 19/05/2019

[7] [https://support.formlabs.com/s/article/Using-Tough-Resin?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Using-Tough-Resin?language=en_US) - Resina Tough – Consulta el 25/06/2019

[8] [https://support.formlabs.com/s/article/Using-Durable-Resin?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Using-Durable-Resin?language=en_US) - Resina Durable – Consulta el 25/06/2019

[9] [https://support.formlabs.com/s/article/Using-Elastic-Resin?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Using-Elastic-Resin?language=en_US) - Resina Elástica – Consulta el 25/06/2019

Curado de resina:

[10] FORMLABS WHITE PAPER (March 2018): A Guide to Post-Curing Formlabs Resins – Suministrado por <https://formlabs.com/>

[11] FORMLABS WHITE PAPER (By Zachary Zguris, PhD): How mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing – Suministrado por <https://formlabs.com/>

Ensayo a tracción:

[12] Jorge Valentín-Gamazo - Memoria de TFG – Desarrollo de férulas mediante impresión 3D - Grado en Ingeniería Mecánica (Universidad de Valladolid)

[13] ASTM INTERNATIONAL: D638-14 (Diciembre 15, 2014): Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic

## 10. ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas de la impresora 3D Form 2.

### Formlabs Stereolithography

#### Quick Stats

---

Printer



**Form 2**

---

Technology Stereolithography (SLA)

---

XY Resolution n/a

---

Laser Spot Size 140 microns

---

Laser Power One 250 mW laser

---

Build Volume (W x D x H) 14.5 x 14.5 x 17.5 cm  
5.7 x 5.7 x 6.9 in

---

Layer Thickness 25 – 300 microns  
.001 – .012 in

---

## Printing Properties

---

Printer	<b>Form 2</b>
Technology	Stereolithography (SLA)
Resin Fill System	<b>Automated</b>
Build Volume (W x D x H)	14.5 × 14.5 × 17.5 cm 5.7 × 5.7 × 6.9 in
Layer Thickness (Axis Resolution)	25 – 300 microns .001 – .012 in
XY Resolution	n/a
Laser Spot Size	140 microns 0.0055 inches
Resin Cartridges	<b>1</b>
Supports	Auto-Generated Easily Removable

---

## Hardware

---

Printer	<b>Form 2</b>
Minimum Access Dimensions (W × D × H)	34.5 × 56 × 79 cm 13.6 × 22 × 31.1 in
Printer Dimensions (W × D × H)	34.5 × 33 × 52 cm 13.6 × 13 × 20.5 in
Weight	13 kg 28.5 lbs
Operating Temperature	Auto-heats to 35 °C Auto-heats to 95 °F
Temperature Control	Self-heating resin tank
Power Requirements	100–240 VAC 1.5 A 50/60 Hz 65 W
Laser Specifications	1 laser EN 60825-1:2007 certified Class 1 Laser Product 405 nm wavelength 250 mW power 140 microns (0.0055 in) laser spot
Connectivity	Wi-Fi (2.4 GHz) Ethernet (100 Mbit) USB 2.0
Printer Control	4.3" interactive touchscreen 480 × 272 resolution Push-button
Alerts	Touchscreen alerts SMS/email via Dashboard

---

## Software

---

### System Requirements

Windows 7 (64-bit) and up  
Mac OS X 10.10 and up  
OpenGL 2.1  
4 GB RAM

---

### Hardware Requirements

Form 3, Form 3L, or Form 2 3D printer

---

### File Types

STL and OBJ file input  
FORM file output

---

### PreForm Print Setup Features

One-Click Print  
Adaptive layer thickness for faster printing with fine details  
Remote Print  
Auto-orient for optimal print position  
Auto-mesh repair  
Auto-generation of supports  
Rotate, scale, duplicate, and mirror  
Layer slicer for path inspection  
Available in multiple languages

---

### Dashboard Printer Management Features

Manage prints and printers via the cloud  
Track resin and tank usage over time  
SMS and email alerts  
Create enterprise group accounts with admins to more easily share printers and control access

---

## Material Properties Data

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green <sup>2</sup>	Post-Cured <sup>3</sup>	Green <sup>2</sup>	Post-Cured <sup>3</sup>	
<b>Tensile Properties</b>					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
<b>Flexural Properties</b>					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
<b>Impact Properties</b>					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
<b>Temperature Properties</b>					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07

<sup>1</sup>Material properties can vary with part geometry, obtained from parts printed using print orientatio, print settings, and temperatura.

<sup>2</sup>Data was obtained from Green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, washed and air dried without post-cure.

<sup>3</sup>Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings , and post-cured with 1.25 mW/cm<sup>2</sup> of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

Anexo 3: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Durable

## Material Properties Data

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green2	Post-Cured <sup>3</sup>	Green2	Post-Cured <sup>3</sup>	
<b>Tensile Properties</b>					
Ultimate Tensile Strength	18.6 MPa	31.8 MPa	2.7 ksi	4.61 ksi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	0.45 GPa	1.26 GPa	65.7 ksi	183 ksi	ASTM D 638-10
Elongation	67 %	49 %	67 %	49 %	ASTM D 638-10
<b>Flexural Properties</b>					
Flexural Stress at 5% Strain	4.06 MPa	27.2 MPa	0.59 ksi	3.95 ksi	ASTM D 790-10, Procedure A
Flexural Modulus	0.16 GPa	0.82 GPa	23.4 ksi	119 ksi	ASTM D 790-10, Procedure A
<b>Impact Properties</b>					
Notched IZOD	130.8 J/m	109 J/m	2.46 ft-lbf/in	2.05 ft-lbf/in	ASTM D 256-10, Test Method A
<b>Temperature Properties</b>					
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	< 30 °C	43.3 °C	< 86 °F	110 °F	ASTM D 648-07, Method B
Thermal Expansion (23 to 50° C)	117.0 µm/m/°C	145.1 µm/m/°C	65.0 µin/in/°F	80.6 µin/in/°F	ASTM E831-14

<sup>1</sup> Material properties can vary with part geometry, obtained from parts printed using print orientation, print settings, and temperature.

<sup>2</sup> Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Durable settings, washed and air dried without post-cure.

<sup>3</sup>Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Durable settings, and post-cured with 2.5 mW/cm<sup>2</sup> of 405 nm LED light for 120 minutes at 60 °C.

Anexo 4: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Tough

## Material Properties Data

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green2	Post-Cured <sup>3</sup>	Green2	Post-Cured <sup>3</sup>	
<b>Mechanical Properties</b>					
Ultimate Tensile Strength	34.7 MPa	55.7 MPa	5040 psi	8080 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	1.7 GPa	2.7 GPa	239 ksi	387 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break	42 %	24 %	42 %	24 %	ASTM D 638-14
Flexural Strength at 5% Strain	20.8 MPa	60.6 MPa	3020 psi	8790 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.6 GPa	1.6 GPa	90.3 ksi	241 ksi	ASTM D 790-15
Notched IZOD	32.6 J/m	38 J/m	0.61 ft-lbf/in	0.71 ft-lbf/in	ASTM D256-10
<b>Thermal Properties</b>					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	32.8 °C	45.9 °C	91.1 °F	114.6 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	40.4 °C	48.5 °C	104.7 °F	119.3 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion (23 – 50 °C)	159.7 µm/m/°C	119.4 µm/m/°C	88.7 µin/in/°F	66.3 µin/in/°F	ASTM E 831-13

<sup>1</sup> Material properties can vary with part geometry, obtained from parts printed using print orientation, print settings, and temperature.

<sup>2</sup> Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Tough settings, washed and air dried without post-cure.

<sup>3</sup>Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Tough settings, and post-cured with 2.5 mW/cm<sup>2</sup> of 405 nm LED light for 120 minutes at 60 °C.

Anexo 5: Hoja de especificaciones técnicas de la resina Elastic

## Material Properties Data

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green	Post-Cured <sup>2</sup>	Green	Post-Cured <sup>2</sup>	
Ultimate tensile strength <sup>3</sup>	1.61 MPa	3.23 MPa	234 psi	468 psi	ASTM D 412-06 (A)
Stress at 50% elongation	.92 MPa	.94 MPa	133 psi	136 psi	ASTM D 412-06 (A)
Stress at 100% elongation	1.54 MPa	1.59 MPa	223 psi	231 psi	ASTM D 412-06 (A)
Elongation at Failure <sup>3</sup>	100%	160%	100%	160%	ASTM D 412-06 (A)
Compression set at 23C for 22 hrs	2%	2%	2%	2%	ASTM D 395-03 (B)
Compression set at 70C for 22 hrs	3%	9%	3%	9%	ASTM D 395-03 (B)
Tear strength <sup>4</sup>	8.9 kN/m	19.1 kN/m	51 lbf/in	109 lbf/in	ASTM D 624-00
Shore hardness	40A	50A	40A	50A	ASTM 2240

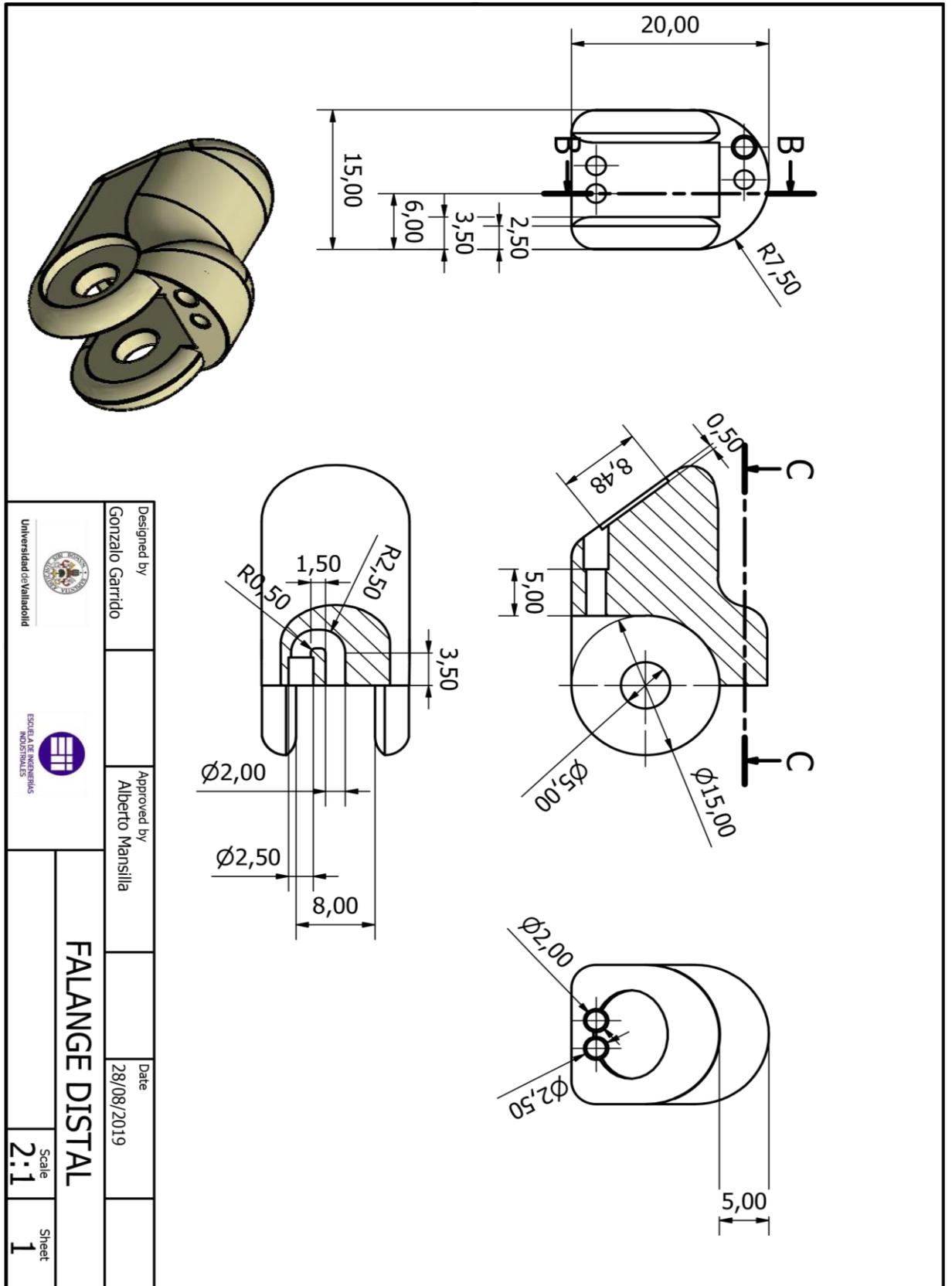
<sup>1</sup> Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings and temperature.

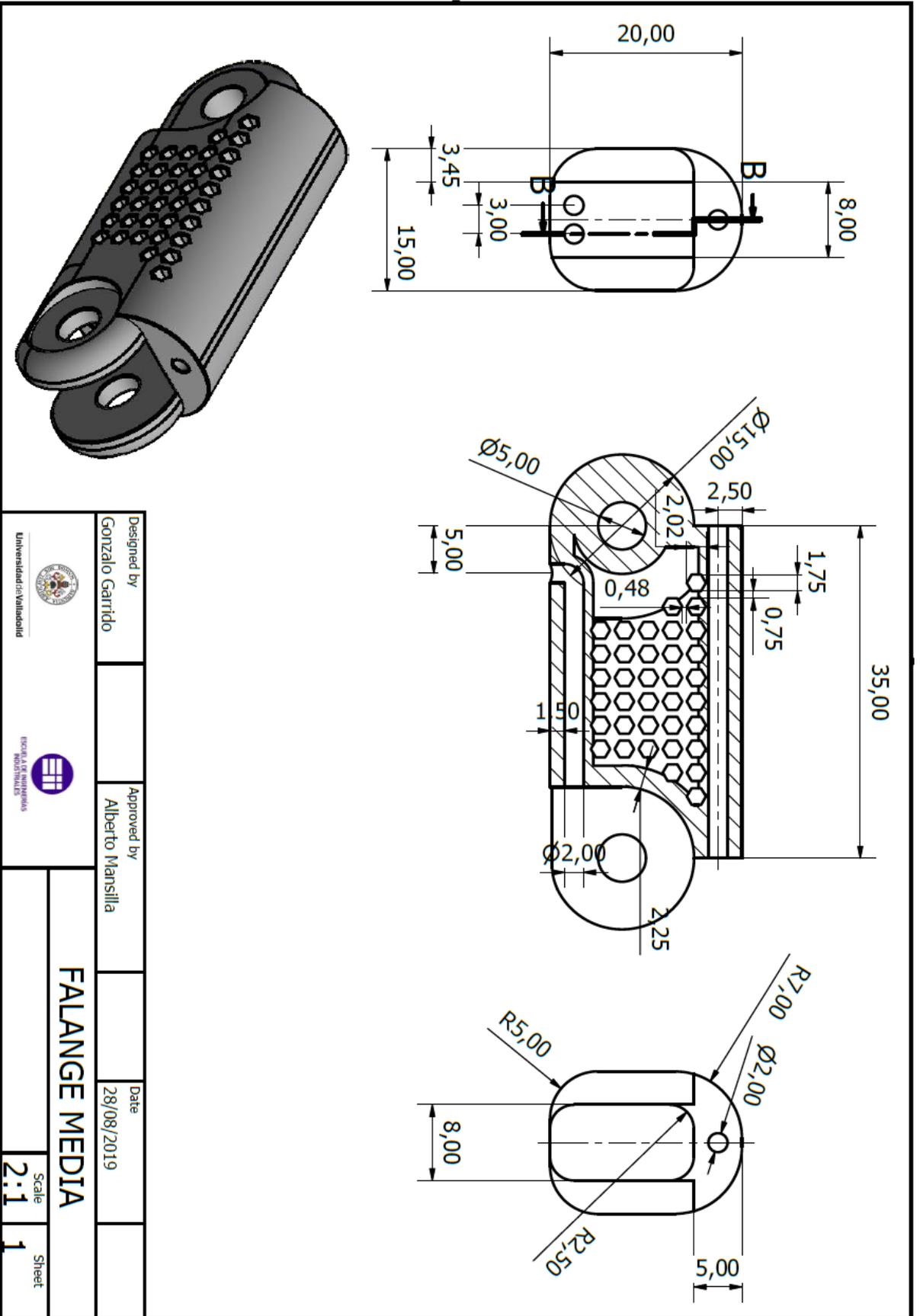
<sup>2</sup> Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Elastic settings, washed in Form Wash for 20 minutes and postcured with Form Cure at 60C for 20 minutes.

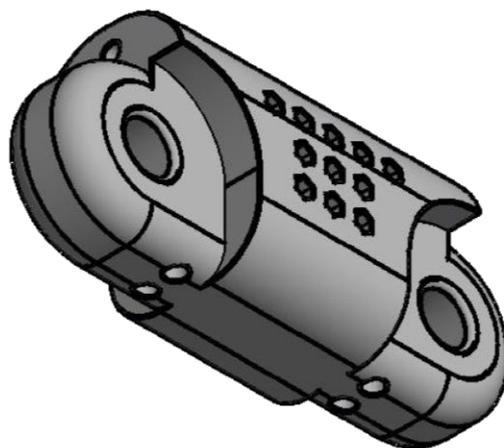
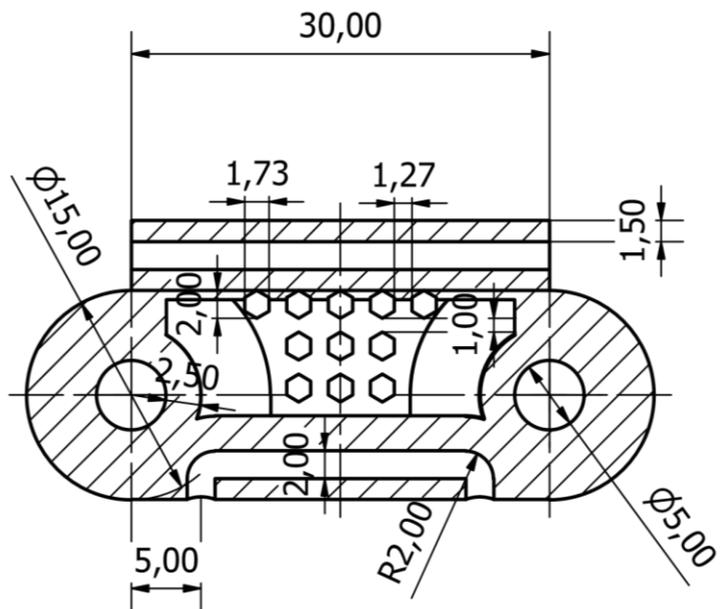
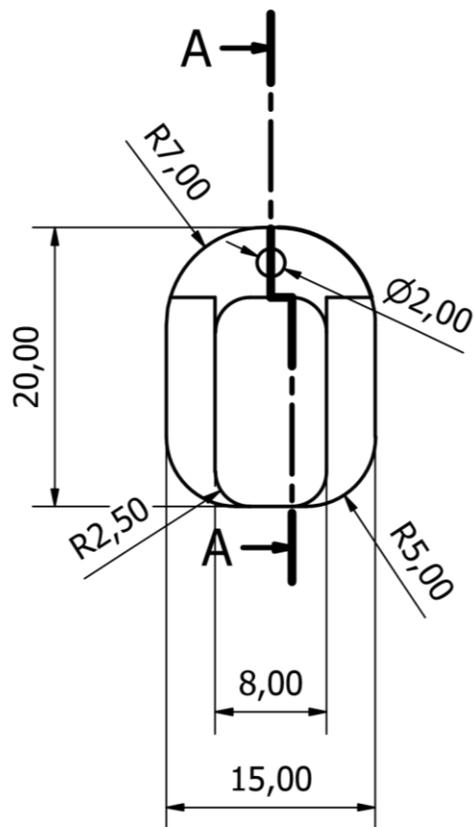
<sup>3</sup> Tensile testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C dumbbell and 20 in/min cross head speed.

<sup>4</sup> Tear testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C tear specimen and a 20 in/min cross head speed

Anexo 6: Planos de las falanges que forman el dedo protésico

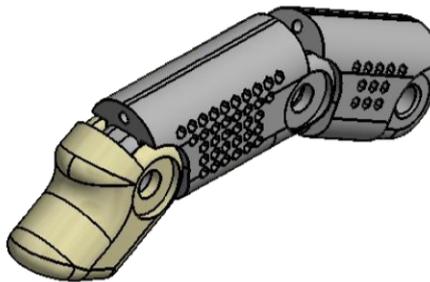
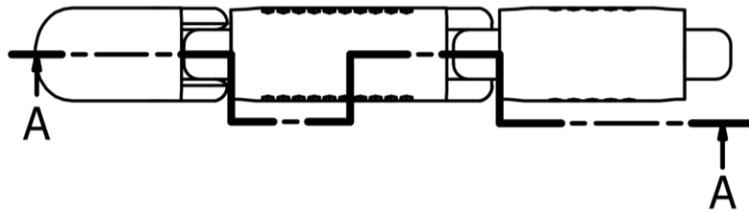
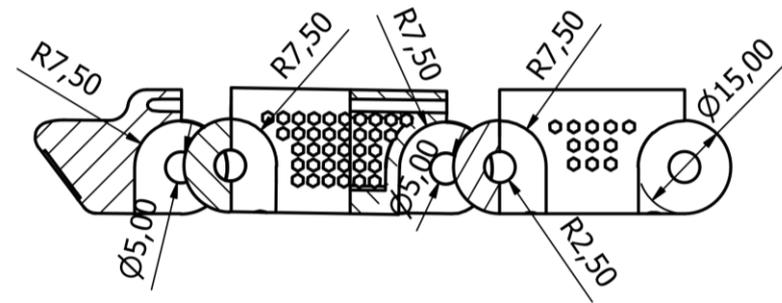




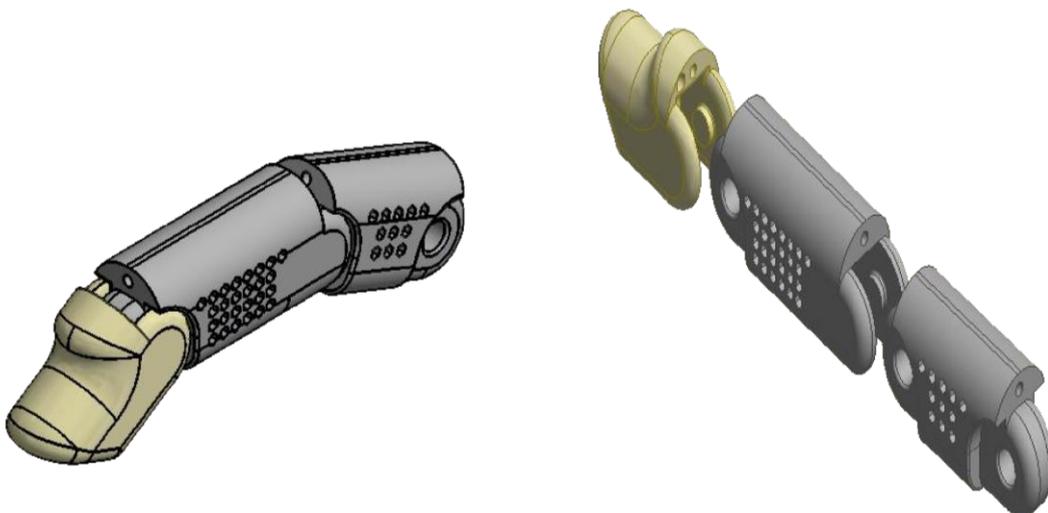
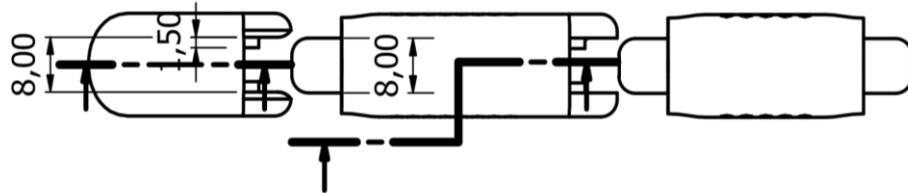
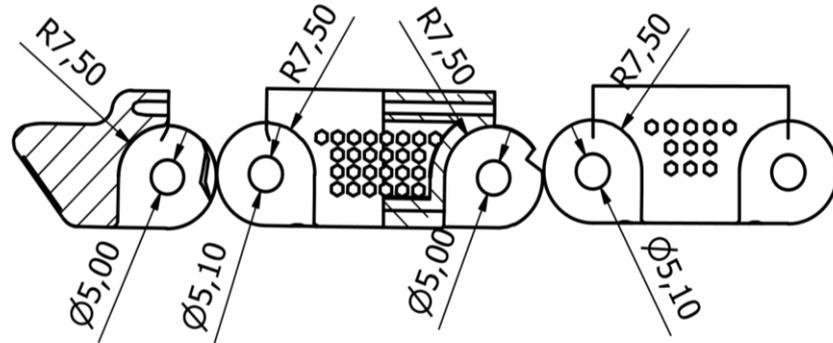


Designed by Gonzalo Garrido	Approved by Alberto Mansilla	Date 28/08/2019
 Universidad de Valladolid	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	<b>FALANGE PROXIMAL</b>
		Scale <b>2:1</b>

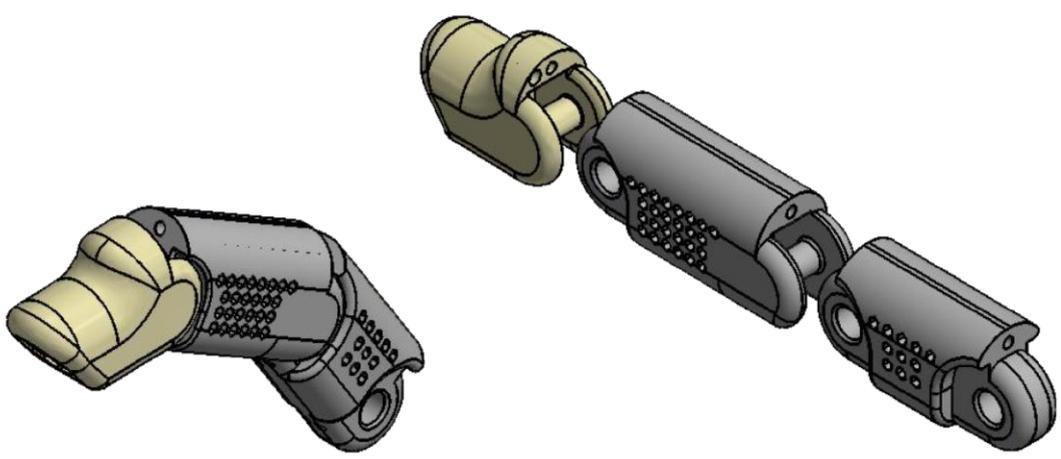
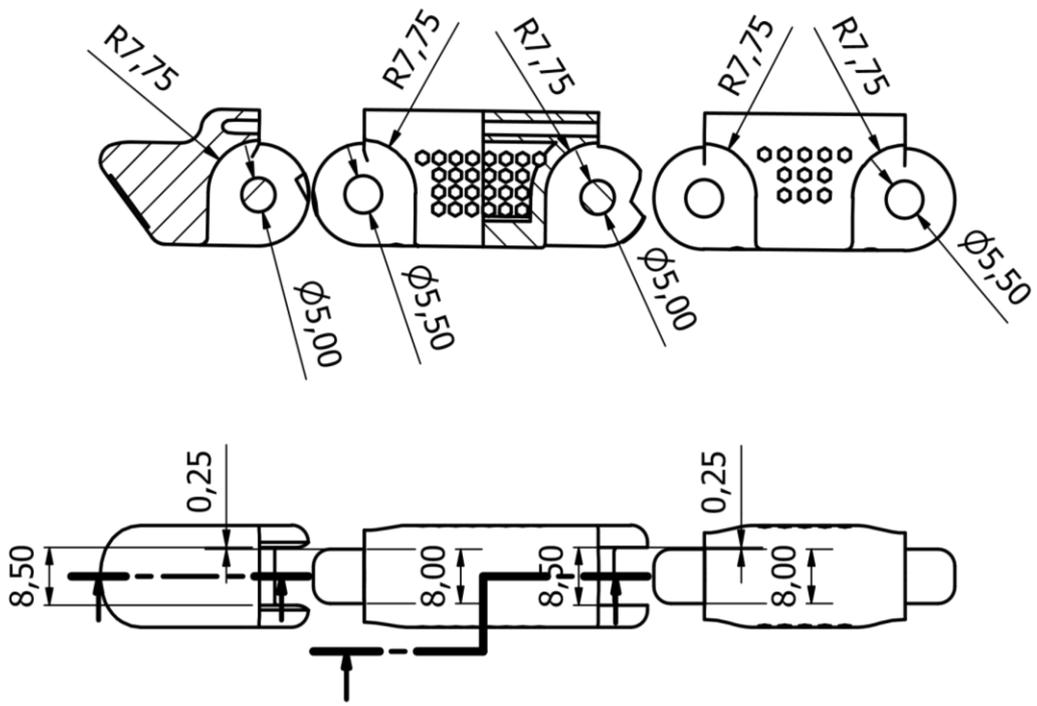
Anexo 7: Planos de los distintos diseños realizados



Designed by Gonzalo Garrido	Approved by Alberto Mansilla	Date 28/08/2019
 Universidad de Valladolid	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	<b>DISEÑO 1</b>
		Scale <b>1:1</b>
		Sheet <b>1</b>



Designed by Gonzalo Garrido	Approved by Alberto Mansilla	Date 28/08/2019	
 Universidad de Valladolid		 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	
<b>DISEÑO 2</b>			
			Scale <b>1:1</b>
			Sheet <b>1</b>



Designed by Gonzalo Garrido	Approved by Alberto Mansilla	Date 28/08/2019		
 Universidad de Valladolid		 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES		<b>DISEÑO 3</b>
		Scale <b>1:1</b>	Sheet <b>1</b>	

Anexo 8: Plano de la funda de la falange distal

