

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO – CHILE



# DISEÑO E IMPRESIÓN DE PROTOTIPO DE ARTERIA AORTA CON MÉTODO DE ESTEREOLITOGRAFÍA

Alex Eduardo Carrasco Cea

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Ing. Sheila Lascano

Profesor Co-referente: Dr. Ing. Joaquín Mura

2023

## **Agradecimientos**

Este trabajo se desarrolló en el marco de la pandemia mundial de COVID19, aun así, el Grupo de investigación multidisciplinario en materiales y manufactura avanzada GRIMA del Departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María estuvo presente como fue posible, con reuniones, apoyo académico y técnico durante todo el proceso de forma remota, aportando con ideas para seguir avanzando. Este grupo encabezado por la profesora Sheila Lascano, fue el apoyo para no dejar de intentar hasta llegar a la culminación de esta etapa.

El uso de la tecnología surgió gracias a la práctica profesional desarrollada en la empresa productiva Unilever Chile, donde se me dio la posibilidad de utilizar una impresora Form2, la cual era parte de mi aprendizaje de prueba y error durante casi un año de trabajo, fue una práctica muy extendida, pero un tiempo infinitamente enriquecedor en conocimientos. La empresa me dejó incursionar en el diseño mecánico en un formato bastante libre, en la búsqueda de mejoras e ideas para hacer de la manufactura aditiva parte del proceso.

Tal como mencioné, la pandemia hizo que varias cosas quedaran en pausa o definitivamente dejaran de trabajar, así sucedió con la primera idea de impresión, ya que Unilever Planta Carrascal, cerró sus puertas y con ello mi acceso a la tecnología que utilizaría al terminar mi proceso de diseño. Fue entonces cuando el Profesor Joaquín Mura, consiguió comprar una impresora Form3 para uso académico, lo que reactivó este trabajo de memoria con lo que faltaba por culminar. Además, el profesor Joaquín fue el nexo entre la ingeniería y los conocimientos médicos que se necesitaban para entender el requerimiento de este prototipo desarrollado.

Finalmente, agradecer a mis amigos y colegas por todo el apoyo, con sus ideas y acompañamiento técnico, tanto en el proceso de escritura de la memoria como en el proceso de diseño digital e impresión del prototipo.

## **Dedicatoria**

En orden de llegada, dedico en primer lugar, este trabajo a mis padres, quienes humildemente me acompañaron en este proceso, ellos y mis hermanas son los pilares que sostienen los sueños que se convirtieron en metas. Dedico este trabajo también a mi primo y mi tía, que además de abrirme las puertas de su casa en una ciudad y región nueva, abrieron su corazón para recibirme como uno más de su pequeña familia. Luego dedico también a mi polola, con su apoyo incondicional, la contención y motivación para alcanzar nuestras metas y junto a ella, su familia, una red de soporte que conocí, y que se ha convertido en parte de mi familia. También dedico este trabajo a mis amigos y compañeros, que hicieron que todo este proceso de esfuerzo y dedicación fuese también, risas y anécdotas que me acompañarán toda la vida.

## Resumen

El proceso de impresión de estructuras biológicas ya es una realidad y se encuentra a un nivel muy alto de investigación y por ende tiene grandes inversiones. El propósito de este trabajo es aterrizar esos conocimientos a un nivel académico y entender que un procedimiento de diseño y desarrollo de prototipos de estudio con estereolitografía se encuentra al alcance de todos.

La impresión de la aorta a partir de imágenes médicas abre la posibilidad de estudiar comportamiento de caudal, velocidad, comportamientos mecánicos de las estructuras y hacer pruebas la cantidad de veces que sea requerido, inclusive hasta la ruptura del prototipo. Para ello, lo primero es evaluar y demostrar la factibilidad de imprimir esta importante estructura en la tecnología de estereolitografía y con los materiales disponibles que se asemejen a la realidad.

Este trabajo consta de dos grandes etapas que se desarrollarán a continuación. La primera etapa es el proceso digital en que la imagen médica es transformada en un diseño que se pueda imprimir y con las dimensiones que más se aproximen a la realidad, hay que recordar que la estructura que se va a imprimir se encuentra en constante fluctuación de tamaño para el flujo de caudal de sangre que pasa por esta arteria. La segunda etapa es el proceso de impresión, en que se explica detalladamente el paso a paso, precauciones y consideraciones al momento de utilizar la tecnología de impresión con resinas fotosensibles. Finalmente, y junto a todo el proceso se presenta una propuesta estandarizada, en que se indica al lector como realizar el diseño a partir de imágenes médicas considerando la arteria aorta como ejemplo a seguir.

Junto a la estereolitografía se encuentran tecnologías más comunes y baratas, como lo es la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM), las que se va mencionando en forma general dentro de este trabajo presentado como alternativa de utilización y con ella mencionando las posibles variaciones que se podrían presentar.

## **Abstract**

The process of printing biological structures is a fact now and is at a very high level of research and therefore has a big budget. The purpose of this work is to ground this knowledge at an academic level and to understand that a procedure for the design and development of study prototypes with stereolithography is within everyone's reach.

Impression of the aorta from medical images opens the possibility of studying flow behavior, velocity, mechanical behavior of the structures and testing as many times as required, even until the prototype breaks. For this, the first thing is to evaluate and demonstrate the feasibility of printing this important structure in stereolithography technology and with the available materials that resemble reality.

This work consists of two major stages that will be developed below. The first stage is the digital process in which the medical image is transformed into a design that can be printed and with the dimensions that are closest to reality, it must be remembered that the structure to be printed is constantly fluctuating in size due to the flow of blood passing through this artery. The second stage is the printing process, in which the step-by-step, precautions and considerations when using photosensitive resin printing technology are explained in detail. Finally, and together with the whole process, a proposal for a standardization of it is presented, in which the reader is told how to carry out a design from medical images, considering the aortic artery as an example to follow.

Along with stereolithography, there are more common and cheaper technologies, such as the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, which are mentioned in a general way within this work presented as an alternative use and with it mentioning the possible variations that could be presented.

## Contenido

Introducción.....	xi
Definición del problema.....	xii
Objetivos .....	xiii
Objetivo general .....	xiii
Objetivos específicos.....	xiii
1. Marco teórico .....	1
1.1. Diseño mecánico.....	1
1.1.1. Un modelo simple de iteración.....	2
1.1.2. Descripción del proceso de diseño .....	3
1.2. Manufactura aditiva .....	6
1.2.1. Modelado por deposición fundida.....	7
1.2.2. Estereolitografía .....	8
1.3. Caracterización de la arteria aorta .....	10
1.3.1. Sistema circulatorio humano .....	10
1.3.2. El corazón.....	11
1.3.3. La arteria aorta.....	13
1.4. Ley de Laplace.....	15
1.5. Imagenología médica.....	16
1.5.1. Tomografía computarizada.....	16
1.5.2. Resonancia magnética .....	17
1.5.3. Ultrasonido .....	18
2. Diseño Conceptual .....	20
2.1. La tecnología .....	20
2.1.1. El Costo .....	21
2.1.2. Calidad de la impresión .....	22
2.1.3. Tiempo de impresión.....	22
2.2. Elección de material .....	23
2.2.1. Resinas Estándar.....	24
2.2.2. Resinas de ingeniería.....	24
3. Diseño básico .....	28
3.1. Imagen médica.....	28
3.2. Software seleccionado .....	29

3.3. Preparación para imprimir .....	31
4. Prototipo.....	34
4.1. La impresión .....	34
4.1.1. Pasos previos .....	34
4.1.2. Carga de Prototipo a la máquina .....	35
4.1.3. Seguimiento del proceso .....	35
4.1.4. Desarrollo del proceso de impresión .....	35
4.1.5. Finalización del proceso de impresión .....	36
4.1.6. Retirar el prototipo de la base.....	36
4.2. Lavado .....	37
4.3. Curado.....	38
5. Propuesta de proceso estándar de prototipado .....	39
5.1. Paso 1: Imagen médica inicial .....	39
5.2. Paso 2: Modificación de la imagen médica .....	39
5.3. Paso 3: Preparación del diseño para impresión .....	44
5.4. Paso 4: Impresión .....	47
5.5. Paso 5: Post procesamiento .....	48
Conclusiones y recomendaciones.....	51
Referencias .....	53
Anexos.....	54
A. La impresora Form 3 .....	54
A.1. Consumibles y advertencias .....	54
A.2. Instalación y puesta en marcha .....	56
B. Especificaciones técnicas <i>Form3</i> .....	62
C. Hojas de datos de resinas.....	64
D. Mantenimiento <i>Form3</i> .....	65

## Lista de figuras

Figura 1-1: Modulo básico en el proceso de diseño. (Después de Asimow).[2].....	2
Figura 1-2: Las actividades de diseño que componen las primeras tres fases del proceso de diseño de ingeniería [2].....	3
Figura 1-3: Esquema del efecto escalonado resultante de la fabricación por capas [4]. ....	6
Figura 1-4: La PRUSA i3 MK3 es una de las mejores impresoras 3D FDM de consumo que puede obtener. [5].....	7
Figura 1-5: Form 2 (Izquierda) y Form 3B (Derecha). ....	8
Figura 1-6: Sistemas circulatorios sistémico y pulmonar. El flujo unidireccional se mantiene por las válvulas del corazón, la diferencia de presión en el árbol arterial y las válvulas del sistema venoso [6]. ....	11
Figura 1-7: Vista externa del corazón: Donde se identifican los principales nombres identificables [6]. ....	12
Figura 1-8: Corte transversal de un vaso genérico que muestra las distintas capas [6]. ....	14
Figura 1-9: Durante la tomografía computarizada un fino haz de rayos X rota alrededor de un área del cuerpo y genera una imagen de las estructuras internas [9].....	17
Figura 1-10: Durante el examen la máquina envía ondas de radiofrecuencia que generan imágenes en dos y tres dimensiones.[9] .....	18
Figura 1-11: Examen de ultrasonido abdominal.....	19
Figura 2-1: Imagen comparativa de las tecnologías principales disponibles. [10].....	22
Figura 2-2: Imagen de impresora (referencial) en que se desarrollará el prototipo. [10].....	23
Figura 3-1: Imagen médica obtenida por resonancia magnética llevada a formato STL. ....	29
Figura 3-2: Autodesk Inventor® Professional 2020 con licencia educativa. ....	30
Figura 3-3: Mesh Enabler permite crear un “cuerpo sólido” a partir de una malla.....	30
Figura 3-4: Software Autodesk Fusion 360 para trabajar con diseño 3D. ....	31
Figura 3-5: Logo de Preform, software de preparación de prototipos de Formlabs.....	31
Figura 4-1: Diseño versión 1 preparado para imprimir, imagen obtenida directamente del software Preform. ....	35
Figura 4-2: Extracción de soportes desde el prototipo impreso, esta acción se puede llevar a cabo antes o después del lavado.....	37
Figura 4-3: La máquina Formwash es una máquina muy fácil de usar y que utiliza alcohol isopropílico para retirar los excedentes de resina en el prototipo.....	37

Figura 4-4: La máquina Form Cure es la encargada de lograr las propiedades mecánicas finales de la resina mediante luz ultravioleta que llega a todos los lugares del prototipo. ....	38
Figura 5-1: Imagen médica de una arteria aorta obtenida desde una resonancia magnética. ....	39
Figura 5-2: Imagen médica de la aorta cargada como una malla en programa Fusion360. ....	40
Figura 5-3: Plano que interseca la malla y crea un boceto. ....	40
Figura 5-4: Imagen médica con planos de intersección. ....	41
Figura 5-5: Para cada plano de intersección se crea un boceto. ....	42
Figura 5-6: Cuerpo sólido modificable que surge de los planos de intersección. ....	42
Figura 5-7: Vaciado del cuerpo sólido asignando el valor de espesor de pared aproximado calculado por Ley de Laplace. ....	43
Figura 5-8: Imagen lista para mandar al software de preparación de impresión Preform. ....	44
Figura 5-9: Imagen importada dentro del volumen de impresión. ....	45
Figura 5-10: Herramienta que genera automáticamente la cantidad necesaria de soportes. ....	45
Figura 5-11: Generador de soportes. ....	46
Figura 5-12: Soportes generados automáticamente. ....	46
Figura 5-13: (a) Tanque de resina, (b) base de impresión. ....	47
Figura 5-14: vista posterior de la impresora y cartucho de resina. ....	47
Figura 5-15: Proceso de lavado en Form Wash. ....	48
Figura 5-16: Proceso de curado del prototipo en Form Cure. ....	49
Figura 5-17: Proceso de extracción de soportes. ....	50
Figura 0-1: Impresora Form 3, identificando partes móviles. ....	54
Figura 0-2: Partes y zonas principales de la impresora Form 3. ....	55
Figura 0-3. ....	56
Figura 0-4: Tornillos mariposa que mantienen fijo el sistema LPU. ....	58
Figura 0-5: Introducción del disco de nivelación. ....	58
Figura 0-6: Nivelación en cada uno de los pies de la impresora. ....	59
Figura 0-7: Instalación del tanque de resina. ....	59
Figura 0-8: Instalación del mezclador. ....	60
Figura 0-9: Inserción de la base de impresión. ....	60
Figura 0-10: Inserción del cartucho de resina. ....	61
Figura 0-11: Hoja de Datos de resinas. ....	64

## Tablas

Tabla 1: Presión arterial.....	12
Tabla 2: Hoja de datos de resina de ingeniería Flexible 80A.....	26
Tabla 3: Hoja de datos de la resina de ingeniería Elástica 50A .....	27
Tabla 4: Dimensiones Form3 .....	62
Tabla 5: Aspectos técnicos Form3 .....	62

## **Introducción**

La impresión 3D tiene inicios documentados desde 1976, con la primera impresora de inyección de tinta. Desde entonces el desarrollo de las técnicas han hecho avanzar esta tecnología en distintas áreas.

Muchas empresas actualmente invierten parte de sus esfuerzos en investigación e innovación en temas relacionados con manufactura aditiva, logrando que ésta se relacione con procesos productivos, agilizando reposición de repuestos, tiempos de mantención y espacios de almacenamiento, por mencionar algunos de los beneficios.

Actualmente uno de los enfoques más importantes e innovadores se relaciona con la biomecánica, recrear órganos biocompatibles que puedan reemplazar y a la vez prescindir de donantes inclusive. Éste no será el enfoque de este trabajo, pero se relacionará en gran medida con la interacción entre la ingeniería mecánica y el estudio y entendimiento del comportamiento de tejidos biológicos, específicamente la arteria aorta.

Existen en el mercado distintas técnicas de impresión 3D, una de las más conocidas es la extrusión de material fundido, que suele abreviarse FDM (Fused Deposition Modeling) o FFF (Fused Filament Fabrication), que consiste en un cable de material termoplástico sólido que se deposita fundido por capas para formar a través de una boquilla el prototipo deseado. Otra de estas técnicas hoy utilizada, es la estereolitografía o también conocida como SLA la que se considera como el origen de los procesos de impresión 3D, con el primer equipo patentado en 1984 por Charles Hull y la primera máquina comercial desarrollada por 3D Systems en 1988. Este proceso de impresión 3D utiliza el principio de fotopolimerización de resinas sensibles a rayos UV que forman un cuerpo capa por capa que se va solidificando mediante un láser.

Las distintas marcas que existen presentan materiales con diferentes propiedades mecánicas pensados como prototipos de estudio o piezas definitivas para alguna aplicación.

## **Definición del problema**

La aorta es la principal arteria del cuerpo humano, sus dimensiones y propiedades mecánicas son un caso de estudio constante, tanto en su estado saludable como con distintas patologías que pudiesen afectar su dimensión o tejido. El tejido de esta arteria es elástico y parte en la porción superior del ventrículo izquierdo, su pared es flexible y extensible, resistente a la presión de bombeo del corazón. Médicamente intervenir este tejido implica un riesgo para los pacientes, es por esta razón que se tiene distintos tipos de exámenes que no requieren de intervención quirúrgica logrando imágenes médicas que son estudiadas por los profesionales de la salud para identificar patologías en esta zona y muchas otras en el cuerpo humano. Las imágenes médicas obtenidas hace algunos años fueron de dos dimensiones, lo que implica que solo se observaban en papel, transparencias o en su defecto, pantallas, hoy es posible tener una visión más completa y con la posibilidad de observar en 3 dimensiones el órgano de estudio, sin embargo, seguimos observando en dos dimensiones, es decir, a través de una pantalla.

Con la impresión 3D será posible recrear esta arteria, para poder hacer estudios en un material similar tanto en sus dimensiones como sus propiedades mecánicas y de este modo conocer más a fondo su comportamiento, de forma tangible, hacer estudios de prototipado, entre otros beneficios que se van a desarrollar más adelante. Además de lograr un prototipo impreso en tres dimensiones, tangible y sólido, es importante realizar una propuesta de prototipado, que se desarrolle de forma ágil y sencilla.

En primera instancia es necesario digitalizar sus dimensiones mediante una imagen 3D tanto interior como exterior de esta arteria en algún software de diseño acorde a los requerimientos de dimensión que ésta presenta.

A continuación, otro punto clave es determinar qué tipo de material disponible en el mercado se asemeja de mejor manera al tejido de estudio de modo de poder contrastar propiedades físicas de presión y temperatura en el mejor de los casos. Finalmente es estudiar la posibilidad de generar un diseño estándar para imprimir prototipos en el momento en que se requiera hacer pruebas.

## **Objetivos**

A continuación, se detallan los objetivos de este trabajo:

### **Objetivo general**

Diseñar e imprimir prototipo de arteria aorta con método de estereolitografía

### **Objetivos específicos**

- Conocer las tecnologías y materiales disponibles de manufactura aditiva.
- Identificar material equivalente a propiedades físicas y mecánicas de arteria aorta.
- Preparar prototipo 3D digital a partir de imágenes médicas de arteria aorta con los parámetros técnicos de impresión disponibles.
- Desarrollar el prototipo adaptado desde imágenes médicas.
- Proponer un proceso estándar de prototipado para arteria aorta desde imágenes médicas.

# **1. Marco teórico**

## **1.1. Diseño mecánico**

En primer lugar, es necesario mencionar la base de la manufactura en ingeniería, la cual se conoce como diseño mecánico, éste establece una serie de normas y herramientas para conseguir un resultado acorde a los objetivos propuestos. “El diseño mecánico es una tarea compleja que requiere muchas habilidades” [1], sin embargo, el diseño no está solo orientado a los ingenieros, el diseño es parte del ser humano desde siempre, entendiendo ingenieros como los profesionales formados para tales actividades. Si vemos el diseño e ingeniería como temas más filosóficos, como habilidades y actitudes del ser, entonces nos encontramos con que “la práctica de la ingeniería se preocupa en gran medida por el diseño, se suele decir que el diseño es en esencia ingeniería” [2] y que está como actor principal en cada nuevo avance y descubrimiento que hacemos como humanidad desde los inicios de la historia y antes.

La idea de diseñar es buscar una solución a un problema para lo cual es necesario generar un plan iterativo, con cierta cantidad de información proveniente tanto de la naturaleza como de la propia indagatoria que realiza el diseñador. En el caso que el diseño termine en algo real y tangible, éste debe ser confiable, funcional y seguro. Todo este plan es un proceso de toma de decisiones basadas en la mencionada cantidad de información con la que se cuenta. Hoy en día, a diferencia de lo que dice la historia de nuestros antepasados, se cuenta con una inmensa cantidad de información, la que probablemente ya haya indagado en la creación de algún diseño en el que se está trabajando, con información inclusive contradictoria a la que se tiene, a pesar de ello, en el marco de la mejora continua y el incansable avance de la tecnología, de todas maneras, se puede aportar investigando y repensando procesos ya establecidos.

Por otro lado, el diseño es una disciplina que requiere de comunicación constante y efectiva de los equipos de trabajo, en muchos casos multidisciplinarios, como en este trabajo de título. El éxito depende de la buena comunicación, de la información y profundidad con que se maneja las distintas variables que afectan el diseño.

En fin, cada diseñador y equipo de trabajo debe procurar que en todos los pasos de este proceso se asegure llegar al objetivo final, donde “Las herramientas de la ingeniería se combinan para producir un plan, que cuando se lleva a cabo, crea un producto funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que se puede fabricar y comercializar, sin importar quién lo construya o lo use” [1].

### 1.1.1. Un modelo simple de iteración

Para iniciar un proceso de diseño y prototipado se debe establecer en primera instancia los pasos del diseño que se seguirán para lograr un prototipo óptimo, en propiedades, dimensiones y tiempo de procesamiento. Así como se menciona, la iteración es en parte el camino del éxito en el diseño, cada vez que un diseño falla, se vuelve a repensar, rediseñar, recrear la serie de pasos que llevó al error para sustituirlos por otros que consigan solucionar el problema inicial. Un modelo simple de iteración es aquel en el que se trabaja de esta manera, es importante destacar que existen un sin número de secuencias propuestas por distintos autores y no hay nada establecido o mandatorio para tales fines.

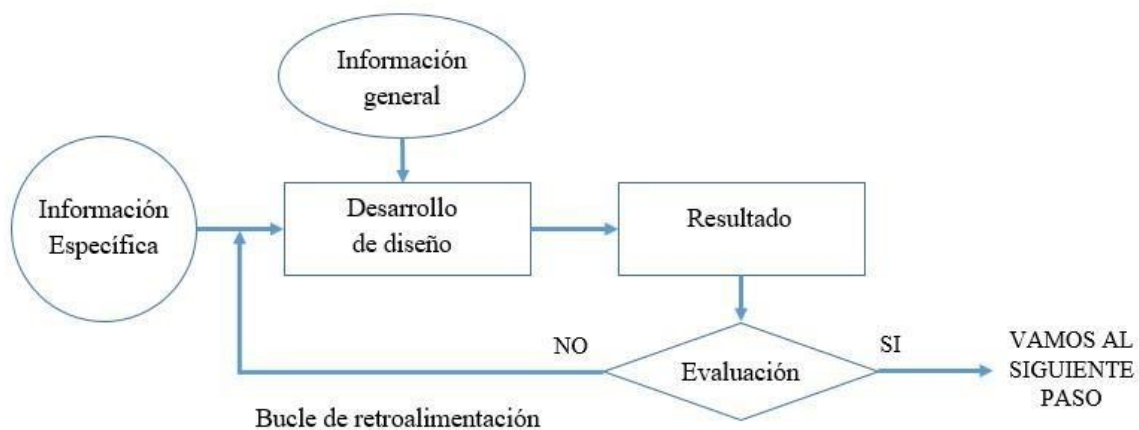


Figura 1-1: Módulo básico en el proceso de diseño. (Después de Asimow).[2]

El modelo de la Figura 3-1 ilustra un número importante de aspectos del proceso de diseño [2]. Por ejemplo, inclusive el sistema más complejo de diseño y secuencia de objetivos puede fallar. Este modelo, a pesar de ser simple indica que cada paso, cada objetivo y cada sistema requiere ser planeado, pensado y evaluado en este proceso de

prueba y error, pudiendo de esta manera entrar en el bucle de retroalimentación o avanzando a pasos siguientes.

### 1.1.2. Descripción del proceso de diseño

La Morfología del diseño fue la primera descripción del proceso completo de diseño que fue detallada por Morris Asimow. Cada uno de los recuadros de la Figura 3-2 tiene asociada distintas actividades que ayudan en el desarrollo de sus objetivos y que se detallarán más adelante. El propósito de esta ayuda gráfica es recordar al lector la secuencia lógica de actividades que lo guiará desde la definición del problema al diseño de detalles, en las primeras tres fases que propone Morris Asimow, como sigue:



Figura 1-2: Las actividades de diseño que componen las primeras tres fases del proceso de diseño de ingeniería [2].

#### 1.1.2.1. Fase 1: Diseño conceptual

En esta primera etapa es donde se da inicio al diseño, desde este punto se piensa y se crean los posibles caminos hacia la solución y se intenta seleccionar el que es más acertado.

Algunos textos hablan de esta etapa como el estudio de factibilidad. Esta es la etapa que requiere mayor esfuerzo creativo, cohesión de diversas áreas de estudio y distintas capacidades, habilidades y conocimiento.

En esta primera fase se tiene las siguientes etapas:

1. **Problema:** El principal logro de esta actividad es establecer cuáles son los requerimientos que pueden satisfacer al consumidor. Todo este análisis y estudio debe estar de acuerdo con la investigación previa donde se identifica cuáles son las principales competencias o alternativas, las especificaciones básicas en el posible mercado, entre otras que establezca el consumidor como importante.
2. **Recopilar información:** Tal como en la etapa previa, para ésta se necesita recopilar la mayor cantidad de información que permita conseguir un diseño conceptual robusto. En ingeniería la búsqueda de información es clave para ubicar el diseño o proyecto en un lugar competitivo y que logre los objetivos.
3. **Generar el concepto o la idea:** Conceptualizar la idea involucra la creación de una amplia variedad de conceptos que potencialmente podrían resolver el problema propuesto. Métodos creativos con una buena búsqueda de información son la clave en el éxito de esta etapa.
4. **Evaluar y seleccionar el concepto o idea:** Antes de pasar a la siguiente fase es necesario revisar que es lo que se tiene hasta ese momento, esto asegura que el diseño sea físicamente realizable y económicamente sostenible. En este punto es necesario evaluar minimizar los tiempos de producción o recursos utilizados, ya sea personas, equipamiento y costos necesarios para completar el prototipo.

#### 1.1.2.2. Fase 2: Diseño de realización

Todo lo que se habla y decide en el diseño conceptual en esta fase toma fuerza, es decir se desarrolla una estructura desde la fase anterior. Esta fase suele llamarse también diseño preliminar. Contempla tres tareas principales que se detallan a continuación:

1. **Arquitectura del producto:** En esta etapa lo que se hace es dividir el diseño en general en subsistemas o en módulos. Se decide como los componentes físicos del

sistema son organizados y combinados para desempeñar las funciones para las que fueron pensados.

2. **Diseño del producto:** En esta etapa es donde se consigue finalmente un modelo físico del diseño, el prototipo. Se piensa en todas aquellas características físicas que ayudarán a hacer un prototipo que cumple con los estándares que se vienen estableciendo a lo largo de la historia del diseño, como, por ejemplo, nervaduras, estrías, orificios, etc. Aquí es donde se utiliza la tecnología aditiva apropiada para tal fin.
  
3. **Diseño paramétrico:** En esta etapa es donde, una vez teniendo el prototipo físico, se establece las tolerancias y dimensiones exactas, es el proceso en el cual se revisa cuan confiable es la robustez, en el caso de existir algún ensamblaje, es revisar que tan funcional quedó el prototipo ensamblado. Finalmente, como se desempeña el prototipo ante un funcionamiento normal de fuerzas y condiciones ambientales.

### **1.1.2.3. Fase 3: Diseño de detalles**

Esta es la fase en que se genera una descripción de ingeniería completa de un producto probado y producible. La idea es agregar información que está faltante hasta este punto, ya sea de forma, dimensiones, tolerancias, propiedades superficiales y mecánicas, incluso de fabricación del prototipo. Este último proceso da lugar a generar especificaciones técnicas de cada pieza, esfuerzos y cargas máximas, por ejemplo.

## 1.2. Manufactura aditiva

“La manufactura aditiva formalmente conocida como ‘Impresión 3D’ como es conocida popularmente” [3] es un método de producción de piezas digitalizadas que se depositan solidificadas, capa por capa, cada una de igual espesor, éstas forman un objeto 3D tangible tal como se observa en la Figura 3-3. Hoy con grandes avances, debido al descubrimiento de nuevas áreas en que se puede aplicar. Esta tecnología entró en el mercado por el año 1987, con el nombre en inglés “*Rapid Manufacturing*” o “*Generative Manufacturing*”, con el paso de los años estos nombres siguen vigentes entre otros que van surgiendo según la tecnología utilizada. En comparación a otras tecnologías de manufactura ésta se puede afirmar que es una tecnología joven y se ha hecho esfuerzos en distintas partes del mundo para estandarizar su utilización.

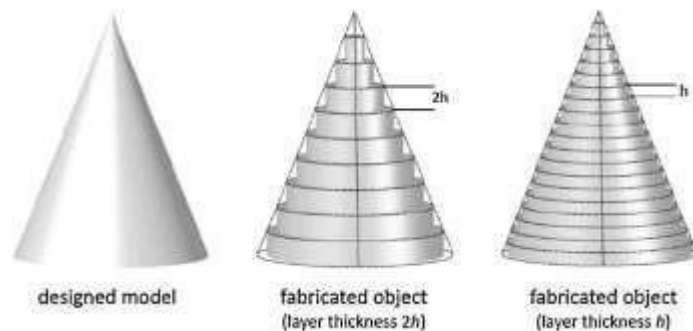


Figura 1-3: Esquema del efecto escalonado resultante de la fabricación por capas [4].

Esta tecnología trabaja constantemente en mejorar las distintas variables que involucran su utilización, por nombrar algunas; el tiempo de manufactura, la precisión, los materiales y sus propiedades mecánicas, el costo de producción de las piezas y la generación de residuos.

Existe una gran cantidad de programas computacionales que sirven para crear o modificar diseños de prototipos, los hay para diferentes niveles de diseñadores y usuarios. Por nombrar algunos: se tiene TinkerCAD y Paint 3D para usuarios principiantes; FreeCAD, SketchUP y OpenSCAD para usuarios intermedios; SolidWorks y Autodesk Inventor para usuarios avanzados o profesionales. En todos ellos las plataformas de uso son cada vez más intuitivas y aunque los últimos tienen la posibilidad de parametrizar diseños más complejos o crear conjuntos de piezas para formar una mayor, también es posible diseñar prototipos simples.

Los beneficios que trae o ha traído la manufactura aditiva, tanto a grandes como a pequeñas escalas son muchos, entre ellos se puede mencionar; la disminución de espacios de almacenamiento, lograr geometrías que virtualmente son muy difíciles o imposibles de lograr por tecnologías convencionales, un uso reducido de material para cada pieza, disminuyendo de esta manera la huella de carbono de la producción, entre otras que se irán desarrollando.

Con respecto a las tecnologías que se utilizan actualmente en manufactura aditiva, existen una amplia variedad de máquinas y materiales con los que es posible llevar a cabo modelos para las áreas antes mencionadas. En ingeniería, por ejemplo, se trabaja con distintos tipos de plásticos, resinas y actualmente, aunque no al alcance de todo el mundo, metales. En medicina se estudian materiales biocompatibles, capaces de interactuar con el cuerpo sin provocar daños, de hecho, se habla inclusive de impresión con tejido biológico, con la idea de recrear en un futuro quizás no tan lejano, órganos funcionales. [11]

### 1.2.1. Modelado por deposición fundida

También conocido “*Fused Deposition Modeling*” (FDM), que es una marca registrada por *Stratasys*, o Fabricación por Filamento Fundido o “*Fused Filament Fabrication*” (FFF), es una tecnología donde se utiliza el método de extrusión por fusión para depositar filamentos de plásticos térmicos en un determinado patrón. Esta es sin duda la tecnología más popular y doméstica que se puede acceder, por sus máquinas de precio accesible, así como también el material utilizado que se puede encontrar en diversos valores, sin embargo, la gran mayoría al alcance del uso común.



Figura 1-4: La PRUSA i3 MK3 es una de las mejores impresoras 3D FDM de consumo que puede obtener. [5]

Los materiales utilizados por esta tecnología son los siguientes, cada una de ellas con propiedades diferentes para las aplicaciones que se le puede encontrar:

- Filamento PLA: Ácido poliláctico.
- Filamento ABS: Acrilonitrilo butadieno.
- Filamento PETG: Tereftalato de polietileno.
- Filamento TPU: Poliuretano termoplástico.
- Filamento ASA: Acrilonitrilo estireno acrilato.
- Filamento NYLON: Poliamida.
- Filamento PC: Policarbonato.

El método de extrusión consiste en palabras simples, en una boquilla que derrite el plástico con un diámetro establecido y dado un espesor de capa, ésta se mueve en cada uno de sus tres ejes, generando, en una base tal como se ve en la Figura 3-4, un prototipo en 3D con las dimensiones dadas.

### 1.2.2. Estereolitografía

En inglés “*Stereolithography*” (SLA), esta tecnología también usa el principio de foto curado del material sensible a la luz, para este caso se utiliza un láser que cura la resina también dentro de un tanque con base transparente, en un determinado patrón en cada capa.

Durante este trabajo se tiene acercamiento con la marca de impresión SLA; FormLabs con las impresoras *Form2* y *Form3B* que se observan en las Figura 3-5.



Figura 1-5: *Form 2* (Izquierda) y *Form 3B* (Derecha).

Los materiales disponibles en esta marca son muy variados, de material fotosensible como se menciona anteriormente, pero mezclado con otras sustancias dando como resultado prototipos para diferentes aplicaciones. A continuación, se especifican los materiales de

la división de materiales para ingeniería que tiene Formlabs, que son los más conocidos para entornos de procesos productivos.

- *Durable Resin*
- *Grey Pro Resin*
- *Elastic Resin*
- *High Temp Resin*
- *Rigid Resin*
- *Tough Resin*
- *Flexible Resin*

En este trabajo se orienta el estudio sobre esta tecnología, sin olvidar que existe la tecnología de modelado por deposición fundida y revisando a grandes rasgos cuales son las ventajas y desventajas de una sobre la otra, de manera tal que el lector sea capaz de seleccionar alguna de las dos tecnologías tratadas en futuros proyectos de manufactura aditiva, teniendo estos datos como premisa.

### **1.3. Caracterización de la arteria aorta**

Para conocer y caracterizar la arteria más importante en caudal y presión del cuerpo humano, primero se tiene que explicar cómo funciona el sistema al que pertenece. Lograr proponer un proceso estándar de prototipado desde el enfoque de la ingeniería, requiere tener en cuenta conocimientos básicos de biología humana, por ello a continuación el lector podrá encontrar información relevante y ser parte del alcance de los objetivos.

#### **1.3.1. Sistema circulatorio humano**

El sistema circulatorio del cuerpo humano se encarga de transportar nutrientes, hormonas y oxígeno a cada rincón, además colabora en la eliminación de desechos producidos por las distintas actividades de los órganos. También, tiene como función el control de temperatura aumentando el flujo sanguíneo en las zonas donde ocurre intercambio térmico. Otras funciones menos mencionadas, pero no menos importantes, es la participación de este sistema en la reproducción, provocando la erección del pene en el coito y la nutrición del feto en el embarazo a través de la placenta. Finalmente cabe mencionar la participación del sistema circulatorio en el transporte de antígenos, células inmunitarias y anticuerpos para defensa del organismo.

El medio para que sea posible tal transporte es la sangre la que está formada células y plasma. Las células presentes en la sangre son los eritrocitos y leucocitos, entre otros; el plasma se compone de agua, proteínas y electrolitos.

Este sistema, como dice anteriormente recorre el cuerpo a través de arterias y venas que llevan la sangre bombeada por el corazón; las arterias por su parte transportan sangre desde el corazón hacia el resto cuerpo y las venas por el contrario transportan desde el cuerpo hacia el corazón.

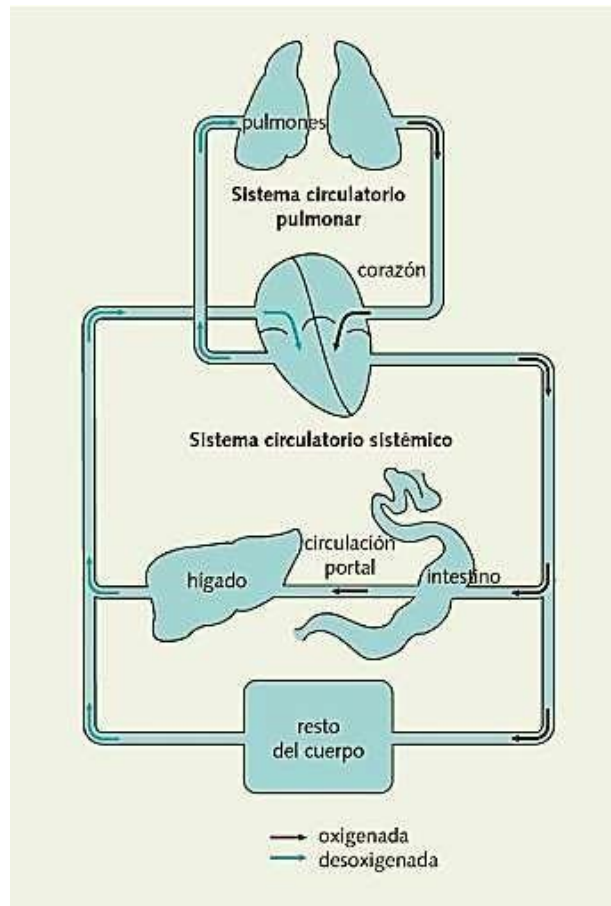


Figura 1-6: Sistemas circulatorios sistémico y pulmonar. El flujo unidireccional se mantiene por las válvulas del corazón, la diferencia de presión en el árbol arterial y las válvulas del sistema venoso [6].

### 1.3.2. El corazón

El corazón es un órgano formado por músculo que funciona como dos bombas, entregando la energía a la sangre para todo su recorrido. Ambas bombas son llamadas ventrículos; izquierdo y derecho, donde cada ventrículo tiene su depósito llamadas aurículas y “actúa en un sistema circulatorio diferente” [6], tal como se muestra en la Figura 3-4.

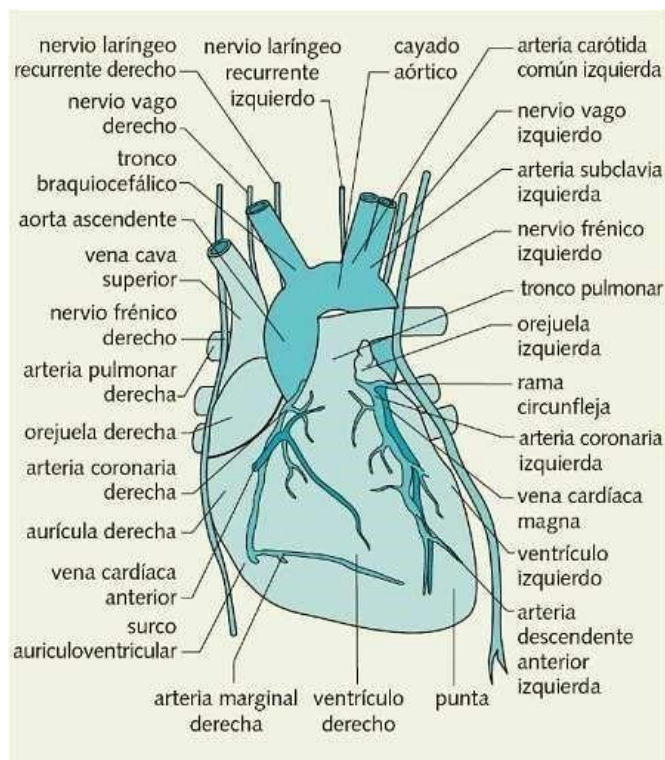


Figura 1-7: Vista externa del corazón: Donde se identifican los principales nombres identificables [6].

La presión arterial es un indicador del cuerpo humano y su valor define si una persona esta sana o padece alguna patología asociada a este indicador, se sitúa por rangos promedios cuales son las medidas de la presión o tensión arterial y su clasificación. Estos rangos es posible encontrarlos en cualquier página de internet o libro de medicina con algunas variaciones, sin embargo, al ser valores promedio se presenta de la siguiente manera.

Tabla 1: Presión arterial

Categoría de presión arterial	Presión arterial sistólica		Presión arterial diastólica
Normal	Menos de 120	y	Menos de 80
Presión arterial alta (sin otros factores de riesgo cardíaco)	140 o mayor	ó	90 o mayor
Presión arterial alta (con otros factores de riesgo cardíaco, según algunos proveedores)	130 o mayor	ó	80 o mayor
Presión arterial peligrosamente alta - Busque atención médica de inmediato	180 o mayor	y	120 o mayor

### **1.3.3. La arteria aorta**

A lo largo de este análisis se estudiará la arteria aorta, que a pesar de que todo el sistema en conjunto es indispensable en el cuerpo humano, en cuanto a caudal y volumen de sangre transportada, se puede afirmar que la arteria aorta es la principal arteria del cuerpo humano, ésta nace en el ventrículo izquierdo del corazón con un trayecto ascendente al inicio, para luego formar un arco, conocido como arco aórtico, después desciende a través del tórax y el abdomen, donde finalmente se divide en dos brazos llamados Iliacas comunes.

Al ser sometida a variaciones de caudal y presión directamente desde el corazón esta arteria debe tener una gran resistencia y adaptarse a las fluctuaciones de forma elástica, por lo que su comportamiento mecánico es muy complejo, y por ello se comporta como un amortiguador de las oscilaciones del flujo sanguíneo de forma de tener un caudal más estacionario en todos los lugares del cuerpo humano al que debe llegar los nutrientes y oxígeno a través de la sangre.

Este trabajo se enfocará en el diseño del arco aórtico por lo que se menciona las propiedades y estructura general de esta arteria para conocimiento del lector.

Esta arteria de gran calibre está compuesta por tres secciones cilíndricas conocidas como; capa íntima o interna, capa media y capa adventicia. De manera que cada una de estas capas contribuye a formar parte del comportamiento mecánico de la arteria. Sin embargo, los factores que llegan a influir para cada uno de ellos son muy variados, tales como la cantidad de sus componentes fundamentales como la elastina, el colágeno, las células musculares, a su vez, estos factores varían con la edad del individuo o enfermedades cardiovasculares que lo afectan, de cierta manera hablar de un valor único, es imposible.

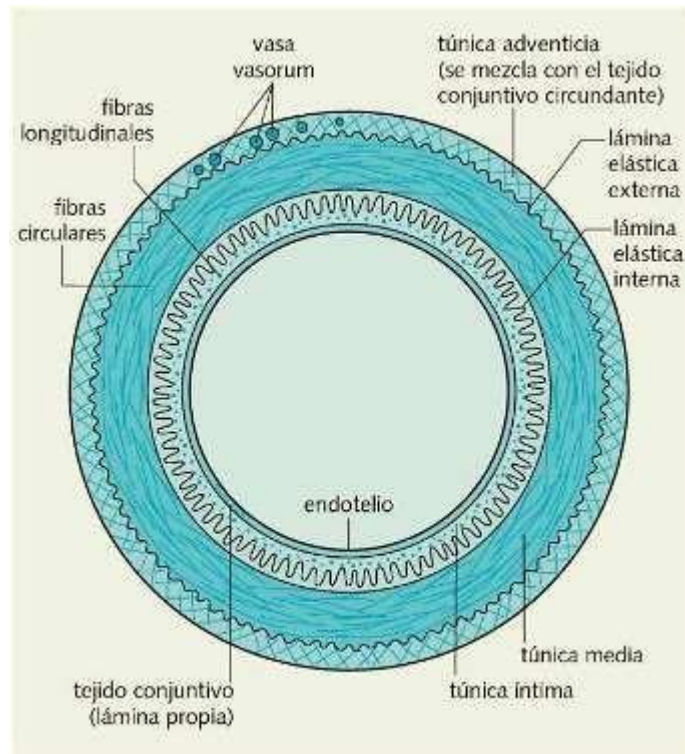


Figura 1-8: Corte transversal de un vaso genérico que muestra las distintas capas [6].

La pared arterial está dentro del grupo conocido como tejidos blandos del cuerpo humano y se diferencian de tejidos que son llamados duros porque sus propiedades mecánicas son bajas y posee una alta flexibilidad. Otros tejidos blandos que tiene el cuerpo humano son los cartílagos articulares, los ligamentos, los tendones y los vasos arteriales. Tal como se describe más arriba la resistencia de un tejido blando depende de la concentración y disposición de los componentes principales (elastina, colágeno y células musculares).

Desde el punto de vista de la ingeniería las arterias son consideradas como materiales compuestos reforzados por dos familias de fibras de colágenos [7]; la capa íntima, formada por una fina capa de células endoteliales y que están sometidas principalmente al esfuerzo tangencial que realiza el flujo sanguíneo. Por su parte la capa media y la adventicia son las encargadas de soportar la mayor parte de las cargas y determinan en mayor medida las propiedades mecánicas de la aorta.

Para lograr una identificación algo más detallada de la arteria se tiene que hacer un análisis en el que se logre identificar las funciones y composiciones de cada una de estas capas anteriormente identificadas, tal como sigue:

Capa Intima: Tal como se menciona anteriormente esta sección transversal de la aorta es una capa de espesor unicelular, es decir muy delgada, basada en el colágeno. Sus funciones principales son el control del diámetro y el intercambio permeable de macronutrientes como grasa y proteínas, además de el paso de glóbulos blancos para el proceso de inflamación y reparación.

#### 1.4. Ley de Laplace

La Ley de Laplace es una relación simple para cuerpos huecos elásticos, donde se considera la presión interna y la tensión que soportan las paredes, la que es dependiente del radio de la curvatura de las paredes. Esta ecuación fue redactada por el físico francés Pierre-Simon Laplace y es útil en el estudio de la fisiología de los distintos tipos de conductos pertenecientes al sistema circulatorio.

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e} \quad 3-1$$

Donde el  $\sigma$  es la tensión por unidad de longitud,  $P$  es la presión interna,  $R$  el radio interno del cilindro y  $e$  el espesor de la pared, por ello esta ecuación se obtiene en unidades de medida de presión por unidad de longitud. De esta manera se puede saber cuánto es la tensión que soporta una estructura cilíndrica elástica dependiendo de su radio. En medicina esta tensión se conoce como tensión parietal, que representa la fuerza por unidad de longitud tangencial de la pared vascular, la cual se opone a la fuerza de distensión vascular generada por la tensión vascular.

La solución es válida instantáneamente inclusive para un flujo no estacionario porque el tiempo no aparece en la ecuación de continuidad de flujo incompresible. En otras palabras, en cualquier momento de tiempo, el campo de flujo incompresible instantáneamente se ajusta a sí mismo de modo que satisface la ecuación de Laplace y las condiciones de frontera que existen en este momento de tiempo. [8]

## **1.5. Imagenología médica**

Existen varios tipos de obtención de imágenes médicas, todos ellos con metodologías no invasivas que permiten a los profesionales de la salud encontrar anomalías y diagnosticar enfermedades sin la necesidad de una operación.

Dependiendo de la zona del cuerpo del paciente que se quiere estudiar o el tipo de búsqueda que se quiere hacer, es que se selecciona un método u otro.

A continuación, se describe brevemente cuales son las tecnologías de obtención de imágenes médicas y sus alcances.

### **1.5.1. Tomografía computarizada**

Esta tecnología utiliza un equipo de rayos X especial para obtener imágenes transversales del cuerpo. Los usos principales de la tomografía computarizada son para explorar:

- Cánceres
- Coágulos de sangre
- Signos de enfermedades en el corazón
- Fracturas
- Hemorragia interna

Para este procedimiento el paciente debe recostarse sobre una mesa lo más inmóvil posible para pasar a través de una máquina de rayos X. Para algunas pruebas, previamente el paciente debe tomar un tinte de contraste que ayuda a obtener imágenes de mejor calidad.



ADAM

*Figura 1-9: Durante la tomografía computarizada un fino haz de rayos X rota alrededor de un área del cuerpo y genera una imagen de las estructuras internas [9]*

### **1.5.2. Resonancia magnética**

Este procedimiento utiliza imanes y ondas de radio muy potentes para crear imágenes del cuerpo, a diferencia de la tomografía computarizada no utiliza rayos X.

Las imágenes por resonancia magnética se denominan cortes y se pueden almacenar o imprimir. En un solo examen se puede obtener miles de imágenes.

También se puede hacer en distintas partes del cuerpo, y sus distintos tipos son:

- Resonancia magnética del abdomen
- Resonancia magnética cervical
- Resonancia magnética del tórax
- Resonancia magnética de la cabeza
- Resonancia magnética del corazón
- Resonancia magnética lumbar
- Resonancia magnética pélvica
- Angiografía por resonancia magnética
- Venografía por resonancia magnética

Para realizar este examen es necesario sacar los objetos metálicos, ya que ciertos tipos pueden ocasionar imágenes borrosas.

Se utilizan pequeños dispositivos llamados espirales alrededor de la zona que se está estudiando que reciben las ondas de radio y ayudan a obtener imágenes de mejor calidad.

De esta misma manera en algunos casos se emplean tintes de contraste para la observación más aguda de ciertas zonas.



*Figura 1-10: Durante el examen la máquina envía ondas de radiofrecuencia que generan imágenes en dos y tres dimensiones.[9]*

### **1.5.3. Ultrasonido**

Este examen consiste en enviar ondas sonoras de alta frecuencia que al rebotar con las estructuras corporales son recibidas por una máquina que las transforma en una imagen. A diferencia de la radiografía o la tomografía, ésta no utiliza radiación ionizante.

La forma de tomar este examen es completamente no-invasiva, el paciente se recuesta sobre una camilla, donde el médico o examinador pone un gel a base de agua sobre la zona que se quiere observar con la intención de que el sonido viaje de mejor forma a través de los tejidos.

Las razones por las cuales alguien requiera un examen de este tipo son variadas, principalmente para detectar problemas en zonas o razones que se detallan a continuación.

- Las arterias del cuello
- Las venas o arterias de los brazos o piernas
- Un embarazo
- La Pelvis
- El abdomen o los riñones
- Las mamas
- La tiroides
- El ojo y su órbita



*Figura 1-11: Examen de ultrasonido abdominal*

## **2. Diseño Conceptual**

### **2.1. La tecnología**

Como se ve en la sección 3.2 hay dos tecnologías que se podrían utilizar para desarrollar el prototipo que busca este trabajo, de antemano se sabe que la tecnología seleccionada es la SLA, pero es importante mostrar cuales son los criterios al elegir una tecnología para la generación de un prototipo y cuáles son sus puntos a favor y en contra con respecto a la tecnología FDM.

La elección de una tecnología por sobre otras, contempla variables, tales como el valor de producción, el tiempo, los materiales disponibles y sus propiedades mecánicas, la calidad superficial que puede tener el prototipo, principalmente. En el caso de producción en masa la variable más importante es el tiempo de producción, cuanto puedo crear en un determinado tiempo y el costo de manufactura. Para el caso de estudio, la variable que tiene mayor peso viene siendo la calidad de la impresión o, mejor dicho, la resolución que alcanza la tecnología.

Como se menciona en la sección 3.3 la aorta es un tejido sometido a flujos y presiones variables, por lo que el material que se seleccione tiene que cumplir, o suplir en parte, estas condiciones de operación debido a que, para un análisis posterior, se pueda hacer pruebas sobre el prototipo. Además, existe una cantidad importante de información en que se define cuáles serían las propiedades mecánicas de esta importante arteria, como es de esperar, cada ser es único y estas especificaciones se pueden asumir como un promedio de la población estudiada, ya que debido a la variabilidad que encontramos en tejidos sanos, existen también patologías que pudiesen afectar el buen funcionamiento de la aorta.

Las variables que estudiaremos a fondo y se van a ir comparando brevemente con la tecnología FDM son el costo, la calidad de la impresión y finalmente el tiempo de impresión y a su vez indicar cuales criterios son más importantes según lo que se quiere conseguir.

### 2.1.1. El Costo

Se sabe que la tecnología FDM es la más económica, por lo que tendría un punto como posible tecnología a utilizar en caso de producción en masa, de hecho, esta tecnología es la más utilizada a nivel doméstico. Este resultado es esperable dado que los materiales utilizados en los distintos casos tienen valores muy diferentes, por un lado, los distintos tipos de filamentos para FDM, en su gran mayoría tienen un valor más bajo que la resina utilizada en SLA o DLP. Así mismo, no tan solo el material es mucho más elevado en valor, si no que las máquinas que se utilizan en los diferentes casos también hay distinción;

El precio de impresión debiese contemplar tanto el volumen de material utilizado como las horas de impresión. En el primer caso el volumen de impresión varía muy poco entre un prototipo con alta resolución y uno de baja resolución, salvo casos puntuales en que se requiera imprimir objetos con secciones muy detalladas, el segundo caso, el tiempo de funcionamiento contempla la resolución, dado que, a menor espesor de capa, la máquina tardará más en finalizar el prototipo impreso y pesar de que éste porcentaje de costo no es tan elevado, el consumo energético de la máquina también entra en la ecuación del cálculo de costo. De esta forma con la formula simple que se muestra a continuación se puede obtener el costo de producción de un prototipo:

$$\text{Costo} = V + t \cdot (v \cdot w + 0,1 \cdot HH)$$

*Fórmula 4-1 Donde V es el valor del material, t es el tiempo de producción, v el valor del kilowatt-hora, w el consumo eléctrico de la máquina y HH el valor de la hora-hombre que se emplea en la impresión.*

Hoy un kilo de filamento PLA, el filamento más común de la tecnología FDM cuesta entre 10% al 15% de lo que cuesta un litro de resina estándar, la más básica de las disponibles. Por otro lado, las máquinas de SLA hoy se puede encontrar por valores similares a una máquina FDM, sin embargo, si lo que se busca es calidad, las máquinas mejor evaluadas parten desde los cuatro millones de pesos chilenos, donde nuevamente una máquina de buena calidad con tecnología FDM se puede encontrar por el 10% de ese valor.

En anexos se puede encontrar el cálculo del costo de este trabajo.

### 2.1.2. Calidad de la impresión

Este concepto se refiere a qué tan preciso puede llegar a ser el prototipo, para este estudio se requiere un nivel de precisión avanzado, con capas de espesor lo suficientemente delgadas que permitan dar un aspecto y sensación de tejido biológico real. Como se menciona anteriormente, un posterior análisis para este trabajo sería hacer pruebas utilizando herramientas de prototipo en que exista la posibilidad de recrear cuantas veces sea necesario al punto de ruptura inclusive, donde imprimir un nuevo prototipo no lleve mucho mas de algunas horas. A continuación, Figura 4-1 se puede comparar la precisión en las tecnologías disponibles de forma cualitativa:



*Figura 2-1: Imagen comparativa de las tecnologías principales disponibles. [10]*

Aquí el resultado nos arroja que SLT es superior a FDM alcanzado capas de espesor hasta 10 veces menor. Es coherente obtener estos valores, dado que la tecnología STL es ampliamente utilizada en el sector de la odontología, donde las prótesis deben tener una calidad superficial mayor.

### 2.1.3. Tiempo de impresión

Ahora que ya se conoce la variable de calidad, se puede hablar del tiempo de producción, ya que estas dos están relacionadas. El tiempo de producción depende de la calidad que se le quiere dar al prototipo, es decir a mayor calidad, mayor tiempo de producción. Esto se debe a que la calidad aumenta o disminuye con el grosor de la capa impresa, si la

resolución de la pieza impresa es alta, el grosor de capa va a ser más pequeño y eso conlleva más tiempo de impresión.

## 2.2. Elección de material

Considerando que la tecnología seleccionada en el punto 4.1 es la conocida como SLA o Estereolitografía, cabe mencionar que parte de esta elección corresponde a la disponibilidad del equipo de impresión 3D de la marca Formlabs y el modelo Form 3B.



*Figura 2-2: Imagen de impresora (referencial) en que se desarrollará el prototipo. [10]*

En ese capítulo la investigación y análisis se centra en los materiales que tiene Formlabs dado que son los que se puede usar en esta máquina. Otras tecnologías usan distintos materiales como ya se explica anteriormente y no se analizará sobre ellos.

Esta marca posee una amplia gama de resinas con diferentes propiedades y para distintas aplicaciones. Por ello es necesario decidir desde las hojas de datos cual de todas ellas se ajusta mejor a lo que se busca obtener en este prototipo.

Se realizará un breve paso por cada grupo de resinas y cada resina para que el lector tenga idea de todo lo que se puede lograr usando una impresora de este tipo.

### **2.2.1. Resinas Estándar**

En primer lugar, se tiene el grupo de resinas estándar, estas presentan un acabado de superficie mate y con gran capacidad de lograr detalles con precisión sin dejar de lado su resistencia. Están diseñadas para su uso inmediato al salir del proceso de impresión y su tono neutro da pie al uso de ellas para un post procesamiento en que la pieza se puede pintar, por ejemplo. Disponibles en gris, negro y blanco. Otro tipo de resina estándar es la resina transparente (Clear Resin), esta resina es útil para crear componentes lumínicos, lentes, aplicaciones ópticas o proteger sistemas o fluidos que requieran observación. Dentro de este grupo se encuentra también la resina de prototipo (Draft Resin), que se utiliza para lograr elementos en menor tiempo, es decir la capa que se foto-polimeriza alcanza un mayor espesor que las resinas antes mencionadas, con esta resina se imprime cuatro veces más rápido. De todas maneras, su configuración permite crear con mayor precisión y alcanzar las 100 micras.

### **2.2.2. Resinas de ingeniería**

En el grupo de las resinas de ingeniería hay también otras opciones de impresión versátiles en propiedades mecánicas y por lo mismo útiles en diferentes aplicaciones, entre ellas; se tiene la resina para alta temperatura (High Temp Resin) diseñada principalmente para tener un comportamiento estable ante elevadas temperaturas, es ideal para imprimir prototipos sometidos a fluidos calientes sin perder precisión y detalle en su acabado. También se tiene disponible la resina para prototipos (Grey Pro Resin) especialmente diseñada para imprimir prototipos sometidos a esfuerzos cíclicos ya que ofrece alta precisión, un alargamiento moderado y una baja deformación.

También están las resinas duras, útiles también en la ingeniería y prototipado. La resina rígida (Rigid Resin) en sus distintas versiones esta resina tiene la particularidad de que está reforzada con vidrio lo que le provee una alta rigidez y un acabado pulido, que también previene las deformaciones del material a lo largo del tiempo. La resina dura (Tough Resin) que es una simulación de un plástico ABS, con propiedades mecánicas similares a este material, esta resina resiste esfuerzos y tensiones tales, que es útil para generar prototipos ensamblados. Finalmente, la resina durable (Durable Resin) es el

material más flexible dentro de este grupo, ideal para piezas compresibles y ensamblajes de baja fricción.

Hasta este punto se ha hecho un recorrido por un gran número de materiales disponibles entre las resinas de Formlabs, aún queda mencionar el grupo de las resinas para odontología y el grupo de las resinas de joyería, inclusive las posibilidades de elección de resinas se abre a resinas especializadas y materiales sanitarios, sin embargo estos tipos ya escapan en gran medida del estudio y objetivos, solo se menciona para evidenciar cuan versátil logra ser esta tecnología y los avances en los que se encuentra permanentemente trabajando.

Otro grupo de resinas son las resinas elástica y flexible, que en tiempos de la Form2 y a inicios de la Form3 se consideraban dentro del grupo de las resinas de ingeniería. Estas resinas se estudiarán más en profundidad en adelante; por sus propiedades mecánicas estas resinas logran prototipos deformables que hasta cierto punto logran recuperar su forma original. Son similares entre sí, aunque la elección de una u otra depende de su aplicación y detalle.

#### **2.2.2.1. Resina de ingeniería Flexible 80A**

Esta es la resina más rígida y suave al tacto que tiene Formlabs entre las resinas flexibles y elásticas que tiene en su librería, con una dureza simulada en durómetro de 80A Shore, similar a la dure que presenta el caucho o el poliuretano termoplástico (TPU).

Es una combinación balanceada entre suavidad y fuerza, esta resina es capaz de resistir esfuerzos de torsión, flexión y compresión, inclusive en ciclos repetidos. El material se adapta bien para amortiguar, disipar y absorber los golpes.

De la página de Formlabs se puede obtener la hoja de datos de cada una de sus resinas, para el caso de la resina de ingeniería Flexible 80A, los datos se describen en la Tabla 2, en sistema métrico. También en esta misma página se puede tener estos datos en sistema imperial, dependiendo de las unidades en las que se está desarrollando el diseño.

Tabla 2: Hoja de datos de resina de ingeniería Flexible 80A

	Verde	Post curado <sup>1</sup>	Método
<b>Propiedades mecánicas<sup>2</sup></b>			
Resistencia a la tracción <sup>3</sup>	3,7 MPa	8,9 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Esfuerzo a 50% de elongación	1,5MPa	3,1 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Esfuerzo a 100% de elongación	3,5MPa	6,3 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Elongación máxima a la ruptura	100%	120%	ASTM D 412-06 (A)
Dureza Shore	70 A	80 A	ASTM 2240
Compresión constante (23°C por 22 horas)	No testeado	3%	ASTM D 395-03 (B)
Compresión constante (70°C por 22 horas)	No testeado	5%	ASTM D 395-03 (B)
Resistencia la desgarre <sup>4</sup>	11 kN/m	24 kN/m	ASTM D 624-00
Fatiga por flexión a 23°C	No testeado	>200.000 ciclos	ASTM D1052
Fatiga por flexión a -10°C	No testeado	>50.000 ciclos	ASTM D1053
Resiliencia de Bayshore	No testeado	28%	ASTM D2632
<b>Propiedades técnicas</b>			
Transición vítrea (Tg)	No testeado	27°C	DMA

<sup>1</sup> La información fue obtenida desde partes impresas usando Form 3, 100 $\mu$ m, configuración Flexible 80A, lavado en Form Wash por 10 minutos y con post-cura con Form Cure a 60°C por 10 minutos.

<sup>2</sup> Las propiedades pueden variar con la geometría de la parte impresa, la orientación, configuración y temperatura de impresión.

<sup>3</sup> El testeo de tensión fue realizado después de 3 horas a 23°C, usando una muestra cortada de la hoja. <sup>4</sup> El testeo de resistencia al desgarre fue realizado después de 3 horas a 23°C, usando una muestra de desgarre Die C directamente impresa.

### 2.2.2.2. Resina de ingeniería Elástica 50A

Esta es la resina más suave de las resinas de ingeniería, ésta siendo un material con una dureza de 50A Shore es comparable a las propiedades de la silicona. Se elige la resina elástica para diseños que están pensados para doblar, torcer, comprimir, estirar y que están sometidos a ciclos repetitivos sin llegar a desgarrarse.

Tabla 3: Hoja de datos de la resina de ingeniería Elástica 50A

	Verde	Post curado <sup>4</sup>	Método
<b>Propiedades mecánicas<sup>5</sup></b>			
Resistencia a la tracción <sup>6</sup>	3,7 MPa	8,9 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Esfuerzo a 50% de elongación	1,5MPa	3,1 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Esfuerzo a 100% de elongación	3,5MPa	6,3 Mpa	ASTM D 412-06 (A)
Elongación máxima a la ruptura	100%	120%	ASTM D 412-06 (A)
Dureza Shore	70 A	80 A	ASTM 2240
Compresión constante (23°C por 22 horas)	No testeado	3%	ASTM D 395-03 (B)
Compresión constante (70°C por 22 horas)	No testeado	5%	ASTM D 395-03 (B)
Resistencia la desgarre <sup>8</sup>	11 kN/m	24 kN/m	ASTM D 624-00
Fatiga por flexión a 23°C	No testeado	>200.000 ciclos	ASTM D1052
Fatiga por flexión a -10°C	No testeado	>50.000 ciclos	ASTM D1053
Resiliencia de Bayshore	No testeado	28%	ASTM D2632
<b>Propiedades técnicas</b>			
Transición vítrea (Tg)	No testeado	27°C	DMA

<sup>4</sup> La información fue obtenida desde partes impresas usando Form 3, 100 $\mu$ m, configuración Flexible 80A, lavado en Form Wash por 10 minutos y con post-cura con Form Cure a 60°C por 10 minutos.

<sup>5</sup> Las propiedades pueden variar con la geometría de la parte impresa, la orientación, configuración y temperatura de impresión.

<sup>6</sup> El testeo de tensión fue realizado después de 3 horas a 23°C, usando una muestra cortada de la hoja. <sup>8</sup> El testeo de resistencia al desgarre fue realizado después de 3 horas a 23°C, usando una muestra de desgarre Die C directamente impresa.

### **3. Diseño básico**

Este diseño se considera un diseño adaptativo, lo que se busca es recrear un tejido del cuerpo humano con el material y la tecnología disponible con la intención de lograr un prototipo con el que se pueda realizar estudios y pruebas identificando de forma tangible su comportamiento.

Este diseño adaptativo por su parte busca recrear la forma y estructura de la arteria aorta. El camino que esta investigación está tomando es interesante dado que se podrá visualizar y comprobar cómo se comporta este prototipo ante las diferentes condiciones de presión que se puede exponer inclusive hasta la ruptura en futuras investigaciones. Hay que recalcar que el alcance de este trabajo de título es ver la factibilidad de la impresión usando el método de estereolitografía, respetando las dimensiones reales promedio de esta importante arteria y ajustándolos a los parámetros técnicos disponibles en la tecnología que se va a utilizar.

Este proceso no es innovador, pero es un acercamiento tangible con la tecnología que ya se tiene al alcance y en base a este estudio y diseño, se podrá recrear una estructura tan compleja y fascinante como lo es la principal arteria del cuerpo humano, la cantidad de veces que se requiera un estudio.

Así, luego de seleccionar la tecnología y el material en que se piensa imprimir este prototipo, sigue un proceso digital en que se trabaja a partir de la imagen médica de la aorta, esta imagen es de un examen no invasivo, la resonancia magnética.

#### **3.1. Imagen médica**

La imagen médica obtenida es una resonancia magnética en tres dimensiones ya convertida en formato STL. Es importante destacar que esta imagen no se obtiene en formato en STL desde el examen mismo, este examen corresponde a una superposición de imágenes consecutivas de la estructura que mediante otros programas se logra construir un cuerpo que posteriormente es llevado al formato para impresión 3D. Además, esta imagen es un sólido, por lo que el trabajo de digitalización en este caso es calcular y generar la pared de la aorta a partir del archivo obtenido.



*Figura 3-1: Imagen médica obtenida por resonancia magnética llevada a formato STL.*

### **3.2. Software seleccionado**

El diseño básico llevó más tiempo del presupuestado al encontrarse con algunos problemas que se tuvo que ir solucionando en la medida que avanzó el trabajo. De hecho, se tuvo que adaptar al software capaz de procesar y conseguir los objetivos que se establecen en el principio. Cabe mencionar que Autodesk y sus distintas herramientas digitales están disponibles para estudiantes de forma gratuita y es posible acceder prácticamente a todos sus distintos programas. Existen software de diseño que se utilizan en diferentes áreas, pero para ingeniería y en la formación académica se utiliza aquel que es más familiar.

Inventor es un software precisamente orientado al trabajo en tres dimensiones, generación de piezas y prototipos digitales con una amplia biblioteca de texturas, colores y materiales, que además incluye simulaciones y da la posibilidad de importar diseños desde otros programas y formatos.



Figura 3-2: Autodesk Inventor® Professional 2020 con licencia educativa.

La imagen médica es obtenida en una extensión que no es modificable, es un formato que se conoce como malla, está compuesta, tal como se ve en la imagen Figura 5-3, por figuras geométricas unidas que dan forma al objeto digital 3D, para poder modificar y preparar el diseño se trabajó con extensión de Autodesk Inventor® Professional, que ayuda a construir un cuerpo a partir de una malla y que este cuerpo sea modificable.



Figura 3-3: Mesh Enabler permite crear un “cuerpo sólido” a partir de una malla.

Cabe mencionar que este proceso es rápido, sin embargo, los alcances del software usando esta extensión, son limitadas y hacen más lento el trabajo con el objeto creado a partir de la malla, tomando mucho tiempo en modificar y muchas veces terminar en error.

Por otro lado, otra herramienta útil de Autodesk fue Fusion 360®, permite trabajar en línea y a pesar de que tiene herramientas similares a Inventor, Fusion 360 configura las herramientas de tal forma que lo convierte en una vía más directa de conseguir estandarizar el trabajo realizado. Lo que es Autodesk Fusion 360 es más una plataforma en que se concentran las herramientas que presenta Autodesk en un formato más en línea.

A pesar de lo anterior, el trabajo en este software resultó ser más fluido para esta aplicación, sin la necesidad de extensiones es posible pasar de la malla a un cuerpo modificable, además tiene una sección que resultó muy útil en el desarrollo del diseño, que fue la posibilidad de generar intersecciones y planos de trabajo donde se identificó los puntos de corte de la malla.



Figura 3-4: Software Autodesk Fusion 360 para trabajar con diseño 3D.

No se va a profundizar en el uso de estas herramientas digitales en este punto, dado que en el siguiente capítulo se abordará de forma más detallada cual fue el paso a paso en el desarrollo de este prototipo.

El desarrollo de piezas mecánicas, con geometrías más simples no requiere de distintos softwares, Autodesk Inventor es suficiente para esa tarea y probablemente lo sea para el desarrollo de este trabajo, sin embargo, diseñar a partir de una imagen médica, en un formato que no es inicialmente modificable, con una geometría que es poco amigable o, mejor dicho, más real, resultó ser mejor y fluido gracias a Autodesk Fusion.

### 3.3. Preparación para imprimir



Figura 3-5: Logo de Preform, software de preparación de prototipos de Formlabs.

Finalmente, ya con el diseño preparado y listo para la impresión viene el proceso de impresión, para lo que el prototipo digital se debe preparar para este último paso. Este

proceso corresponde a la orientación del prototipo en la base y la selección y configuración de soportes. En este caso particular, Formlabs tiene una herramienta digital única, que permite además monitorear y predecir cual será el resultado final del prototipo y por ende advertir de posibles riesgos en la configuración seleccionada con el logo de la Figura 5-5.

La orientación del diseño 3D sobre la base debe considerar algunos aspectos claves, el principal es que todo el cuerpo de la pieza debe estar dentro de los márgenes establecidos, si este quedase levemente fuera, el software no permite la impresión. Por otro lado, algunas de las posibles advertencias que pueden aparecer antes de imprimir son las siguientes:

- Nivel de resina
- Cantidad de soportes
- Presencia de mínimos
- Presencia de huecos

El nivel de resina es muy fácil de solucionar, no tan barato. Solo requiere cambiar el cartucho y con eso el problema está solucionado. En la práctica, hay que considerar que siempre queda un saldo residual en el cartucho con resina insuficiente, es por lo que éste se guarda hasta que el nuevo cartucho se utiliza, de modo de vaciar la cantidad mínima de mililitros del antiguo al nuevo cartucho. Este procedimiento no es para nada complejo ya que los cartuchos en la parte de la toma de aire tienen una tapa rosca al igual que un bidón o botella. Por otro lado, el error de soportes insuficientes es muy común que aparezca, aquí se debe mencionar que es en base a la experiencia que este mensaje se puede omitir, siempre el software asegura la impresión con una cantidad de soportes que significan un gran porcentaje del consumo de resina, pero existe un punto en que el mensaje aun aparece y la impresión termina siendo un éxito. Si el lector trabaja o trabajará con una impresora de resina, en primera instancia es recomendable seguir las instrucciones que da el software. El error de presencia de mínimos también es común que aparezca, principalmente se debe a que siempre en la zona del prototipo a la base, debe si o si existir un soporte, si no existe un soporte, este punto automáticamente se convierte en un mínimo, es decir una zona que no se imprimirá. Finalmente, el mensaje de advertencia de hueco es cuando la zona a imprimir genera una cámara cerrada, la que en contacto con la resina

puede llegar a provocar vacío, y podría ocasionar un desprendimiento del prototipo desde la base, tal como es el principio de funcionamiento de una ventosa.

## **4. Prototipo**

El proceso de impresión con el método de Estereolitografía costa de tres etapas donde la primera es la impresión misma, en segundo lugar, el lavado y por último el curado, cada una de estas etapas tiene ciertas precauciones que hay que tomar que se describirán en forma detallada.

### **4.1. La impresión**

La Form3 es una máquina bastante moderna y una gran adquisición para la ingeniería de los materiales, tal como se menciona anteriormente, ésta tiene un elevado valor en comparación a otras máquinas que utilizan resinas fotosensibles, por ello, a pesar de que el proceso es simple, cada paso se debe realizar con cuidado para no dañar sus componentes. Un resumen del paso a paso se puede encontrar en la página de la marca Formlabs, sin embargo, es importante incluirlo en este trabajo para que forme parte del flujo con que se desarrolla el tema.

#### **4.1.1. Pasos previos**

Hay que cerciorarse de cuatro puntos previos a cargar el diseño 3D en la impresora, en esta parte no importa el orden con que se realiza esta lista de comprobación lo importante es revisar cada uno;

- a. Revisar si tanque se encuentra bien inserto, la impresora es capaz de detectar si este punto no está del todo correcto.
- b. Revisar que la base esté en su lugar y también bien instalada.
- c. Revisar que cartucho de resina esté bien instalado y reconocido también por la impresora.
- d. Finalmente corroborar que la toma de aire en el bidón esté abierta. Ojo si es que el bidón es nuevo, corroborar también que la salida de resina esté abierta.

### 4.1.2. Carga de Prototipo a la máquina

Luego de realizar las inspecciones previas se puede cargar el archivo STL con el software Preform, como se menciona anteriormente, con la revisión pertinente de soportes y listo para imprimir.

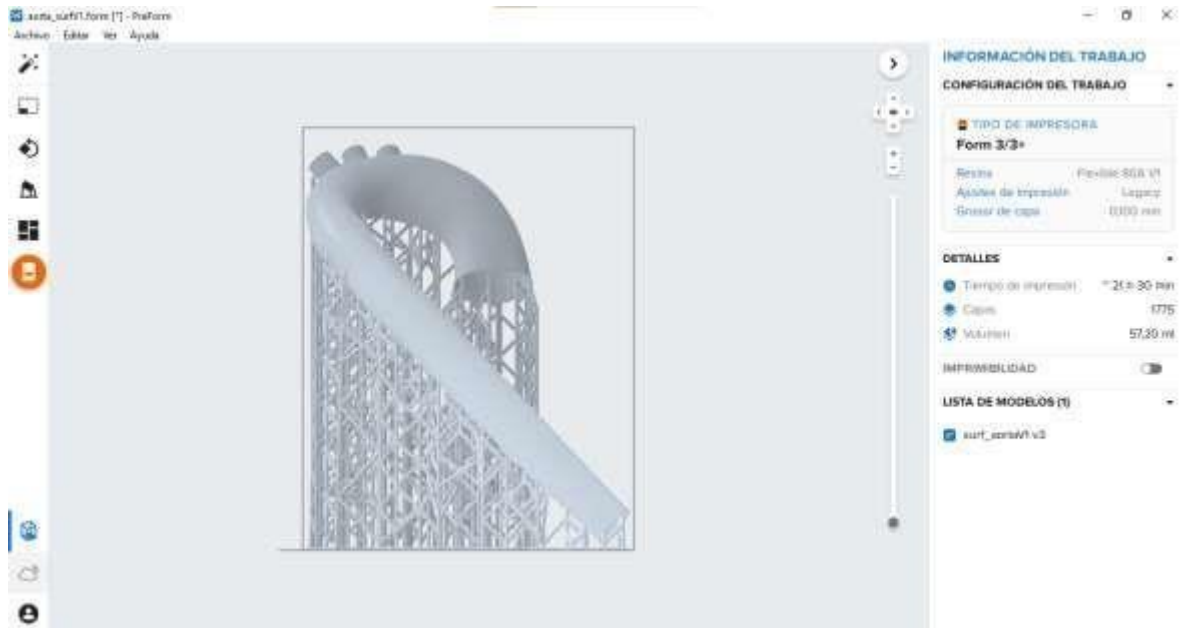


Figura 4-1: Diseño versión 1 preparado para imprimir, imagen obtenida directamente del software Preform.

Tal como se menciona en el título 5.3, existen algunos mensajes de advertencia que pueden aparecer y que se debe poner atención antes de cargar el archivo en la impresora.

### 4.1.3. Seguimiento del proceso

Este modelo de la Form3 admite un seguimiento online si se ingresa un usuario, considerar que el tiempo de impresión no incluye la preparación de la impresora misma, ésta debe conseguir una temperatura de 30° para que la resina se encuentre en su punto de fluidez óptimo para que la luz logre foto-polimerizar de mejor manera.

### 4.1.4. Desarrollo del proceso de impresión

Cuando la impresora comienza a imprimir, avanza capa por capa con el láser tal como se simula en el software. Es importante durante este periodo que la nivelación y la estabilidad de la impresora se mantenga perfectamente constante, una vibración o un movimiento

brusco puede ocasionar que el prototipo se desprenda de la base. Por otro lado, es importante también que no llegue la luz del sol directamente a la impresora y mucho menos a la cabina de impresión, ya que como es lógico, ésta se podría foto-polimerizar. No está de más mencionar que el lugar donde se instala la impresora debe estar libre de material particulado como polvo, por ejemplo. También hay que corroborar que la resina restante en el cartucho sea suficiente para concluir la impresión, sin embargo, la impresora misma realiza una estimación de cuál es el volumen que se requiere para finalizar y si esta es insuficiente, lanza una alerta.

#### **4.1.5. Finalización del proceso de impresión**

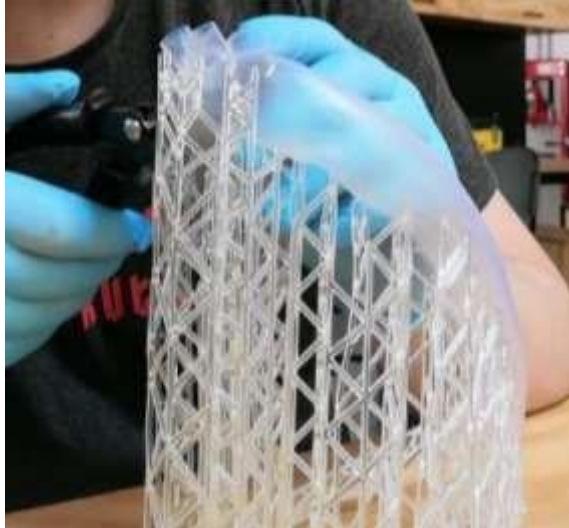
Una vez finalizada la impresión la base sube la resina líquida restante cae al depósito. En este punto es una buena práctica dejar unos minutos para que no queden residuos extra en el prototipo, sobre todo si la geometría del prototipo es rugosa o algo compleja.

#### **4.1.6. Retirar el prototipo de la base**

Finalmente, para el proceso de impresión solo queda retirar la base de su soporte cuidando que no se dañe el prototipo y no ingrese luz directa al estanque. Ideal que el laboratorio de impresión tenga una luz natural tenue o en algún lugar con sombra. Aquí se tiene dos opciones, al retirar la base se puede retirar también el prototipo de ella y proceder a lavarlo o se puede realizar el lavado sin retirar de la base, ya que la *Form Wash* posee el espacio para la base, tomar esta decisión depende del nivel de alcohol en la máquina y la complejidad de retirar el prototipo. En el caso de un prototipo delicado y complejo es mejor no retirar y lavar directamente.

En caso de decidir retirar antes del lavado se recomienda cortar los soportes en el lugar más cercano a la base, y luego del lavado retirar de los puntos de contacto con el prototipo, esto para evitar tener el prototipo en verde expuesto a la luz por mucho tiempo.

La herramienta que se utiliza para esta tarea es la pinza, la cual tiene una punta muy fina que consigue eliminar el soporte de forma segura para no dañar el prototipo.



*Figura 4-2: Extracción de soportes desde el prototipo impreso, esta acción se puede llevar a cabo antes o después del lavado.*

## **4.2. Lavado**

La Form Wash tiene una capacidad máxima de 10 litros de alcohol isopropílico, en un estanque donde se genera una turbulencia mediante una hélice que se mueve con fuerza magnética, para este caso por la complejidad del prototipo, se decide lavar directamente sin retirar de la base con la intención de retirar una vez finalizado el lavado cuidadosamente los soportes. El proceso de lavado puede llevar el tiempo suficiente para que todas las superficies queden sumergidas y afectadas por la turbulencia. El alcohol retira los excedentes de resina que no cae en el depósito, dejando el prototipo solo con las superficies que fueron foto polimerizadas por el láser. Es importante después de varios lavados de prototipos revisar la densidad del alcohol con el flotador, ya que, cuando ésta aumenta demasiado, los lavados terminan perdiendo efectividad.



*Figura 4-3: La máquina Formwash es una máquina muy fácil de usar y que utiliza alcohol isopropílico para retirar los excedentes de resina en el prototipo.*

### 4.3. Curado

Este proceso es algo más de cuidado, ya que funciona con radiación ultravioleta y temperatura, estas variables pueden arruinar un prototipo, si no se realizan correctamente. Cada resina tiene sugerencias de temperatura y tiempo de radiación en la Form Cure, por otro lado, hay que considerar el espesor de las capas, ya que cuando éstas son muy delgadas, la temperatura puede deformar su geometría inicial.



*Figura 4-4: La máquina Form Cure es la encargada de lograr las propiedades mecánicas finales de la resina mediante luz ultravioleta que llega a todos los lugares del prototipo.*

## **5. Propuesta de proceso estándar de prototipado**

### **5.1. Paso 1: Imagen médica inicial**

Este trabajo parte con una imagen médica en formato STL tomada desde un paciente anónimo, mediante la tecnología de una resonancia magnética.



*Figura 5-1: Imagen médica de una arteria aorta obtenida desde una resonancia magnética.*

El formato en que se recibe esta imagen es adecuado para trabajar en cualquier programa de diseño 3D, lo que deja al lector en libertad de usar el que le acomode, sin embargo, en este proceso se utilizará Fusion360.

### **5.2. Paso 2: Modificación de la imagen médica**

Este paso se extenderá ya que es el que llevo la mayor cantidad de tiempo. Inicialmente el uso de la herramienta Autodesk Inventor, parecía ser suficiente para realizar la tarea de modificar y adaptar la imagen médica para su impresión, sin embargo, su interfaz resultó ser más exigente y lento de lo que el hardware utilizado lograba alcanzar. Por el contrario, tal como se menciona en el punto anterior, otra de las herramientas de Autodesk fue la solución y respuesta a la tarea.

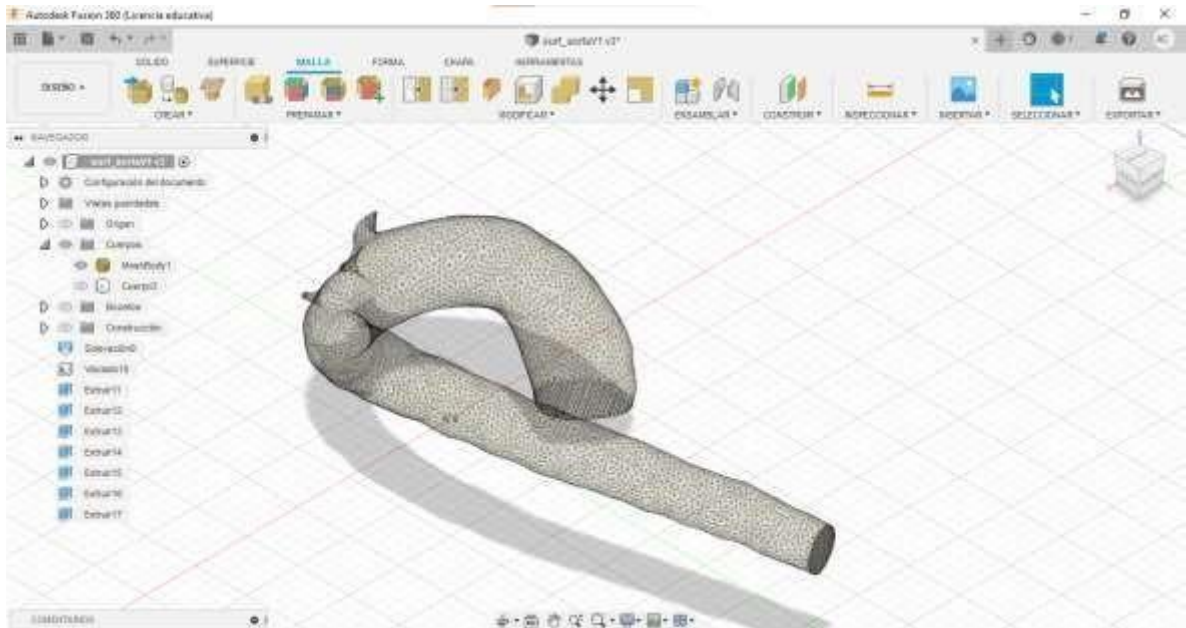


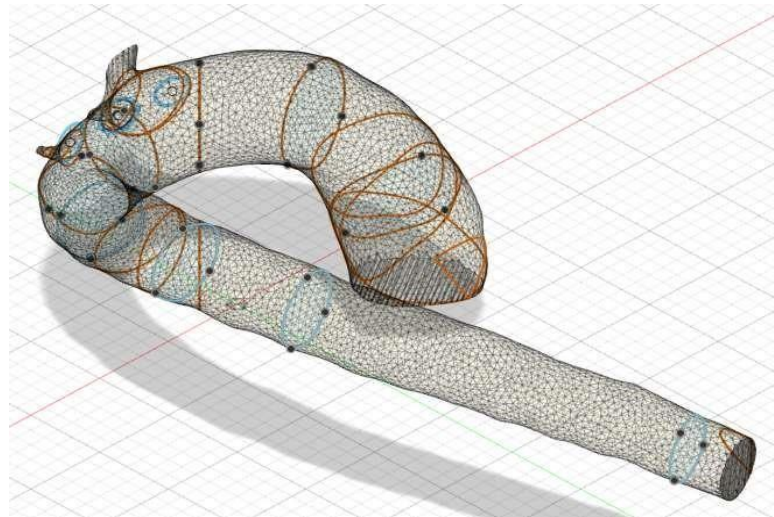
Figura 5-2: Imagen médica de la aorta cargada como una malla en programa Fusion360.

Como se ve en la Figura 7-2, la imagen médica se carga como una malla que no es posible modificar en primera instancia, pero gracias a la herramienta “crear boceto de sección de malla” es posible hacer un barrido de planos por la imagen.



Figura 5-3: Plano que interseca la malla y crea un boceto.

De esta manera se puede observar que los planos construyen una copia de la imagen médica adaptándose de una forma aproximada a la imagen inicial. En este punto es correcto afirmar que la aproximación a la malla es suficiente dado que la misma imagen médica es una aproximación o promedio de las dimensiones que tiene la arteria en sus constantes fluctuaciones con los cambios de presión que actúan sobre ella.



*Figura 5-4: Imagen médica con planos de intersección.*

Se busca generar un cuerpo a partir de estos planos, por ello estos se ubican siempre pensando en la forma perpendicular al flujo, demarcando de la mejor manera la sección transversal de la arteria.

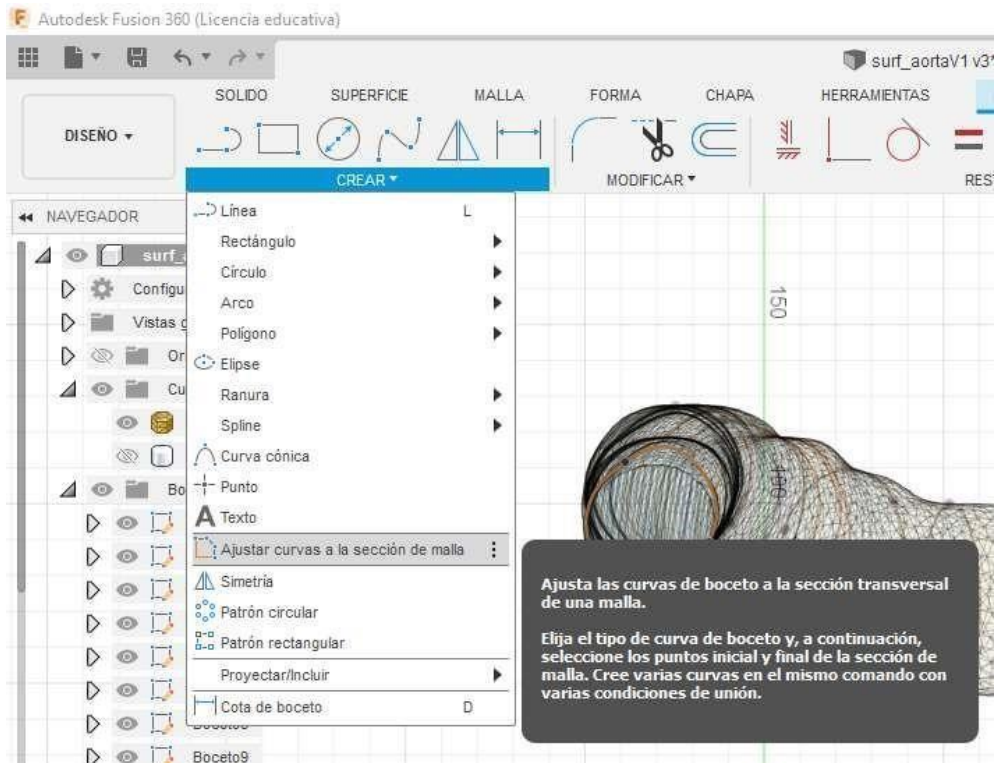


Figura 5-5: Para cada plano de intersección se crea un boceto.

Cada uno de estos bocetos se crea con la herramienta “Ajustar curvas a la sección de malla”, ésta resultó ser la herramienta más útil del proceso, significó un punto de inflexión en el avance de este trabajo.

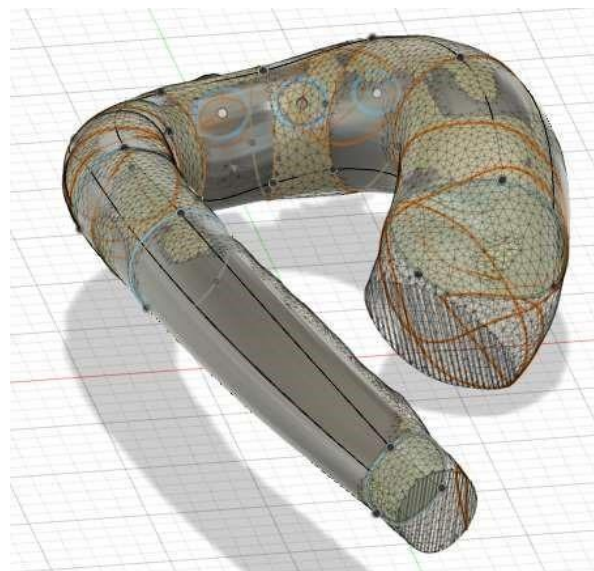
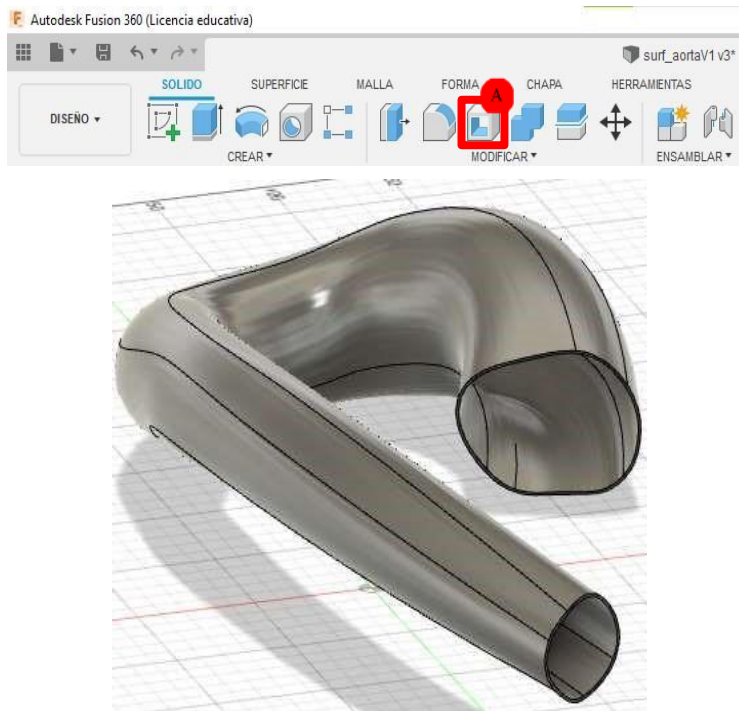


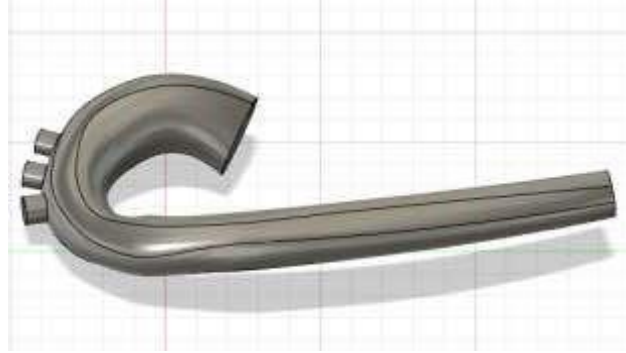
Figura 5-6: Cuerpo sólido modificable que surge de los planos de intersección.

Luego de creado el cuerpo sólido ya es posible hacer las modificaciones que se estimen o calculen convenientes. Antes de pasar al siguiente paso, algunas recomendaciones claves en la generación del cuerpo sólido. Cuando se utiliza la herramienta “Ajustar curvas a la sección de malla”, es recomendable poner la menor cantidad de puntos para generar la curva, esto porque agiliza la generación del cuerpo. Otro punto esencial es que los puntos de la herramienta “Ajustar curvas a la sección de malla”, no ubican de forma aleatoria, en este caso la ubicación parte desde la zona más alta de la malla en el eje z, luego dos puntos buscando dividir la curva en tres (se genera con un mínimo de 3 puntos).



*Figura 5-7: Vaciado del cuerpo sólido asignando el valor de espesor de pared aproximado calculado por Ley de Laplace.*

Llegado a este punto el diseño está alcanzando la parte final del diseño digital con Fusion360, el estudio se centra principalmente el arco aórtico, a pesar de ello se prueba la posibilidad de agregar las arterias subclavias y carótidas, sin embargo, para una segunda versión del diseño estas se sacan, ya que como se menciona no forman parte de este análisis.



*Figura 5-8: Imagen lista para mandar al software de preparación de impresión Preform.*

El cálculo del espesor de la pared está dado por la Ley de Laplace de cilindros y se calculó que es posible generar un prototipo de 3 mm de espesor con un factor de seguridad de 2,5 ante una presión de 180 milímetros de mercurio, que es una presión muy alta y peligrosa para un ser humano.

Este diseño es la versión 1 de este trabajo, pero se selecciona para mostrar el paso a paso ya que es el que requiere de mayores requerimientos de software, de hardware y de tiempo de trabajo, además es lo más exigente en lo que respecta a dimensiones dentro de la impresora.

Finalmente se exporta el modelo a impresión, lo que genera un archivo en formato STL, este archivo es el que se importa al programa de preparación Preform, importante revisar que no existan puntos en el diseño que puedan ocasionar un error en la impresión, como huecos o estructuras internas.

### **5.3. Paso 3: Preparación del diseño para impresión**

Utilizando la herramienta Preform, se importa el modelo dentro del volumen permitido, el programa automáticamente reducirá su tamaño en la posición en que se encuentra inicialmente, pero esto es configurable, así como también su ubicación dentro del volumen.

En resumen, se debe ajustar el tamaño y la ubicación del modelo en primera instancia.

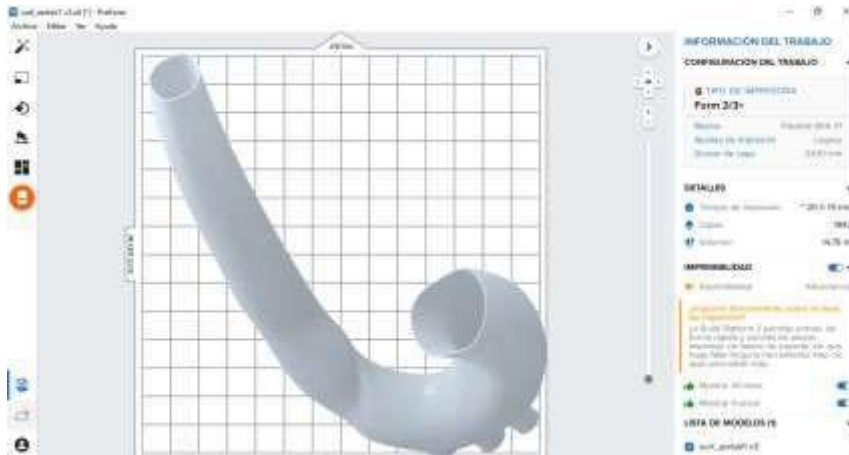


Figura 5-9: Imagen importada dentro del volumen de impresión.

Aquí se selecciona la mejor forma cuidando de no generar las advertencias mencionadas en la sección 5.3. Aquí la forma rápida y fácil de proceder es que automáticamente de la ubicación y orientación y además genere los soportes con la herramienta “Impresión de un clic” que se muestra en la Figura 7-10 Herramienta que genera automáticamente la cantidad necesaria de soportes.



Figura 5-10: Herramienta que genera automáticamente la cantidad necesaria de soportes.

Sin embargo, la experiencia dice que esta herramienta genera una cantidad excesiva de soportes, una buena forma de trabajo es utilizarla, pero a continuación modificar y eliminar los soportes que se encuentren sobrantes mientras no el software no arroje una advertencia de error.



Figura 5-11: Generador de soportes.

Otra forma rápida de generar soportes es en la sección “Generar automáticamente la selección”, también la desventaja de esta herramienta es la mencionada anteriormente, se genera una cantidad excesiva de soportes. Aquí también la solución es utilizar la herramienta y luego dar al botón “Editar...” quitando los soportes evitando que el programa nos genere una advertencia de error.

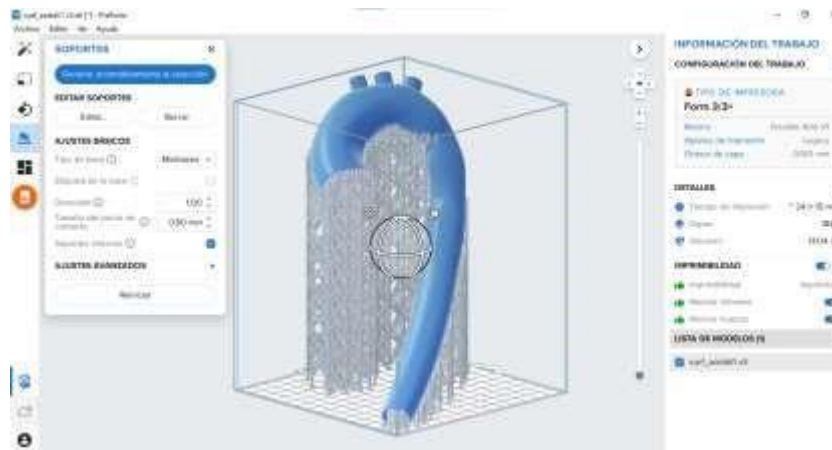


Figura 5-12: Soportes generados automáticamente.

En este punto ya es posible realizar la impresión sin problemas, las recomendaciones siguientes son solo para optimizar el uso de resina.

#### 5.4. Paso 4: Impresión

En la sección 6.1, el proceso de impresión se encuentra descrito, la estandarización aquí es más un procedimiento o lista de chequeo que permite asegurar que los puntos clave a la hora de imprimir se cumplan evitando errores burdos.



*Figura 5-13: (a) Tanque de resina, (b) base de impresión*

Revisar que tanto el tanque como la base estén bien insertos en la impresora, este punto también es advertido en caso de que no esté en cumplimiento, no obstante, siempre es necesario corroborar previo a cada impresión.



*Figura 5-14: vista posterior de la impresora y cartucho de resina.*

El cartucho de resina también debe ser un punto de control importante, primero su buena ubicación es por gravedad, así que este punto por lo general está bien abordado, cuando la impresora ha pasado un tiempo sin imprimir, se debe sacar y agitar el cartucho para

asegurar que la resina se mezcle correctamente, en segunda instancia la toma de aire en la tapa, cada vez que se realiza una impresión, esta debe estar abierta y se debe cerrar cuando la impresora esta apagada, si la toma de aire queda cerrada, la resina no va descender correctamente.

Como última inspección, cerciorarse que la resina restante en el cartucho es suficiente y corresponde a la resina que se programó en el modelo. De todas maneras, la impresora generará una alerta si estos puntos no se cumplen.

### **5.5. Paso 5: Post procesamiento**

En el laboratorio se cuenta con las máquinas para este proceso que son la *Form Wash* y la *Form Cure*, estas máquinas facilitan el post procesamiento y aseguran la calidad de la impresión en el sentido de las propiedades mecánicas que se mencionan en la sección 4.2 en la Tabla 2 y la Tabla 3. El uso de estas máquinas no requiere más explicación que la que ya se aborda en la sección 6.2 y 6.3 donde se trata el lavado y curado respectivamente de la impresión.



*Figura 5-15: Proceso de lavado en Form Wash.*



Figura 5-16: Proceso de curado del prototipo en Form Cure.

Para el caso de la estandarización de todo lo que implica esta impresión es posible mencionar algunos puntos relevantes, por ejemplo:

- Al ser un prototipo grande, este se puede introducir completamente en la *Form Wash*, es decir sin despegar de la base, para lograr esto, la *Form Wash* debe estar con el nivel de alcohol cercano al límite máximo, de modo de alcanzar a lavar todos los sitios o zonas del prototipo. Llevar a cabo el proceso de esta manera es una buena práctica ya que facilita posteriormente el trabajo de retirar los soportes.
- En la *Form Cure* ya es necesario desprender el prototipo de la base, aquí no hay forma de instalar con base. Hay que considerar que el prototipo dentro de esta máquina gira, por lo que debe quedar dentro de los límites de esta base tipo rejilla, de forma circular para evitar que se tope con las paredes.
- Curar la pieza con los soportes no es necesario debido a que estos posteriormente serán desechados y sus propiedades mecánicas no importan, en este caso se conservan los soportes solo con el objetivo de mantener la pieza en una posición adecuada para realizar el curado. Si por alguna razón los soportes se retiran anteriormente y la pieza no se puede ubicar correctamente dentro de la máquina, se puede utilizar los mismos soportes extraídos para dar la posición.



*Figura 5-17: Proceso de extracción de soportes.*

Este proceso no se ha mencionado en detalle y junto a las fotografías presentadas a la Figura 7-17, se puede hacer las siguientes recomendaciones;

- Este proceso es posible realizarlo con la pieza en verde (recién terminada la impresión y antes del lavado o curado) sin embargo eso depende de la complejidad del prototipo. Tal como se menciona en los párrafos anteriores en este caso se conservan los soportes hasta después de lavado y curado.
- Los soportes tienen 2 aspectos importantes, que son; tipo de base del soporte y punto de contacto al prototipo. En cuanto a la base del soporte este es el punto y la forma de cómo se conecta el soporte a la base de impresión y el punto de contacto. Para retirar el soporte del prototipo, el tamaño del punto de contacto toma un rol importante en la calidad de la superficie; a mayor tamaño del punto de contacto, más afectada se ve la pieza en calidad superficial, pero a su vez menor la posibilidad de un desprendimiento durante la impresión. Para quitar los soportes se utiliza la pinza que se presenta en anexos.
- Hay que considerar que retirar los soportes de forma manual o tirando desde la pieza misma puede dañar el prototipo o su calidad superficial.

## Conclusiones y recomendaciones

Las tecnologías disponibles para manufactura aditiva son tan variadas que se pueden adaptar a cualquier aplicación, la definición o elección de la tecnología en gran medida depende de los medios disponibles y la profundidad del análisis que se quiere lograr. Para el caso de estudio y simulación de tejidos biológicos el método SLA es más adecuado debido a su alta calidad de impresión y los materiales disponibles.

De la misma forma, la definición de los materiales para generar el prototipo depende de la aplicación, y las opciones disponibles son diversas y aun un campo en desarrollo constante. En este trabajo el estudio se centra solo en resinas con propiedades elásticas y flexibles para la generación de un prototipo de la aorta, esto debido a que estos materiales presentan un comportamiento similar a ese tejido, no obstante, para otras aplicaciones muy probablemente existe una resina o filamento que se adapte al propósito.

El diseño 3D de la aorta a partir de imágenes médicas requiere de herramientas digitales avanzadas, como Fusion360 e Inventor. A medida que el prototipo se asemeja a la realidad, o la imagen médica, mayor es la exigencia de rendimiento del computador utilizado.

El prototipo desarrollado se ajusta principalmente a los requerimientos del “cliente”, finalmente el campo de estudio que se quiere lograr queda subdimensionado frente a las posibilidades de impresión en la *Form3*. Se centralizó el estudio en arco aórtico el cual está dentro de los límites espaciales de impresión.

Crear un proceso estándar de prototipado para una imagen médica está orientado principalmente en mostrar un camino ya probado con éxito en la impresión, comprobando la factibilidad técnica, en los aspectos estudiados como la tecnología, materiales y dimensiones. De todas maneras, es importante mencionar que siempre es posible encontrarse con aspectos nuevos o de mayor complejidad, debido a que se trata de tejidos biológicos con una variedad infinita de posibilidades, inclusive con patologías o deformidades.

Como recomendaciones para futuras memorias orientadas en la impresión 3D de tejidos biológicos, sobre todo con la tecnología de estereolitografía, siempre es una buena ayuda buscar soporte en la documentación que ofrece el fabricante de la máquina o en su defecto

en ayuda técnica de los proveedores, esto debido a que ellos conocen las posibles fallas que podría presentar un prototipo o errores de proceso que se pueden cometer. A pesar de que la *Form3* es una impresora bastante automatizada, con la posibilidad de hacer seguimiento de la impresión a distancia, existen partes del proceso que de todas maneras requieren de la intervención de quien está utilizando esta máquina.

Queda abierta la posibilidad de utilizar este prototipo para pruebas de caudal y presión, simulando el paso del flujo sanguíneo, probando los puntos críticos y modificando las salidas de conexión. Incluso con imágenes médicas de patologías asociadas a la aorta, es posible probar donde existe mayor probabilidad del colapso o ruptura de esta arteria.

Finalmente, luego de todo este trabajado, queda demostrado que es factible la impresión del arco aórtico con la tecnología de estereolitografía y abierto el análisis para futuras pruebas con el prototipo.

## Referencias

- [1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Novena. 2008.
- [2] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering design*, Cuarta. 2009.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing,” in *Additive Manufacturing Technologies*, Second., New York, NY: Springer New York, 2015.
- [4] Z. Quan *et al.*, “Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: Opportunities and challenges” *Mater. Today*, vol. 18, 2015, doi: 10.1016/j.mattod.2015.05.001.
- [5] E. Grames, “All3DP,” 2021. <https://all3dp.com/es/1/sla-vs-fdm-resina-vsfilamentoimpresora-3d-diferencias/>.
- [6] J. Evans, *Lo esencial en Sistema cardiovascular*, Cuarta. 2013.
- [7] D. Balzani, S. Brinkhues, and G. Holzapfel, “Constitutive framework for the modeling of damage in collagenous soft tissues with application to arterial walls,” vol. 213, 2012.
- [8] J. Çengel, Yunus. Cimbala, *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones*, 4th ed. 2010.
- [9] “MedlinePlus información de salud para usted” 2022. <https://medlineplus.gov/spanish/encyclopedia.html>.
- [10] “High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals” *Formlabs*, 2022. <https://formlabs.com/>.
- [11] “Bioprinting: imprimiendo tejidos humanos” AQUAE FOUNDATION, 2016. <https://www.fundacionaquae.org/bioprinting-imprimiendo-tejidos-humanos/>

## Anexos

### A. La impresora Form 3

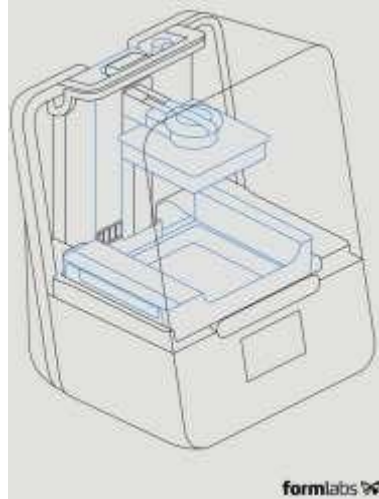


Figura 0-1: Impresora Form 3, identificando partes móviles.

Este capítulo no está orientado en resolver los objetivos de este trabajo, sin embargo, se incluyen en él debido a que es necesario profundizar en esta impresora, tanto para esta memoria como para las que vendrán en impresión con resina fotosensible.

La impresora *Form3* es una de las últimas tecnologías de la marca Formlabs y consta con mejoras frente a su predecesora la *Form2*. Se presentan procesos no abordados como lo son; la seguridad, la configuración, la instalación, el funcionamiento y el mantenimiento de la impresora *Form3*. Todos estos alcances están pensados para quienes tengan que interactuar de alguna manera con esta máquina, ya sea utilizando sus funciones de impresión, realizando algún mantenimiento o supervisando a usuarios inexpertos.

Siempre para profundizar sobre el uso de esta impresora es bueno recurrir a la página de Formlabs.

#### A.1. Consumibles y advertencias

Las instrucciones de esta impresora son muy importantes, ya que de esto depende que los trabajos realizados tengan las características finales de la resina foto-polimerizable curada

y sean o no los esperados. Además, a pesar de ser una máquina de uso doméstico sin mayores riesgos, también es necesario tener precauciones, sobre todo con errores que en casos muy extraños podrían llevar a accidentes graves o la muerte.

Es importante mencionar que aun sea un mismo lote de impresión, un mismo diseño, inclusive bajo las mismas condiciones aparentemente, una impresión puede variar con otra en manufactura aditiva y esta tecnología.

Y las advertencias más destacables sobre esta impresora son las siguientes:

- Asegurarse que el diseño del prototipo es adecuado para su aplicación y función prevista.
- En el caso de los artefactos médicos que existen hechos con manufactura aditiva y los materiales disponibles en Formlabs, la marca no se responsabiliza por problemas con diseños de estos.
- La impresora tiene sus funcionalidades descritas con los materiales y consumibles originales, cualquier modificación de la impresora puede ocasionar un error funcional definitivo en la máquina.

En los anexos se incluyen las especificaciones técnicas de la máquina.

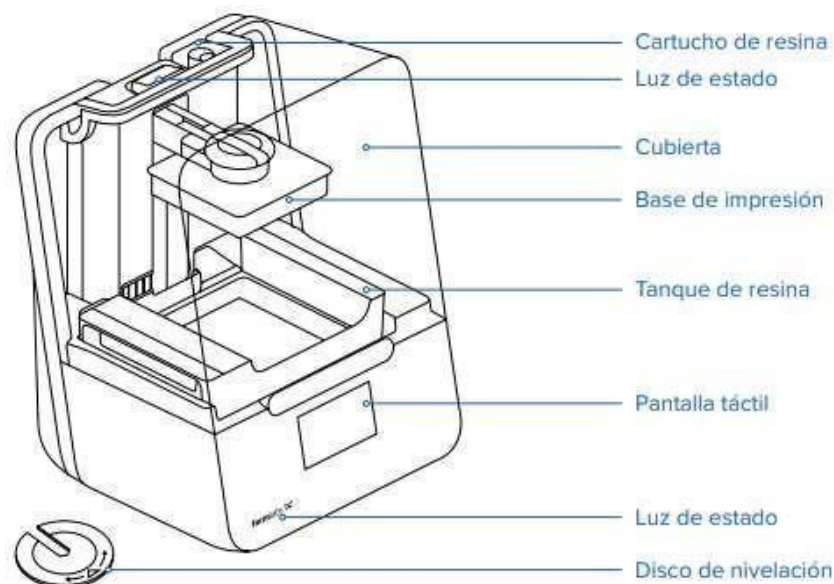


Figura 0-2: Partes y zonas principales de la impresora Form 3.

Las partes móviles o extraíbles de la impresora son; el cartucho de resina, la base de impresión y el tanque de resina. Estos 3 elementos son considerados consumibles, es decir tienen una vida útil inferior a la vida útil de la impresora y se van reponiendo en la medida

que se utilizan o desgastan. El tanque de resina contiene un litro de resina fotosensible que se consume tanto en las piezas como en los soportes que se fotocuran. La base de impresión, por su parte se deña en el uso de las herramientas y el cuidado con el que se realice el retiro de los prototipos impresos, cuando ésta se encuentra muy marcado y rayado, es necesario reemplazar para evitar la reflexión del láser. Finalmente, el tanque de resina se reemplaza al cambiar el tipo de resina utilizado y cuando se generan marcas en su superficie inferior, la que debe ser transparente para el paso del láser que fotopolimeriza la resina.

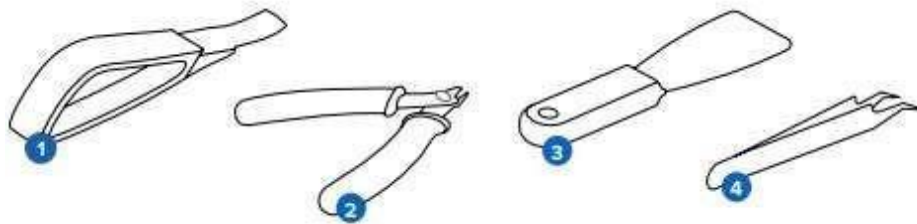


Figura 0-3

**Figura 0-3 Herramientas propias de impresora, (1) espátula afilada para retirar impresión, (2) pinza para cortar soportes, (3) espátula redonda, (4) pinza fina.**

La resina por su parte se debe tratar como cualquier químico de uso doméstico. Como regla general, las resinas estándar y de ingeniería no tienen certificación para uso e impresión de herramientas relacionadas con comida, no así las resinas biocompatibles, las que se encuentran certificadas para tipos y tiempos de uso vinculados a cuerpo humano. En anexos se adjunta un ejemplo de hoja de datos de resinas.

## **A.2. Instalación y puesta en marcha**

En primer lugar, el espacio de trabajo debe resguardar algunos aspectos relevantes para el correcto funcionamiento de esta impresora, tales como lo son las dimensiones mínimas necesarias para acceder:

- Ancho: 40 cm.
- Alto: 78 cm.
- Profundidad: 53 cm.

Además, la superficie se debe encontrar nivelada, libre de polvo (o fuentes de polvo) y no estar expuesta directamente por luces muy fuertes o la misma luz del sol.

Agregar también que se debe tener un espacio para la *Form Cure* y la *Form Wash*, en caso de tener estas máquinas.

Ya seleccionado el espacio, importante realizar un correcto desembalaje, o supervisar que se haga correctamente, para ello el paso a paso es el siguiente de modo de evitar daños en la máquina:

1. Abre la caja desde arriba. Si la caja tiene una compuerta lateral, dobla hacia abajo el lado de la caja.
2. Utiliza las asas suministradas para sacar la impresora y su plataforma de transporte de la caja.
3. Retira la impresora de la plataforma de transporte y coloca la impresora en tu espacio de trabajo.
4. Retira cualquier envoltorio y embalaje adicional de la parte exterior de la impresora.

Luego se retira el material de embalaje y se libera el bastidor de la Unidad de Procesamiento de Luz (Light Processing Unit, LPU) antes de realizar cualquier tipo de conexión a la fuente de electricidad. Para ello también es necesario seguir el siguiente paso a paso:

1. Abre la cubierta de la impresora.
2. Lee y retira la pegatina de instrucciones que hay alrededor del bastidor de la LPU.
3. Localiza el pasador en el lado izquierdo del bastidor de la LPU.
4. Gira con la mano los tornillos de mariposa en sentido contrario a las agujas del reloj. Afloja  
1. y retira los dos tornillos de mariposa y el pasador.
5. Guarda el pasador y los tornillos junto con el embalaje original de la impresora

Es necesario guardar el embalaje ya que este es la mejor forma de transportar la máquina y además hace que esta conserve su garantía.

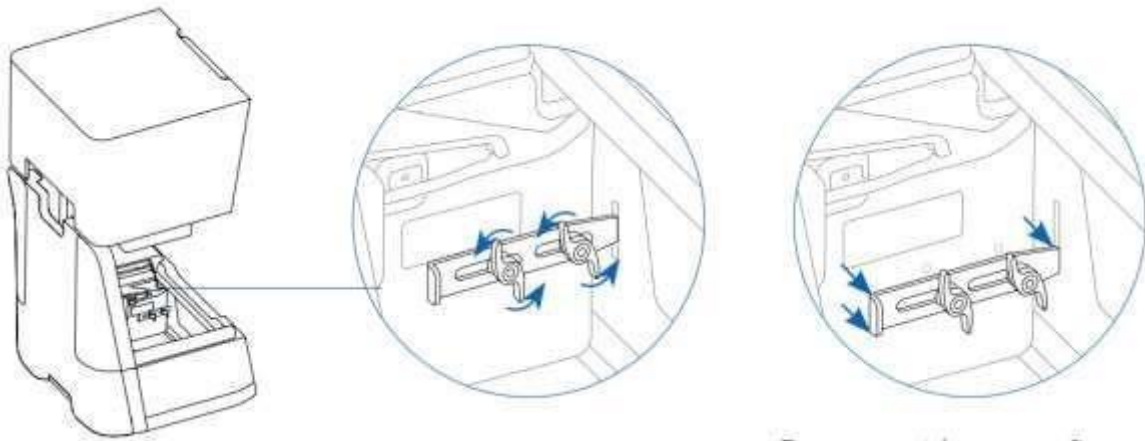


Figura 0-4: Tornillos mariposa que mantienen fijo el sistema LPU.

La conexión de los cables disponibles son el cable de alimentación, el cable USB y el cable de Ethernet, que en este punto ya es posible conectar.

Uno de los pasos claves en la puesta en marcha y posteriores inspecciones es la nivelación. Las impresoras de resina deben estar correctamente niveladas, este proceso ya es asistido por la interfaz de la impresora misma y para ello se utiliza el disco de nivelación que se observa en la Figura 0-2, el que sirve para girar los pies que la impresora va sugiriendo, es por esta razón que es necesario que la superficie sea lo mejor nivelada posible. Para realizar este procedimiento es necesario llevar a cabo el siguiente paso a paso:

1. Conecta la impresora a la alimentación. Si es necesario, la pantalla táctil te pedirá que utilices el disco de nivelación.
  - a. La secuencia de configuración inicial de la impresora incluye el proceso de nivelación.
2. Sigue las instrucciones que aparecerán en pantalla para ajustar los pies de debajo de la impresora.
3. Introduce el disco de nivelación redondo debajo de la esquina designada. Empuja hasta que el disco de nivelación se acople al pie.

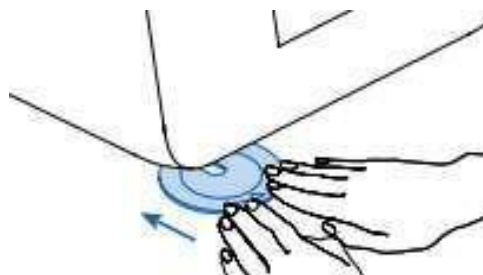


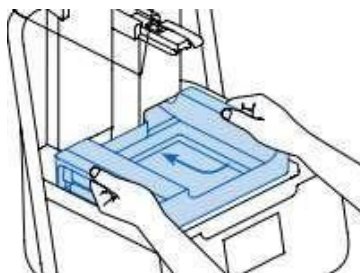
Figura 0-5: Introducción del disco de nivelación.

4. Gira la herramienta en el sentido de las agujas del reloj para subir la altura de la impresora y hacia el sentido contrario para bajarla.
  - a. La impresora se envía con todos los pies completamente retraídos. La altura de los pies solo se puede subir durante la configuración inicial de la impresora.



*Figura 0-6: Nivelación en cada uno de los pies de la impresora.*

5. Ajusta los pies hasta que la pantalla táctil indique que la impresora está nivelada. Luego de la nivelación de la impresora ya se puede instalar el tanque de resina, el mezclador y la base de impresión, en esta impresora (Form 3) a diferencia de su predecesora, el mezclador de resina se mueve por fuerzas magnéticas, en la impresora Form 2, este se afianza a un brazo externo al tanque de resina.

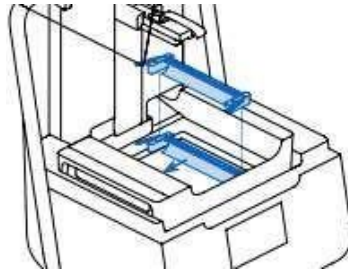


*Figura 0-7: Instalación del tanque de resina.*

1. Abre la cubierta de la impresora.
2. Retira la tapa del contenedor del tanque.
3. Retira los materiales de embalaje del tanque.
4. Levanta el tanque de resina con una mano en cada lado de él.
5. Alinea las paredes laterales del tanque de resina con los raíles izquierdo y derecho del soporte del tanque.

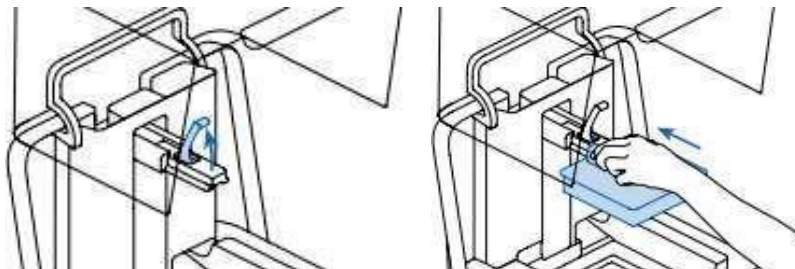
- Empuja las asas laterales hacia la parte posterior de la impresora y hacia abajo, hasta que las paredes laterales se acoplen a los raíles. El tanque de resina encaja en su sitio con un clic y se asienta con firmeza. Un sensor detecta el tanque de resina y se ilumina la luz de estado

En estos pasos es importante no contaminar la parte inferior del tanque de resina, debido a que es en ese lugar donde apunta el laser y éste debe penetrar de la mejor manera.



*Figura 0-8: Instalación del mezclador.*

Orienta el mezclador con los brazos flexibles apuntando hacia arriba y hacia el compartimento del mezclador. Desliza el mezclador hacia la izquierda, hasta su compartimento. Los brazos flexibles en cada extremo harán un clic al encajar en su sitio. Tal como en la Figura 0-8.



*Figura 0-9: Inserción de la base de impresión.*

Levanta el cierre de la base de impresión, tal como en la Figura 0-9 (Izquierda). Encaja la base de impresión en su soporte, empújala hasta ponerla en su lugar, como en la Figura 0-9 (derecha), un sensor detecta la base de impresión y se ilumina la luz de estado. Baja el cierre de la base de impresión para asegurarla.



*Figura 0-10: Inserción del cartucho de resina.*

Para la carga e instalación del cartucho de resina, se debe seguir los siguientes pasos;

1. Cierra la cubierta de la impresora.
2. Agita bien el cartucho antes de cada impresión para asegurarte de que la resina se mezcle de forma uniforme. Agita el cartucho de resina aproximadamente cada dos semanas durante su almacenamiento para mantener en buen estado las características de su composición y así obtener la mejor calidad de impresión.
3. Retira la cubierta protectora naranja de la válvula de la parte inferior del cartucho. Considera guardar la cubierta para proteger la válvula durante su almacenamiento.
4. Alinea el cartucho con la abertura en la parte posterior de la impresora.
5. Empuja hacia abajo el mango del cartucho hasta que la parte superior del cartucho quede al mismo nivel que la impresora. Un sensor detecta el cartucho de resina y se ilumina la luz de estado. Tal como en la Figura 0-10.
6. Pulsa para abrir la tapa de ventilación, para que el tanque de resina se llene de forma correcta.

En este punto la impresora está lista para enviar una imagen a imprimir.

## B. Especificaciones técnicas *Form3*

Tabla 4: Dimensiones *Form3*

	Impresora Form 3	Cartucho de resina	Tanque de resina de la Form 3	Base de impresión de la Form 3
Dimensiones del envío	57×51×69 cm (22,5×20×27 in)	24×20×8 cm (9,5×8×3 in)	35×30×8 cm (14×11,8×3,3 in)	18×17×8 cm (7×6,75×3 in)
Peso del envío	22,7 kg (50 lb)	1,5 kg (3,3 lb)	1,4 kg (3,1 lb)	0,67 kg (1,5 lb)
Peso del producto	17,5 kg (38,6 lb)	1,35-1,6 kg (3-3,5 lb)	0,8 kg (1,8 lb)	0,65 kg (1,4 lb)

Tabla 5: Aspectos técnicos *Form3*

Tecnología de impresión 3D	Low Force Stereolithography (LFS)
Dimensiones mínimas para acceder fácilmente a la máquina	Anchura: 40 cm (15,5 in) Profundidad: 53 cm (21 in) Altura: 78 cm (30,5 in)
Peso	17,2 kg (37,9 lb)
Temperatura de funcionamiento	Auto calefacción hasta 35 °C (95 °F)
Control de temperatura	Cámara de impresión con calefacción por aire
Requisitos de alimentación	100–240 V ~ 2,5 A 50/60 Hz 220 W
Especificaciones láser	1 Light Processing Unit (LPU) Certificación EN 60825-1:2014 Producto láser de clase 1 Láser violeta de 405 nm Láser de 250 mW
Diámetro del punto focal del láser (FWHM)	85 micras (0,0033 in)
Información sobre radiaciones	La <i>Form3</i> es un producto láser de clase 1. La radiación accesible se encuentra dentro de los límites de clase 1.
Conectividad	Wifi, Ethernet y USB

Conectividad Ethernet	Puerto LAN Ethernet RJ-45 (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T) Realiza la conexión con un cable Ethernet (no incluido): como mínimo de Cat5 o Cat5e o Cat6 para 1000BASE-T
Conectividad WiFi	Protocolo: IEEE 802.11 b/g/n Frecuencia: 2,4 GHz, 5 GHz Seguridad admitida: WPA/WPA2
Emisión sonora	No supera los 70 dBA
Control de la impresora	Pantalla táctil interactiva
Sistema de llenado de resina	Automático
Volumen de impresión	145 × 145 × 185 mm 5,7 × 5,7 × 7,3 in
Soportes	Autogenerados Extraíbles

## C. Hojas de datos de resinas.

### Flexible 80A Resin Material Properties Data

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green	Post-Cured <sup>2</sup>	Green	Post-Cured <sup>2</sup>	
<b>Mechanical Properties</b>					
Ultimate Tensile Strength <sup>3</sup>	3.7 MPa	8.9 MPa	539 psi	1290 psi	ASTM D 412-06 (A)
Stress at 50% Elongation	1.5 MPa	3.1 MPa	218 psi	433 psi	ASTM D 412-06 (A)
Stress at 100% Elongation	3.5 MPa	6.3 MPa	510 psi	909 psi	ASTM D 412-06 (A)
Elongation at Break	100%	120%	100%	120%	ASTM D 412-06 (A)
Shore Hardness	70A	80 A	70A	80 A	ASTM 2240
Compression Set (23 °C for 22 hours)	Not Tested	3%	Not Tested	3%	ASTM D 624-00
Compression Set (70 °C for 22 hours)	Not Tested	5%	Not Tested	5%	ASTM D 395-03 (B)
Tear Strength <sup>4</sup>	11 kN/m	24 kN/m	61 lb/in	137 lb/in	ASTM D 395-03 (B)
Ross Flex Fatigue at 23 °C	Not Tested	>200,000 cycles	Not Tested	>200,000 cycles	ASTM D1052, (notched), 60° bending, 100 cycles/minute
Ross Flex Fatigue at -10 °C	Not Tested	>50,000 cycles	Not Tested	>50,000 cycles	ASTM D1052, (notched), 60° bending, 100 cycles/minute
Bayshore Resilience	Not Tested	28%	Not Tested	28%	ASTM D2632
<b>Thermal Properties</b>					
Glass transition temperature (Tg)	Not Tested	27 °C	Not Tested	27 °C	DMA

<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 3, 100 µm, Flexible 80A settings, washed in Form Wash for 10 minutes and postcured with Form Cure at 60 °C for 10 minutes.

<sup>3</sup> Tensile testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C specimen cut from sheets.

<sup>4</sup> Tear testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C tear specimen directly printed.

### Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1x 1x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 Hour Weight Gain (%)	Solvent	24 Hour Weight Gain (%)
Acetic Acid, 5 %	0.9	Hydrogen Peroxide (3 %)	0.7
Acetone	37.4	Isooctane (aka gasoline)	1.6
Isopropyl Alcohol	11.7	Mineral Oil, light	0.1
Bleach, 5 % NaOCl	0.6	Mineral Oil, heavy	<0.1
Butyl Acetate	51.4	Salt Water (3.5 % NaCl)	0.5
Diesel	2.3	Sodium hydroxide (0.025 %, pH = 10)	0.6
Diethyl glycol monomethyl ether	19.3	Water	0.7
Hydraulic Oil	1.0	Xylene	6.4
Skydrol 5	10.7	Strong Acid (HCl Conc)	28.6
Tripropylene Glycol Methyl Ether	13.6		

Figura 0-11: Hoja de Datos de resinas.

## D. Mantenimiento *Form3*

Antes de cada impresión inspeccionar:

- Entorno de instalación: La temperatura de funcionamiento de las impresoras de Formlabs es de 18–28 °C (64–82 °F). Para obtener un resultado óptimo de impresión, no salgas de esa franja.
- Válvula de mordida del cartucho de resina: La válvula de mordida se encuentra en la parte inferior del cartucho de resina. Esta válvula flexible regula la dispensación de resina. La resina fluye hacia fuera por la abertura central cuando el brazo dispensador del cartucho aprieta la válvula de mordida para abrirla. Revisa la válvula de mordida cada vez que cambies de cartucho de resina para asegurarte de que no hay daños o restos de resina curada
- Interior del tanque de resina: Retirar resina curada o restos de otras impresiones, ver que el mezclador está bien instalado y cumple con su función.

Mensualmente:

- Chip y lector de identificación del cartucho y contactos de detección del tanque: La Form 3 utiliza los chips de identificación en los tanques y cartuchos de resina para detectar, hacer seguimiento y emparejar cada tipo de resina en el tanque con el cartucho de resina adecuado. El chip de identificación se encuentra en la parte inferior del marco de los tanques y en el fondo de los cartuchos, cerca de la válvula de mordida. Protege el chip de identificación, el soporte del tanque y los contactos de detección del cartucho y el tanque de contaminación por resina o daños. La resina curada o la contaminación impiden que la impresora identifique correctamente un cartucho o un tanque de resina durante su inserción o su uso. Evita exponer el chip de identificación del cartucho y el chip de identificación, el soporte y los contactos de detección del tanque a resina líquida
- Exterior del tanque de resina: Si el tanque de resina está sucio, especialmente en la zona inferior, éste podría provocar errores de impresión.

Cada 3 meses

- Cubierta: Realiza una inspección visual de la cubierta en busca de restos de resina, grietas u otro tipo de daños. Limpia la cubierta con un paño de microfibras no abrasivo y agua jabonosa o un limpiador de uso general, como limpiacristales.
- Pantalla: Realiza una inspección visual de la pantalla en busca de restos de resina. Limpia la pantalla con un paño de microfibras no abrasivo y un limpiador de uso general, como un producto limpiacristales.

- Bandeja de goteo: Retira la base de impresión, el tanque de resina y el cartucho de resina para acceder a la bandeja de goteo, que es la zona que está bajo la canaleta del tanque de resina o bajo el mecanismo dispensador del cartucho de resina. Realiza una inspección visual de la bandeja de goteo. Limpia cualquier resto o contaminación de resina con alcohol isopropílico y papeles absorbentes.
- Carcasas: Realiza una inspección visual de las carcasas de la parte posterior, frontal, lateral y superior en busca de restos de resina u otro tipo de daños. Limpia cualquier resto o contaminación de resina con agua jabonosa y papeles absorbentes.
- Tornillos guía de los ejes X y Z: Usa guantes limpios para manejar el tornillo guía y el lubricante.
  - Inspección del eje X:
    - 1. Gira manualmente el tornillo guía del eje X.
    - 2. A medida que el bastidor de la LPU se mueve hacia la izquierda y la derecha, usa la vista, el oído y el tacto para buscar zonas que hagan ruido o en las que el soporte se atasque o se mueva de forma menos constante.
    - 3. Realiza una inspección visual del eje X para asegurarte de que no haya restos u objetos extraños que obstruyan el tornillo guía o la ruta de movimiento.
    - 4. Realiza una inspección visual del eje X para asegurarte de que toda la rosca está cubierta de lubricante. □ Inspección del eje Z:
    - 1. Gira manualmente el tornillo guía del eje Z.
    - 2. A medida que el soporte de la base de impresión se mueve hacia arriba y hacia abajo, usa la vista, el oído y el tacto para buscar zonas que hagan ruido o en las que el soporte se atasque o se mueva de forma menos constante.
    - 3. Realiza una inspección visual del eje Z para asegurarte de que no haya restos u objetos extraños que obstruyan el tornillo guía o la ruta de movimiento.
    - 4. Realiza una inspección visual del eje Z para asegurarte de que toda la rosca está cubierta de lubricante.
  - Si al tornillo le falta lubricante o si el eje X o el Z emiten ruidos intermitentes durante la impresión, lubrica el tornillo guía.