

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Mecánica

Santiago – Chile



**“Elaboración de tooling para diferentes procesos
utilizando impresión 3D”**

Alvaro Matías Pérez Vega

Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesora guía: Dr. Ing. Sheila Lascano Farak

Profesor correferente: Dr. Ing. Joaquín Mura Mardones

Marzo 2022

Dedicatoria

Agradezco a mi madre Silvia Vega Morales, quien se preocupó de que no me faltase ni un solo día comida, para tener la energía y concentración necesarias en mis estudios. A mi padre Eduardo Pérez Sedano, quien me enseñó a valorar las cosas que entrega la vida y el trabajo arduo. A mi hermano Vicente Pérez Vega, que compartió parte de su positividad cuando más lo necesitaba. Y el apoyo incondicional que me entregaron a lo largo de toda mi vida, motivándome constantemente para poder lograr mis metas, otorgándome diversos puntos de vista ante las situaciones y problemas acontecidos en el último periodo. Quiero agradecer también a todos mis amigos y compañeros con los cuales compartí más de 6 años, realizando diversos trabajos y actividades, acompañándome en momentos de estrés y alegría. Por último, quiero agradecer a la rama de taekwondo, quienes me integraron con gran compañerismo, formando nuevos lazos que terminaron en amistad.

Agradecimientos

Se agradece al grupo GRIM3A perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica, por el apoyo durante el proceso de desarrollo de este trabajo, al igual que la asistencia técnica en el uso de los diversos equipos y herramientas presentes en las instalaciones del Makerspace y Taller Metalmecánico de la universidad. Como también a la ayuda entregada por el DIMEC de la Universidad de Santiago de Chile, en la realización de ensayos de microtensión en los fantomas fabricados en la etapa previa al rediseño de esta investigación.

Además, el autor de este trabajo de memoria y el correferente Joaquín Mura agradecen al proyecto interno de línea de iniciación-reactivación "Aplicaciones de manufactura aditiva a la evaluación no-invasiva de alteraciones en arterias y estudio de optimización de soportes para la generación de morfologías cardiovasculares complejas" PI_LII_2021_86, por la impresión 3D de algunos modelos arteriales en resina flexible y la definición de morfologías de prueba.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el diseño y fabricación de tooling para diferentes procesos utilizando impresión 3D por FDM, tomando como referencia la elaboración de un fantoma aórtico con una coartación en su interior, con el fin de estudiar mediante MRI el flujo sanguíneo que estas patologías modifican.

Para realizar este fantoma, es necesario entender cuales son los métodos y materiales disponibles que permitan acercarnos a las propiedades mecánicas y dimensionales requeridas.

A partir de estas características, se diseña un molde con diferentes piezas, dentro de las cuales se pueden destacar la carcasa del molde la cual genera la geometría externa del fantoma, y los núcleos separables que generan la geometría de la coartación.

Posteriormente se imprimen estos componentes, los cuales se someten a un pulido mecánico con papel de lija de SiC (o herramientas multipropósito) y a un pulido químico con vapor de acetona en caliente. De esta forma se mejora la calidad superficial de las impresiones 3D para asegurar el correcto ensamble de las piezas.

Tras esto, se realiza la colada de caucho de silicona, esperando el tiempo de curado para la solidificación de la mezcla, resultando un fantoma con la geometría deseada, pero con una serie de irregularidades que no permiten de que el fantoma sea funcional.

Por estos motivos, se realiza un rediseño de los componentes del molde considerando los problemas y defectos del proceso. Por lo que se imprimirán nuevas piezas, además de probar el método de degasificación en cámara de vacío y también el uso de una mesa vibratoria para reducir la cantidad de burbujas. Obteniendo mejoras significativas en comparación a las pruebas iniciales, logrando el objetivo principal de este trabajo, ya que es posible elaborar tooling empleando el moldeo por colada de caucho de silicona en un molde impreso en 3D.

Abstract

This work aims at the design and manufacture of tooling for different processes using 3D printing by FDM, taking as a reference the elaboration of an aortic phantom with a coarctation, in order to study by MRI the blood flow that these pathologies modify.

To perform this phantom, it is necessary to understand what methods and materials are available that allow us to approach the mechanical and dimensional properties required.

From these characteristics, a mold is designed with different pieces, within which the mold housing generates the external geometry of the phantom, and the separable cores that generate the geometry of the coarctation.

These components are then printed, physically polished by SiC sanding paper (or multipurpose tool), and chemically with hot acetone vapor. In this way, the surface quality of the 3D prints is improved to ensure the correct assembly of the pieces.

After this, the silicone rubber casting is carried out, waiting for the curing time for the solidification of the mixture, resulting in a phantom with the desired geometry, but with a series of irregularities that do not allow the phantom to be functional.

For these reasons, a redesign of the mold components is followed through considering the problems and defects of the process. So new parts will be printed, in addition to testing the method of degassing in a vacuum chamber and the use of a vibrating table to reduce the number of bubbles. Obtaining significant improvements compared to the initial tests, achieving the main objective of this work, since it is possible to elaborate tooling using silicone rubber casting in a 3D printed mold.

Glosario

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrinolitirino Buatdieno Estireno)
CAD	Computer-aided Design (Diseño asistido por computadora)
ECV	Enfermedad Cardiovascular
ECVs	Enfermedades Cardiovasculares
EPP	Equipo de Protección Personal
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelado por Deposición de Fundida)
FFF	Fabricación por Filamento Fundido
MRI	Magnetic Resonance Imaging (Imagen por Resonancia Magnética)
PC	Polycarbonate (Policarbonato)
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol (Tereftalato de Polietileno Glicol)
PIV	Particle Image Velocimetry (Velocimetría de Imagen de Partícula)
PLA	Polylactid Acid (Ácido Poliláctico)
SGA	Sistema Globalmente Armonizado
TPC	Thermoplastic Copolyester (Copolyéster Termoplástico)
TPE	Thermoplastic Elastomer (Elastómero Termoplástico)
TPU	Thermoplastic Polyurethane (Poliuretano Termoplástico)

Definiciones

Aterosclerosis	Enfermedad generada por la deposición de placa dentro de las arterias, restringiendo el flujo sanguíneo correcto.
Brim	En impresión 3D por FDM, es la ampliación del área de impresión de la primera capa, aumentando la superficie de contacto con la cama.
Cama de impresión	Superficie sobre la cual se realiza el proceso de impresión 3D.
Catalizador	Sustancia que acelera o retarda una reacción química sin participar en ella.
Coartación aórtica	Defecto cardíaco congénito que consiste en el estrechamiento de la aorta.
Fantoma	Objeto que simula partes del cuerpo, elaborado con materiales de características similares a la del organismo.
Polímero	Un polímero es un material o sustancia que consta de grandes moléculas, compuestas de subunidades repetitivas.
Raft	En impresión 3D por FDM, es la impresión de una capa inicial adicional sobre la cama para tener una mayor adherencia a esta.
STL	Formato de archivo que adapta un modelo 3D realizando una teselación triangular.
Tooling	Proceso de adquisición de componentes de maquinaria y manufactura requeridos en una producción.

Índice

Introducción.....	xviii
Objetivo General.....	xix
Objetivos Específicos	xix
1 Marco Teórico	1
1.1 Descripción del Problema	1
1.2 Aterosclerosis.....	1
1.3 Desarrollo actual de fantomas.....	3
1.4 Manufactura Aditiva (AM)	5
1.5 Métodos de impresión 3D.....	6
1.5.1 Polimerización fotoquímica.....	6
1.5.2 Fusión en cama polvo	7
1.5.3 Material Jetting (inyección de material).....	9
1.5.4 Binder Jetting (inyección de aglutinante).....	10
1.5.5 Extrusión de materiales (FFF o FDM)	11
1.6 Filamentos de impresión FDM	11
1.7 Elementos por considerar en la impresión FDM	14
1.8 Post-procesamiento	20
1.9 Moldeo de polímeros	28
1.9.1 Moldeo por compresión.....	28
1.9.2 Moldeo por inyección.....	29
1.9.3 Moldeo por transferencia.....	30
1.9.4 Rotomoldeo	31
1.9.5 Moldeo por colada	32

1.10	Moldeo de elastómeros	33
1.11	Desgasificación	34
1.11.1	Cámara de vacío	34
1.11.2	Vibración	35
1.11.3	Escala de dureza de elastómeros	36
2	Esquema generalizado del proceso de fabricación de tooling.....	37
3	Diseño, materiales y fabricación del molde y del fantoma	38
3.1	Software de diseño empleado	38
3.2	Parámetros de diseño de fantasmas	38
3.3	Diseño 3D de componentes del molde.....	41
3.3.1	Diseño de núcleos	41
3.3.2	Diseño de molde	43
3.3.3	Diseño de soportes.....	46
3.3.4	Diseño de cúpula	48
3.3.5	Ensamble de componentes diseñados.....	48
3.4	Selección de materiales para fabricación de componentes	49
3.4.1	Filamento de impresión 3D	49
3.4.2	Caucho para elaboración fantasmas	51
3.5	Impresión 3D y post-procesamiento	52
3.5.1	Impresora y software	52
3.5.2	Impresión 3D de componentes	55
3.6	Post-procesamiento de impresión 3D	58
3.6.1	Pulido mecánico	58
3.6.2	Pulido químico.....	60

3.7	Fabricación del fantoma.....	62
3.7.1	Esquemas de procedimiento colada y degasificación	62
3.7.2	Preparación y moldeo de fantomas.....	67
4	Resultados de fantoma	69
5	Proceso de rediseño de molde	71
5.1	Análisis de problemas en diseño inicial.....	71
5.1.1	Impresión 3D	71
5.1.2	Dificultades en proceso de moldeo.....	72
5.1.3	Defectos presentes en fantoma	74
5.2	Pruebas de fabricación de molde rediseñado	75
5.2.1	Prueba 1 (Sin degasificar)	76
5.2.2	Prueba 2 (cámara de vacío)	76
5.2.3	Prueba 3 (vibración)	78
5.3	Análisis de pruebas de rediseño	78
5.4	Esquema de procedimientos empleados en fabricación.....	80
6	Ensayos de microtensión en fantomas	81
7	Costos de fabricación	83
8	Conclusiones	84
9	Recomendaciones y trabajos futuros.....	85
10	Referencias Bibliográficas.....	86
11	Anexo	90
12	Apéndice	124

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1: (A) arteria sana; (B) arteria obstruida por placa [2].</i>	2
<i>Figura 1.2: A) Moldes de aluminio para inyección; B) Vista del interior del fantoma; C) Vista lateral [4].</i>	3
<i>Figura 1.3: (a) Núcleo de molde macho; (b) Molde hembra; (c) Fantoma resultante [5].</i>	4
<i>Figura 1.4:(a) arteria impresa en PLA; (b)arteria posicionada en bloque; (c) relleno de caja con gel; (d)solidificación de gel; (e) Disolución de impresión PLA;(f) fantoma fabricado [6].</i>	5
<i>Figura 1.5: Representación de sistema de impresión SLA [8].</i>	6
<i>Figura 1.6: Representación de sistema de impresión SLS [8].</i>	8
<i>Figura 1.7: Representación de sistema de impresión por inyección de material [8].</i>	9
<i>Figura 1.8: Representación de sistema de impresión por inyección de aglutinante [8].</i>	10
<i>Figura 1.9: Representación de proceso de impresión 3D mediante FDM.[9]</i>	11
<i>Figura 1.10: Efecto de contracción (encerrado de rojo) del material en pieza de FDM. [13]</i>	15
<i>Figura 1.11: (a) Efecto escalera a diferentes escalas; (b) Suavizado de superficie mediante pulido por vapor de acetona [14].</i>	16
<i>Figura 1.12: Esquema de aplicación de soportes de impresión según comparación del ángulo crítico ϕ_{ac}. [15]</i>	17
<i>Figura 1.13: Disolución en agua de soportes de impresión del material PVA. [18]</i>	18
<i>Figura 1.14: Patrones de impresión realizados en Ultimaker Cura 4.11.0 con relleno de 10%. Los patrones son: A) Líneas; B) Cuadrícula; C) Triángulo; D) Tri-hexágono; E) Cúbico; F) Octeto; G) Giroide; Concéntrico.</i>	20
<i>Figura 1.15: Comparación de pieza antes (izquierda) de ser lijada y el resultado posterior (derecha) de este proceso. [21]</i>	21
<i>Figura 1.16: Montaje de proceso de pulido por vapor de acetona en frío, con paredes rodeadas de papel absorbente, empapado con acetona. [23]</i>	23
<i>Figura 1.17: Montaje de pulido por vapor de acetona en caliente. Fuente: [24]</i>	24
<i>Figura 1.18: Esquema del proceso de generación de vapor mediante la vibración ultrasónica del transductor piezoeléctrico. [18]</i>	24

<i>Figura 1.19: Montaje del método de pulido por atomización ultrasónica. [26].</i>	25
<i>Figura 1.20: Comparación post y pre pulido mediante vapor de acetona. [21].</i>	25
<i>Figura 1.21: Señal de seguridad según NCh1411/4 para la acetona de 99,5% de concentración, siendo: Azul (salud) = 1; Rojo(inflamabilidad) = 3; Amarillo (reactividad) = 0.</i>	27
<i>Figura 1.22: Esquema de moldeo por compresión. [29].</i>	29
<i>Figura 1.23: Esquema de moldeo por inyección. [29].</i>	30
<i>Figura 1.24: Esquema de moldeo por transferencia. [29].</i>	31
<i>Figura 1.25: Esquema de rotomoldeo. [29].</i>	32
<i>Figura 1.26: Proceso de elaboración de una pieza de silicona pasando por las etapas de: Mezcla, desgasificación, colada, segunda desgasificación, curado y pieza final [30].</i>	33
<i>Figura 1.27: Esquema de desgasificación de un molde de silicona, siendo:(a) el posicionamiento de los elementos; (b) el inicio del vacío; (c) etapa final del vacío; (d) eliminación de burbujas de aire. [30]</i>	34
<i>Figura 1.28: Combinaciones de parámetros (amplitud y frecuencia) que permiten la desgasificación (rombos rosados) para la solución de CMC en análisis CFD.[34]</i>	35
<i>Figura 1.29: Tabla comparativa de dureza Shore. [36]</i>	36
<i>Figura 2.1: Esquema del proceso de fabricación de tooling.</i>	37
<i>Figura 3.1: Esquema representativo de diferentes etapas de una coartación generada por aterosclerosis.[37]</i>	39
<i>Figura 3.2: Bocetos de fantasmas con dimensiones en milímetros.</i>	39
<i>Figura 3.3: Banco de prueba de fantasmas, indicando las conexiones para el montaje.</i>	40
<i>Figura 3.4: (a) Núcleo hembra y macho; (b) ensamble de núcleos.</i>	42
<i>Figura 3.5: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica del núcleo DH-10. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.....</i>	43
<i>Figura 3.6: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.</i>	44
<i>Figura 3.7: Vista isométrica del molde. Encerrado de color rojo la ranura de agarre; de azul las guías; de verde las perforaciones.</i>	45

<i>Figura 3.8: Ampliación de vista isométrica del ensamblaje de las carcasas del molde, indicando las ranuras generadas.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.9: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica pedestal. Al lado derecho, una vista superior de este mismo junto a sus cotas principales.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.10: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica de una de las contenciones del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.11: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica de la cúpula del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.12:A) vista isométrica del ensamblaje; B) vista frontal en corte del ensamblaje. Al costado derecho se encuentra la leyenda de colores de cada componente.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.13: Fantoma fabricado en el CIB de la Pontifica Universidad Católica de Chile.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.14: Impresora Prusa I3 Mk3 en proceso de impresión de ambas mitades del molde.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.15: Previsualización del software PrusaSlicer 2.1.1.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.16: Relleno de una impresión fallida de uno de los núcleos.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.17: Núcleos hembra impresos mediante FDM.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.18: Núcleos macho impresos mediante FDM.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.19: Ambas partes del molde impresas mediante FDM.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.20: De izquierda a derecha, base del molde, contención y cúpula. Todos impresos mediante FDM.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.21: A la izquierda se señalan las rebabas generadas en el proceso de impresión, y a la derecha el efecto de escalera.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.22: Herramientas utilizadas en el proceso de lijado.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.23: Vista inferior de núcleos hembra y macho luego del proceso de lijado.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.24: Núcleos ensamblados. En orden descendente, D-22, D-16, D-12, D-10.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.25: Al lado izquierdo se presenta el montaje de boques al interior del contenedor para el pulido por vapor de acetona. Al lado derecho se encuentra el montaje completo.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.26: Molde pulido por vapor de acetona en caliente.</i>	<i>62</i>

<i>Figura 3.27: Representación del vertido de elastómero viscoso(rosado), al interior del molde diseñado.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.28: Representación de colada por molde abierto</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.29: (a) Proceso de cierre de molde, posterior a la colada por molde abierto; (b) Molde completamente cerrado.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.30: Representación del escape del aire (color celeste) al momento de desgasificar una mezcla con burbujas de aire.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.31:(A) Montaje de ensamble y bolsa previo a desgasificar. (B) Montaje post desgasificación.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.1: Primer intento de realización de fantoma.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.2: Fantoma D-10 luego del proceso de desmolde.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.3: Imagen enfocada a las burbujas de aire presentes en el fantoma D-10.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.1: Vista inferior del molde posterior al proceso de curad, con filtraciones de silicona.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.2: Núcleo D10-H y D10-M posterior a la fractura del vástago.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.3: Comparación de cantidad de burbujas entre parte superior (A) y parte inferior (B) del fantoma.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.4: Resultado de prueba 1, con burbujas concentradas en la parte superior del fantoma.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.5: Comparación anterior (izquierda) y posterior (derecha) del proceso de desgasificación en cámara de vacío.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.6: Resultado de prueba 2. Mostrando los surcos generados en la superficie del fantoma.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.7: Resultado de prueba 3, con pequeñas burbujas en la parte superior del fantoma.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.8: Esquema de fabricación del fantoma D10.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.1: Preparación de ensayo de tracción de la probeta L2 (longitudinal 2).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.2: Gráfico de Esfuerzo en función de la deformación de las probetas L2 y L5, indicando sus pendientes en la región elástica.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 10.1: Plano de núcleo D22-M.</i>	<i>90</i>

<i>Figura 10.2: Plano de Núcleo D22-H.</i>	91
<i>Figura 10.3: Plano de núcleo D16-M.</i>	92
<i>Figura 10.4: Plano de núcleo D16-H.</i>	93
<i>Figura 10.5: Plano de núcleo D14-M.</i>	94
<i>Figura 10.6: Plano de núcleo D14-H.</i>	95
<i>Figura 10.7: Plano de núcleo D12-M.</i>	96
<i>Figura 10.8: Plano de núcleo D12-H.</i>	97
<i>Figura 10.9: Plano de núcleo D10-M.</i>	98
<i>Figura 10.10: Plano de núcleo D10-H.</i>	99
<i>Figura 10.11: Plano de molde.</i>	100
<i>Figura 10.12: Plano de cúpula.</i>	101
<i>Figura 10.13: Plano de base.</i>	102
<i>Figura 10.14: Plano de contención.</i>	103
<i>Figura 10.15: Plano de ensamble del molde.</i>	104
<i>Figura 10.16: Página 1/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	105
<i>Figura 10.17: Página 2/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	106
<i>Figura 10.18: Página 3/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	107
<i>Figura 10.19: Página 4/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	108
<i>Figura 10.20: Página 5/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	109
<i>Figura 10.21: Página 6/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	109
<i>Figura 10.22: Página 7/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.</i>	110
<i>Figura 10.23: Plano de molde A del proceso de rediseño.</i>	113
<i>Figura 10.24: Plano del molde B del proceso de rediseño.</i>	114

<i>Figura 10.25: Plano del núcleo D10-H del proceso de rediseño</i>	<i>115</i>
<i>Figura 10.26: Plano del núcleo D10-M del proceso de rediseño.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 10.27: Plano de explosionado del ensamble de los elementos rediseñados.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 10.28: Vista en corte del ensamble de los componente rediseñados, indicando las salidas para gases.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 10.29: Vista en corte del ensamble de los núcleos rediseñados, indicando las medidas modificadas.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 10.30: Vista en corte de ambas mitades del molde, mostrando el proceso de unión y sellado por las ranuras y dientes.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 10.31: Parámetros de impresión de piezas rediseñadas, utilizando el software Ultimaker Cura 4.11.0.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 10.32: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación de las 10 probetas. Cinco circulares (C) y cinco longitudinales (L)</i>	<i>122</i>
<i>Figura 10.33: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación para las 5 probetas longitudinales.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 10.34: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación para las 5 probetas circulares.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 11.1: Encerrado de color rojo se encuentran las propiedades del filamento ABS Flashforge del catálogo entregado por el proveedor.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 11.2: Página 1/2 de ficha técnica de la acetona marca Química Universal de concentración de 99.5%.</i>	<i>125</i>
<i>Figura 11.3: Página 2/2 de ficha técnica de la acetona marca Química Universal de concentración de 99.5%.</i>	<i>126</i>
<i>Figura 11.4: Página 1/2 del catálogo de propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 entregado por el proveedor.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 11.5: Página 2/2 del catálogo de propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 entregado por el proveedor.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 11.6; Caucho de silicona RTV XL 8830 1[Kg] junto con su catalizador.</i>	<i>129</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1: Resumen de propiedades principales de filamentos comunes, elaborada con información de [10].</i>	14
<i>Tabla 1.2: Tabla de clasificación de peligros de la acetona según SGA, extraída de Figura 12.2 (Apéndice B).</i>	26
<i>Tabla 3.1: Abreviaciones para identificación de fantasmas.</i>	40
<i>Tabla 3.2: Abreviaciones para identificación de núcleos del molde.</i>	42
<i>Tabla 3.3: Conceptos a evaluar en proceso de selección de pesos ponderados.</i>	50
<i>Tabla 3.4: Valores asignados a conceptos de matriz de pesos ponderados, destacando la ponderación más alta, atribuida al filamento de ABS.</i>	50
<i>Tabla 3.5: Características principales del filamento ABS FLASHFORGE.</i>	51
<i>Tabla 3.6: Propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 extraídas de Tabla 12.1(ver Apéndice C).</i>	52
<i>Tabla 3.7: Características de la impresora Prusa i3 Mk3.</i>	53
<i>Tabla 3.8: Parámetros principales de impresión.</i>	54
<i>Tabla 3.9: Propiedades de los implementos utilizados para el proceso de lijado.</i>	58
<i>Tabla 3.10: Volúmenes del modelo CAD de cada fantoma.</i>	67
<i>Tabla 3.11: Transformación de volumen a peso, con porcentaje de catalizador respectivo en función de los valores de Tabla 3.10.</i>	67
<i>Tabla 5.1: Cantidad de silicona y catalizador utilizada en cada prueba.</i>	76
<i>Tabla 7.1: Costos fijos y variables del proceso de fabricación del fantoma (previo rediseño)</i>	83
<i>Tabla 11.1: Características del termómetro Cooper-Atkins.</i>	111
<i>Tabla 11.2: Datos e información de las pruebas de pulido por vapor de acetona. Midiendo la cantidad de acetona, temperatura inicial (T_i) y final del agua (T_f), duración del proceso (t) y su descripción.</i>	111
<i>Tabla 11.3: Características de implementos utilizados en el proceso de pulido por vapor de acetona.</i>	112

<i>Tabla 11.4: Características de implementos e instrumentos utilizados en preparación de mezcla.</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 11.5: Características de la impresora Ultimaker 2+</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 11.6: Propiedades y características del filamento PLA.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 11.7: Características del agitador Gilson SS3.</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 11.8: Dimensiones de las probetas empleadas en el ensayo de microtensión. Denominando con la letra “L” las probetas longitudinales, y “C” a las circulares.</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 12.1: Propiedades de caucho de silicona, extraída de Figura 12.4. De color amarillo se destaca el caucho de silicona RTV XL 8830.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 12.2: Asignación de puntaje para método de selección de matriz de pesos ponderados.[38].....</i>	<i>130</i>

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en todo el mundo. Cada año mueren más personas por este tipo de enfermedad que por cualquier otra causa. Se calcula que en el año 2019 murieron por esta causa alrededor de 17,9 millones de personas [1], lo cual representa un 32% de todas las muertes registradas en el mundo, y de estas, el 85% se debieron a la cardiopatía coronaria. Para disminuir los riesgos asociados a este tipo de enfermedad, es fundamental la detección precoz [1].

Dentro de las estrategias de detección se han identificado aquellas que emplean fantasmas para simular la anatomía y comportamiento del flujo sanguíneo en presencia de alguna enfermedad cardiovascular. Es por esto que, el centro de imágenes biomédicas de la PUC en conjunto con el laboratorio de manufactura avanzada USM buscan estudiar el comportamiento del flujo sanguíneo en arterias con coartación mediante el desarrollo de fantasmas, y así encontrar métodos para la detección temprana de enfermedades cardiovasculares. Hasta ahora el CIB ha trabajado en el estudio de enfermedades cardiovasculares mediante Resonancia Magnética (RMI) en un fantoma aórtico de silicona flexible, traído del extranjero, utilizando sistemas de bombeo de flujo controlados por computador para poder obtener condiciones similares a la del cuerpo humano. Aunque hasta ahora el fantoma ha sido útil, solamente permite realizar estudios de una sola configuración

Por esto, el presente estudio busca desarrollar un protocolo de fabricación de fantasmas aórticos utilizando procesos de manufactura aditiva que cumplan con los requisitos para estudio en RMI.

Objetivo General

- Elaborar tooling para diferentes procesos usando impresión 3D mediante FDM, tomando como referencia el diseño y fabricación de un fantoma aórtico con una coartación en su interior.

Objetivos Específicos

- Establecer el procedimiento a utilizar para la realización de un fantoma aórtico con coartación en su interior.
- Realizar diseño 3D de los distintos elementos a utilizar para la fabricación de un fantoma aórtico con coartación en su interior.
- Fabricar los componentes necesarios para llevar a cabo la elaboración de un fantoma aórtico con coartación en su interior.
- Elaborar fantomas aórtico con coartación en su interior a partir de los componentes fabricados y materiales seleccionados
- Generar un esquema para elaboración de tooling mediante impresión 3D tomando como referencia los procedimientos a utilizar en la fabricación del fantoma aórtico con coartación en su interior.

1 Marco Teórico

1.1 Descripción del Problema

Este trabajo se origina a partir de una investigación en colaboración con *Centro de Imágenes Biomédicas de la Pontificia Universidad Católica (CIB UC)*. Dicha investigación consta en el estudio del comportamiento del flujo de un fluido (agar), al interior de diferentes fantomas con características similares a las de la arteria aorta con algún tipo de coartación. Por lo cual es necesario un estrechamiento por las paredes internas de los fantomas, sin modificar la geometría cilíndrica del exterior de este, siendo el diseño y desarrollo de estos elementos el objetivo de este trabajo.

Las irregularidades que se generarán al interior del fantoma tienen el fin de simular los defectos de la arteria que producen una disminución del flujo sanguíneo, y así estudiar su comportamiento mediante resonancia magnética (RMI). Además, se intenta tener un bajo costo de fabricación. Es así como se selecciona como método de fabricación la técnica de moldeo con resina, cuyo molde será obtenido mediante el método de manufactura aditiva de deposición fundida de filamento (FDM) o más conocido como impresión 3D.

1.2 Aterosclerosis

La aterosclerosis es una afección frecuente, que aparece por la acumulación progresiva de placa en las paredes de las arterias (Figura 1.1). Esta placa se conforma por la adhesión de colesterol, grasa y otras células del torrente sanguíneo. Lo cual genera un estrechamiento de la arteria, restringiendo el correcto flujo de sangre, disminuyendo el transporte de oxígeno necesario por los órganos y tejidos de nuestro organismo [2]

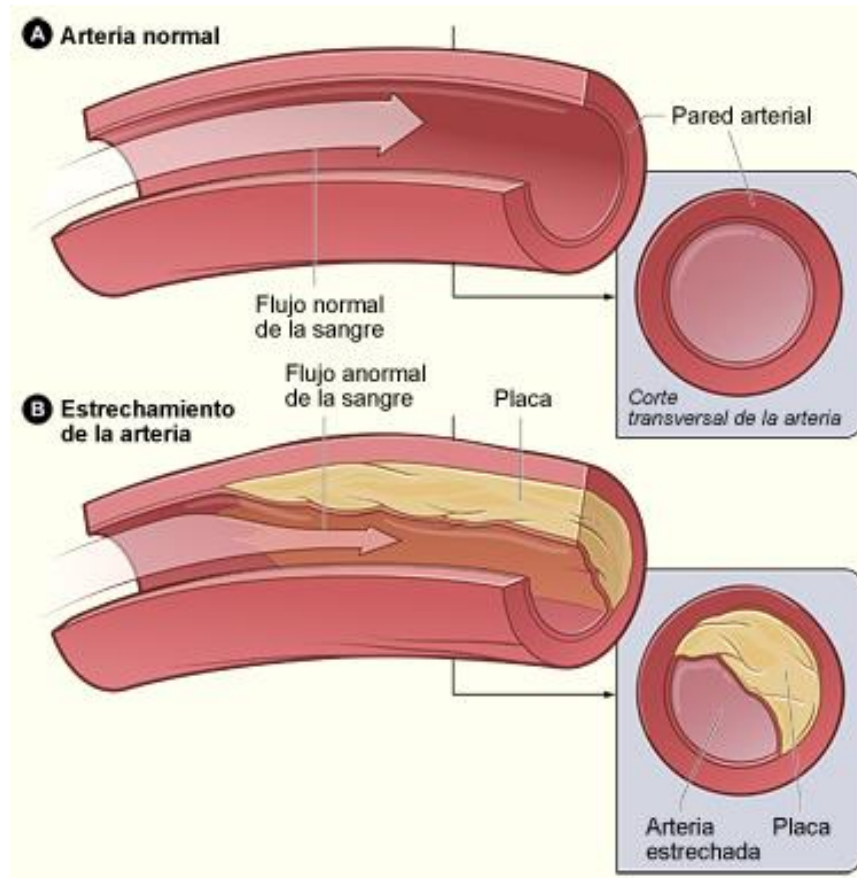


Figura 1.1: (A) arteria sana; (B) arteria obstruida por placa [2].

Dependiendo de la zona afectada por esta enfermedad, las complicaciones asociadas van desde dolores simples en extremidades, hasta accidentes cardíacos o cerebrovasculares [3]. De esta manera, la detección temprana es fundamental en la prevención de esta afección. Por lo cual el estudio de estas enfermedades mediante el uso de fantomas se encuentra en auge, debido al gran número (17.9 millones en el año 2019 [1]) de fallecidos por ECV (enfermedad cardiovascular).

1.3 Desarrollo actual de fantomas

En la actualidad existen investigaciones en las cuales se han desarrollado fantomas de distintas arterias mediante diversos métodos de fabricación. A continuación, se presentan algunos de estos trabajos, mostrando parte de su procedimiento.

Fabricación mediante inyección en molde de aluminio

Una de estas investigaciones, consta en la fabricación de un fantoma de las arterias coronarias mediante la inyección de silicona translúcida en un molde metálico [4]. Esta pieza presenta un incremento progresivo del espesor de pared en dirección del centro de este elemento. Con el cual se estudia la dinámica de fluidos mediante la velocimetría de imagen de partículas (PIV). En la Figura 1.2 se observa el molde empleado y el fantoma resultante.

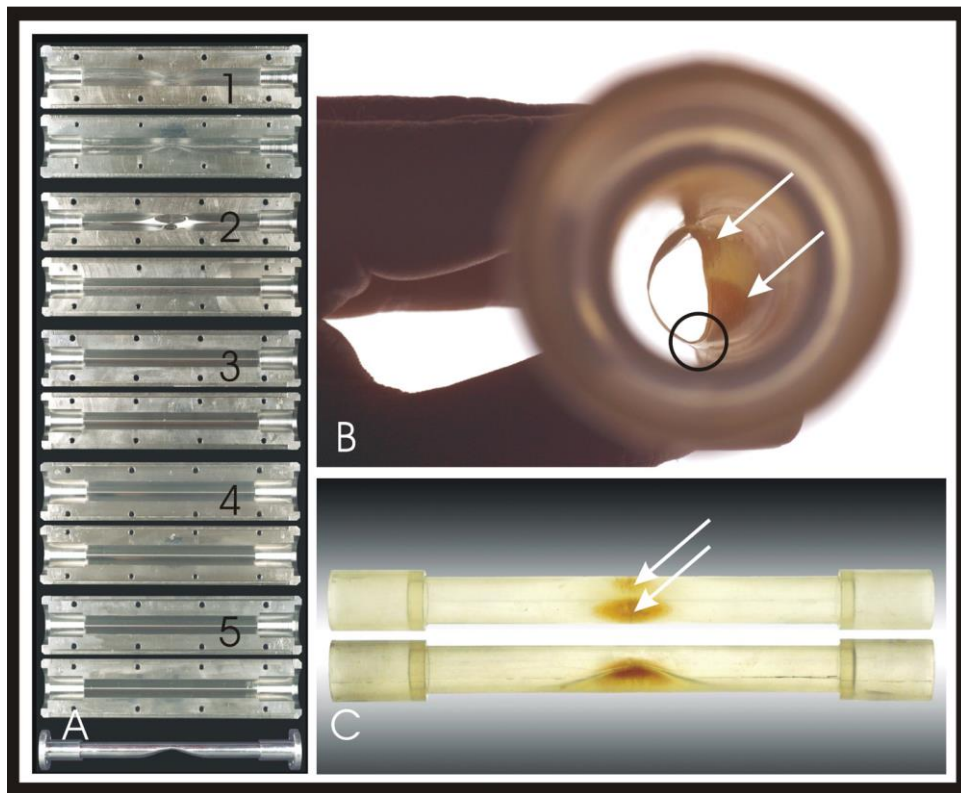


Figura 1.2: A) Moldes de aluminio para inyección; B) Vista del interior del fantoma; C) Vista lateral [4].

Fabricación mediante inyección en molde impreso en 3D

Otro de estos trabajos, consta en la elaboración de un fantoma del tronco braquiocefálico (rama del arco aórtico), inyectando un elastómero al interior de un molde fabricado en impresión 3D. Este molde consta de un núcleo macho (Figura 1.3(a)), que genera el contorno interior del fantoma y se inserta al interior del molde hembra (Figura 1.3(b)), generando la superficie exterior del fantoma (Figura 1.3 (c)) [5].

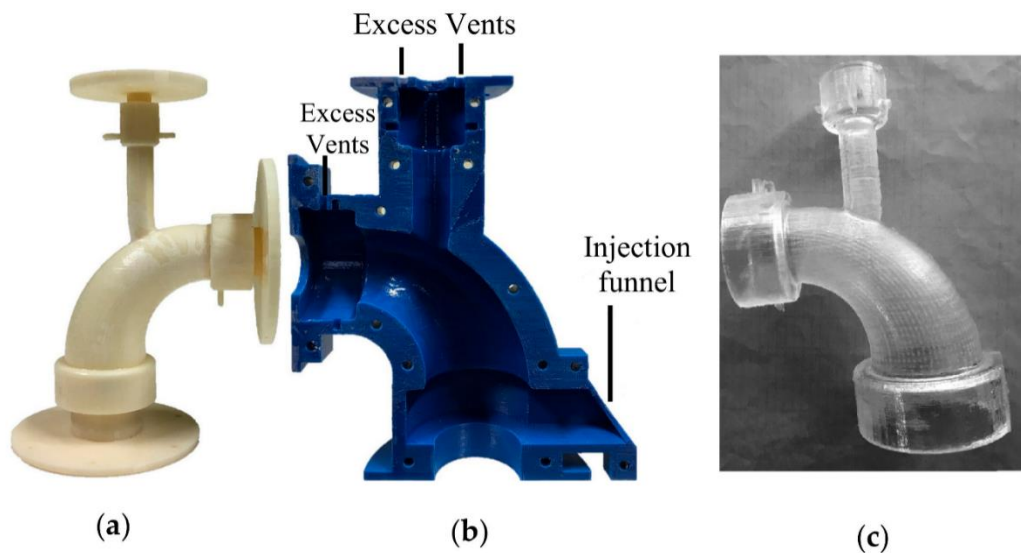


Figura 1.3: (a) Núcleo de molde macho; (b) Molde hembra; (c) Fantoma resultante [5].

Fabricación mediante disolución de impresión 3D

También existen trabajos que muestran un método completamente diferente, fabricando un fantoma de una arteria bifurcada sin pared [6]. El cual se elabora a partir de la disolución de una impresión 3D de alcohol polivinílico (PVA), dentro de un bloque de gel de características similares a la del tejido humano. Generando en el interior del bloque, una cavidad con las dimensiones de la arteria bifurcada. Este proceso de fabricación puede ser observado en la Figura 1.4.

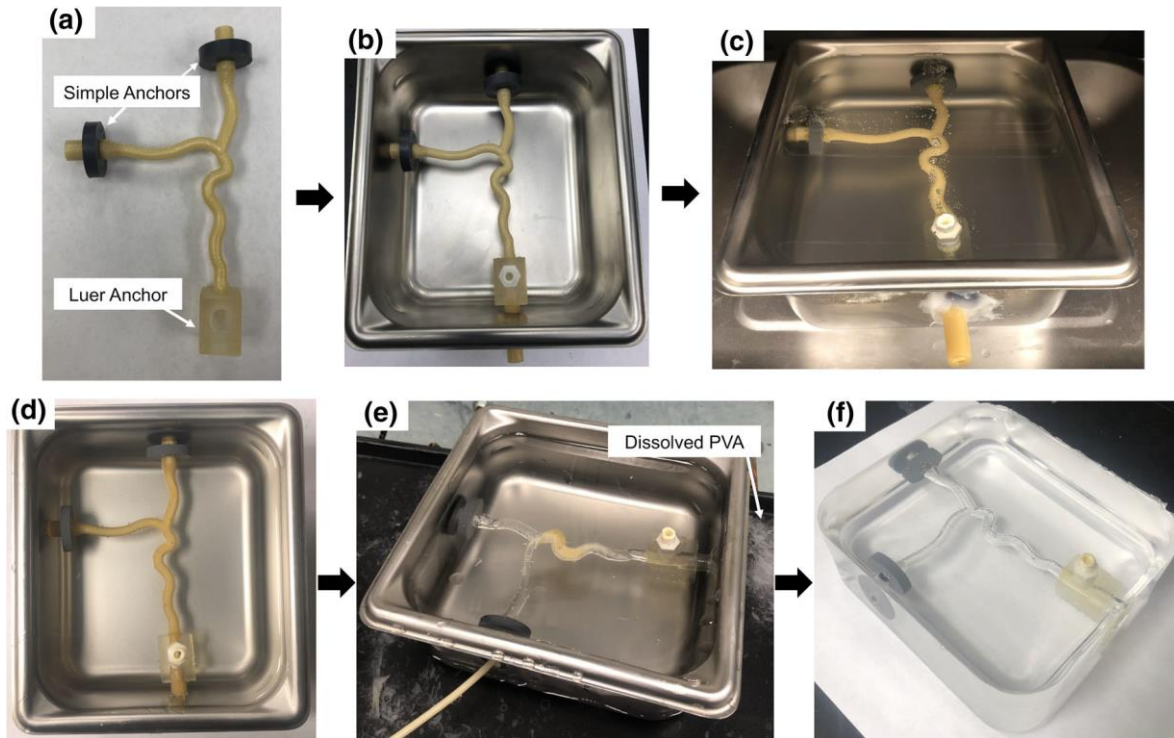


Figura 1.4:(a) arteria impresa en PLA; (b)arteria posicionada en bloque; (c) relleno de caja con gel; (d)solidificación de gel; (e) Disolución de impresión PLA;(f) fantoma fabricado [6].

1.4 Manufactura Aditiva (AM)

La manufactura aditiva (también denominada impresión 3D) es el proceso de construir aditivamente una pieza, capa por capa. Existen diversas tecnologías de impresión 3D, y cada una de éstas cuenta con beneficios y limitaciones, siendo capaces de imprimir piezas con diferentes materiales y geometría.

Los materiales de impresión 3D se pueden separar en 3 grandes grupos: polímeros termoplásticos, polímeros termoestables y polvos metálicos. Los termoplásticos se pueden fundir y solicitar una y otra vez, conservando generalmente sus propiedades. para esto es necesario calentar el termoplástico sólido llevándolo a un estado maleable, extruyéndolo en una superficie de impresión donde luego se solidifica. A diferencia de los termoplásticos, los termoestables no se derriten, y generalmente parten como un fluido viscoso que al curar se vuelven sólidos. El curado puede ocurrir a través del calor, la exposición a la luz o mediante la mezcla con un catalizador. Una vez sólidos, estos no se pueden fundir [7].

1.5 Métodos de impresión 3D

El año 2015 se creó la norma ISO/ASTM 52900 [3] para estandarizar toda la terminología, así como clasificar cada uno de los métodos de impresión, explicando cada uno de estos a continuación.

1.5.1 Polimerización fotoquímica

Las tecnologías de polimerización fotoquímica utilizan una resina polimérica en una cuba que se cura con una fuente de luz. Las formas más comunes de este tipo de impresión son SLA (estereolitografía) y DLP (procesamiento de luz directo).

Los principales beneficios de la polimerización fotoquímica son el acabado de la superficie lisa y la alta precisión y detalle que la tecnología es capaz de producir. Pero la limitación de esta impresión depende de propiedades mecánicas del polímero que utiliza el proceso. Los fotopolímeros (polímeros que curan con la luz) son frágiles y no tienen la resistencia al impacto o la durabilidad [8].

Estereolitografía (SLA)

El proceso utiliza espejos, conocidos como galvanómetros, para apuntar un rayo láser a través de la cuba que contiene la resina, curando y solidificando el material a medida que avanza capa por capa [7].

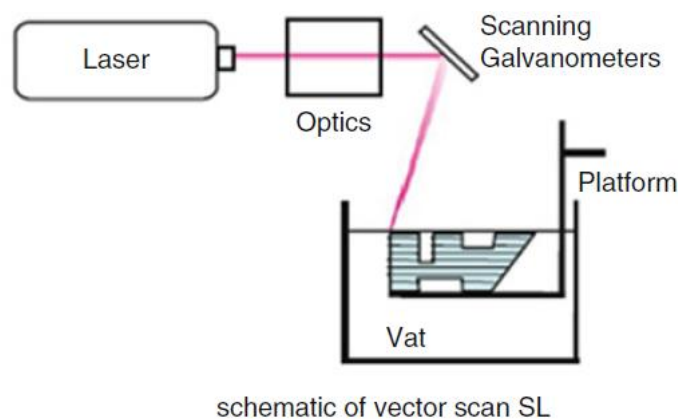


Figura 1.5: Representación de sistema de impresión SLA [8].

Procesamiento directo de luz (DLP)

El método de DLP sigue un proceso casi idéntico al SLA. La principal diferencia es que DLP utiliza una pantalla de proyector de luz digital para iluminar una sola imagen de cada capa a la vez. Debido a que el proyector es una pantalla digital, la imagen de cada capa se compone de píxeles cuadrados, lo que resulta en una capa formada por pequeños ladrillos rectangulares [7].

DLP puede lograr tiempos de impresión más rápidos en comparación con SLA, ya que una capa completa se expone a la vez, en lugar de rastrear el área de sección transversal con un punto láser [7].

1.5.2 Fusión en cama polvo

Las tecnologías de fusión de cama de polvo utilizan una fuente térmica para generar la fusión entre partículas, en una ubicación específica del área de construcción y así producir una pieza sólida. La mayoría de las tecnologías de fusión de lecho de polvo emplean mecanismos para aplicar y alisar el polvo a medida que se construye una pieza, lo que resulta en que el componente final esté encerrado en polvo. Este método se puede aplicar para polímeros mediante SLS, como también para metales mediante DMLS/SLM, los cuales se explicarán a continuación.

Sinterización selectiva por láser (SLS)

El proceso SLS comienza con un contenedor de polvo de polímero que se calienta a una temperatura justo por debajo del punto de fusión del polímero. Un rodillo deposita una capa muy delgada del material en polvo (típicamente 0,1 mm) [8] sobre una plataforma de impresión. Un rayo láser de CO₂ comienza a escanear la superficie. El láser sinteriza selectivamente el polvo y solidifica una sección transversal de la pieza. Al igual que SLA, el láser se enfoca en la ubicación correcta mediante un par de galvanómetros. Cuando se escanea toda la sección transversal, la plataforma de impresión se mueve hacia abajo para comenzar con la siguiente capa, repitiendo este proceso hasta terminar la impresión [8]. A diferencia de los demás métodos, el 50% [8] del polvo empleado es reciclable para las máquinas SLS, por que reduce los desechos generados.

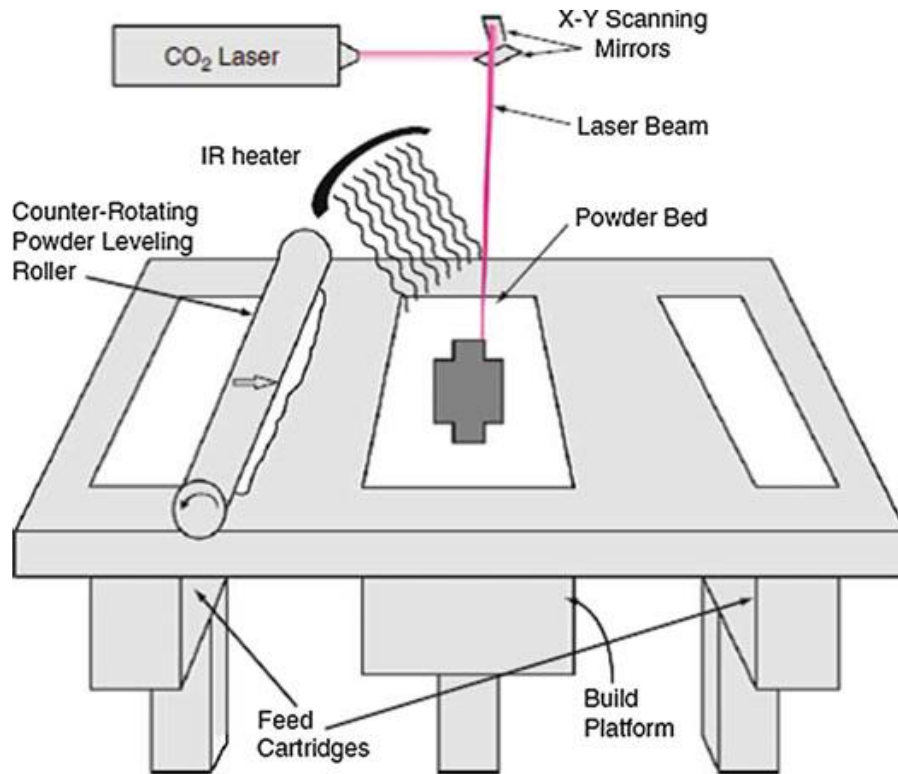


Figura 1.6: Representación de sistema de impresión SLS [8].

DMLS/SLM

Tanto la sinterización metálica directa por láser (DMLS) como la fusión selectiva por láser (SLM) producen piezas a través de un método similar al SLS, usando polvos metálicos.

El método DMLS, puede emplear aleaciones de polvos metálicos, los cuales no son derretidos por este método, sino que lo calienta hasta un punto para que pueda fusionarse a nivel molecular. En cambio, el SLM utiliza el láser para lograr una fusión completa del polvo metálico (no aleado) formando una parte homogénea [7].

A diferencia del SLS, los procesos de DMLS y SLM requieren de soporte estructural, con el fin de limitar la probabilidad de cualquier contracción que pueda ocurrir, debido a las temperaturas empleadas en el proceso. Lo que requiere de un mayor conocimiento al usar estos métodos [7].

1.5.3 Material Jetting (inyección de material)

El método funciona de manera muy similar a una impresora de inyección de tinta estándar, sin embargo, en lugar de imprimir una sola capa de tinta, muchas capas se construyen unas sobre otras para crear una pieza sólida. El cabezal de impresión expulsa cientos de pequeñas gotas de fotopolímero y luego también las cura (solidifica) a través de una luz UV. Después de que una capa ha sido depositada y curada, la plataforma de construcción desciende repitiendo el proceso para construir una pieza 3D.

Los procesos de inyección de material requieren soporte y esto se imprime simultáneamente durante la construcción a partir de un material soluble que se elimina durante el post-procesamiento. Material Jetting es una de las únicas tecnologías que ofrecen impresión multimaterial, con una superficie lisa. Pero al igual que la impresión SLA, las piezas suelen ser frágiles [7].

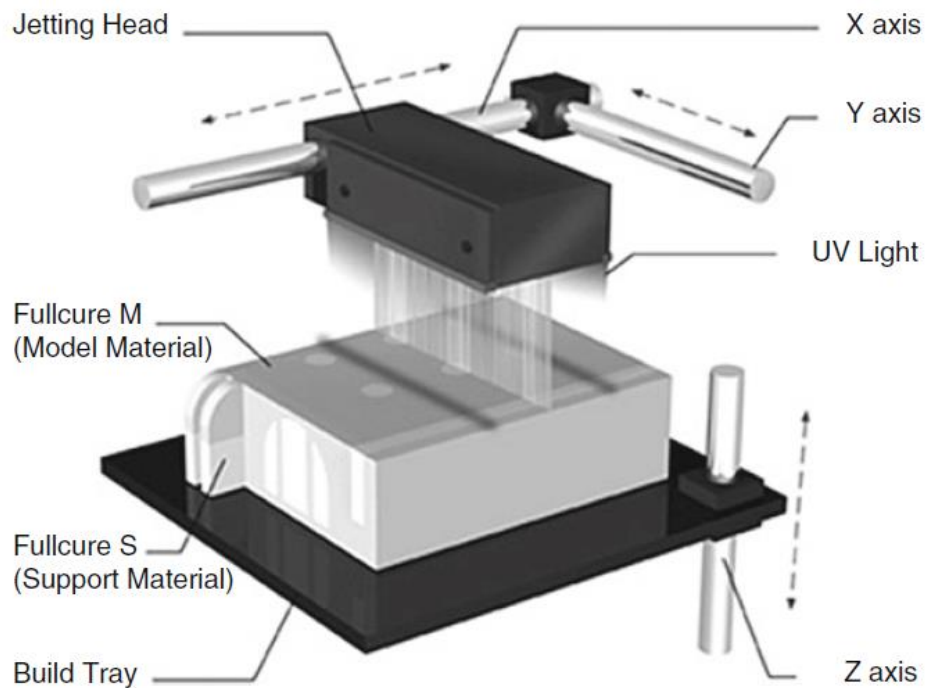


Figura 1.7: Representación de sistema de impresión por inyección de material [8].

1.5.4 Binder Jetting (inyección de aglutinante)

El Binder Jetting imprime de forma similar al SLM. A diferencia de SLM, que utiliza un láser para sinterizar el polvo metálico, el Binder Jetting mueve un cabezal de impresión sobre la superficie del polvo depositando gotas de aglutinante (generalmente de $80\ \mu m$ de diámetro) que unen las partículas de polvo para producir cada capa de la pieza. Una vez que se ha impreso una capa, se baja la cama polvo y se extiende una nueva capa de polvo sobre la capa recientemente impresa. Este proceso se repite hasta que se genera una pieza sólida [8].

Una de las principales características del Binder Jetting es que el proceso no utiliza calor, lo que significa que las piezas no sufren las tensiones residuales, además de que el 100% del polvo empleado no adherido puede ser reciclado [7]. Como consecuencia de esto, los resultados finales tienen una textura granulada y frágil.

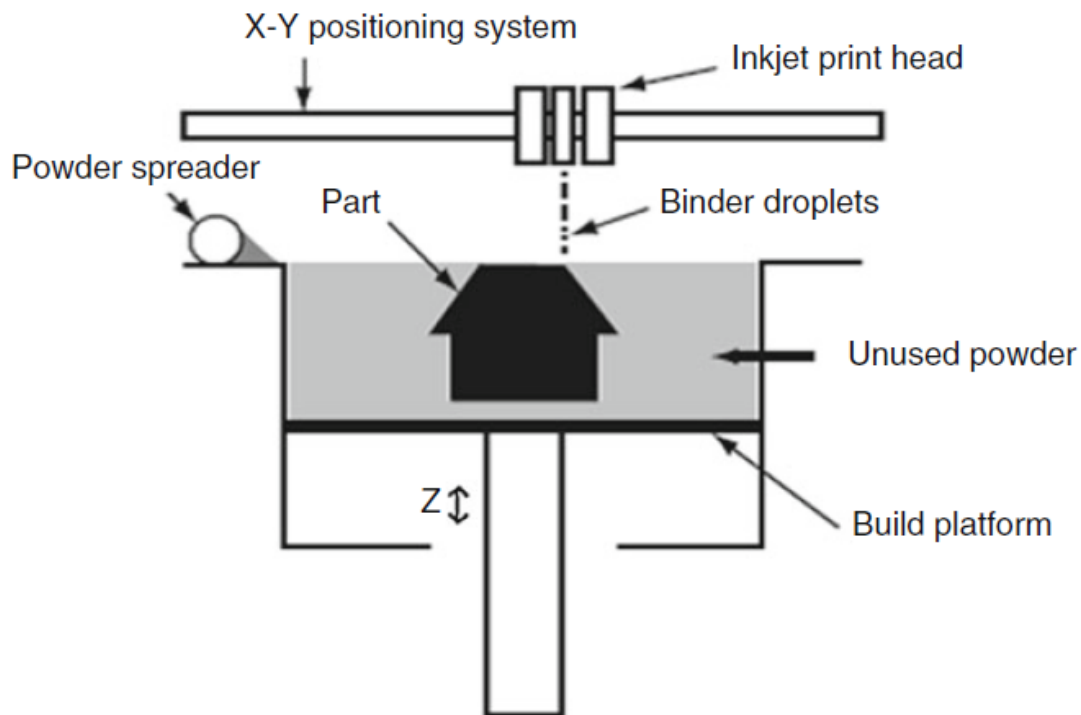


Figura 1.8: Representación de sistema de impresión por inyección de aglutinante [8].

1.5.5 Extrusión de materiales (FFF o FDM)

La extrusión de material, también conocida como fabricación por filamento fundido (FFF) o deposición de material fundido (FDM) imprime utilizando un filamento termoplástico, empujándolo a través de una boquilla calentada y fundiéndolo en el proceso. La impresora deposita el material en una plataforma de construcción en un camino predeterminado, donde el filamento se enfría y solidifica para formar una parte sólida.

Es un método simple de usar en comparación a los anterior, que permite generar piezas de diversas geometrías, baja densidad, pero sensibles a los cambios de temperatura durante el proceso de impresión.

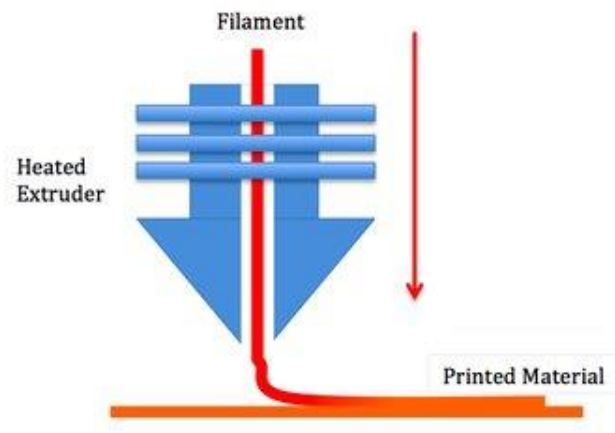


Figura 1.9: Representación de proceso de impresión 3D mediante FDM.[9]

1.6 Filamentos de impresión FDM

Considerando que los materiales termoplásticos tienen una variedad de propiedades, se mencionarán los principales filamentos junto a sus respectivas aplicaciones y características.

PLA

El PLA es un termoplástico biodegradable, convirtiéndolo en la solución más ecológica en el ámbito de la impresión en 3D, en comparación con los plásticos de base petroquímica.

Este material es duro y quebradizo, una vez que se ha enfriado con un umbral de temperatura inferior al del ABS. No es obligatorio el calentamiento de la cama de impresión, pero puede

ser beneficioso para la calidad del objeto impreso. Una vez que se calienta, el PLA emite un ligero olor, pero no emite humos como el ABS calentado, por lo que no será necesaria ninguna campana extractora. [10]

ABS

El ABS es generalmente muy duradero y fuerte, ligeramente flexible y bastante resistente al calor. Las impresoras 3D capaces de procesar plásticos ABS, normalmente funcionan con un extrusor a temperaturas entre 220 y 250[°C] [10]. Por lo tanto, una impresora 3D capaz de procesar ABS está necesariamente equipada con una cama de impresión con sistema de calefacción y paredes que restrinjan los cambios de temperatura, con el fin de evitar la deformación o el agrietamiento de los materiales impresos.

El ABS también tiene algunas desventajas. En primer lugar, se trata de un plástico no biodegradable a base de petróleo que, sin embargo, se puede reciclar. Otro problema es que el ABS crea humos que pueden irritar zonas sensibles del cuerpo, por lo que se recomienda la presencia de campanas de extracción o circulación de aire leve, que evite la acumulación de estos humos.

PETG

El tereftalato de polietileno (PETG) es un plástico muy pegajoso cuando se funde, por lo que los problemas de adhesión a la cama son disminuidos, sin la necesidad de elevar la temperatura de cama. Este material es libre de olores, pero se requiere una temperatura superior al PLA y comparable al ABS. El PETG genera menos contracciones durante el enfriamiento, por lo que es bueno para objetos planos grandes.

Una característica de este material es que es higroscópico, lo que significa que absorbe la humedad del aire circundante. Así que es necesario guardar el filamento 3D en un lugar fresco y seco para que la calidad de las impresiones no se vea afectada.[11]

TPU

El poliuretano termoplástico (TPU) es un tipo de filamento flexible. Puede reproducir detalles finos con un aspecto brillante. Su principal característica es la flexibilidad y tiene una buena adherencia de capa, lo cual permite la disminución de contracciones en las primeras capas de

impresión, pero esta característica genera desviaciones en las esquinas y voladizos. Por lo que es recomendable la impresión de piezas de geometría simple.

Este material se imprime a temperaturas de exclusión muy parecidas al PLA, aunque requiere una temperatura de cama más elevada.[10]

Nylon

El nylon (nailon) ofrece impresiones muy fuertes y ligeramente flexibles con excelentes propiedades de desgaste, temperatura y resistencia a los productos químicos en comparación con ABS o PLA. Los objetos impresos con este material pueden ser fácilmente mecanizados con herramientas afiladas, sin necesidad de refrigerante, utilizando velocidades bajas para evitar la fusión.[11]

PVA

El PVA (alcohol polivinílico) es un termoplástico a base de petróleo y soluble en agua que se puede utilizar como material de soporte para PLA y otros materiales. Tiene alta resistencia a la tracción y flexibilidad. Es inodoro, no tóxico y biodegradable, lo que lo hace ambientalmente seguro. Los disolventes recomendados para el PVA son agua y productos químicos como glicoles, glicerol, piperazina, metilamina, formamida, y tetrahidrofurano [12].

Propiedades y características de los filamentos FDM

Para organizar de mejor manera los materiales mencionados anteriormente. En la

Tabla 1.1 se presentan de manera estructurada la información de estos filamentos.

Tabla 1.1: Resumen de propiedades principales de filamentos comunes, elaborada con información de [10].

Característica	PLA	ABS	PETG	Nylon	TPU	PVA
Dureza	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Media
Flexibilidad	Baja	Media	Media	Alta	Alta	Media
Durabilidad	Media	Alta	Alta	Muy alta	Alta	Muy alta
Dificultad	Baja	Media	Baja	Baja	Media	Media
Temp. De impresión	190°C – 210°C	220°C – 250°C	210°C – 240°C	240°C – 250°C	195°C – 230°C	180°C – 210°C
Temp. De cama	20°C – 60° C	90°C – 110°C	80°C – 110°C	90°C – 110°C	70°C	20°C – 40°C
Contracción / deformación	Mínima	Considerable	Mínima	Considerable	Considerable	Considerable
Adhesión a cama	Alta	Media	Media	Baja	Media	Alta

1.7 Elementos por considerar en la impresión FDM

Parámetros de la impresora

Hay muchos parámetros que se pueden ajustar en la mayoría de las máquinas FDM para lograr una impresión precisa. La velocidad de construcción, la velocidad de extrusión y la temperatura de la boquilla controlan la consistencia del filamento extruido y son establecidas por el operador, pero cada proveedor de filamento recomienda los parámetros para sus productos. [7]

A un nivel fundamental, el diámetro de la boquilla y la altura de la capa definen la resolución de una pieza impresa FDM. Si bien todos los parámetros definen la precisión dimensional de una pieza, un diámetro de boquilla más pequeño y una altura de capa más baja generalmente se consideran las soluciones para piezas donde se requiere una superficie lisa y un mayor nivel de detalle.

Otro elemento para considerar es el tamaño de la pieza a imprimir, dado a que no todas las máquinas presentan la misma área de impresión. Por lo que las dimensiones del elemento a fabricar deben estar dentro del rango de impresión disponible.

Deformación

La deformación de las piezas fabricadas mediante FDM se produce debido al enfriamiento gradual. A medida que las diferentes secciones de la impresión se enfrían a diferentes velocidades, se contraen y se encogen. Esto genera tensiones internas que pueden conducir a la deformación o distorsión.

Una cama calentada, así como una buena adherencia de la cama, juegan un papel importante en el anclaje de una pieza FDM, lo que reduce la probabilidad de que se produzca una contracción.

Otra forma de disminuir estas tensiones es la utilización de un *brim* o *raft*. El primero consta en la impresión de una capa del material, utilizando una superficie mayor a la superficie de contacto de la pieza a imprimir, permitiendo una mejor adherencia. El *raft* a diferencia del *brim*, consta en la impresión de varias capas utilizando un área mayor de soporte y es utilizado principalmente con materiales con alta sensibilidad a los cambios de temperatura, siendo el ABS un ejemplo. Además, ambos elementos ayudan al soporte vertical de la estructura durante el proceso de impresión, mejorando la calidad de la impresión especialmente en las capas más alejadas de la cama. [7]

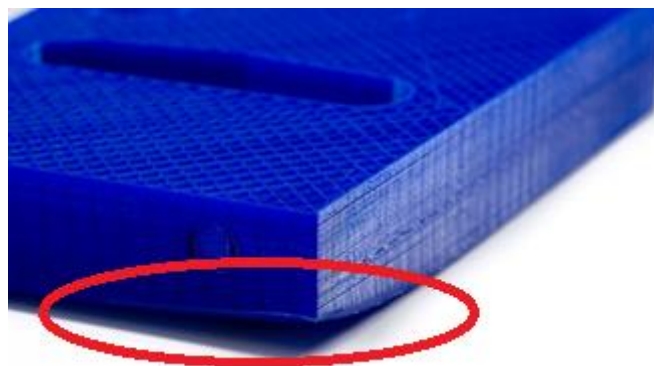


Figura 1.10: Efecto de contracción (encerrado de rojo) del material en pieza de FDM. [13]

Adhesión de capa

La adhesión o unión de capas es una parte importante del proceso de impresión FDM. A medida que el filamento se extruye, necesita unirse y solidificarse con las capas previamente impresas para formar una parte sólida y cohesiva. La fuerza descendente y la fusión parcial del material subyacente permite la unión de la nueva capa con la capa ya impresa. [7]

Efecto escalera

Este efecto, es generado en cualquier impresión 3D por FDM, ya que el filamento se dilata por la temperatura al ser extruido, mientras que la capa ya depositada se encuentra a menor temperatura, completamente sólida. Dejando un patrón en la superficie similar al de una escalera (Figura 1.11(a)). Para evitar esto, se puede aplicar algún tipo de post procesamiento para suavizar la superficie (Figura 1.11(b)).

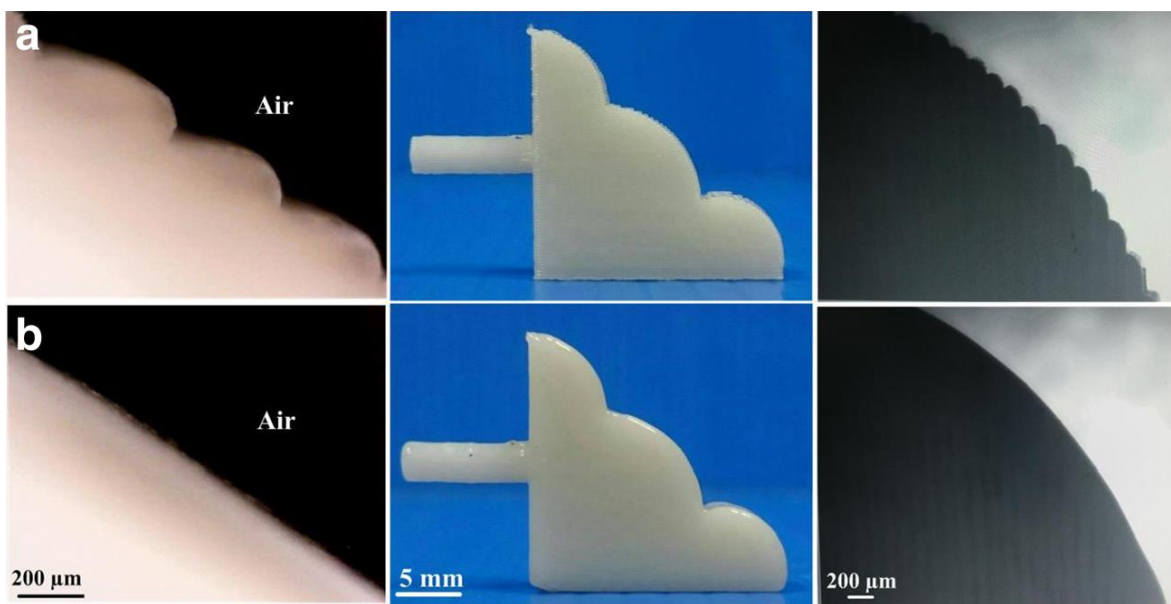


Figura 1.11: (a) Efecto escalera a diferentes escalas; (b) Suavizado de superficie mediante pulido por vapor de acetona [14].

Estructuras de apoyo

Las piezas FDM pueden requerir estructuras de soporte para imprimir con éxito. Se requiere soporte cuando el ángulo entre un plano perpendicular a la cama y la superficie de impresión supere el ángulo crítico [15], siendo este determinado por cada impresora, material y

parámetros de impresión, pero tiene un valor cercano a los 45° [16]. Superar este ángulo crítico puede afectar la calidad de impresión. En la Figura 1.12 se observa el ángulo α_2 en que se utiliza soporte en comparación al ángulo crítico α_c .

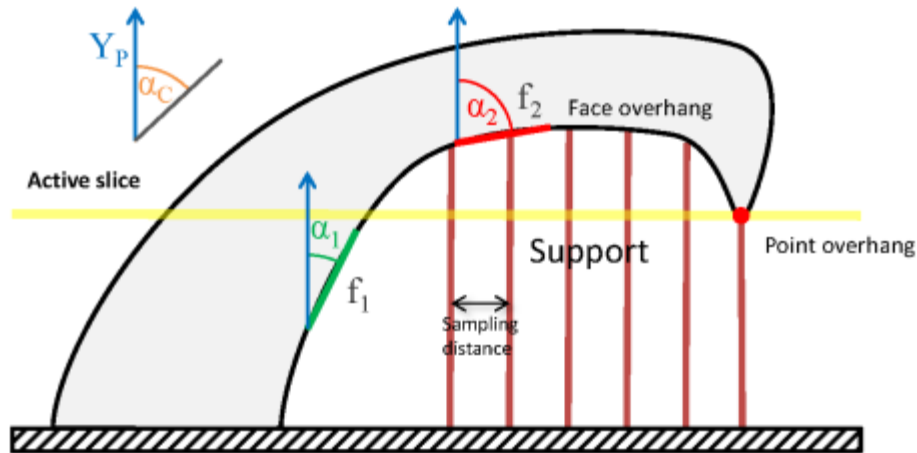


Figura 1.12: Esquema de aplicación de soportes de impresión según comparación del ángulo crítico α_c .

[15]

También, es imposible depositar nuevas capas en el aire, por lo que se requiere un soporte sólido cuando no hay una capa debajo para imprimir. Esto permite imprimir características que de otro modo no serían posibles. La Figura 1.12 muestra este caso con un punto rojo que está en contacto con la línea (amarilla) de impresión, siendo este punto, un lugar de impresión en voladizo, siendo imposible sin el apoyo de soportes.

La desventaja del soporte es que tiene un efecto perjudicial en la superficie con la que está en contacto, lo que afecta el acabado superficial de la pieza.

Soporte soluble

Algunas impresoras FDM ofrecen extrusión dual (dos cabezales de impresión) y son capaces de imprimir piezas multi materiales. Para estas impresoras (por ejemplo la impresora

Ultimaker S5 [17]), las estructuras de soporte se pueden imprimir en un material soluble (generalmente PVA).

Debido a que el soporte se disuelve en agua o disolvente, en lugar de eliminarse mecánicamente, la superficie de la impresión que estaba en contacto con el soporte tiene un acabado superior.



Figura 1.13: Disolución en agua de soportes de impresión del material PVA. [18]

Relleno

Las piezas FDM generalmente no se imprimen completamente sólidas. Para ahorrar material y disminuir el tiempo de construcción, las piezas se imprimen con una estructura interna de baja densidad conocida como relleno. Existen diferentes formas de patrones para el relleno, y cada una de estas presenta características particulares que afectan a las propiedades mecánicas de la estructura final. A continuación, se mencionarán 8 formas de geometrías para este relleno las cuales se ilustran en la Figura 1.14.

- **Líneas:** El patrón de relleno de líneas contiene líneas impresas en una sola dirección por capa, cambiando a la dirección perpendicular en la siguiente. Forma de relleno proporciona resistencia en solo dos dimensiones y es bueno para impresiones rápidas. El patrón de líneas no usa demasiado material y mantiene el peso bastante ligero.[19]

- **Cuadrícula:** El patrón de relleno de cuadrícula es similar en apariencia al de líneas, pero en lugar de líneas unidireccionales cada capa, contiene líneas bidireccionales (perpendiculares) en cada capa, con el doble de espacio entre líneas, proporcionando resistencia bidimensional. El relleno de cuadrícula consume una cantidad promedio de material y tarda un tiempo mayor que el generado por líneas.[19]
- **Triángulos:** El patrón de triángulos se ve como líneas triangulares superpuestas, con líneas que van en tres direcciones en el plano de la cama de impresión. Proporciona resistencia solo en dos dimensiones, pero aún funciona para impresiones que deban ser fuertes.[20]
- **Tri-hexágono:** El patrón de relleno tri-hexágono contiene una variedad de líneas que van en tres direcciones en el plano de impresión, creando patrones hexagonales con triángulos en el medio. Este relleno proporciona resistencia en dos dimensiones, pero es más resistente que el patrón triangular simple. [19]
- **Cúbico:** Este patrón produce cubos apilados, pero debido a que están inclinados 45° en 2 direcciones con respecto a la base de impresión, genera un aspecto similar al relleno de triángulos. Proporciona una excelente resistencia en tres dimensiones, consumiendo más material y tiempo en la impresión en comparación a los patrones anteriores.[19]
- **Octeto:** Este patrón es similar al cúbico, pero en lugar de aumentar los triángulos inclinados, se materializa como cuadrados. Esta forma de relleno es útil para piezas que requieren alta resistencia, consumiendo una mayor cantidad de material.[20]
- **Giroide:** El patrón de relleno de giroide incluye curvaturas irregulares cóncavas que eventualmente se cruzan. Está destinado a lograr un equilibrio óptimo entre resistencia en las 3 direcciones, material y tiempo de impresión. [19]

- **Concéntrico:** El relleno concéntrico es una estructura interna compuesta de líneas concéntricas que coinciden con el contorno de una pieza. Este patrón es rápido de imprimir, bueno para piezas flexibles y consume significativamente menos material que la mayoría de los patrones. [20]

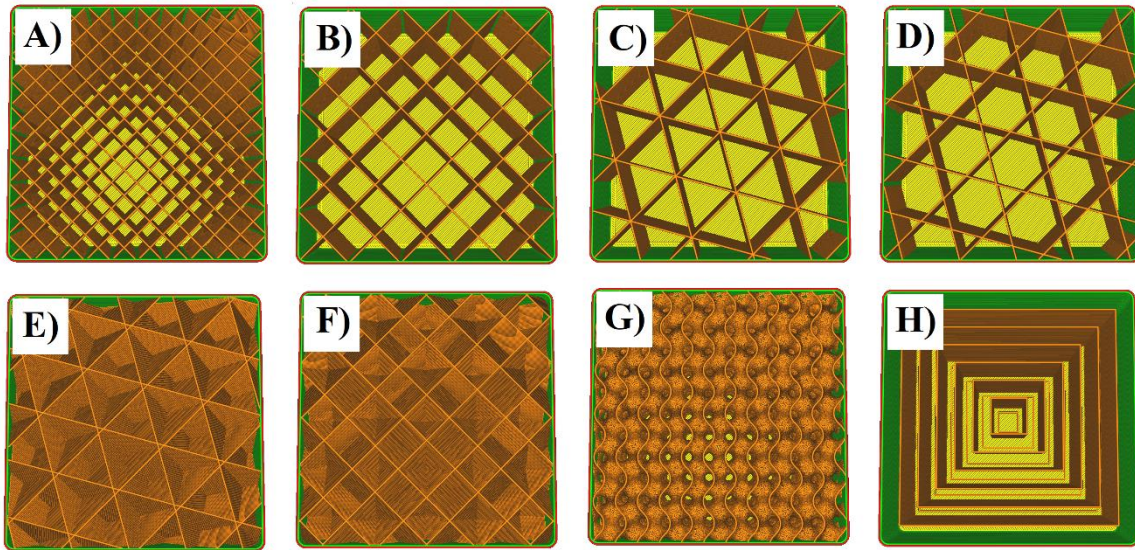


Figura 1.14: Patrones de impresión realizados en Ultimaker Cura 4.11.0 con relleno de 10%. Los patrones son: A) Líneas; B) Cuadrícula; C) Triángulo; D) Tri-hexágono; E) Cúbico; F) Octeto; G) Giroide; H) Concéntrico.

1.8 Post-procesamiento

El post-procesamiento es la etapa donde se eliminan los soportes de impresión y posibles defectos. Para eliminar este material sobrante se emplean métodos mecánicos, tales como, corte con pinzas y hasta el lijado, y en algunos casos el pulido químico con vapores de disolventes tales como la acetona.

Lijado

Este es el proceso de pulido físico consiste en la utilización de elementos abrasivos (como el papel de lija) en la superficie de la impresión. Este método remueve parte del material de la superficie, emparejando la rugosidad generada entre capa y capa. Cabe destacar que este proceso puede modificar las medidas de la pieza, reduciendo el tamaño o agrandando

orificios, dejando un acabado mate. Uno de los mayores impedimentos de este proceso son los detalles de tamaños pequeños y geometrías que se presenten al interior de la pieza, ya que éstas son difíciles de alcanzar y están delimitadas por el implemento abrasivo a utilizar. En la Figura 1.15 se puede apreciar el cambio generado en la superficie de la impresión mediante este método.

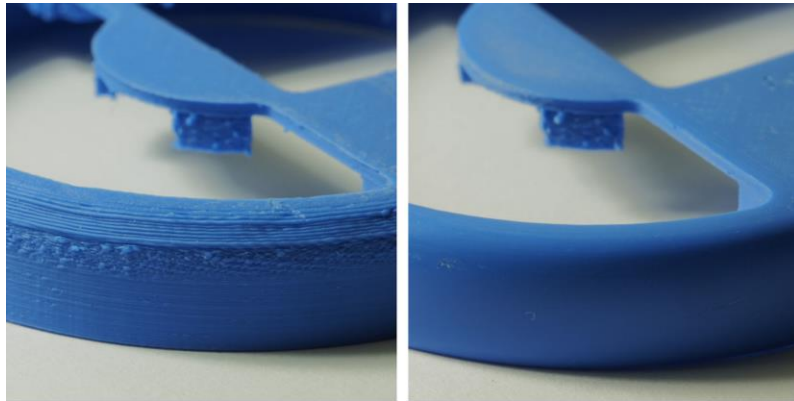


Figura 1.15: Comparación de pieza antes (izquierda) de ser lijada y el resultado posterior (derecha) de este proceso. [21]

Pintado

El pintado consta en la aplicación de una sustancia de textura líquida sobre la superficie de impresión. Al contrario que el lijado, en este proceso se adiciona material, por lo que las dimensiones de la pieza se ven incrementadas, aumentando el tamaño y reduciendo el tamaño de las perforaciones u orificios presentes en ésta. Generalmente se usan pinturas como el óleo, esmalte, lacas y acrílicos. Un detalle muy particular, es que la base de este tipo de pintura no debe reaccionar químicamente con el filamento utilizado en la impresión, ya que las dimensiones se pueden ver afectadas, llegando al punto del derretimiento de la pieza. Por ejemplo, las impresiones realizadas con ABS no pueden ser pintadas con pinturas en base de acetona por qué ocurre el efecto anteriormente mencionado.

Vapor de acetona (ABS/PLA)

El vapor de acetona es tipo de pulido químico, el cual consta en el derretimiento gradual de la superficie expuesta de una impresión 3D inmersa en vapor de acetona. Se puede aplicar en los termoplásticos de ABS y PLA. Para este método de post procesamiento se requiere de algún tipo de contenedor que pueda ser cerrado y no reaccione al entrar en contacto en la acetona.

Al trabajar con este compuesto es necesario entender cuáles son los riesgos y peligros, por este motivo, en el capítulo 0 se explicarán estos detalles, mencionando además medidas preventivas y el uso de EPP correspondiente.

Vapor de acetona en frío

Se debe realizar este procedimiento dentro de algún contenedor cerrado con espacio suficiente para almacenar la pieza a pulir, dejando una separación entre la pieza y la acetona, realizando este proceso a temperatura ambiente [22].

Generalmente la pieza se cuelga o se posiciona sobre una rejilla (de algún material que no reacciona con el filamento y acetona) para crear esta separación. El tiempo que debe estar el elemento inmerso dentro de este contenedor puede variar dependiendo del tamaño de la pieza, pero usualmente toma entre 1 y 2[h] [22].

En la Figura 1.16 se muestra un ejemplo del montaje de este método de pulido, en donde se puede apreciar un contenedor de vidrio rodeado en su superficie interna por papel impregnado con acetona. Dentro de este, se posiciona una superficie elevada en donde se apoyará la pieza a pulir.



Figura 1.16: Montaje de proceso de pulido por vapor de acetona en frío, con paredes rodeadas de papel absorbente, empapado con acetona. [23]

Vapor de acetona en caliente

Este método a diferencia del anterior requiere que la temperatura de la acetona se encuentre a unos 55[°C] [24]. Además de ser más rápido, tardando aproximadamente 15 minutos [25] cuando la acetona ya se encuentra caliente, pero dependiendo del resultado al cual se quiera llegar, estos valores pueden variar.

En la Figura 1.17 se muestra un ejemplo de la disposición de los materiales para realizar este procedimiento, en donde se eleva la temperatura de la acetona con un calentador, controlando la temperatura con una termocupla. La pieza impresa se encuentra en el interior del contenedor por sobre el nivel de acetona.

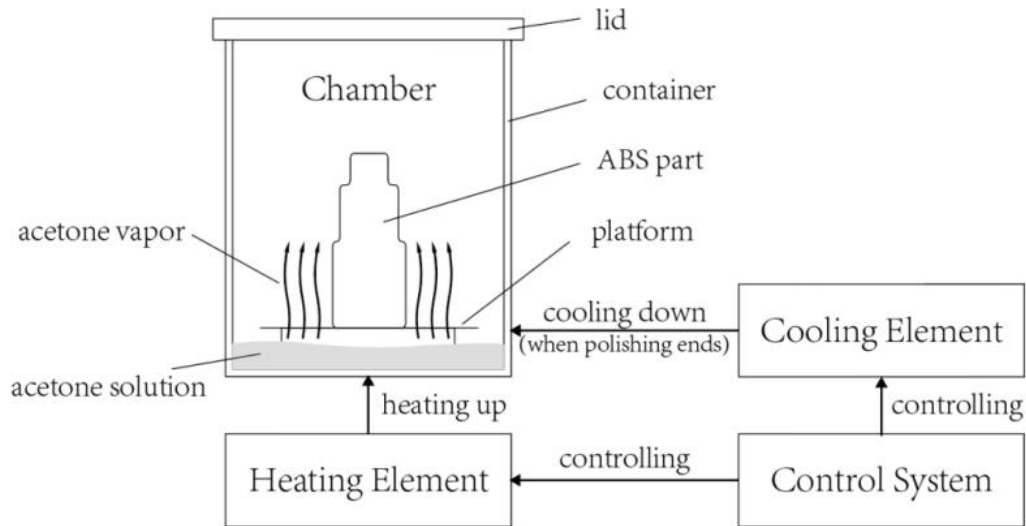


Figura 1.17: Montaje de pulido por vapor de acetona en caliente. Fuente: [24]

Vapor de acetona por atomización ultrasónica

Este método consta en las vibraciones de alta energía que produce un transductor piezoeléctrico, generando ondas de compresión de alta frecuencia, transformando la sustancia utilizada en vapor [26].

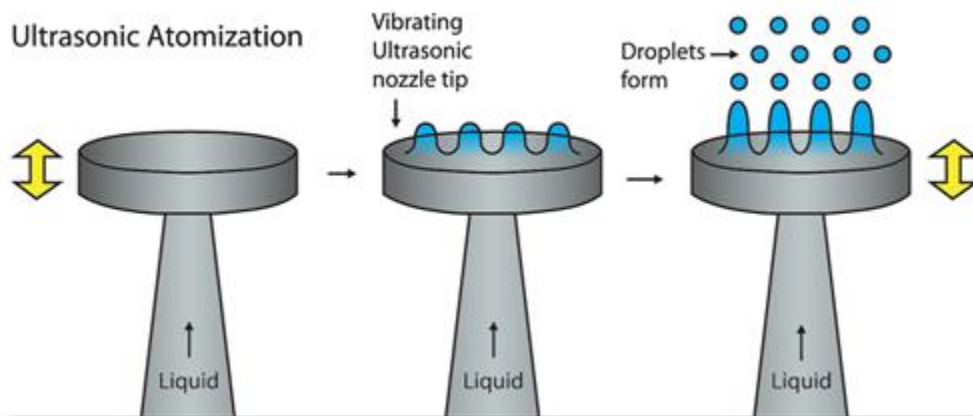


Figura 1.18: Esquema del proceso de generación de vapor mediante la vibración ultrasónica del transductor piezoeléctrico. [18]

Para llevar a cabo este procedimiento, se requiere de un humidificador ultrasónico (Figura 1.18) dispuesto al interior del recipiente donde se encuentra la pieza a pulir (Figura 1.19).

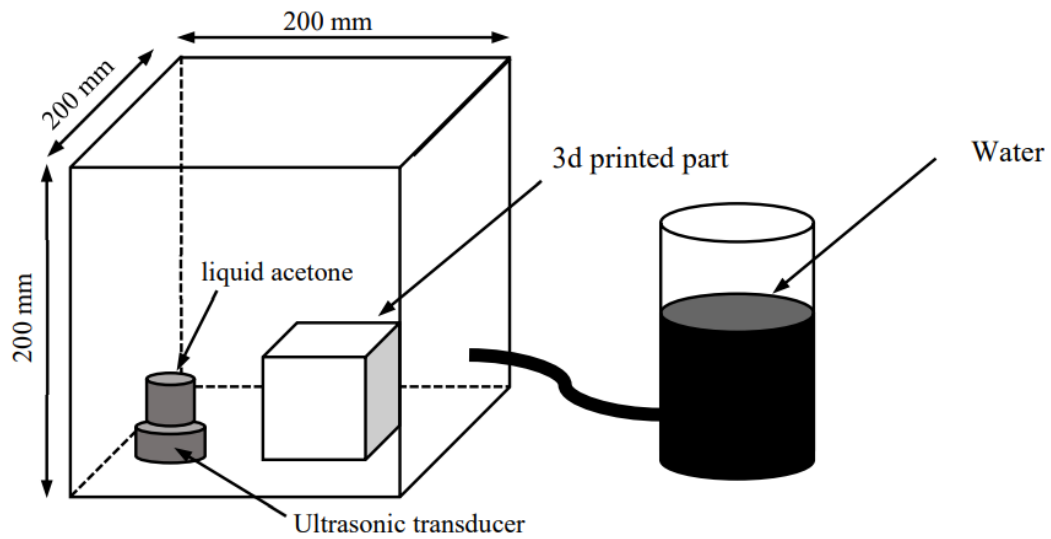


Figura 1.19: Montaje del método de pulido por atomización ultrasónica. [26]

En la Figura 1.20 se muestra la diferencia en el acabado de una pieza pulida mediante vapor de acetona. Al lado izquierdo se aprecia la uniformidad y brillo generado por este post procesamiento, eliminando el efecto de escalera en la superficie de la impresión.



Figura 1.20: Comparación post y pre pulido mediante vapor de acetona. [21]

Peligros del uso de acetona

La acetona es un compuesto químico que a temperatura ambiente se presenta como un líquido incoloro de olor característico. Se evapora fácilmente a temperatura ambiente, es inflamable y es soluble en agua, por lo que hay que tener una serie de precauciones al momento de manipular este compuesto.

El D.S. 57/19 [27] aprueba el reglamento de clasificación, etiquetado y notificación de sustancias y mezclas peligrosas, como norma jurídica en Chile, incorporando el sistema globalmente armonizado (SGA) de clasificación y etiquetado de sustancias peligrosas impulsado por Naciones Unidas. Este sistema establece el ámbito de aplicación y responsabilidad sobre estos compuestos, agrupándolos en clases y categorías de peligros.

Algunas acetonas, utilizadas como disolvente industrial de un 99,5% de concentración (Figura 12.2 (ver **Apéndice B**)), presenta su pictografía y clasificación según la SGA en la siguiente tabla.

Tabla 1.2: Tabla de clasificación de peligros de la acetona según SGA, extraída de Figura 12.2 (**Apéndice B**).

Pictograma	Palabra de advertencia	Clasificación SGA	Categoría
	Peligro	Líquido inflamable	2
	Atención	Lesiones oculares graves / irritación ocular	2A
	Peligro	Toxicidad específica en órganos dianas (exposición única)	3
	Atención	Peligro por aspiración	2

Tomando en cuenta esta clasificación SGA, se debe tener una gran precaución, ya que los líquidos y vapores son muy inflamables; puede provoca irritación ocular grave; puede provocar somnolencia y vértigo; puede ser nocivo en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratoria.

A modo de prevención, el compuesto se debe mantener alejado de fuentes de calor, superficies calientes, chispas, llamas al descubierto y otras fuentes de ignición. Es fundamental mantener el recipiente cerrado para evitar escapes del vapor, por lo que es necesario un entorno al aire libre o ventilado durante el almacenamiento o manipulación del líquido. Para evitar lesiones cutáneas y oculares es recomendable el uso de equipo de protección personal tales como gafas y guantes.

La norma NCh 1411/4 Of78 identifica los compuestos peligrosos en base a 3 categorías, tales como salud, inflamabilidad y peligro, además de información adicional. En la Figura 1.21 se presenta la señal de seguridad bajo esta norma. De color azul con el valor 1 (ligeramente peligroso), que representa riesgo de salud, significando que la exposición a este material puede causar irritación o lesiones permanentes; de color rojo con el valor 3 (moderadamente inflamable), se representa el riesgo de inflamación, significando que estos materiales pueden combustionar bajo casi todas las condiciones ambientales de temperatura, presentando un punto de inflamación inferior a los 23[°C] y una temperatura de ebullición mayor a los 38[°C] (el punto de ebullición de la acetona es de 56[°C] [28]); y finalmente de color amarillo con valor 0 (estable), se representa riesgo de reactividad, significando que aún bajo la exposición al fuego el material se mantiene normalmente estable, además de no reaccionar con el agua.

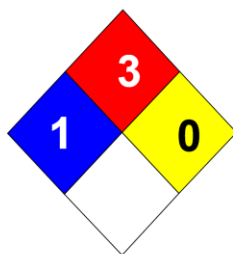


Figura 1.21: Señal de seguridad según NCh1411/4 para la acetona de 99,5% de concentración, siendo: Azul (salud) = 1; Rojo(inflamabilidad) = 3; Amarillo (reactividad) = 0.

1.9 Moldeo de polímeros

Los polímeros son materiales a los cuales se les puede dar forma mediante el proceso de moldeo bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. Existen diversas formas de realizar este proceso dependiendo de las características del elemento a fabricar. A continuación, se explicará

1.9.1 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión consiste en darle forma al material puesto en el interior de una matriz compuesta por dos mitades que generan la geometría negativa de la pieza al presionar el molde. Este proceso se ilustra en la Figura 1.22, consistiendo en (1) la carga del polímero a conformar dentro la cavidad de la mitad inferior del molde. Dependiendo de los requerimientos del material, el molde puede ser precalentado para obtener la temperatura adecuada de trabajo del polímero. Luego de esta etapa, se juntan ambas mitades (2) del molde para presionar el polímero, forzándolo a fluir y tomar la forma de la cavidad del molde. En algunos casos es necesario polimerizar o curar el polímero (3), siendo necesario calentar el molde y así obtener la solidificación de la pieza. Finalmente, se abre el molde (4) y se extrae del interior la pieza conformada.

Este proceso suele ser más simple que el moldeo por inyección [29] al no necesitar algún otro sistema que ingrese la carga de material en la cavidad del molde, pero esto limita a que la pieza a fabricar sea de una geometría de baja complejidad debido a la poca capacidad de fluidez del polímero. Usualmente, el sistema de calentamiento de este proceso se realiza mediante resistencias eléctricas, vapor, o circulación de aceite caliente en caso de requerirlo. El proceso de moldeo por compresión puede ser clasificado como **moldeo manual**, si es que este proceso se realiza completamente por un operador; **semiautomático** si es que parte de este proceso es realizado por un ciclo de programación, siendo necesaria la acción de un operario en alguna de las etapas del proceso; y **automático**, cuando el proceso completo es realizado por un ciclo programado (incluyendo carga (1) y descarga (4)).

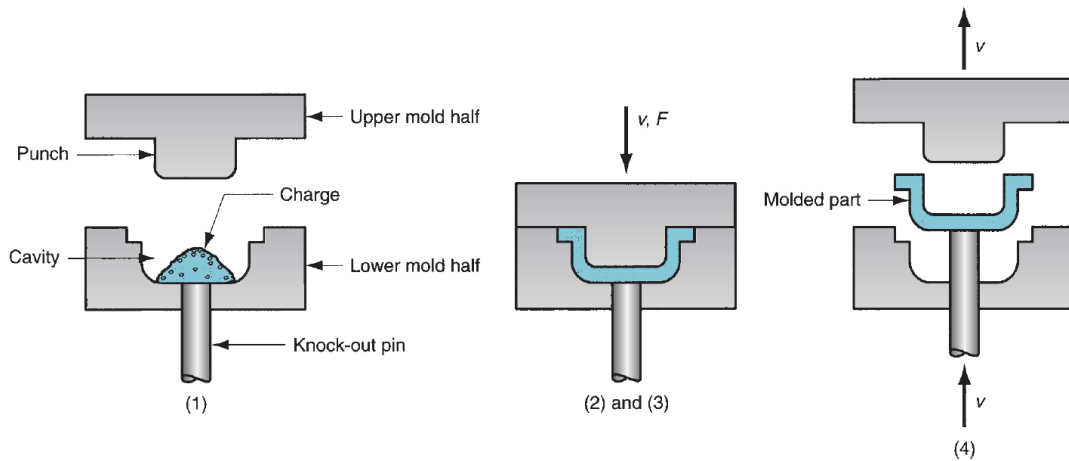


Figura 1.22: Esquema de moldeo por compresión. [29]

1.9.2 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso en el cual un polímero en estado de alta plasticidad es forzado a fluir dentro de la cavidad de un molde, en el cual solidifica. Tras esto la pieza es removida incluyendo los residuos, tardando entre 10 a 30 segundos [29] el ciclo completo de fabricación. Para este proceso se requiere de un molde metálico y una máquina de inyección. En la Figura 1.23 se muestra el esquema de este proceso, partiendo por (1) el cierre del molde metálico, además de la preparación previa del polímero a inyectar. Posteriormente, se inyecta el material (2) en la cavidad del molde, para luego esperar su solidificación (3) mientras se prepara la carga del material para el siguiente ciclo. Finalmente, se extrae la pieza (4) separando el molde.

Con este proceso de moldeo es posible de lograr formas complejas, con una gran rapidez y precisión utilizando el equipamiento mencionado anteriormente.

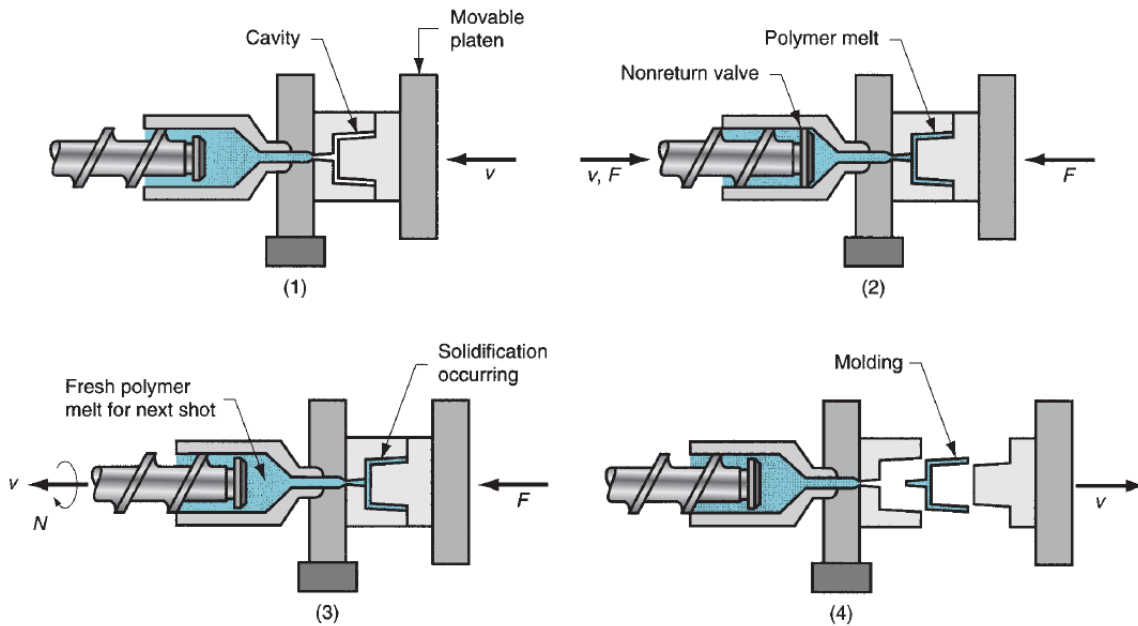


Figura 1.23: Esquema de moldeo por inyección. [29]

1.9.3 Moldeo por transferencia

En este proceso, el polímero es cargado (Figura 1.24 (1)) en una cámara conectada directamente con la cavidad del molde. El material es presionado por un vástago (2) que transfiere el contenido hacia el espacio con la forma del negativo de la pieza a fabricar, forzando el flujo del material por la cavidad del molde. Finalmente se abre el molde (3) y se extrae del interior la pieza conformada. Durante este proceso, dependiendo de los requerimientos del polímero utilizado, el molde puede ser precalentado y/o calentado durante el proceso de transferencia (2) para polimerizar este o curarlo.

A diferencia del moldeo por compresión, en este proceso se pueden realizar insertos metálicos o cerámicos posicionados en la cavidad del molde, previa transferencia de material, logrando la unión del polímero con el inserto.

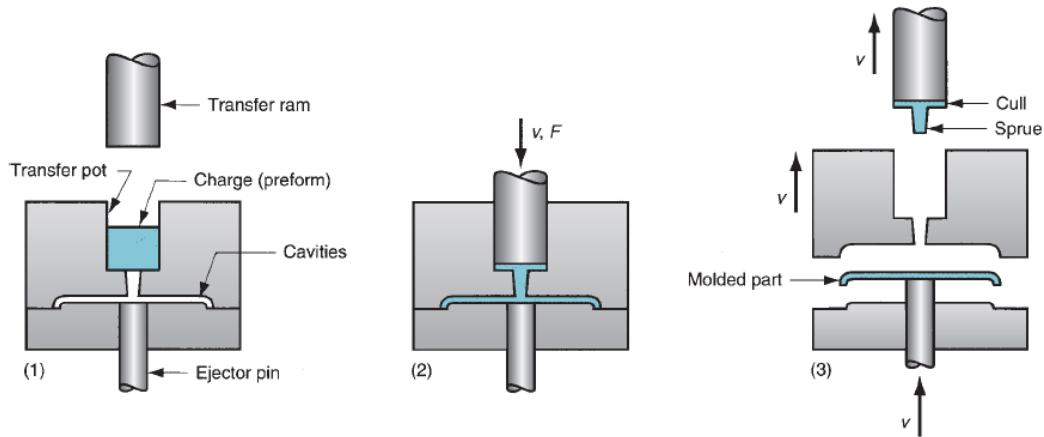


Figura 1.24: Esquema de moldeo por transferencia. [29]

1.9.4 Rotomoldeo

El rotomoldeo usa la gravedad mediante la rotación de un molde para fabricar una pieza hueca. Este proceso favorece a las geometrías complejas exteriores del polímero a conformar. En la Figura 1.25 se representa este proceso que consta de diferentes etapas. Primero, se carga (1) una cantidad determinada del polímero a utilizar dentro de la cavidad del molde abierto. Posteriormente se cierra el molde, para realizar simultáneamente el calentamiento y rotación de este en 2 de sus ejes, impregnando las paredes internas del molde por el polímero, formando gradualmente una capa de espesor uniforme del material fundido. Mientras sigue rotando, el molde es enfriado (3) para solidificar su contenido. Finalmente se abre el molde (1) y se extrae del interior la pieza conformada.

Este proceso es mucho más simple que el moldeo por inyección, pero los ciclos de fabricación son más largos, durando 10 minutos o más [29].

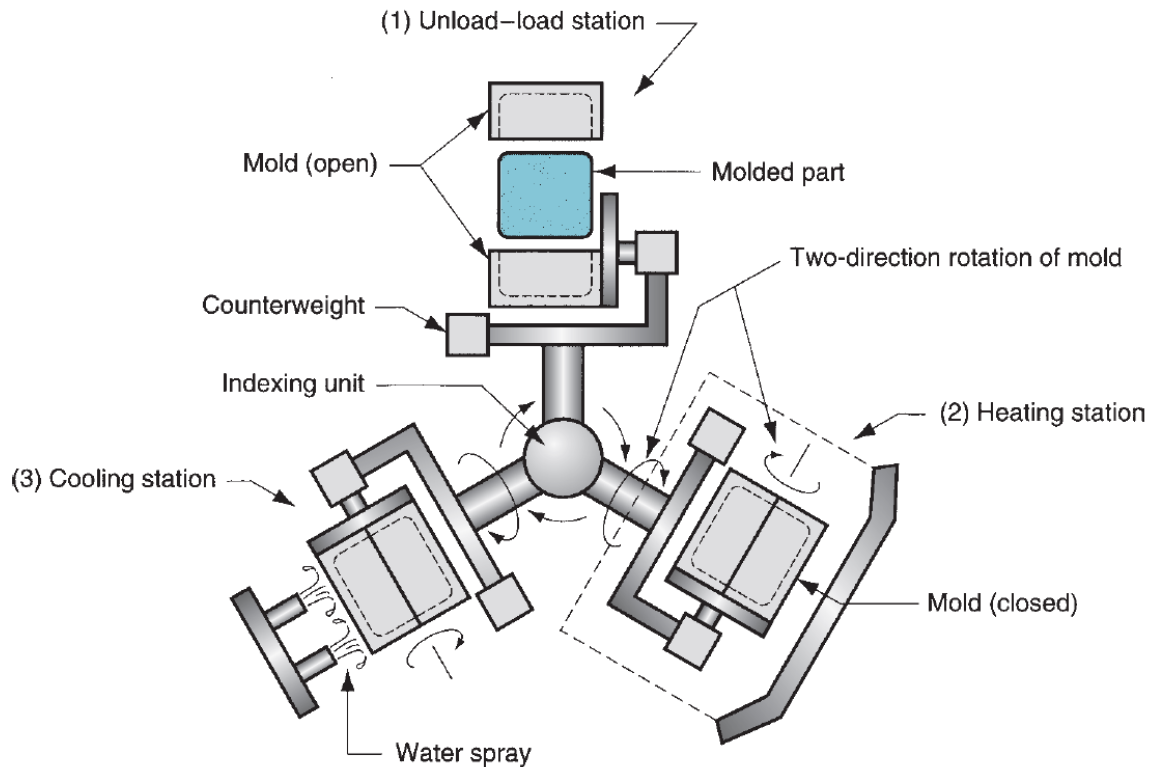


Figura 1.25: Esquema de rotomoldeo. [29]

1.9.5 Moldeo por colada

El moldeo por colada involucra el vertido de una resina líquida dentro de un molde, usando la gravedad para llenar la cavidad, permitiendo que tome la forma correspondiente al solidificar. El endurecimiento de la resina puede llevarse a cabo mediante diferentes formas dependiendo del material utilizado.

Este proceso tiene ventajas en términos de simplicidad en su ejecución y bajo costo en la elaboración del molde en comparación a los procesos mencionados anteriormente. El producto final queda libre de esfuerzos residuales debido a que solo se utiliza la gravedad para generar el flujo del material. Pero se debe considerar que al utilizar materiales que presenten contracción al curar pueden no cumplir la geometría deseada, siendo el proceso de moldeo por inyección o transferencia recomendados en estos casos, debido a la presión utilizada para generar el flujo del material. [29]

1.10 Moldeo de elastómeros

Los elastómeros son polímeros capaces de tener una gran deformación elástica bajo la aplicación de un bajo esfuerzo. Algunos de estos pueden extenderse hasta 5 veces su tamaño [29], logrando volver a su tamaño original. Este material suele ser referido como caucho o goma, y puede ser categorizado en 2 categorías [29]: cauchos naturales, derivado de ciertas plantas; y elastómeros sintéticos, producidos por polimerización.

Para utilizar estos materiales, es necesario realizar una mezcla entre el elastómero junto con la adición de un agente catalizado, antes de ser introducido al molde. De esta forma el elastómero pasa de un estado viscoso a uno sólido, tomando la forma del recipiente que lo contiene luego de transcurrir el tiempo de curado. En la Figura 1.26 se ilustra este proceso, incluyendo la desgasificación que será explicada en el siguiente capítulo.

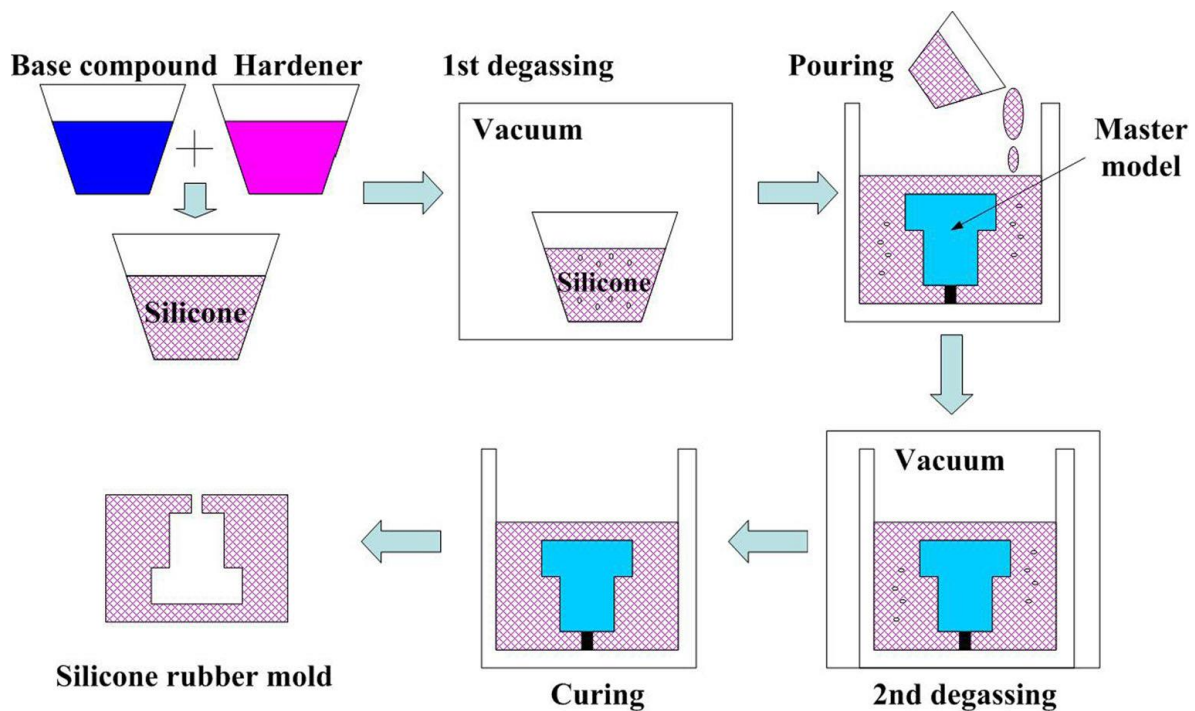


Figura 1.26: Proceso de elaboración de una pieza de silicona pasando por las etapas de: Mezcla, desgasificación, colada, segunda desgasificación, curado y pieza final [30].

1.11 Desgasificación

Parte de los cauchos de silicona son espesos y presentan una alta viscosidad. Por lo que es recomendable que sean desgasificados [31], de este modo se evita la acumulación de aire y burbujas en el resultado final. De lo contrario, al momento de la solidificación del molde, se podrían presentar algunos defectos en la silicona, como burbujas (en estado sólido), porosidades e irregularidades en la estructura. A continuación, se explicarán 2 métodos de desgasificación.

1.11.1 Cámara de vacío

Para poder realizar la desgasificación en cauchos de silicona, es necesario generar un vacío de 1[bar] [32] por un periodo de 20 hasta 60 minutos [32]. Cualquier valor menor a los mencionados puede generar un crecimiento en el tamaño de las burbujas al interior de la silicona en vez de eliminarlas.

Cabe destacar que, al momento de generar esta diferencia de presión, el volumen de silicona puede verse aumentado debido a la espuma resultante de la salida de burbujas. La silicona volverá a su normalidad tras terminar este proceso.

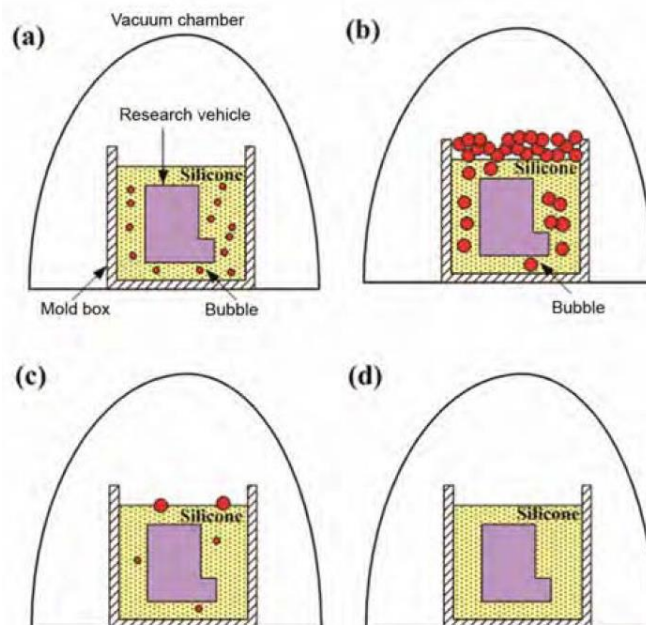


Figura 1.27: Esquema de desgasificación de un molde de silicona, siendo: (a) el posicionamiento de los elementos; (b) el inicio del vacío; (c) etapa final del vacío; (d) eliminación de burbujas de aire. [30]

1.11.2 Vibración

Algunas siliconas de alta viscosidad presentan un comportamiento pseudoplástico, disminuyendo su viscosidad aparente a medida que se incrementa el esfuerzo en este material o se realiza el proceso de curado [33].

La aplicación de una vibración vertical de frecuencias inferiores a los 100[Hz] [34] con una amplitud menor a 5[mm] [34], pueden remover las burbujas mediante el desplazamiento cíclico de estas. En la Figura 1.28 se muestra el análisis en CFD (Computational Fluid Dynamics) de la degasificación de una solución de carboximetilcelulosa (CMC), aplicando vibraciones de diferentes frecuencias y amplitudes.

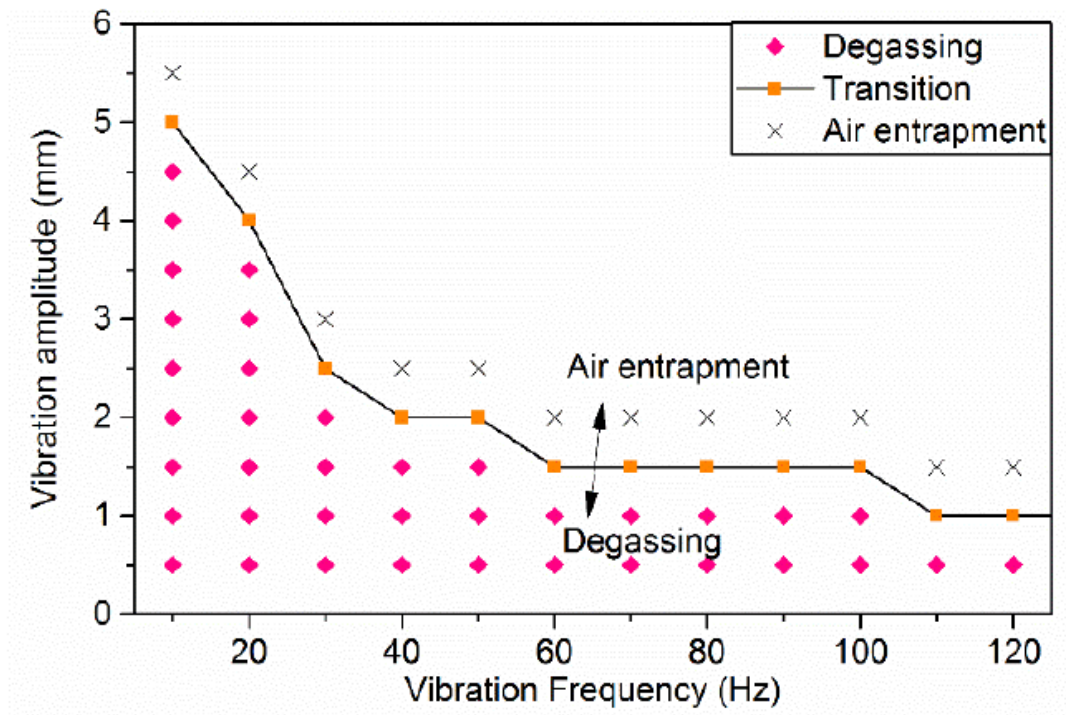


Figura 1.28: Combinaciones de parámetros (amplitud y frecuencia) que permiten la degasificación (rombos rosados) para la solución de CMC en análisis CFD.[34]

1.11.3 Escala de dureza de elastómeros

El durómetro Shore es una forma estandarizada de medir la dureza de elastómeros cuando ya se encuentran en estado sólido. Existen diferentes escalas, con rangos del 0 al 100 adimensionales.

La norma ASTM D2240 [35] reconoce 12 escalas, siendo las escalas Shore 00, Shore A y Shore D las más utilizadas. La escala Shore 00 mide cauchos blandos y geles; La escala Shore A mide cauchos flexibles hasta plásticos semirrígidos; Y la escala Shore D es empleada en la medición de plásticos duros. En la Figura 1.29 se muestran estas 3 escalas comparando sus valores con la dureza de ciertos objetos.

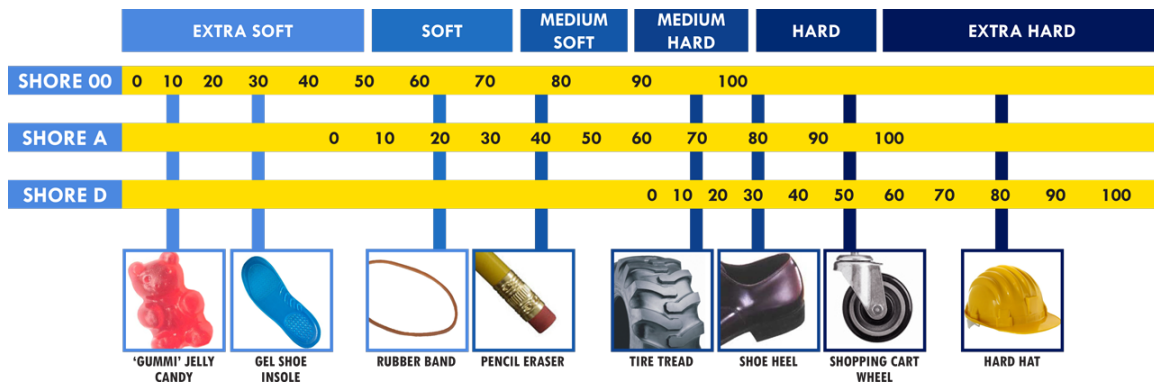


Figura 1.29: Tabla comparativa de dureza Shore. [36]

2 Esquema generalizado del proceso de fabricación de tooling

A modo de resumen se genera un esquema con las etapas para la fabricación de un fantoma mediante los procedimientos utilizados en este trabajo, siendo éste una posible guía en la futura elaboración de tooling bajo procesos y características similares.



Figura 2.1: Esquema del proceso de fabricación de tooling.

3 Diseño, materiales y fabricación del molde y del fantoma

La realización de los fantomas conlleva una serie de procesos, además de cumplir ciertos requerimientos dimensionales y mecánicos que se describirán en esta sección. Por lo cual, esta sección se segmentará en 8 puntos a modo de facilitar el entendimiento de contenidos.

A diferencia del esquema general de fabricación de tooling Figura 2.1, el paso n°4 se divide en los puntos de impresión 3D y pulido del molde, explicándolos por separado.

3.1 Software de diseño empleado

Todos los bocetos y dibujos realizados en 2D fueron creados mediante el software **AutoCAD® 2018** versión estudiantil, siendo de principal importancia en el desarrollo de los bocetos de los distintos fantomas y la estructura base de los modelos 3D del molde, núcleos y soportes de sujeción. Para la realización de los elementos 3D se utilizó el programa **Inventor® 2018** versión estudiantil, facilitando la generación de geometrías como cavidades y extrusiones, necesarias en el ensamble de estos componentes.

3.2 Parámetros de diseño de fantomas

Considerando la descripción del problema mostrado en el capítulo 1.1, se toma como referencia esquemas representativos de la enfermedad cardiovascular aterosclerosis por su geometría del contorno interior de la deformidad, esto permite genera una curva anatómica en la estrangulación del fantoma, siendo ideal para el estudio de MRI al cual se someterá. A continuación, se presenta la Figura 3.1 que servirá en para la generación de los bocetos.

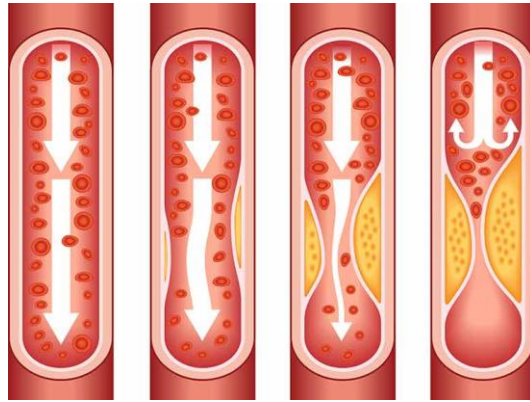


Figura 3.1: Esquema representativo de diferentes etapas de una coartación generada por aterosclerosis.[37]

De estas figuras se toma la curvatura generada en su interior para el diseño del estrechamiento. Con lo cual se establecen las dimensiones generales representadas en la Figura 3.2.

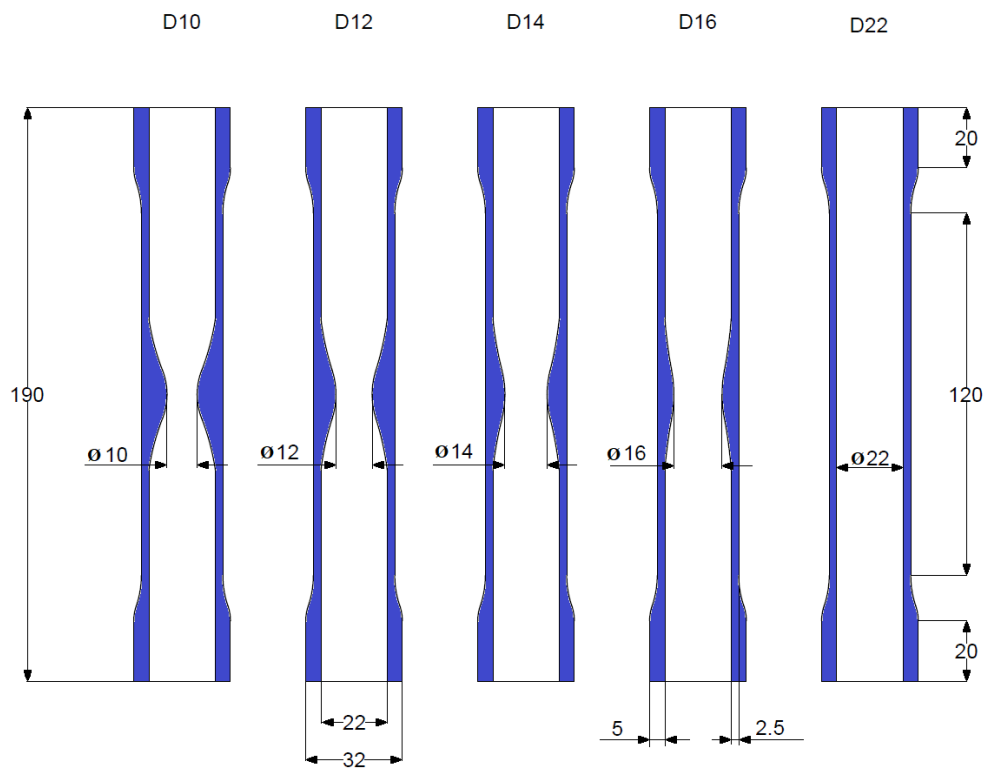


Figura 3.2: Bocetos de fantasmas con dimensiones en milímetros.

Como se aprecia en la imagen anterior, cada uno de los 5 fantomas presenta un aumento en el espesor de sus extremos. Con esto se busca disminuir los esfuerzos generados en esta sección al montar y desmontar el sistema de prueba (Figura 3.3). Cabe destacar que la geometría externa de los fantomas es la misma para todos y lo único que los diferencia es el diseño interior.

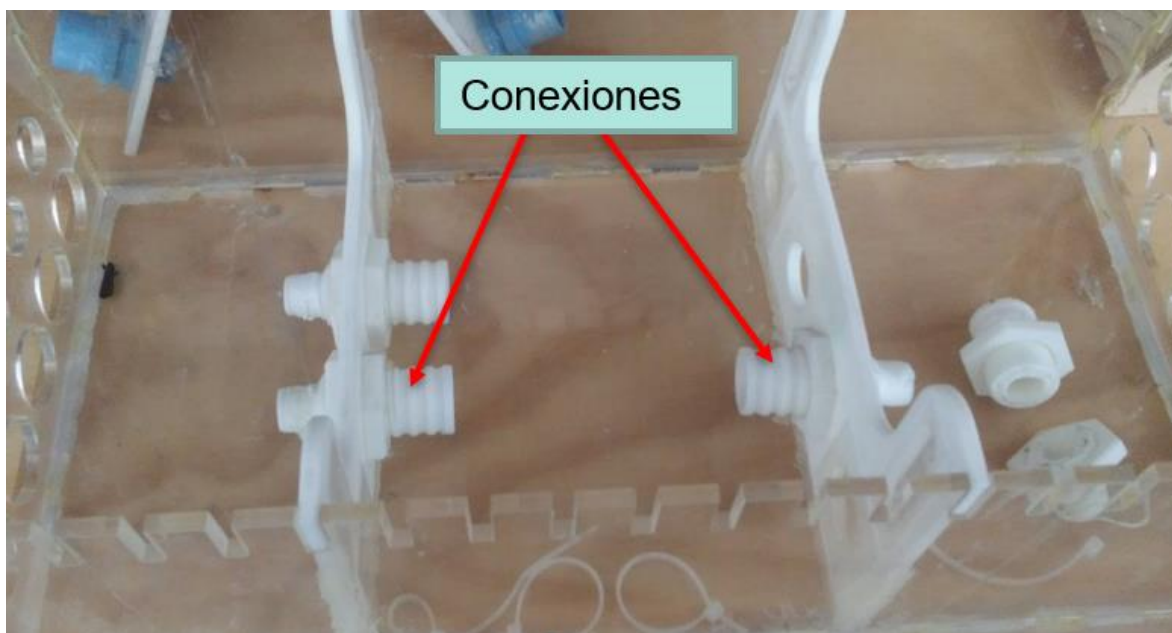


Figura 3.3: Banco de prueba de fantomas, indicando las conexiones para el montaje.

A modo de simplificación, se asigna a cada uno de los fantomas de la Figura 3.2 una abreviación, la cual está dada por el diámetro en milímetros de coartación al interior del fantoma. Quedando determinadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Abreviaciones para identificación de fantomas.

Fantoma	Diámetro de mínimo estrechamiento
D10	10 [mm]
D12	12 [mm]
D14	14 [mm]
D16	16 [mm]
D22	22 [mm]

Las abreviaciones de la Tabla 3.1 serán de utilidad para nombrar el diseño de los núcleos a lo largo del escrito.

Considerando la situación actual pandémica por el virus SARS-CoV-2, parte del desarrollo de este trabajo no pudo ser realizado en los talleres y laboratorios de la universidad. Por lo que se hace uso de los implementos y herramientas a disposición personal en las etapas iniciales de este trabajo, buscando las formas más simples de lograr el objetivo principal. A partir de estos acontecimientos se determina que el proceso de moldeo adecuado para la elaboración del fantoma, es el método de moldeo por colada, siendo este uno de los procesos más simples y de menos requerimientos de elementos externos.

3.3 Diseño 3D de componentes del molde

En este punto, se genera el diseño de los distintos elementos con los cuales se trabajará para cumplir el objetivo principal.

3.3.1 Diseño de núcleos

A partir de los bocetos realizados, es necesario crear 5 núcleos que permitan obtener el estrangulamiento deseado en cada fantoma. Al tener la deformación en el segmento central del fantoma, no se podrá retirar el núcleo de la pieza de resina, dado a que ésta impedirá el movimiento del núcleo. Por consiguiente, el núcleo se dividirá en 2 piezas. Una se denominará “hembra”, que presenta una perforación en su interior desde la zona donde el diámetro tiene la mayor reducción en su tamaño que va en dirección del eje central. Y otra que se denominará “macho”, que presenta un vástago, extendiéndose desde el área de mayor estrechamiento en dirección del eje central.

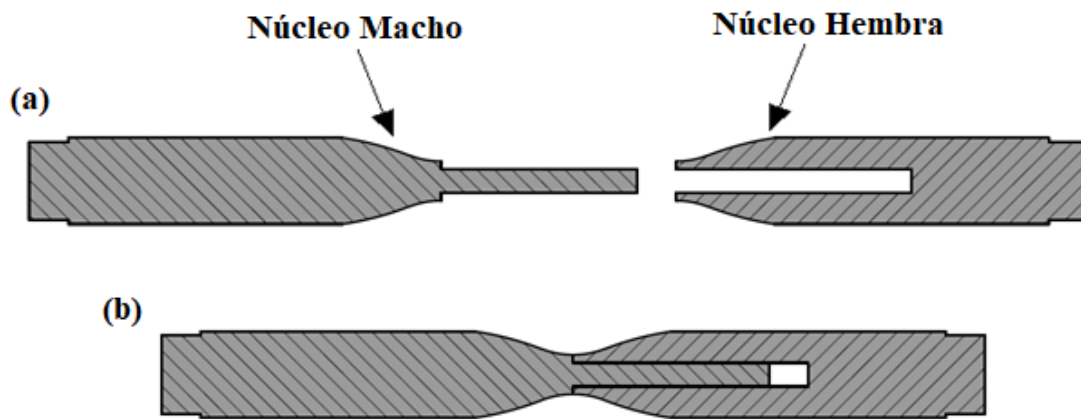


Figura 3.4: (a) Núcleo hembra y macho; (b) ensamble de núcleos.

Al tener 5 núcleos, que constan de 2 partes, para no confundir estas piezas se denominaran como “DX-Y”, donde “DX” corresponde al fantoma de diámetro de estrechamiento “X”. E “Y” será asignado por la letra “H” o “M” dependiendo de si corresponde a la parte “hembra” o “macho” de dicho núcleo. A continuación, se presenta en la Tabla 3.2 las denominaciones respectivas.

Tabla 3.2: Abreviaciones para identificación de núcleos del molde.

Fantoma (Núcleo)	Tipo	Abreviación para parte del núcleo
D10	Hembra	D10-H
	Macho	D10-M
D12	Hembra	D12-H
	Macho	D12-M
D14	Hembra	D14-H
	Macho	D14-M
D16	Hembra	D16-H
	Macho	D16-M
D22	Hembra	D22-H
	Macho	D22-M

Para facilitar la separación del núcleo, cada parte tendrá una manija en su extremo, la que permitirá generar tracción o torsión al momento de separar estas piezas, además de servir de guía en el ensamble con el molde.

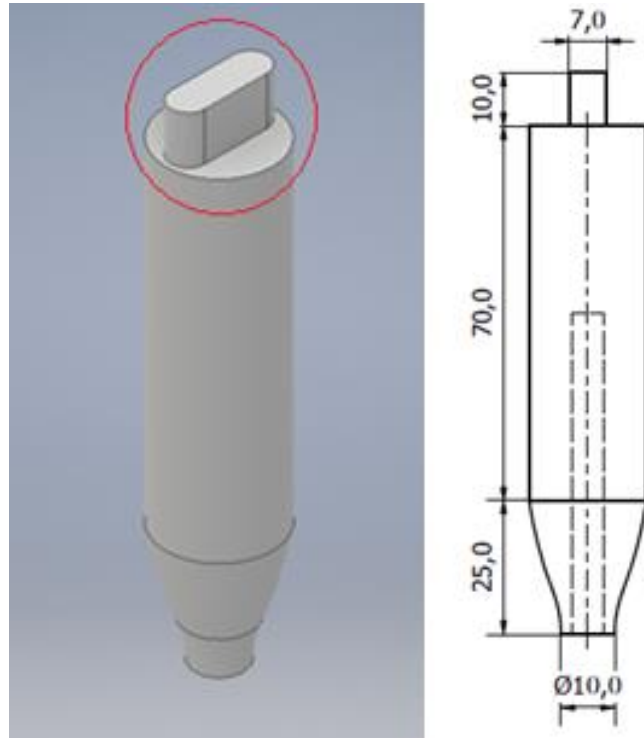


Figura 3.5: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica del núcleo DH-10. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.

Los planos de todos los núcleos se presentan desde la Figura 11.1 a la Figura 11.10 (ver **Anexo A**)

3.3.2 Diseño de molde

Este molde consta de 2 partes completamente simétricas, que en su interior presentan un sacado con la forma del contorno externo de los fantasmas diseñados (todos los fantasmas presentan la misma forma en su contorno exterior) y una serie de detalles de los cuales se ilustran en la Figura 3.6.

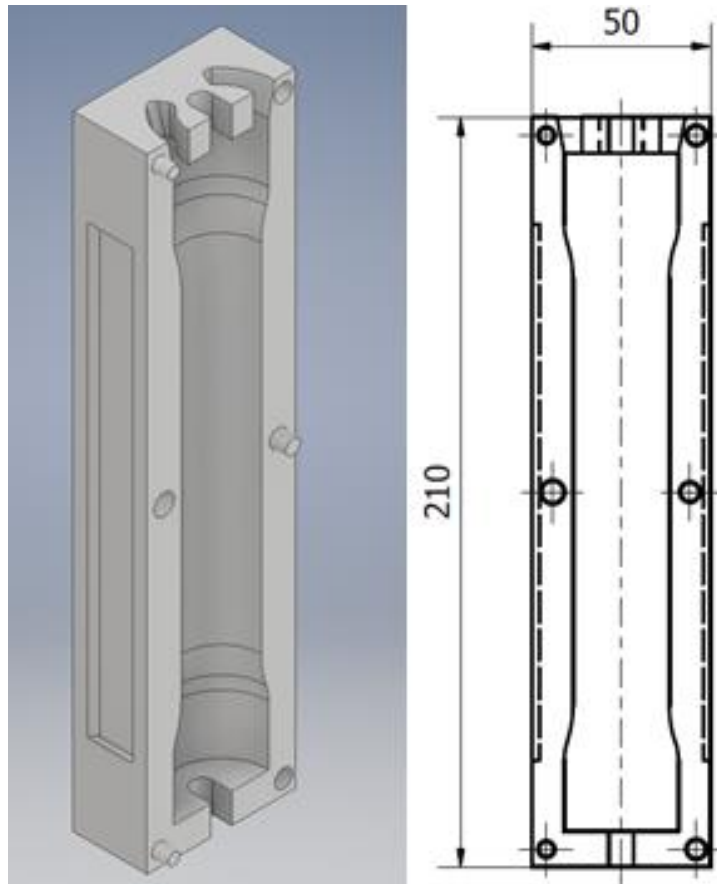


Figura 3.6: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.

En la parte lateral externa del molde presenta una cavidad que permite tener un mejor agarre del molde y facilitar la separación de los elementos en la etapa de desmolde. En la Figura 3.7 encerrado de color rojo se identifica esta cavidad.

Cada parte del molde presenta 3 perforaciones y 3 vástagos dispuestos de tal forma que sirven para encajar y alinear de forma simétrica estas 2 partes externas de molde. Este se puede apreciar en la Figura 3.7 encerrado de color verde para las perforaciones y de color azul para los vástagos.

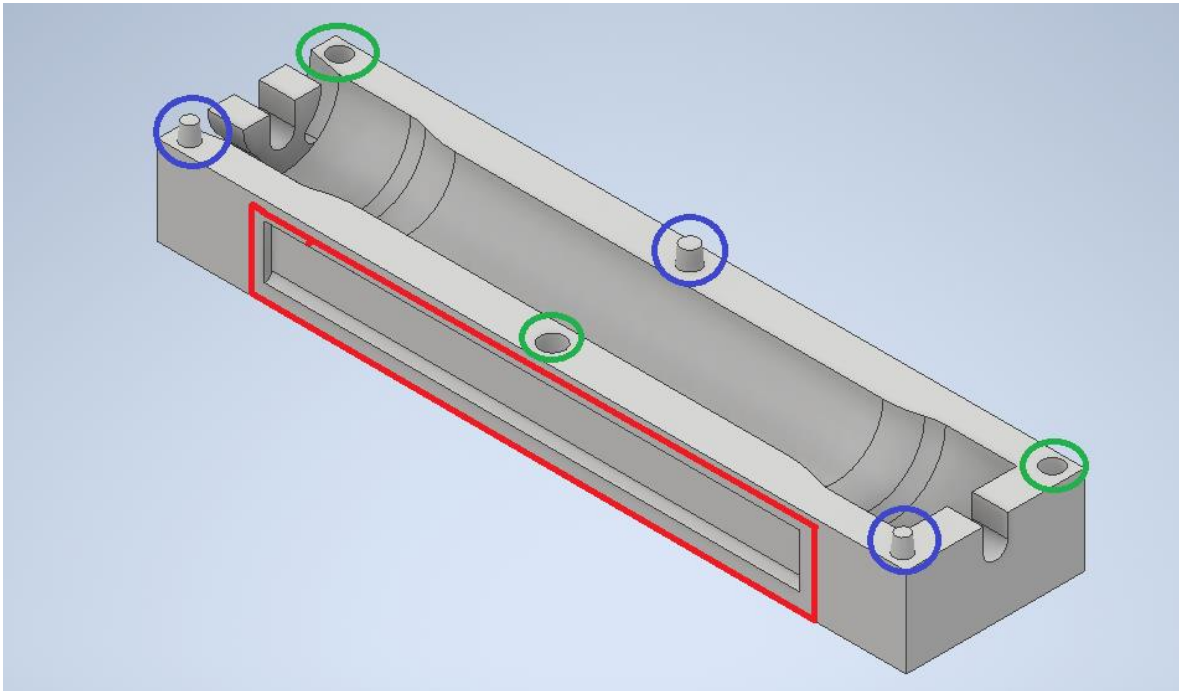


Figura 3.7: Vista isométrica del molde. Encerrado de color rojo la ranura de agarre; de azul las guías; de verde las perforaciones.

Para asegurar la correcta alineación del núcleo dentro del molde, se dispone de una ranura en 2 caras opuestas, generando un espacio del tamaño de la manija del núcleo. Las ranuras se identifican en la Figura 3.8.

Al momento de cerrar este molde juntando las 2 piezas idénticas (Figura 3.6), se generan 3 espacios en la cara superior de este ensamble. Dos espacios laterales, presentando una inclinación que permite la entrada de la colada y facilita el escape de gases, y una ranura central diseñada para el posicionamiento de la manija del núcleo. En la siguiente figura se identificará estas ranuras.

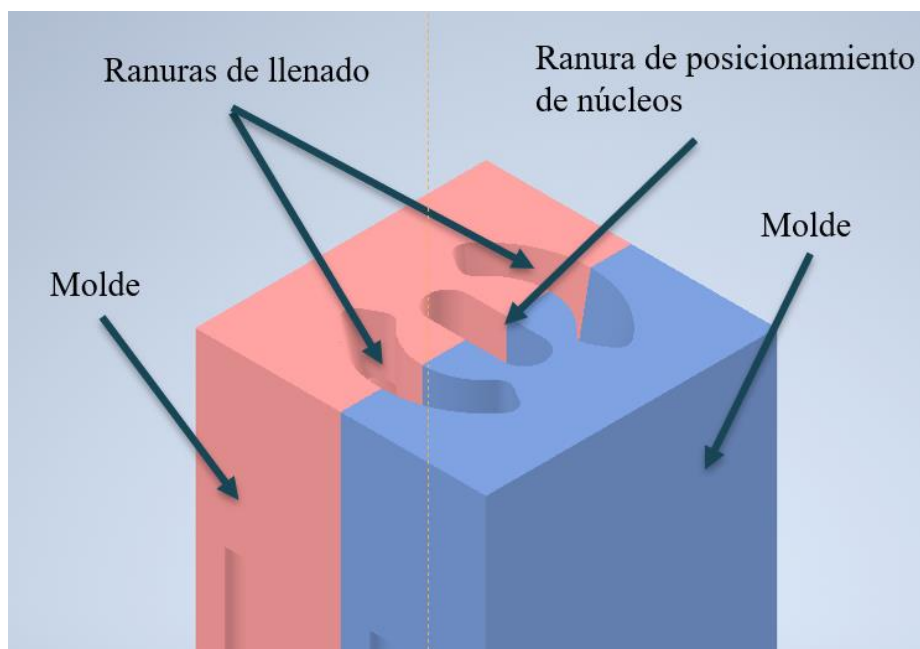


Figura 3.8: Ampliación de vista isométrica del ensamblaje de las carcasas del molde, indicando las ranuras generadas.

El plano completo del molde se presenta en la Figura 11.11 dispuestos en el **Anexo A**.

3.3.3 Diseño de soportes

Para generar estabilidad en el molde al momento verter la colada, se diseña un pedestal en el cual se debe insertar las 2 partes del molde junto al núcleo previamente ensamblados.

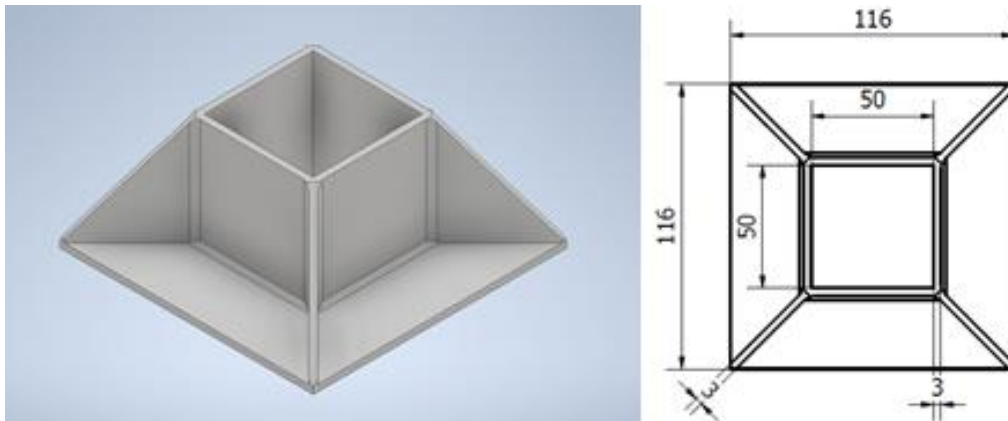


Figura 3.9: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica pedestal. Al lado derecho, una vista superior de este mismo junto a sus cotas principales.

También para evitar la separación de las zonas que no quedan sujetas por el pedestal, se diseña un marco cuadrado, el cual presenta un ensanchamiento hacia los vértices, de esta manera se reduce el esfuerzo generado en las esquinas, además de facilitar el posicionamiento y remoción del elemento de contención. En las figuras siguientes se muestra el diseño de estos elementos.

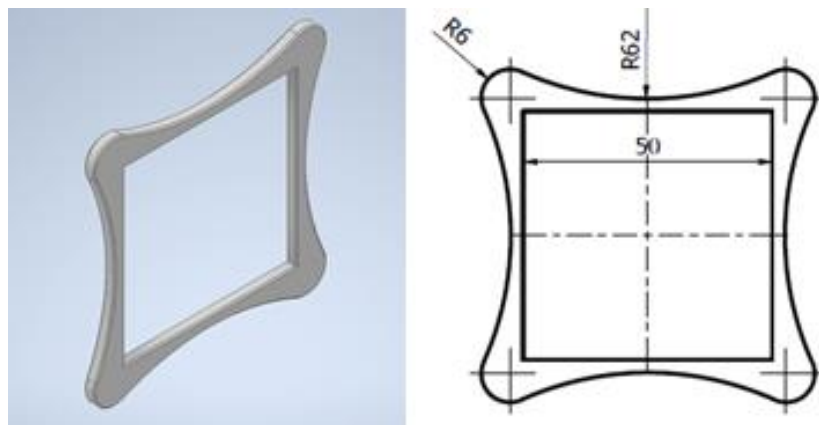


Figura 3.10: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica de una de las contenciones del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.

Los planos del pedestal y contención se presentan en la Figura 11.13 y Figura 11.14 respectivamente (ver **Anexo A**).

3.3.4 Diseño de cúpula

Como el proceso de fabricación de este fantoma será realizado mediante colada de resina, será necesario extraer el aire atrapado en el interior, y así evitar la formación de burbujas. Por lo cual se diseña un elemento que sea capaz de permitir la circulación de aire en la parte superior del ensamble, cuando se genere el vacío, independiente del método de desgasificación.

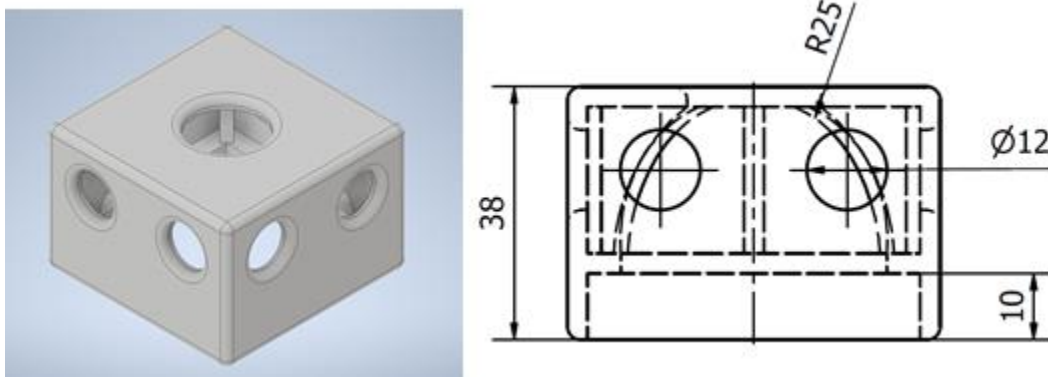


Figura 3.11: Al lado izquierdo se presenta una vista isométrica de la cúpula del molde. Al lado derecho, una vista frontal de este mismo junto a sus cotas principales.

En la Figura 3.11 se pueden observar algunas perforaciones dentro de este elemento, 2 por cada lateral y 1 en la parte superior, las cuales facilitan la generación de vacío. Además, la presencia de arcos internos aumenta la rigidez de esta pieza dejando el espacio interior necesario para el escape de burbujas de aire atrapadas al interior del molde, como también la posible espuma que se pueda generar en este mismo proceso. El plano de la cúpula se presenta en la Figura 11.12 (ver **Anexo A**).

3.3.5 Ensamble de componentes diseñados

Para entender como los elementos diseñados se unen para darle funcionalidad al molde, en la Figura 3.12 se representa con diferentes colores cada una de estas piezas, mostrando una vista isométrica del ensamble (A), una vista en corte frontal de la mitad de este, mostrando los elementos internos de esta unión (B) junto con la leyenda respectiva. Se observa que en

la parte inferior se encuentra el pedestal, pieza en la cual se insertan ambas mitades del molde luego de que el núcleo completo es insertado en su interior. Por el costado se encuentra uno de los soportes y en la parte superior la cúpula.

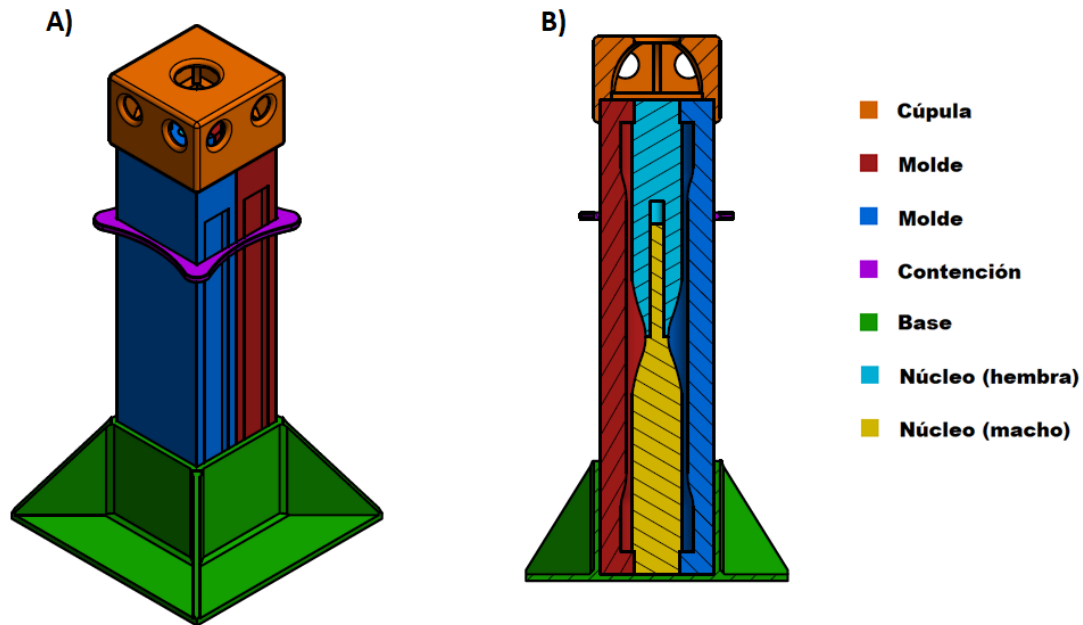


Figura 3.12:A) vista isométrica del ensamble; B) vista frontal en corte del ensamble. Al costado derecho se encuentra la leyenda de colores de cada componente.

3.4 Selección de materiales para fabricación de componentes

El desarrollo de este trabajo requiere del uso de algún filamento para la impresión 3D, y algún elastómero para la fabricación del fantoma. Por lo cual, en este punto se explicara la selección de estos materiales, considerando las limitaciones generadas por la pandemia (SARS-CoV-2) al momento de realizar las cotizaciones (agosto, 2020).

3.4.1 Filamento de impresión 3D

Dentro del marco teórico del escrito se nombran algunos de los filamentos de impresión 3D más comunes. Dadas las amplias características y propiedades de estos termoplásticos, se decide emplear el método de selección de matriz de pesos ponderados[38] aplicando los siguientes criterios y sus pesos respectivos: disponibilidad (35%); dificultad (20%);

contracción (15%); adhesión a cama (10%); costo por Kg (20%). El criterio de disponibilidad tiene el mayor peso por la baja cantidad de stock en el momento en el cual se realizaron las cotizaciones. En la Tabla 3.3 se muestran los conceptos evaluados para cada criterio.

Tabla 3.3: Conceptos a evaluar en proceso de selección de pesos ponderados.

Criterio	Peso	Filamentos					
		PLA	ABS	PETG	Nylon	TPU	PVA
Disponibilidad [u]	0.30	Entre 5 y 3	> 10 Unidades	Entre 1 y 2	Entre 1 y 2	Sin stock	Sin stock
Dificultad	0.25	Baja	Media	Baja	Baja	Media	Media
Contracción	0.15	Mediana	Considerable	Mínima	Considerable	Considerable	Considerable
Adhesión a cama	0.10	Alta	Media	Media	Baja	Media	Alta
Costo CLP/Kg	0.20	\$25,000	\$22,500	\$25,800	\$33,000	\$35,000	\$75,000

A partir de la tabla anterior, a cada uno de los conceptos se le atribuye un valor numérico entre 0 a 4 (escala de 5 puntos (ver **Apéndice D**)), que refleje parte de este dentro del criterio en el cual se aplica. En la Tabla 3.4 se observa la matriz de pesos ponderados, mostrando en la última fila la ponderación para cada filamento.

Tabla 3.4: Valores asignados a conceptos de matriz de pesos ponderados, destacando la ponderación más alta, atribuida al filamento de ABS.

Criterio	Peso	Filamentos					
		PLA	ABS	PETG	Nylon	TPU	PVA
Disponibilidad [u]	0.35	2	4	1	1	0	0
Dificultad	0.20	4	3	4	4	3	3
Contracción	0.15	4	2	4	3	3	3
Adhesión a cama	0.10	4	3	3	1	3	4
Costo CLP/Kg	0.20	4	4	3	2	2	0
Ponderación Total	1.00	3.3	3.4	2.65	2.1	1.75	1.45

Considerando la matriz de pesos ponderados, el filamento de ABS presenta la mayor ponderación, con un valor de 3.4. Por lo cual se empleará ABS FLASHFORGE de 1.75[mm] para la impresión de los componentes. Las características principales de este filamento se

muestran en la Tabla 3.5, y los detalles completos se encuentran en la Figura 12.1 (ver **Apéndice A**).

Tabla 3.5: Características principales del filamento ABS FLASHFORGE.

Marca	FLASHFORGE
Material	ABS
Velocidad de impresión	60 - 90 [mm/s]
Temperatura de impresión	220-240[°C]
Diámetro de filamento	1.75[mm]
Resolución de impresión requerida	0.1 - 0.2[mm]

3.4.2 Caucho para elaboración fantomas

Para poder fabricar los fantomas, se escoge un material que pueda ser moldeable y cumpla con características de dureza similares al fantoma de prueba desarrollado en el CIB de la PUC (Figura 3.13). Por lo cual se realiza inspección táctil comparando esta sensación con elementos presentes en la Figura 1.29.



Figura 3.13: Fantoma fabricado en el CIB de la Pontifica Universidad Católica de Chile.

Determinando que la dureza debe ser mayor que al de una banda elástica (20 shore A) y menor que la de una goma de borrar (40 shore A).

Tomando en cuenta la información anterior y los acontecimientos globales generados por el COVID-19, se prefiere a un proveedor local, por motivos de tiempos de envío y disponibilidad. Por lo cual se utilizará el caucho de silicona RTV XL 8830 de dureza Shore A 30, distribuido por la empresa PLASTICENTER, mostrando sus propiedades principales en la

Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 extraídas de Tabla 12.1(ver Apéndice C).

Productor	PLASTICENTER
Modelo	XL 8830
Viscosidad a 25°C [cPs]	24000-29000
Dureza (Shore A)	30
Retractilidad (%)	<0.3
Relación de mezcla (%)	3-5
Densidad [g/cm^3]	1.08
Vida útil [min]	20-40
Tiempo de curado [h]	2-5

3.5 Impresión 3D y post-procesamiento

A continuación, se explicará el proceso de fabricación de los elementos necesarios para elaborar molde, considerando los implementos y herramientas para el desarrollo de la impresión FDM.

3.5.1 Impresora y software

Para la impresión de estos elementos se utilizó el equipo *Prusa I3 Mk3*. Una impresora de código libre, bastante simple de usar. Especializada en el uso de filamento PLA y ABS de 1.75[mm] de diámetro. A continuación, en la Tabla 3.7 se mostrarán las características principales de este equipo.

Tabla 3.7: Características de la impresora Prusa i3 Mk3.

Marca	Prusa
Modelo	I3 Mk3
Resolución	± 0.2 [mm]
Velocidad de impresión	80 – 150 [mm/s]
Temperatura de extrusor	270[°C]
Diámetro de filamento	1.75[mm]
Volumen de impresión	25 x 25 x 25 [cm]

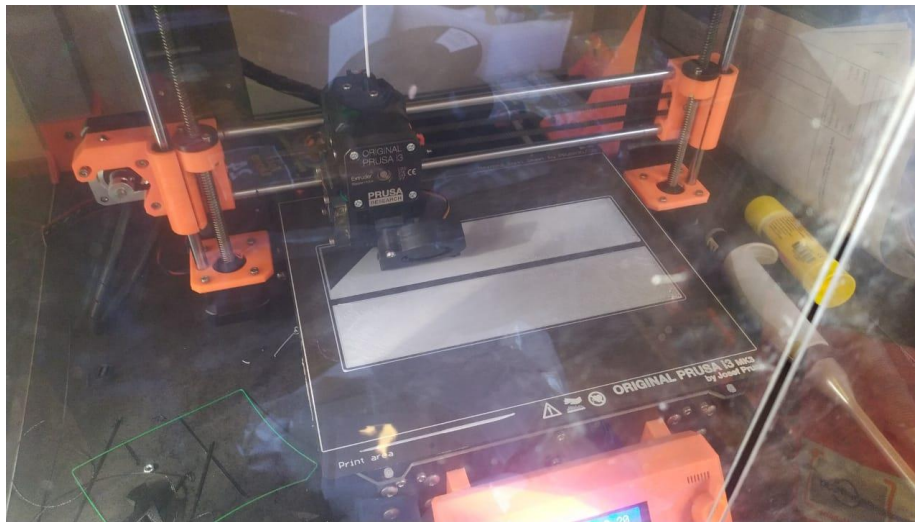


Figura 3.14: Impresora Prusa I3 Mk3 en proceso de impresión de ambas mitades del molde.

En la Figura 3.14 se puede observar la impresora utilizada, realizando el proceso de impresión de las primeras capas de la carcasa de los moldes, utilizando el calentador de cama removible y un aislamiento para mantener la temperatura dentro de esta cámara de impresión. Ya que estos dos últimos son necesarios para imprimir con este tipo de filamento (ABS).

Para poder realizar la impresión de las piezas, además de seleccionar los parámetros de funcionamiento durante este proceso, se utilizó el software *PrusaSlicer 2.1.1*.

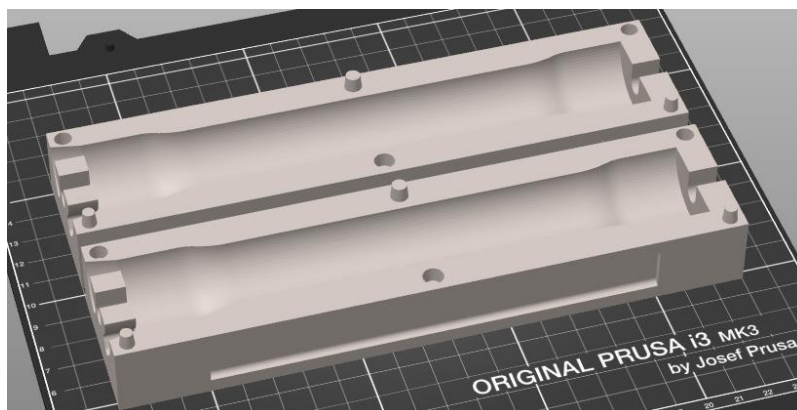


Figura 3.15: Previsualización del software PrusaSlicer 2.1.1.

Parámetros de impresión

Para poder imprimir el material de ABS es necesario una serie de parámetros que sean compatibles con la impresora, por lo que es necesario configurar estos en el software. En la siguiente tabla se muestran los principales parámetros de impresión empleados en la creación de las piezas del molde.

Tabla 3.8: Parámetros principales de impresión.

Altura de capa	0.2 [mm]
Densidad de relleno	15%
Patrón de relleno	Giroide
Diámetro de filamento	1.75[mm]
Temperatura de extrusor	260[°C]
Diámetro de filamento	1.75[mm]

Los detalles completos de estos parámetros se encuentran de la Figura 11.16 a la Figura 11.22(ver **Anexo B**).

Patrón de relleno de impresión

Como las piezas que conforman el molde, se someterán a distintos tipos de esfuerzos en el en el proceso de desgasificación y desmolde, es necesario que el relleno de esta impresión

cumpla con este requerimiento, además de disminuir la cantidad de filamento utilizado, así se reducirán costos de material y tiempo de impresión.

El software *PrusaSlicer 2.1.1*, dentro de sus parámetros de configuración de impresión cuenta con el tipo de relleno de giroide, el cual cumple con las características deseadas en la impresión.



Figura 3.16: Relleno de una impresión fallida de uno de los núcleos.

3.5.2 Impresión 3D de componentes

Luego de mostrar los parámetros utilizados para realizar la impresión de los diversos elementos. Este proceso tomo alrededor de 28 horas de impresión con un consumo aproximado de 1 [kg] de filamento. A continuación, se muestra el resultado de este proceso.



Figura 3.17: Núcleos hembra impresos mediante FDM.



Figura 3.18: Núcleos macho impresos mediante FDM.



Figura 3.19: Ambas partes del molde impresas mediante FDM.

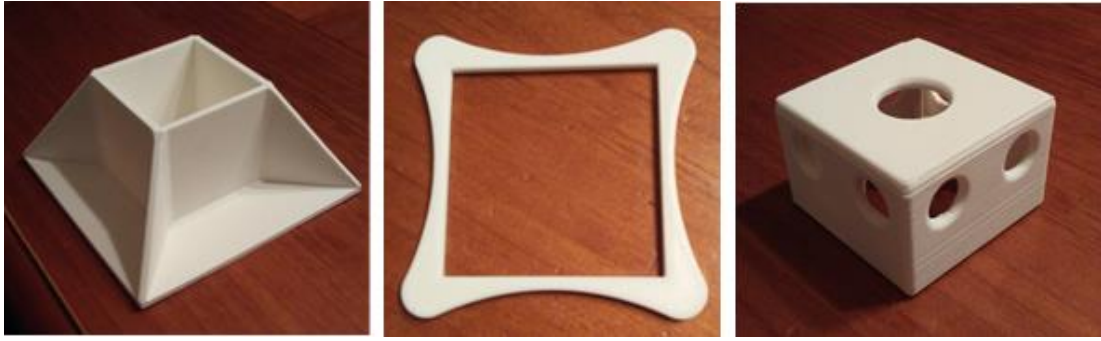


Figura 3.20: De izquierda a derecha, base del molde, contención y cúpula. Todos impresos mediante FDM.

Cabe destacar, que las dimensiones de las piezas fabricadas presentan sobremedida en algunas zonas de importancia, en donde se requiere algún tipo de holgura que permita el ensamble y desmontaje del molde. Además, ciertas partes de algunas impresiones no coinciden completamente con la geometría del diseño. En la Figura 3.21 se destacan parte de estos problemas generados.

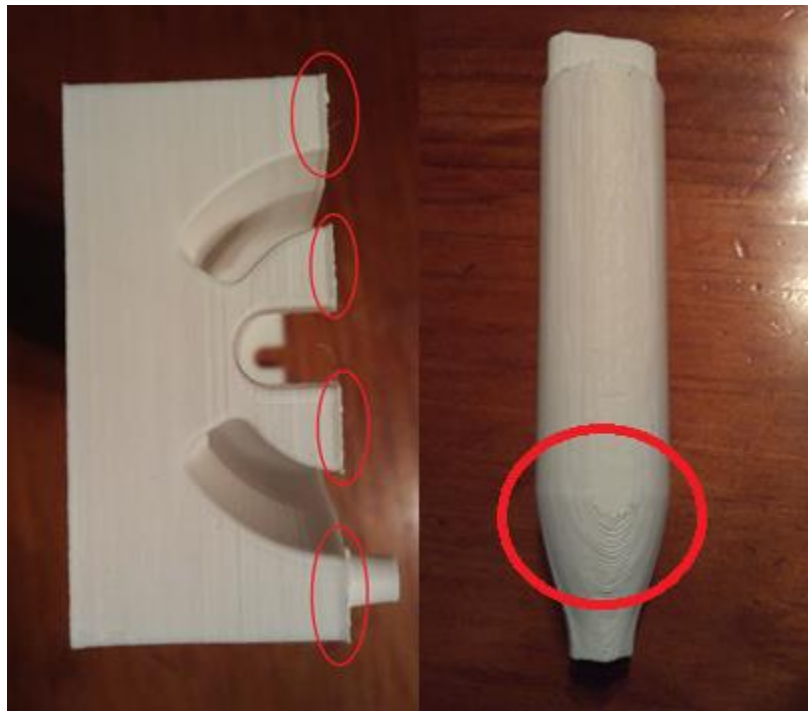


Figura 3.21: A la izquierda se señalan las rebabas generadas en el proceso de impresión, y a la derecha el efecto de escalera.

3.6 Post-procesamiento de impresión 3D

Para mejorar el acabado superficial de las piezas, se aplicarán dos métodos de pulido. En primera instancia se empleará un pulido mecánico, utilizando herramientas abrasivas en los casos que requieran de remoción de material como rebabas, sobre dimensiones o remoción de soportes de impresión. Y los casos que solo se necesite emparejar la superficie para obtener una geometría uniforme, se aplicará el método de pulido químico mediante vapor de acetona en caliente, el cual corregirá parte del problema generado entre las capas de impresión (ver Figura 1.11).

3.6.1 Pulido mecánico

En este post-procesamiento inicial, se emplearán herramientas abrasivas tales como papel de lija y herramienta multipropósito. Los implementos utilizados se encuentran detallados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Propiedades de los implementos utilizados para el proceso de lijado.

Implemento	Marca	Modelo
Herramienta rotativa multipropósito	DREMEL	3000
Kit de accesorios	DREMEL	710-RW
Lija de madera	ISESA	Grano fino 180



Figura 3.22: Herramientas utilizadas en el proceso de lijado.

Para partir esta etapa, se eliminaron todos los restos provenientes de la impresión, tales como soportes de zonas con voladizo o restos de raft que son empleados para generar la correcta fabricación de las piezas. Posteriormente, se utilizó la herramienta rotativa multipropósito para remover los excesos de material en áreas donde se requiera la unión de piezas y actualmente no se pueda.

Para finalizar el acabado superficial por lijado, se usó la lija grano fino en las partes de mayor fragilidad, como los vástagos presentes en los núcleos macho y las zonas de embotellamiento en todos los núcleos.

Terminada esta etapa de pulido, se puede realizar una comparación visual con respecto al estado previo de las piezas. Cabe destacar, que dentro de este procedimiento el núcleo D12-H y D12-M fueron destruidos por la aplicación de una fuerza no debida al momento de corroborar el correcto ensamble entre ambos elementos.

En la Figura 3.23 se logra apreciar la remoción de los soportes internos de impresión en comparación a la Figura 3.17, dejando la perforación libre para el ensamble, mostrando la correcta alineación de estos elementos en la Figura 3.24.



Figura 3.23: Vista inferior de núcleos hembra y macho luego del proceso de lijado.

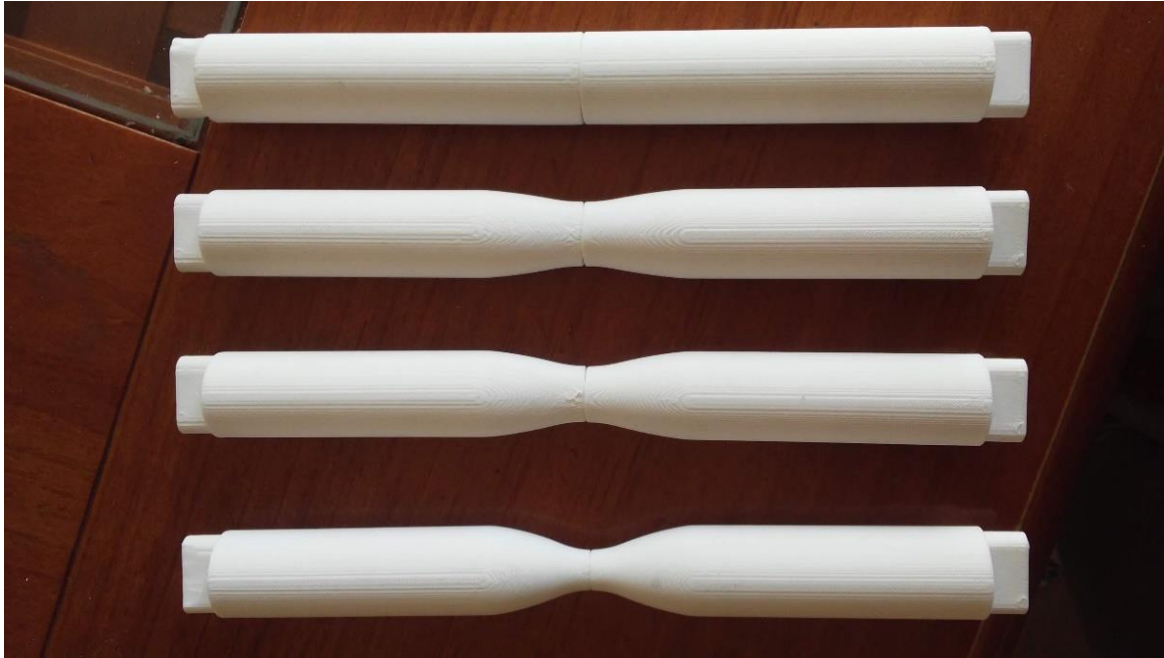


Figura 3.24: Núcleos ensamblados. En orden descendente, D-22, D-16, D-12, D-10.

3.6.2 Pulido químico

Luego del pulido mecánico, se procede a mejorar el acabado superficial del molde mediante el pulido químico utilizando vapor de acetona en caliente.

Consideraciones de importancia

El vapor de acetona es altamente volátil e inflamable, por lo que el trabajo y manipulación de este líquido debe ser en un entorno ventilado, alejado de fuentes que puedan generar la ignición, como se menciona en el punto 0. También como medidas de protección adicionales, se utilizó una mascarilla, guantes y lentes de seguridad.

Procedimiento

Dentro de un contenedor plástico se posicionan unas barras de cartón envueltas en papel aluminio dado a que este material no reacciona con la acetona.

Luego vierte acetona al interior de este contenedor sin sobrepasar el nivel de las barras mencionadas anteriormente, utilizando aproximadamente 100 [g] de acetona. Posteriormente,

sobre estas barras se coloca una base de cartón envuelta de papel aluminio, que sirve para sostener las piezas y estas no entren en contacto directo con la acetona.



Figura 3.25: Al lado izquierdo se presenta el montaje de boques al interior del contenedor para el pulido por vapor de acetona. Al lado derecho se encuentra el montaje completo.

Tras realizar este montaje, se cierra el contenedor con su respectiva tapa, y se hace flotar este sobre agua caliente a $68.3[^\circ\text{C}]$. Esto permite que la acetona se evapore, considerando que su punto de ebullición es de $56[^\circ\text{C}]$ [28] y el recipiente que la contiene presenta un coeficiente de transferencia de calor desconocido que limita la transferencia de energía, implicando que la temperatura del agua sea mayor a la temperatura de ebullición de la acetona.

Finalmente, luego de $7[\text{min}]$ y $30[\text{s}]$, se extrae el recipiente del agua caliente para extraer la base junto con la pieza pulida del contenedor, dejando curar esta durante $8[\text{h}]$.

En la Figura 3.26 se aprecian los efectos en la superficie interior del molde al aplicar este método de pulido, mostrando su acabado liso y brillante por la superficie interior del molde, con una disminución del efecto de escalera generado por proceso de impresión FDM.



Figura 3.26: Molde pulido por vapor de acetona en caliente.

Cabe destacar que los valores de temperatura del agua caliente y tiempo de pulido se consiguieron tras una serie de pruebas en retazos y piezas fallidas durante la impresión, mostrando estos datos en la Tabla 11.2 (ver

Anexo C). También, en la Tabla 11.3 se realiza la descripción de los materiales utilizados como el contenedor y papel aluminio. Finalmente, la ficha técnica de la acetona se encuentra en la Figura 12.2 (ver **Apéndice B**).

3.7 Fabricación del fantoma

3.7.1 Esquemas de procedimiento colada y desgasificación

Moldeo por colada en molde cerrado

El proceso de colada de material se realizará vertiendo el contenido de la mezcla de resina por las ranuras de la parte superior del molde, antes de colocar la cúpula en el ensamble final. Lo que se pretende es que el fluido baje por una de las ranuras dejando la otra libre para el escape del aire contenido al interior molde.

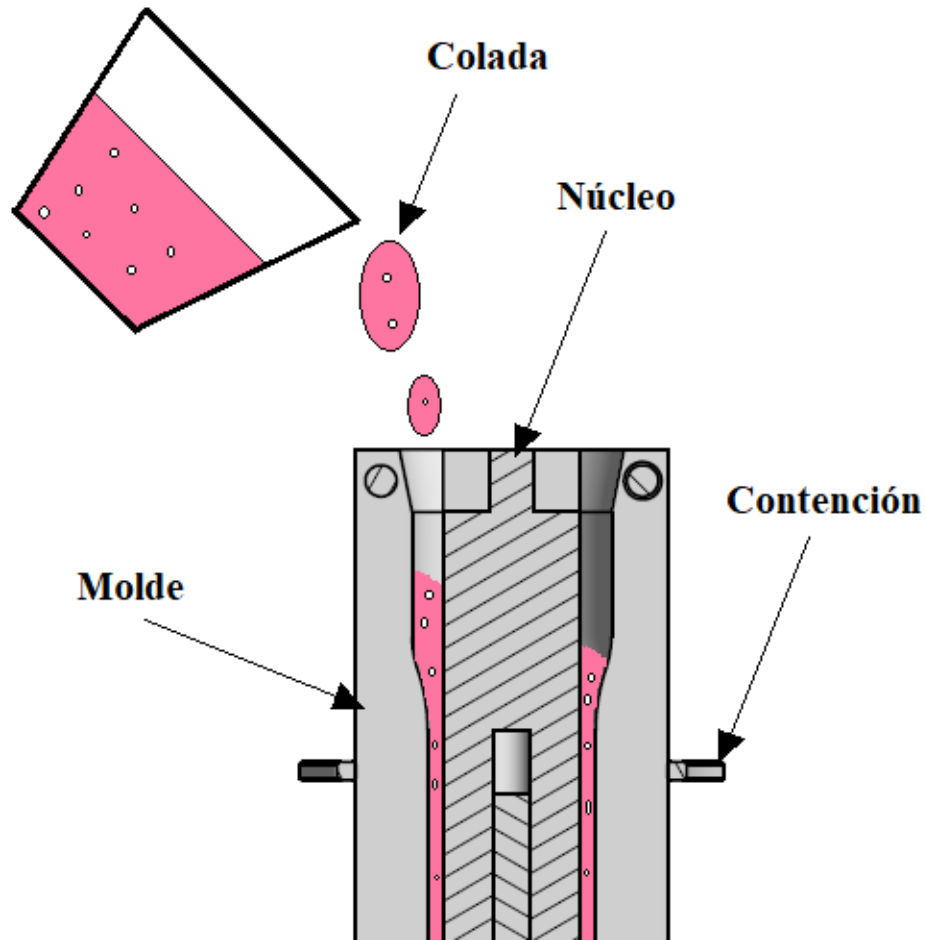


Figura 3.27: Representación del vertido de elastómero viscoso(rosado), al interior del molde diseñado.

Molde por colada en molde abierto

Este proceso consta en el vertido de la mezcla de silicona sobre ambas mitades del molde (abierto), previamente dispuestos en forma horizontal (ver Figura 3.28). Posteriormente, se posiciona el núcleo en una de las mitades. Luego, unen los moldes por una de sus aristas más largas (Figura 3.29 (a)), para finalizar con el ensamble mediante el movimiento gradual de ambas mitades sellando el contenido en su interior (Figura 3.29 (b)).

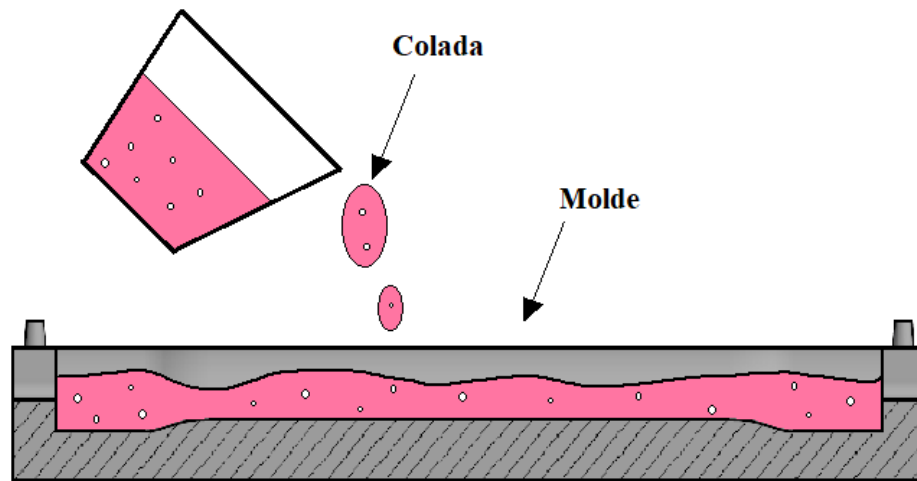


Figura 3.28: Representación de colada por molde abierto

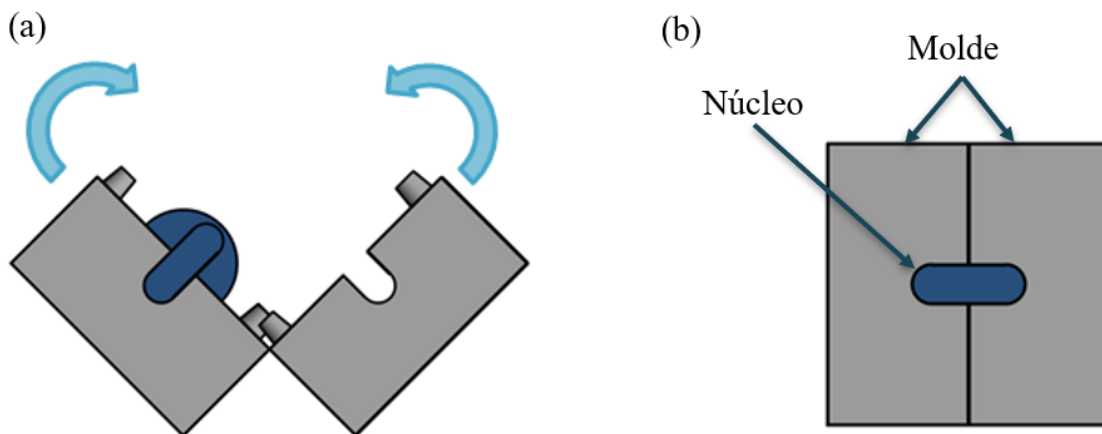


Figura 3.29: (a) Proceso de cierre de molde, posterior a la colada por molde abierto; (b) Molde completamente cerrado.

Desgasificación

El proceso de desgasificación del caucho de silicona se realizará situando el ensamble completo (posterior a la colada de material) dentro de un entorno en el cual se genere un vacío (explicado en el punto 1.11), lo que permitirá la extracción de las burbujas de aire que

puedan quedar atrapadas luego de realizar la colada de material. A continuación, se mostrará un esquema de este proceso ilustrando la funcionalidad de la cúpula en la desgasificación.

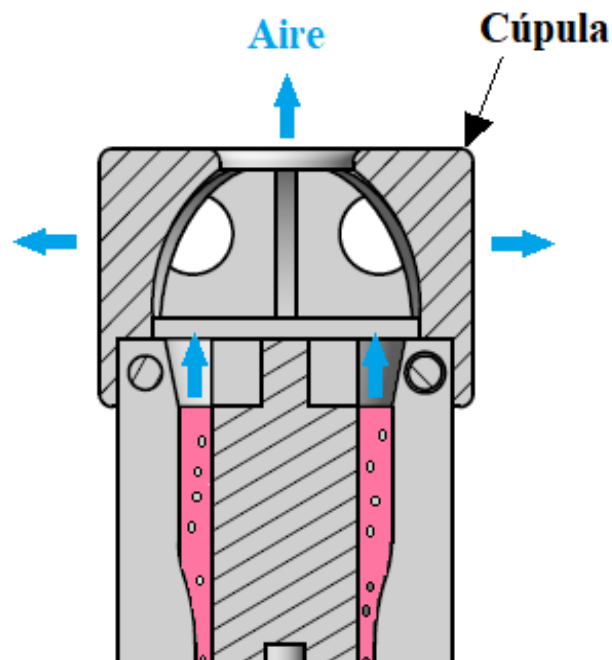


Figura 3.30: Representación del escape del aire (color celeste) al momento de desgasificar una mezcla con burbujas de aire.

Este proceso parte por el posicionamiento del ensamble completo al interior de la bolsa de vacío, dejando la cúpula directamente bajo la válvula unidireccional de extracción de aire de la bolsa. Para evitar el contacto de los cantos vivos del molde con la bolsa, se envuelve el ensamble con una tela, y se cierra la bolsa.

Posteriormente se enciende la aspiradora a su máxima potencia, conectando la boquilla directamente a la válvula de extracción de aire de la bolsa. Mientras se genera el vacío, se presionan los lugares de la bolsa en donde se observen acumulaciones de aire. Finalmente se apaga la aspiradora, separándola de la bolsa de vacío, y se cierra la válvula con su respectiva tapa.

En la Figura 3.31 (A), se puede observar como el molde se posiciona al interior de la bolsa de vacío y en (B) como queda este después de la extracción de aire mientras está envuelto en la tela.

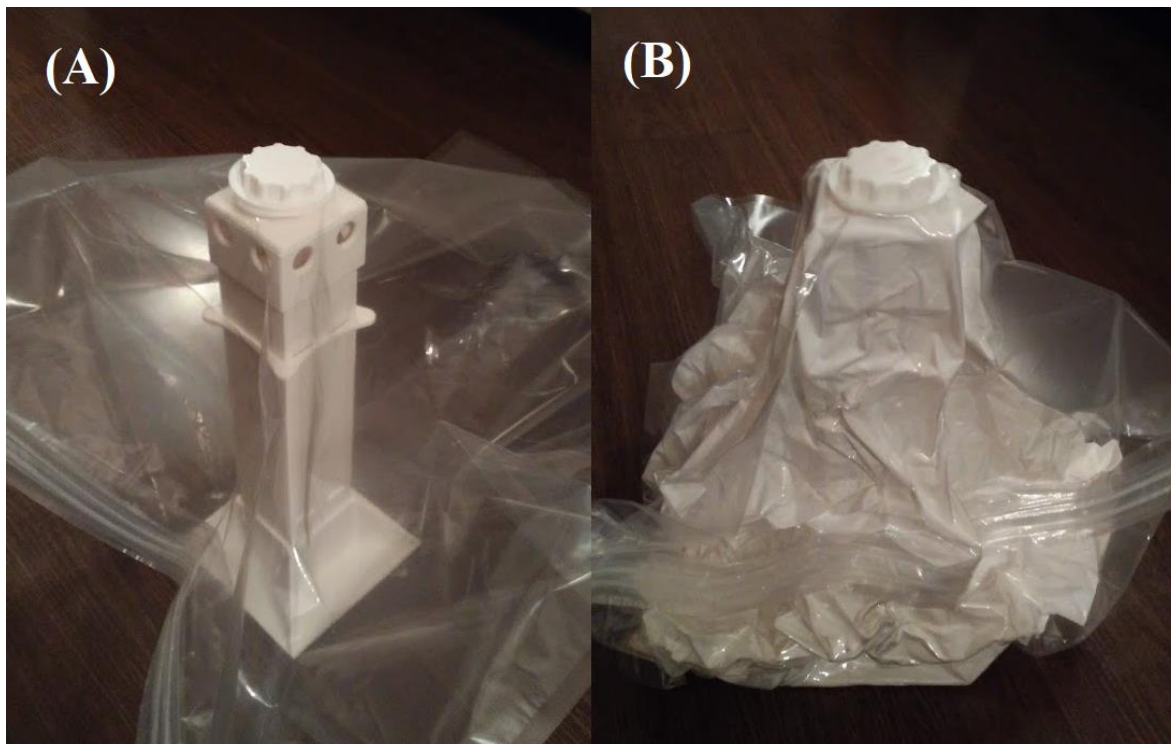


Figura 3.31:(A) Montaje de ensamble y bolsa previo a desgasificar. (B) Montaje post desgasificación.

Cálculo de volumen de silicona

Tabla 3.6. De este modo se requiere mezclar 100 partes de caucho de silicona y 3,4 o 5 partes del agente de curado por peso con exactitud antes de realizar la colada.

Para saber la cantidad de caucho y catalizador que se empleará en cada fantoma, se extrae la información del volumen que ocupa cada diseño 3D de éstos, además del error de cálculo asociado entregado por el software *Inventor 2018*.

Tabla 3.10: Volúmenes del modelo CAD de cada fantoma.

Fantoma	Volumen [ml]	± Error
D22	57.3	0.188%
D16	56.2	0.192%
D14	55.0	0.196%
D12	53.6	0.201%
D10	48.8	0.298%

A partir de los datos de la tabla anterior, utilizando la densidad del caucho de silicona equivalente (ver **Apéndice C**) $1.08[g/cm^3]$, y considerando que la cantidad de catalizador a utilizar corresponde a un valor entre 3% y 5% del peso de caucho a utilizar. Los valores mínimos de material a emplear se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.11: Transformación de volumen a peso, con porcentaje de catalizador respectivo en función de los valores de Tabla 3.10.

Fantoma	Peso [g]	Catalizador [g]
D22	61.9	1.9 – 3.1
D16	60.7	1.8 – 3.0
D14	59.4	1.8 – 3.0
D12	57.9	1.7 – 2.9
D10	52.7	1.6 – 2.6

3.7.2 Preparación y moldeo de fantomas

Considerando los valores de la Tabla 3.11 y en el punto 5.1 (análisis de problemas de diseño) de este trabajo, se realizará la explicación del procedimiento para la elaboración de 1 de los fantomas, siendo este el fantoma **D10**. Realizando dos pruebas, una mediante colada de molde cerrado, y la otra por molde abierto.

Primero se procede a realizar la mezcla de del caucho de silicona junto a su catalizador utilizando 73[g] de caucho de silicona y 2[g] de catalizador equivalentes al 4.1% del peso del

caucho. Se utiliza una cantidad mayor de material que el dispuesto en la Tabla 3.11 para el fantoma D10, de esta forma se compensan posibles pérdidas durante manipulación de este contenido. Posteriormente se vierte esta mezcla por la abertura superior del molde, siguiendo la Figura 3.27.

Este proceso parte con la mezcla de 74[g] de silicona con 3[g] de catalizador equivalentes al 4.0% del peso del caucho. Luego se dispone de ambas mitades del molde en posición horizontal, de tal forma que la cavidad del molde queda hacia la parte superior, como se muestra en la. Posteriormente se vierte la mitad de la mezcla en cada mitad del molde como se muestra en la Figura 3.28, esperando a que el caucho se acomode lentamente en los espacios de la cavidad. Tras esto, se posiciona el núcleo completo previamente ensamblado (ensamble de núcleo macho con núcleo hembra) en una de las mitades. Finalmente se juntan los moldes para poder hacer el ensamble (Figura 3.12), incluyendo la base y contenciones posteriormente. Con esto el conjunto está preparado para pasar a la etapa de desgasificación.

Luego del ensamble, ambos moldes están listos para aplicar la desgasificación en bolsa de vacío como se muestra en la Figura 3.31. Después de 12[h] de curado, se desmoldan las piezas. Mostrando los resultados de este proceso en el siguiente capítulo.

4 Resultados de fantoma

Moldeo por colada en molde cerrado

El resultado obtenido no cumple con las características deseadas, debido a que el caucho de silicona no avanzó de la manera deseada dada su alta viscosidad. Logrando que este avanzara aproximadamente 3[cm] desde la ranura del molde por la cual se realizó la colada del material, alcanzando a generar solo un extremo de mayor espesor.



Figura 4.1: Primer intento de realización de fantoma.

Moldeo por colada en molde abierto

En la Figura 4.2 se logra observar como la pieza, obtiene la geometría establecida en los bocetos mostrados en la Figura 3.2, logrando la coartación de este fantoma (zona oscurecida en la mitad de la pieza), el engrosamiento de sus extremos, y la superficie cilíndrica lisa en el contorno central.



Figura 4.2: Fantoma D-10 luego del proceso de desmolde.

Uno de los problemas presentes dentro de este fantoma, es la presencia de burbujas atrapadas en su interior, siendo un problema para el estudio mediante MRI, ya que pueden generar alteraciones durante la toma de datos mediante éste método. Esto se puede ver de mejor manera en la Figura 4.3 con las manchas de un color más claro en el fantoma, siendo estas generadas por el paso de la luz a través de las zonas de menor espesor, provocado por el aire atrapado.



Figura 4.3: Imagen enfocada a las burbujas de aire presentes en el fantoma D-10.

5 Proceso de rediseño de molde

Durante el proceso de fabricación de fantasmas, se presentaron ciertos problemas que dificultan el desarrollo y obtención el objetivo principal de este trabajo. Por lo cual se explicará cada uno de estos, para posteriormente realizar un proceso de mejora y rediseño de los elementos fabricados.

5.1 Análisis de problemas en diseño inicial

A continuación, se explicará en detalle cada uno de los problemas y dificultades presentes en el proceso de fabricación, agrupando estos en problemas relacionados a la impresión 3D, moldeo y fantoma resultante.

5.1.1 Impresión 3D

Los principales problemas presentes en la impresión tienen relación con contracción del filamento con la temperatura ambiental y el efecto escalera generado en la deposición de material.

Contracción del material de impresión

El material utilizado para la impresión de los elementos (ABS) es reactivo ante los cambios de temperatura, por lo que durante este proceso se utilizó una caja de aislamiento. A pesar de esto, las condiciones ambientales de temperatura no fueron favorables, ya que en el periodo de fabricación de estas piezas la temperatura exterior máxima no superó los 10[°C](Agosto, 19, 2021[39]). Lo que el efecto de contracción (wrapping) del material no pudo ser evitado.

Escalonamiento en superficie de núcleos

Dada la orientación horizontal en la impresión de los núcleos, el efecto de escalera generado por el proceso de FDM, generó irregularidades en la cilindridad de esta pieza, dejando una superficie escalonada y excéntrica (Figura 3.21).

5.1.2 Dificultades en proceso de moldeo

Durante el proceso de colada, curado y desmolde, se presentaron una serie de problemas y dificultades en la realización de éstas. Lo cual no permite completar el proceso de fabricación adecuado. A continuación, se realizará una descripción de estos problemas.

Viscosidad de silicona

La viscosidad de la resina utilizada, dificultó la colada de material, dada su resistencia al avance al rellenar los espacios del molde. Esto a su vez, limita el escape del aire presente el interior de la mezcla, generando burbujas dentro del fantoma al curar la mezcla.

Cambio de método de fabricación

Inicialmente, el diseño del molde facilitaba el proceso de cola del material por la parte superior de éste. Pero la viscosidad del material impedía el flujo adecuado hacia la parte inferior del molde, por lo cual se realizó el proceso de moldeo por transferencia utilizando una jeringa médica. La resina logró descender unos pocos centímetros por el molde, obteniendo sólo la parte superior del fantoma (Figura 4.1). A partir de esto, para utilizar los materiales e implementos disponibles, se modificó el proceso de moldeo realizando la cola del material directamente a la mitad de cada molde, obteniendo mejores resultados, pero con la presencia de burbujas de aire (Figura 4.2).

Filtraciones de resina

Al realizar el moldeo mediante el proceso modificado, parte del material se escapa por los costados, generando pérdida de material y posibles huecos al interior del molde y fantoma. En la Figura 5.1 se observa como por la parte inferior se filtró silicona, solidificándose en el proceso de curado



Figura 5.1: Vista inferior del molde posterior al proceso de curad, con filtraciones de silicona.

Dificultad en desmolde

Algunos de los elementos diseñados presentan una mayor complejidad al momento de desmoldar. Lo que implica que se debe aplicar fuerzas innecesarias, que podrían dañar eventualmente alguna una de las piezas.

- **Separación del molde**

Las ranuras presentes en los costados del molde no presentan una profundidad adecuada. Lo que dificulta la separación de esta pieza, siendo necesaria la aplicación de una fuerza mayor.

- **Remoción del núcleo del molde**

la parte superior e inferior del molde no contempla algún tipo de hendidura que facilite la extracción del núcleo junto con el fantoma.

Además, la aplicación de las fuerzas en las manijas de cada núcleo genera un momento flector en el punto de unión de estos elementos. Ocasionando la fractura del vástago del núcleo *D10-M*.



Figura 5.2: Núcleo D10-H y D10-M posterior a la fractura del vástago.

- **Separación de núcleos**

Las manijas presentes en los extremos de todos los núcleos no presentan algún tipo de agarre que facilite la tracción de estos elementos, siendo aún más difícil la separación de estas piezas cuando se aplica algún tipo de material desmoldante, que lubrica gran parte de la superficie del molde.

5.1.3 Defectos presentes en fantoma

Luego del proceso de curado y desmolde, se obtiene el fantoma como resultado final. Este presenta la geometría y dimensiones establecidas en los parámetros mencionados en la etapa inicial de diseño, pero presenta algunas irregularidades que pueden afectar la funcionalidad de esta pieza.

Burbujas de aire

Al observar Figura 4.3, se logra observar la presencia de algunos puntos de un color más claro que el resto de la superficie de esta pieza. Siendo esto generado por el aire que no pudo escapar antes de solidificarse la resina. Las burbujas presentan una geometría ovalada, con

la parte más ancha en la misma dirección que el posicionamiento de del molde (vertical o a lo largo del fantoma) durante la etapa de curado.

También existe una mayor concentración de burbujas en el extremo superior (Figura 5.3 (A)) del fantoma en comparación a la parte inferior (B). Lo cual confirma la dirección de escape del gas.

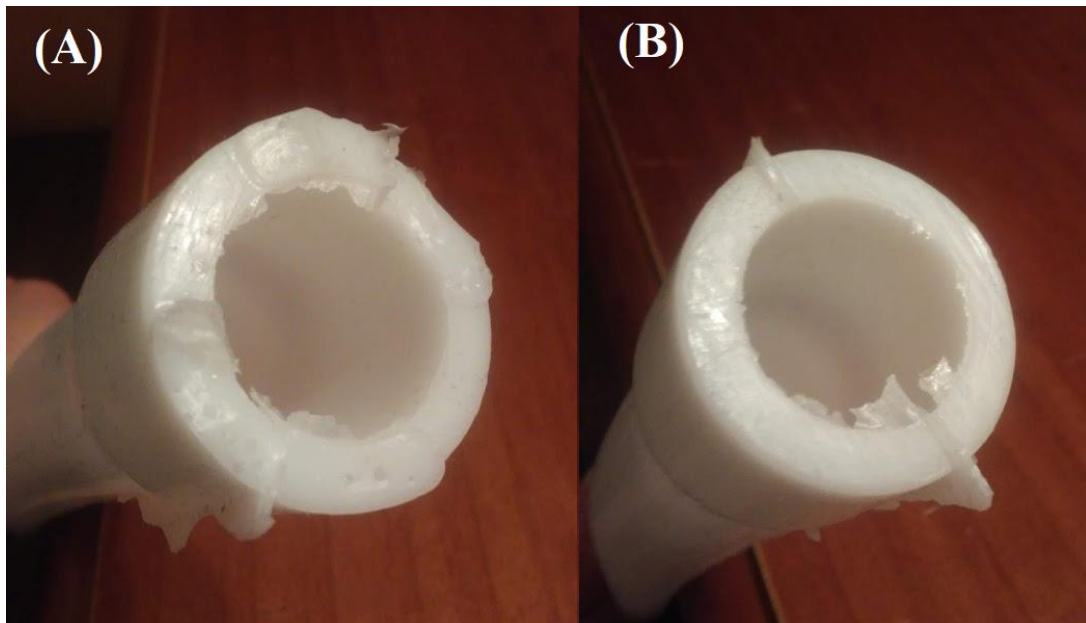


Figura 5.3: Comparación de cantidad de burbujas entre parte superior (A) y parte inferior (B) del fantoma.

5.2 Pruebas de fabricación de molde rediseñado

A partir de los problemas mencionados anteriormente, se realiza una serie de cambio en el diseño con el fin de mejorar los resultados, además de facilitar el proceso de fabricación. Considerando una orientación horizontal para disminuir la trayectoria de recorrido de las burbujas, incremento en el área y distribución de las salidas de aire, uso de filamento de PLA para disminuir las contracciones térmicas. Estas modificaciones se representan en el **Anexo F**. Los planos completos se pueden apreciar en el **Anexo E**. Y los implementos para llevar a cabos los procedimientos se encuentran en el **Anexo H**.

Para encontrar un mejor método de fabricación de fantomas, se realizan 3 pruebas de fabricación del fantoma D10, variando el proceso de desgasificación, utilizando la misma

silicona y el proceso de colada por molde abierto mostrado en la figura Figura 3.28. En la Tabla 5.1 se presenta la cantidad de silicona y catalizador utilizada en cada una de las pruebas.

Tabla 5.1: Cantidad de silicona y catalizador utilizada en cada prueba.

Prueba	Desgasificado	Silicona [g]	Catalizador [g]	Catalizador [%]
Prueba 1	Sin aplicar	81.56	3.0	3.7%
Prueba 2	Cámara de vacío	85.08	3.5	4.1%
Prueba 3	Vibración	82.16	2.5	3.0%

5.2.1 Prueba 1 (Sin desgasificar)

En esta prueba se aplica el mismo procedimiento de colada por molde abierto, sin aplicar método de desgasificación. Obteniendo como resultado la Figura 5.4.



Figura 5.4: Resultado de prueba 1, con burbujas concentradas en la parte superior del fantoma.

5.2.2 Prueba 2 (cámara de vacío)

Para esta prueba, luego del proceso de colada de material y ensamble de las piezas. Se introduce el molde en la cámara de vacío durante 1[h], con una presión de vacío de 0,8 [bar]. En la Figura 5.5 (izquierda) se aprecia el molde previo a extracción de aire; en esta misma figura (derecha) se aprecia el molde tras el proceso de desgasificación.

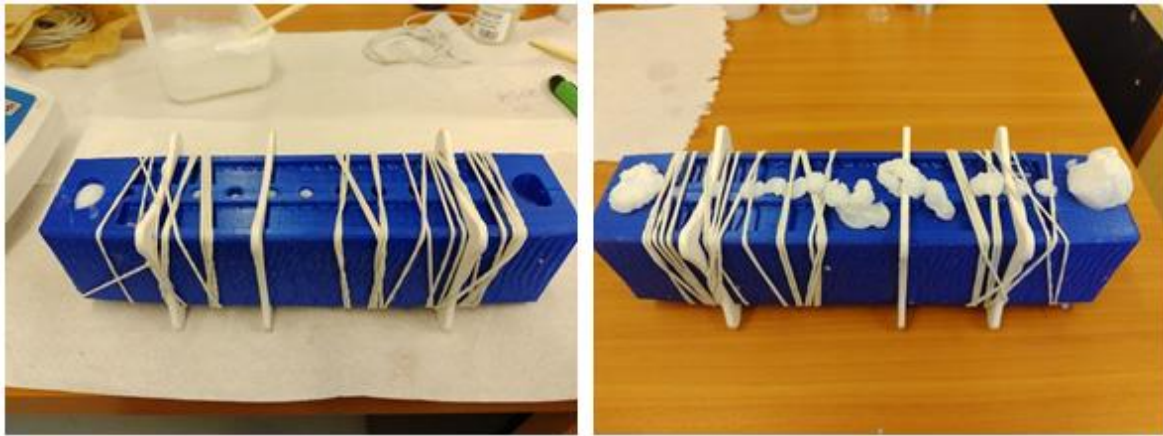


Figura 5.5: Comparación anterior (izquierda) y posterior (derecha) del proceso de desgasificación en cámara de vacío.

Posteriormente se dejó curar durante 1 día el ensamble, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.6.



Figura 5.6: Resultado de prueba 2. Mostrando los surcos generados en la superficie del fantoma.

En la imagen anterior se aprecian cavidades a lo largo de todo el fantoma, generando irregularidades en el espesor de la pared de este.

5.2.3 Prueba 3 (vibración)

A diferencia de la prueba 2, se disminuye el porcentaje de catalizador con el motivo de aumentar el tiempo de trabajo de la silicona antes de que este empiece a solidificar, pasando de 4.1% a 3% de catalizador con respecto al peso de silicona. Lugo de realizar la colada de material, se cierra el molde y se posiciona en la mesa vibradora, configurándola a máxima potencia durante un periodo de 25[min]. Las características y configuración de la mesa vibradora se muestran en la Tabla 11.7 (ver **Anexo H**).

Luego del proceso de extracción de gases mediante vibrado, se deja curar molde por un periodo de 2 días, para asegurar la solidificación de la mezcla debido a la reducción de catalizador. En la Figura 5.7 se observa el fantoma resultante de esta prueba.



Figura 5.7: Resultado de prueba 3, con pequeñas burbujas en la parte superior del fantoma.

5.3Análisis de pruebas de rediseño

Considerando los resultados obtenidos tras las pruebas, la prueba 1 presenta mejoras notorias en la distribución de las burbujas presentes al interior del fantoma. En la Figura 4.2 se puede ver como las burbujas están presentes en distintos puntos a lo largo de todo el fantoma, a diferencia de la Figura 5.4 que presenta una acumulación de éstas en la parte superior.

El resultado obtenido en la prueba 2, mostró un empeoramiento de las características superficiales del fantoma, por lo que se determina que el proceso de desgasificación utilizando cámara de vacío, no es el adecuado para la resina RTV XL 8830 utilizando el

molde diseñado. Cabe señalar que la presión de vacío generada es de 0.8[bar], siendo menor a 1[bar] indicado en el capítulo 1.11, siendo esta una posible causa en la formación de los surcos.

Con respecto a la prueba 3, el proceso de vibrado mostro mejoras significativas en comparación a la prueba 1. Obteniendo una mayor concentración de burbujas cercana a los puntos de escape de aire. Lo que podría indicar una mejora en el procedimiento. Siendo este último, el mejor resultado obtenido, tomando en cuenta las condiciones de fabricación establecidas para el desarrollo de este trabajo.

5.4 Esquema de procedimientos empleados en fabricación

A modo de resumen se genera un esquema con las distintas etapas de elaboración del fantoma D10 mediante el procedimiento con mejores resultados, indicando características y especificaciones generales de estos procedimientos. En la Figura 5.8 se ilustra este esquema.

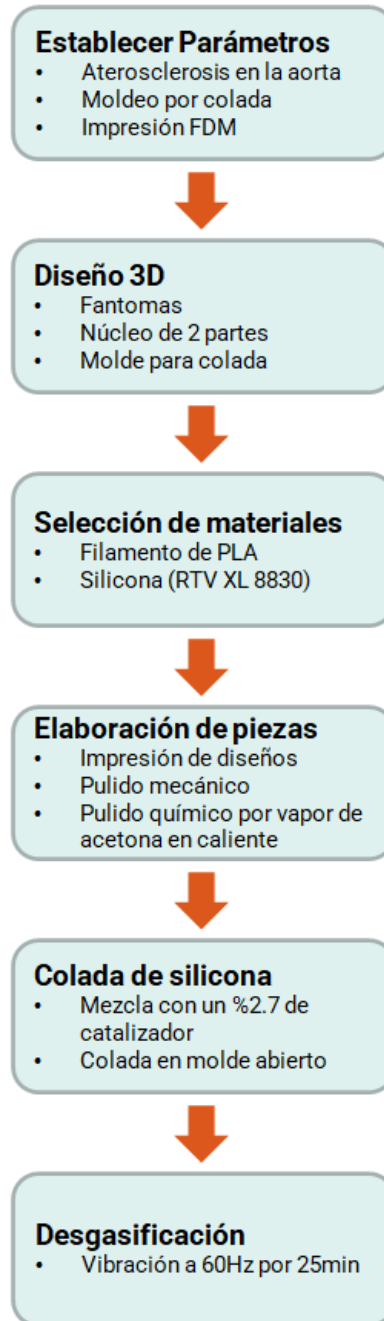


Figura 5.8: Esquema de fabricación del fantoma D10.

6 Ensayos de microtensión en fantasmas

Para entender el comportamiento mecánico de mezcla de silicona empleada en la fabricación de estos fantasmas, se realizan ensayos de microtensiones a 5 fantasmas elaborados previamente al rediseño del molde. Gracias a una colaboración del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), quienes llevaron a cabo estas pruebas, se extrae de cada uno de los 5 fantasmas una probeta en la dirección longitudinal del fantoma denominada como “L”, y otra en la sección circular denominada como “C”. Las longitudes aproximadas de las probetas son de 10[mm] de largo, con espesor y ancho de 2.5[mm] para la sección transversal como se muestra en la Figura 6.1. Las medidas de cada probeta se encuentran en la Tabla 11.8 (ver **Anexo I**).

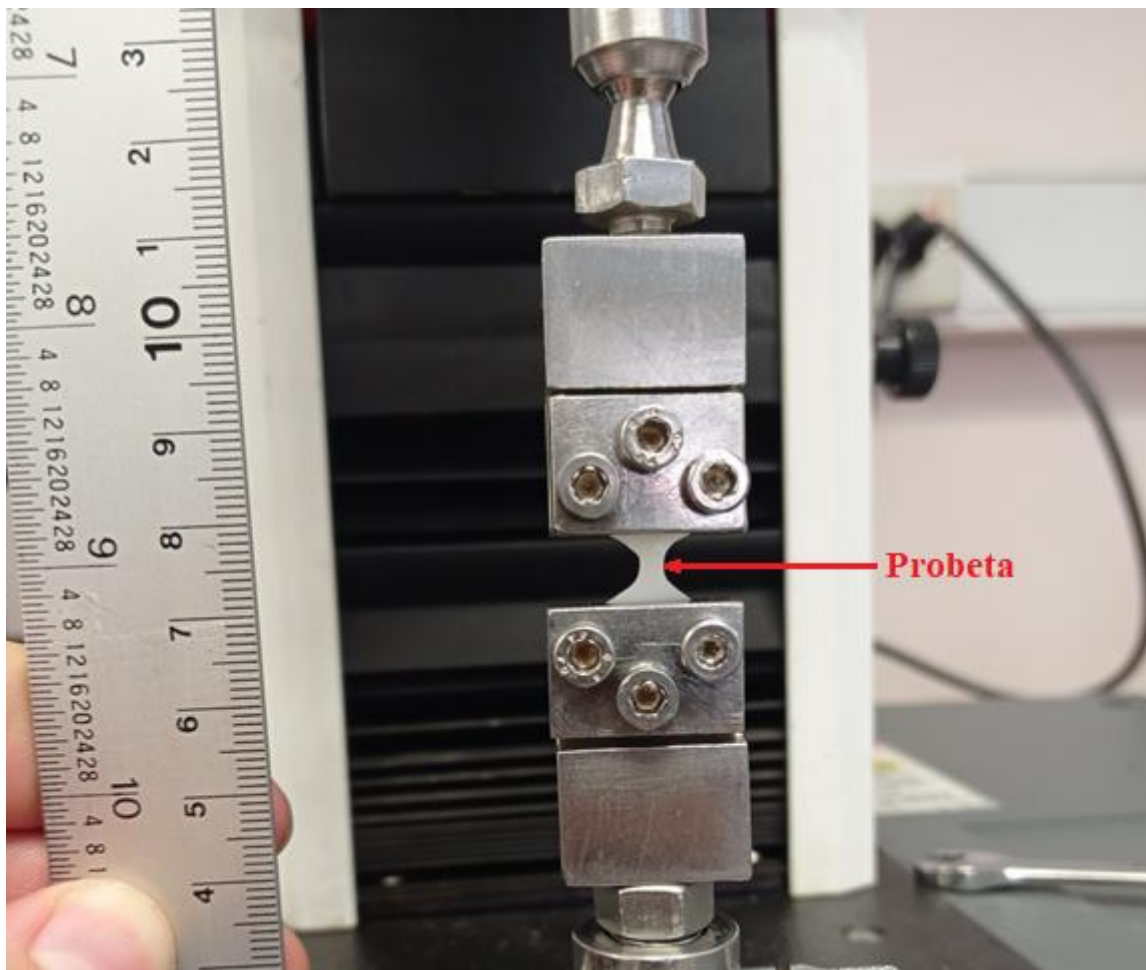


Figura 6.1: Preparación de ensayo de tracción de la probeta L2 (longitudinal 2).

Una de las propiedades mecánicas de interés para el estudio de los fantoma, es el módulo de Young, el cual representa la rigidez del material. Para esto se toman las gráficas de esfuerzo en función de la deformación unitaria de las muestras con menor y mayor pendiente en la gráfica. Esto se puede observar en la Figura 6.2. El resto de las curvas se presentan de la Figura 11.32 a la Figura 11.34 (ver **Anexo I**).

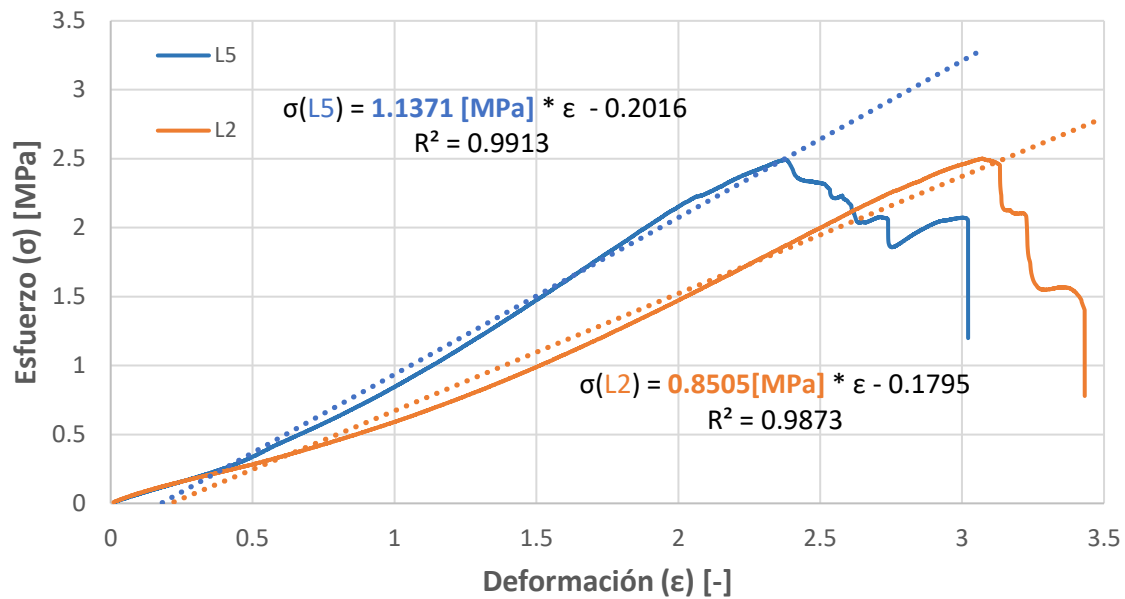


Figura 6.2: Gráfico de Esfuerzo en función de la deformación de las probetas L2 y L5, indicando sus pendientes en la región elástica.

A partir de las pendientes de las curvas en la zona elástica, mostradas en la figura anterior, se obtienen 2 valores de módulo de Young. El valor mínimo corresponde a la probeta L2, y el mayor corresponde a la probeta L5. Dejando un rango de posibles módulos elásticos entre estos los valores 0.8505[MPa] y 1.1371[MPa].

7 Costos de fabricación

A continuación, se presentan los costos asociados a la fabricación de uno de los fantasmas previos al rediseño. Separando estos costos en variables y fijos.

Tabla 7.1: Costos fijos y variables del proceso de fabricación del fantoma (previo rediseño)

Ítem	Costo Unitario	Unidad (S.I.)	Cantidad empleada	Total
Caucho de silicona	\$22,000	[Kg]	0.08	\$1,760
Filamento ABS	\$27,000	[Kg]	1.3	\$35,100
Lijas	\$2,000	[-]	1	\$2,000
Acetona	\$5,000	[l]	1	\$5,000
Depreciación Impresora	\$156	[h]	30	\$4,680
Costo Variable				\$48,540
Diseño	\$8,000	[h]	63	\$504,000
Selección de materiales	\$8,000	[h]	18	\$144,000
Preparación de impresión	\$8,000	[h]	2	\$16,000
Preparación de moldeo	\$8,000	[h]	4	\$32,000
Terminaciones	\$8,000	[h]	2	\$16,000
Horas Trabajadas	\$8,000	[h]	89	
Costo Fijo				\$712,000
Costo total				\$760,540

Se puede observar en la tabla anterior, que el costo fijo representa un 93% del costo total dada la cantidad de horas requeridas para poder elaborar una pieza. En el caso de realizar más fantasmas de características similares, el costo fijo por fantoma podría ser reducido significativamente.

8 Conclusiones

Con el levantamiento de información realizado en el marco teórico, es posible establecer los procedimientos y materiales necesarios poder fabricar tooling de diferentes características. Determinado características de los filamentos más comunes usados en la impresión 3D, métodos de pulido de estos materiales, métodos de moldeo de polímeros

Para entender de mejor manera el procedimiento de elaboración de tooling y poder aplicarlo en diseño de nuevos elementos, se genera un esquema de 7 etapas, las cuales son: establecer parámetros; generar diseño; seleccionar materiales; producir molde; moldear; desgasificar; curar y desmoldar. Este esquema se representa en la Figura 2.1, explicando brevemente cada uno de los puntos.

Luego de determinar los requisitos que debe cumplir el fantoma en el planteamiento del problema de diseño, es posible realizar los distintos bocetos y diseños con las dimensiones y geometría requeridas del fantoma utilizando el software **AutoCAD® 2018** versión estudiantil para los elementos en 2D, y el programa **Inventor® 2018** para los elementos 3D.

Utilizando los CAD generados a partir de los diseños 3D se logra imprimir los componentes mediante FDM. Estas piezas se elaboraron con filamento de ABS en la impresora Prusa I3 MK3 inicialmente, y posteriormente en la impresora Ultimaker 2+ con filamento de PLA en el rediseño del molde.

Tras la impresión y pulido de los componentes, se procede al moldeo de los fantasmas que luego de ciertas modificaciones en el proceso de moldeo, diversas pruebas de variación de porcentaje de catalizador en la mezcla de silicona, y diferentes métodos de desgasificación, se determina que el proceso de colada de silicona en molde abierto con posterior compresión, y desgasificación por vibrado, presenta los mejores resultados con la menor concentración de burbujas de aire.

9 Recomendaciones y trabajos futuros

Para futuros trabajos, se recomienda tener en cuenta la viscosidad del material a moldear, dado que este fue uno de los principales problemas al momento de extraer las burbujas presentes en el interior del molde. La viscosidad del caucho de silicona (24.000-29.000[cPs]), impedía el correcto desplazamiento del aire en el interior del ensamble, por lo que el uso de un material similar de menor viscosidad podría mejorar este aspecto.

Otro punto a tener en cuenta es el filamento a utilizar en la impresión 3D junto con la temperatura ambiente. El efecto de contracción (wrapping) es muy común en el filamento de ABS, siendo de menor medida en el de PLA. Por lo que tener una cámara aislante en la impresora es de suma utilidad para evitar esta deformación y así mejorar la calidad de la impresión.

Para los ensambles y elementos deslizantes presentes en el diseño, considerar las tolerancias de cada impresora podría facilitar el proceso de ajuste de medidas, evitando el pulido innecesario de estas áreas.

El uso de diferentes técnicas de impresión como la SLA (estereolitografía) junto al desarrollo de resinas más flexibles, podrían reemplazar el proceso de fabricación mostrado en este trabajo.

10 Referencias Bibliográficas

- [1] “Cardiovascular diseases (CVDs)”. [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accedido dic. 21, 2021).
- [2] “Atherosclerosis - ¿Qué es la aterosclerosis? | NHLBI, NIH”. <https://www.nhlbi.nih.gov/es/salud/aterosclerosis> (accedido mar. 27, 2022).
- [3] “Arterioesclerosis/ateroesclerosis - Síntomas y causas - Mayo Clinic”. <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/arteriosclerosis-atherosclerosis/symptoms-causes/syc-20350569#> (accedido mar. 27, 2022).
- [4] J. Brunette, R. Mongrain, y J. C. Tardif, “A realistic coronary artery phantom for particle image velocimetry: Featuring injection-molded inclusions and multiple layers”, *J. Vis.*, vol. 7, n° 3, pp. 241–248, 2004, doi: 10.1007/BF03181639.
- [5] S. G. Yazdi *et al.*, “A novel fabrication method for compliant silicone phantoms of arterial geometry for use in particle image velocimetry of haemodynamics”, *Appl. Sci.*, vol. 9, n° 18, 2019, doi: 10.3390/app9183811.
- [6] M. E. Laughlin, S. E. Stephens, J. A. Hestekin, y M. O. Jensen, “Development of Custom Wall-Less Cardiovascular Flow Phantoms with Tissue-Mimicking Gel”, *Cardiovasc. Eng. Technol.*, vol. 13, n° 1, 2022, doi: 10.1007/s13239-021-00546-7.
- [7] B. Redwood, F. Schöffner, y B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications*. 3D Hubs B.V., 2017.
- [8] I. Gibson, D. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer New York, 2014.
- [9] “What is FDM 3D Printing? – Simply Explained | All3DP”. <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> (accedido dic. 21, 2021).
- [10] N. Wyatt, *3D Printing for Model Engineers: A Practical Guide*. Crowood Press, 2018.
- [11] L. W. Kloski y N. Kloski, *Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the*

Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution. Make Community, LLC, 2016.

- [12] C. Duran, V. Subbian, M. T. Giovanetti, J. R. Simkins, y F. R. Beyette, “Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, n° 5, pp. 528–534, 2015, doi: 10.1108/RPJ-09-2014-0117.
- [13] “How to fix warping – Ultimaker Support”. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012113239-How-to-fix-warping> (accedido dic. 21, 2021).
- [14] C. C. Kuo, C. M. Chen, y S. X. Chang, “Polishing mechanism for ABS parts fabricated by additive manufacturing”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, n° 5–8, pp. 1473–1479, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9845-0.
- [15] J. Vanek, J. A. G. Galicia, y B. Benes, “Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication”, *Eurographics Symp. Geom. Process.*, vol. 33, n° 5, pp. 117–125, 2014, doi: 10.1111/cgf.12437.
- [16] M. F. Vicente, M. Canyada, y A. Conejero, “Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers”, *Int. J. Rapid Manuf.*, vol. 5, n° 1, p. 116, 2015, doi: 10.1504/ijrapidm.2015.073551.
- [17] “Ultimaker S5: Reliability at scale”. <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5> (accedido mar. 27, 2022).
- [18] “Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PVA”. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pva/> (accedido dic. 21, 2021).
- [19] P. Pecho, V. Ažaltovič, B. Kandra, y M. Bugaj, “Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 40, pp. 861–868, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.121.
- [20] P. K. Mishra, P. Senthil, S. Adarsh, y M. S. Anoop, “An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts”, *Compos. Commun.*, vol. 24, n° December 2020, p.

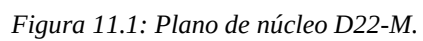
100605, 2021, doi: 10.1016/j.coco.2020.100605.

- [21] “Acabados y terminación - Impresión 3D”. <https://www.3dworks.cl/post/acabados-y-terminacion-impresion-3d> (accedido dic. 21, 2021).
- [22] A. Colpani, A. Fiorentino, y E. Ceretti, “Characterization of chemical surface finishing with cold acetone vapours on ABS parts fabricated by FDM”, *Prod. Eng.*, vol. 13, pp. 437–447, 2019, doi: 10.1007/s11740-019-00894-3.
- [23] “Acetone Vapor Smoothing”. <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0714/6487/files/in-action.jpg?v=1508343543> (accedido dic. 21, 2021).
- [24] K. Xu, T. Xi, y C. Liu, “Design of the desktop vapor polisher with acetone vapor absorption mechanism”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1303, nº 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1303/1/012061.
- [25] V. T. L. Costa y C. N. Pai, *Superficial characteristics of acetone vapor treated ABS printed parts for use in upper limb prosthesis*, vol. 70, nº 1. Springer Singapore, 2019.
- [26] R. Kesvarakul y K. Limpadapun, “The study and development of factor affecting the smoothness in 3d printed part surface treatment via acetone vapor”, *Key Eng. Mater.*, vol. 821 KEM, pp. 174–180, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.821.174.
- [27] “Decreto-57 09-FEB-2021 MINISTERIO DE SALUD, SUBSECRETARÍA DE SALUD PÚBLICA - Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional”, 2021, Accedido: dic. 21, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155752>.
- [28] W. M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 96th Edition*. CRC Press, 2015.
- [29] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [30] C. C. Kuo y M. Y. Lai, “Development of an automatic vacuum degassing system and parameters optimization for degassing process”, *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 18, nº

6, pp. 405–410, 2011.

- [31] C. C. Kuo y M. X. Wu, “Evaluation of service life of silicone rubber molds using vacuum casting”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, n° 9–12, pp. 3775–3781, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9755-1.
- [32] C. C. Kuo y C. M. Huang, “Development of a high efficiency degassing system for making silicone rubber mold”, *Adv. Mater. Res.*, vol. 664, pp. 835–840, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.664.835.
- [33] J. Stieghorst y T. Doll, “Rheological behavior of PDMS silicone rubber for 3D printing of medical implants”, *Addit. Manuf.*, vol. 24, pp. 217–223, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.10.004.
- [34] X. Zhan, B. Shen, Y. He, Z. Sun, y X. Li, “Application of low frequency vibration to degassing of highly viscous shear-thinning fluids”, *Vibroengineering Procedia*, vol. 16, pp. 1–6, 2017, doi: 10.21595/vp.2017.19007.
- [35] ASTM D2240, “Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness”, *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, n° 9, pp. 1689–1699, 2015, doi: 10.1520/D2240-15E01.
- [36] “Durometer Shore Hardness Scale”. <https://www.smooth-on.com/page/durometer-shore-hardness-scale/> (accedido jul. 09, 2020).
- [37] “High blood pressure and atherosclerosis - Saga”. <https://www.saga.co.uk/magazine/health-wellbeing/conditions/cardiovascular/high-blood-pressure-atherosclerosis> (accedido may 08, 2021).
- [38] L. C. Schmidt y G. E. Dieter, *Engineering design: By George {E} . Dieter and Linda {C} . Schmidt*. 2015.
- [39] “Archivo meteorológico Santiago de Chile - meteoblue”. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/santiago-de-chile_chile_3871336?fcstlength=1m&year=2021&month=8 (accedido dic. 21, 2021).

Anexo A. Planos de Diseño



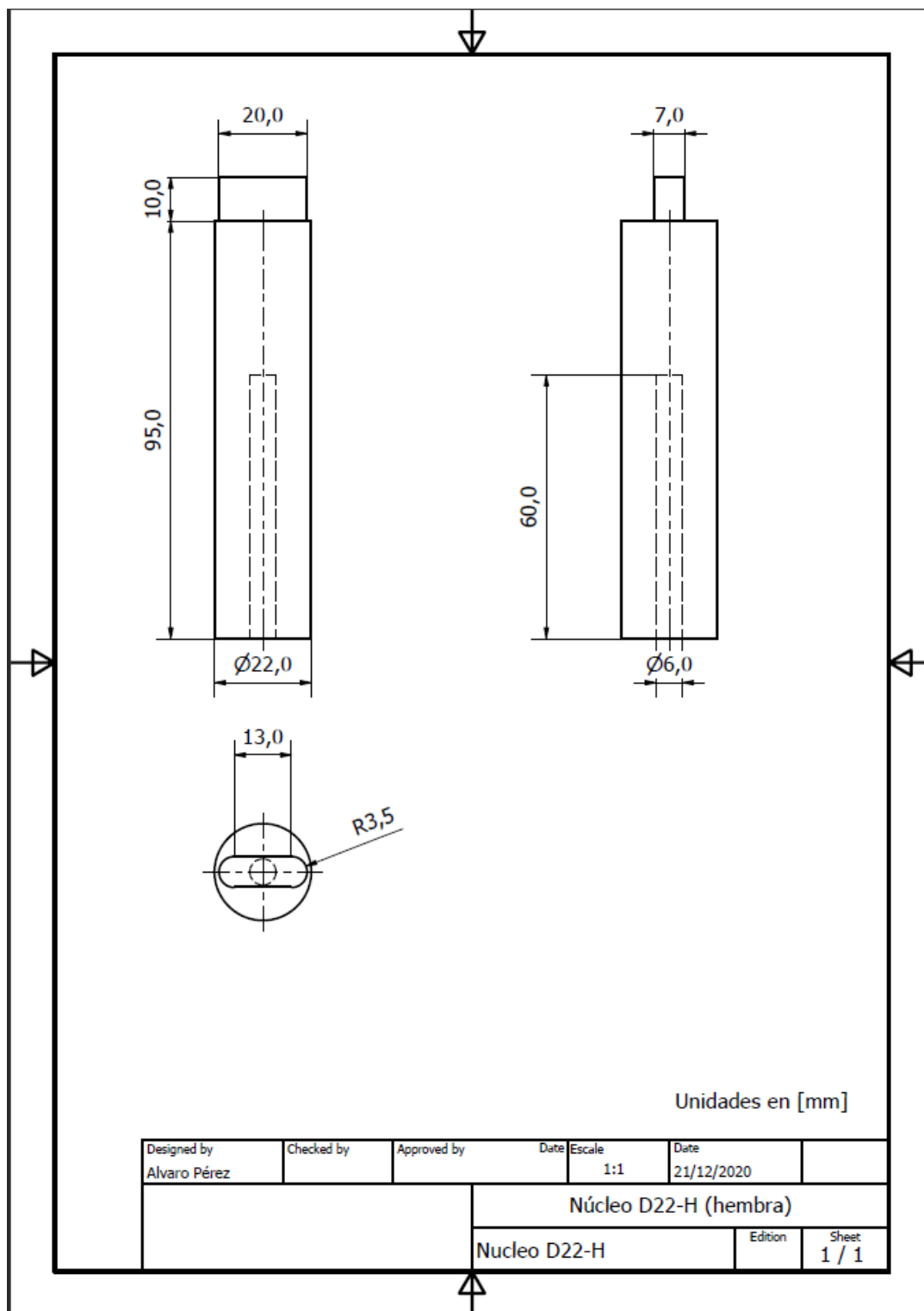


Figura 11.2: Plano de Núcleo D22-H.

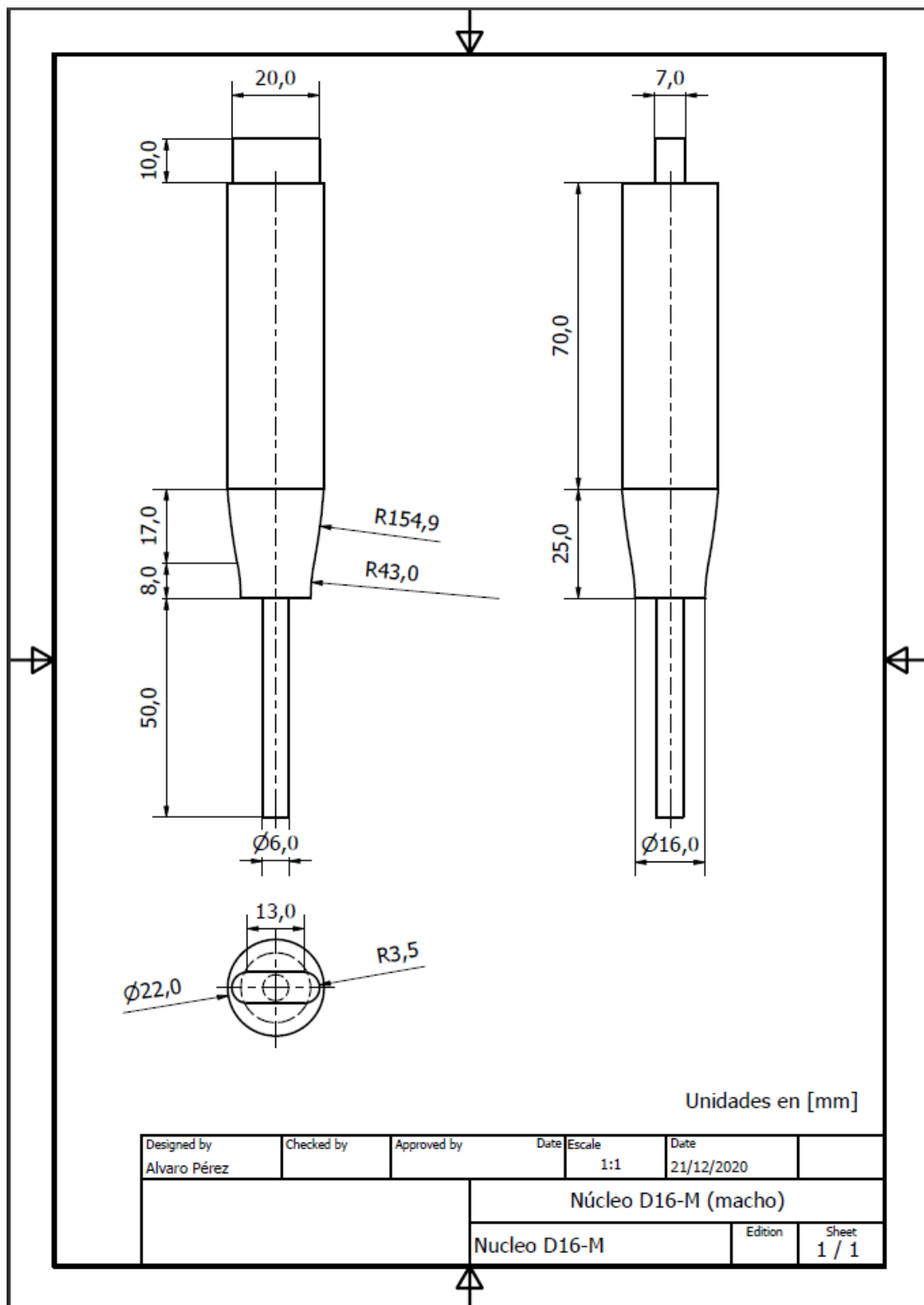


Figura 11.3: Plano de núcleo D16-M.

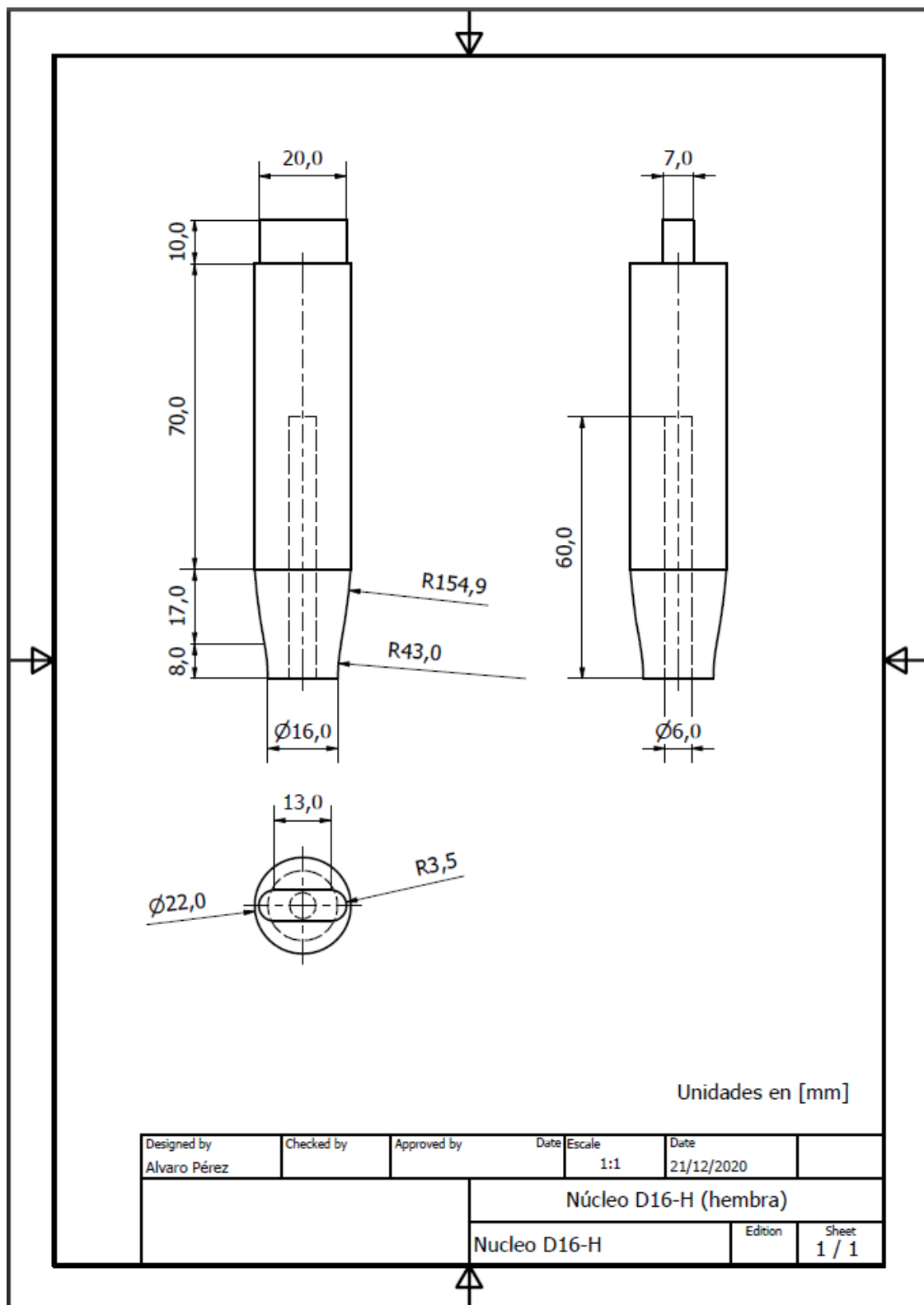


Figura 11.4: Plano de núcleo D16-H.

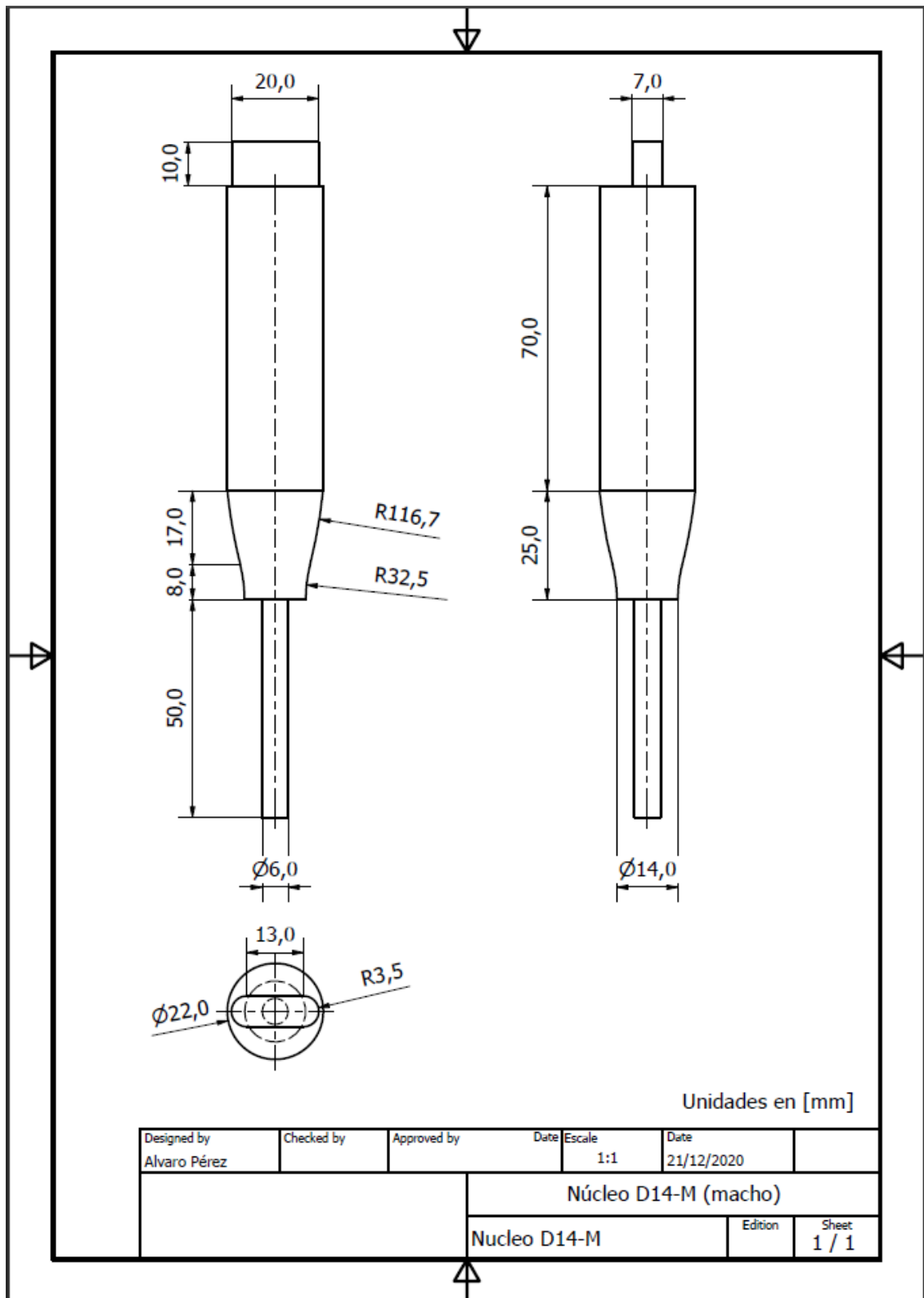


Figura 11.5: Plano de núcleo D14-M.

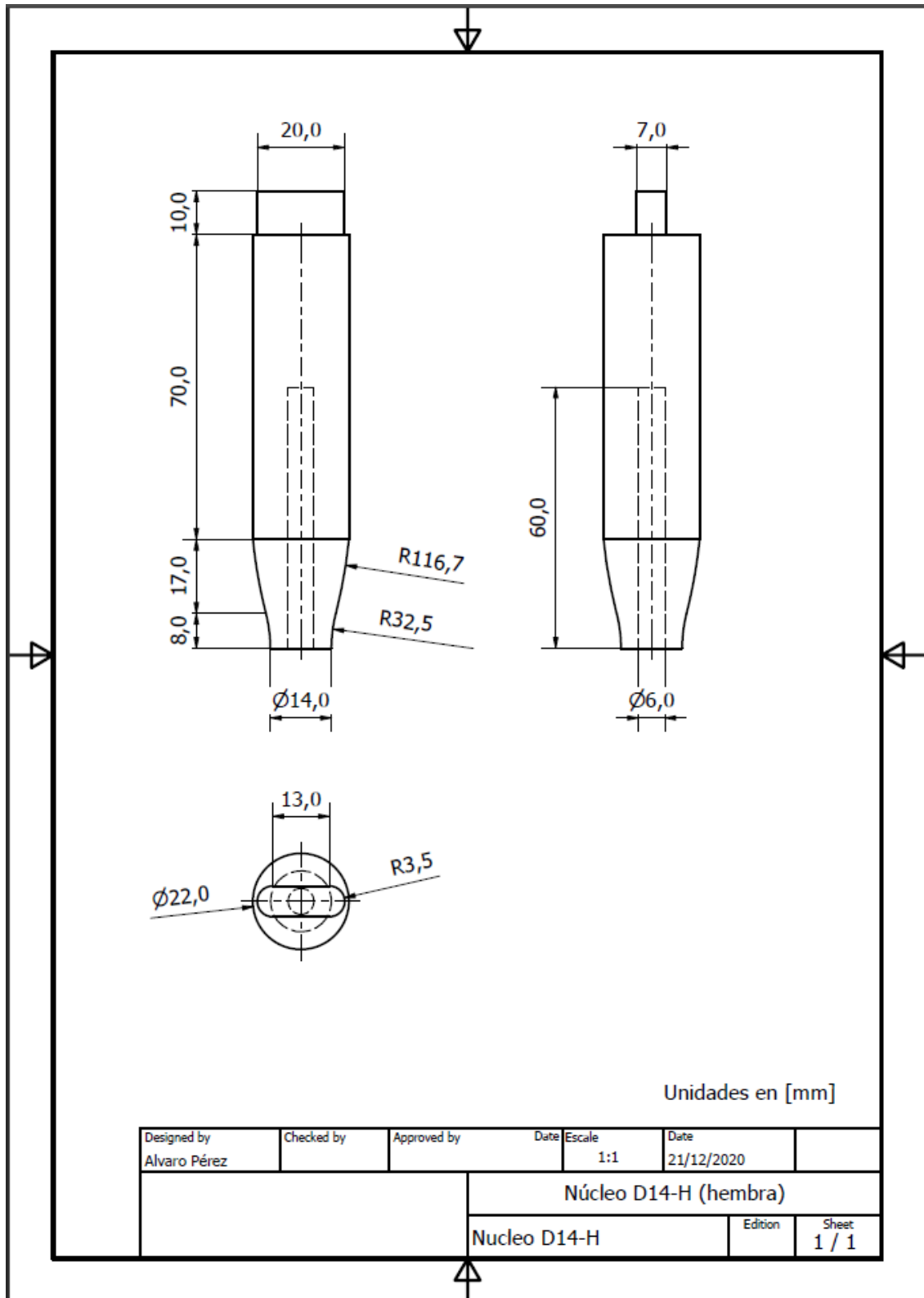


Figura 11.6: Plano de núcleo D14-H.

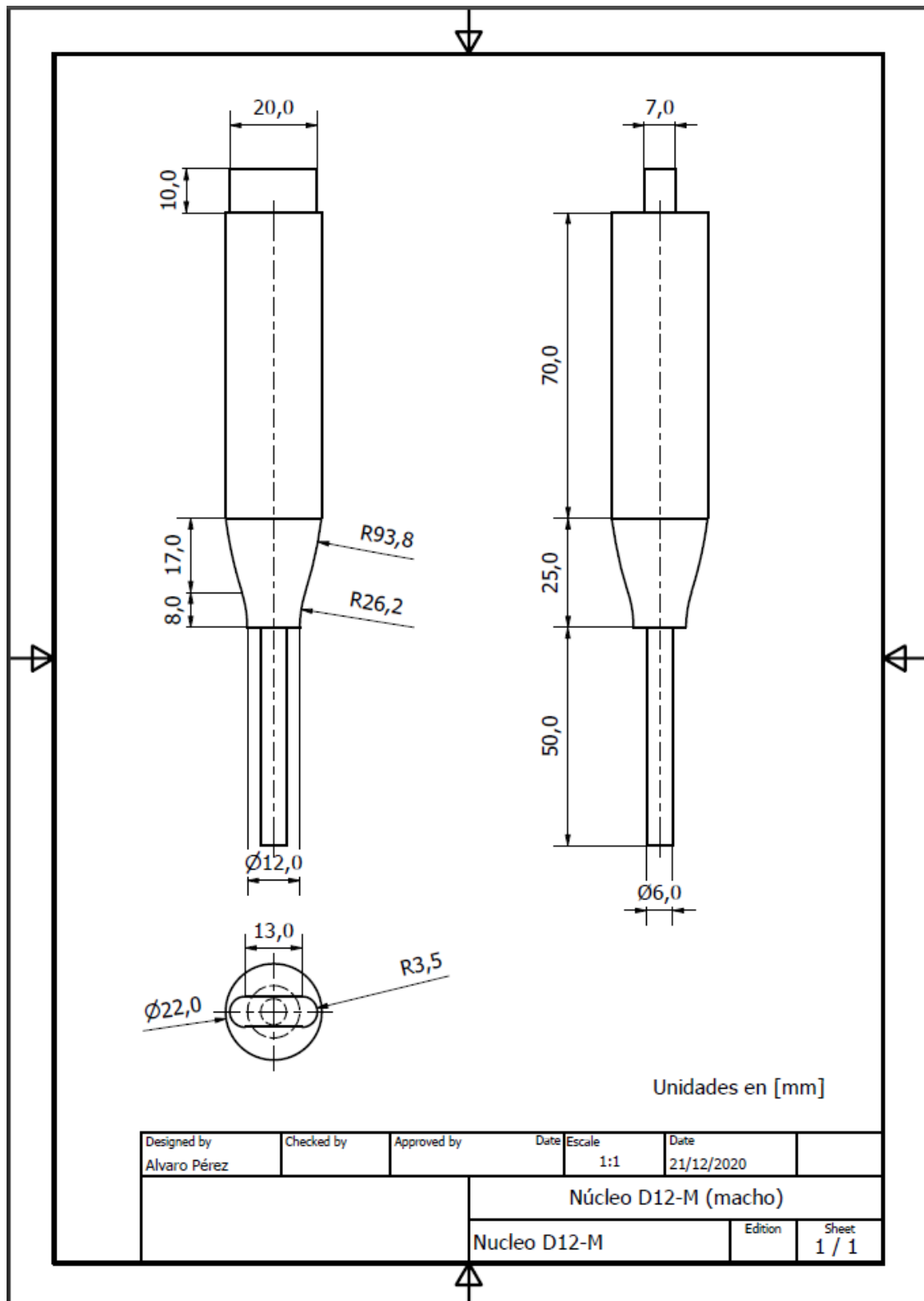


Figura 11.7: Plano de núcleo D12-M.

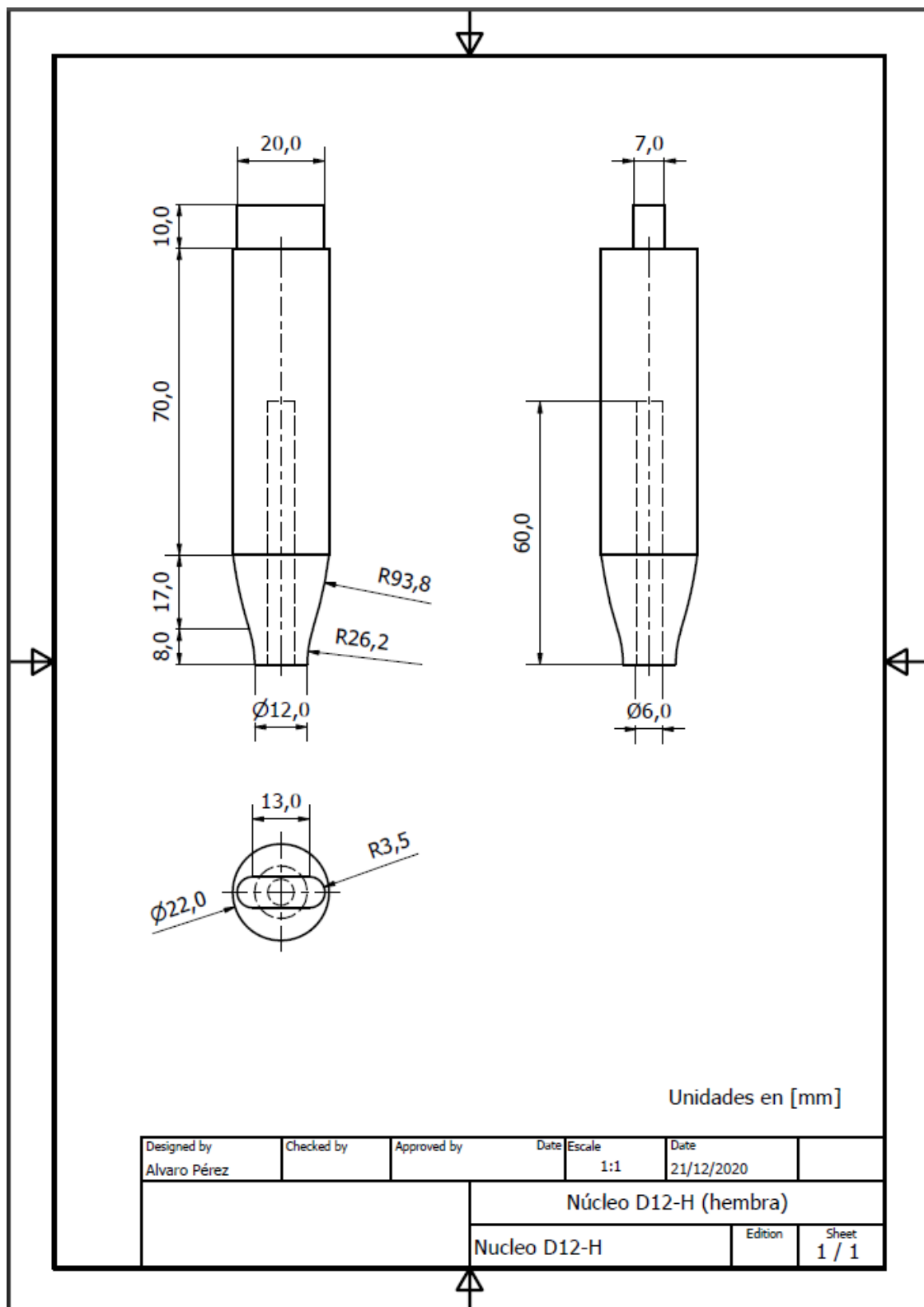


Figura 11.8: Plano de núcleo D12-H.

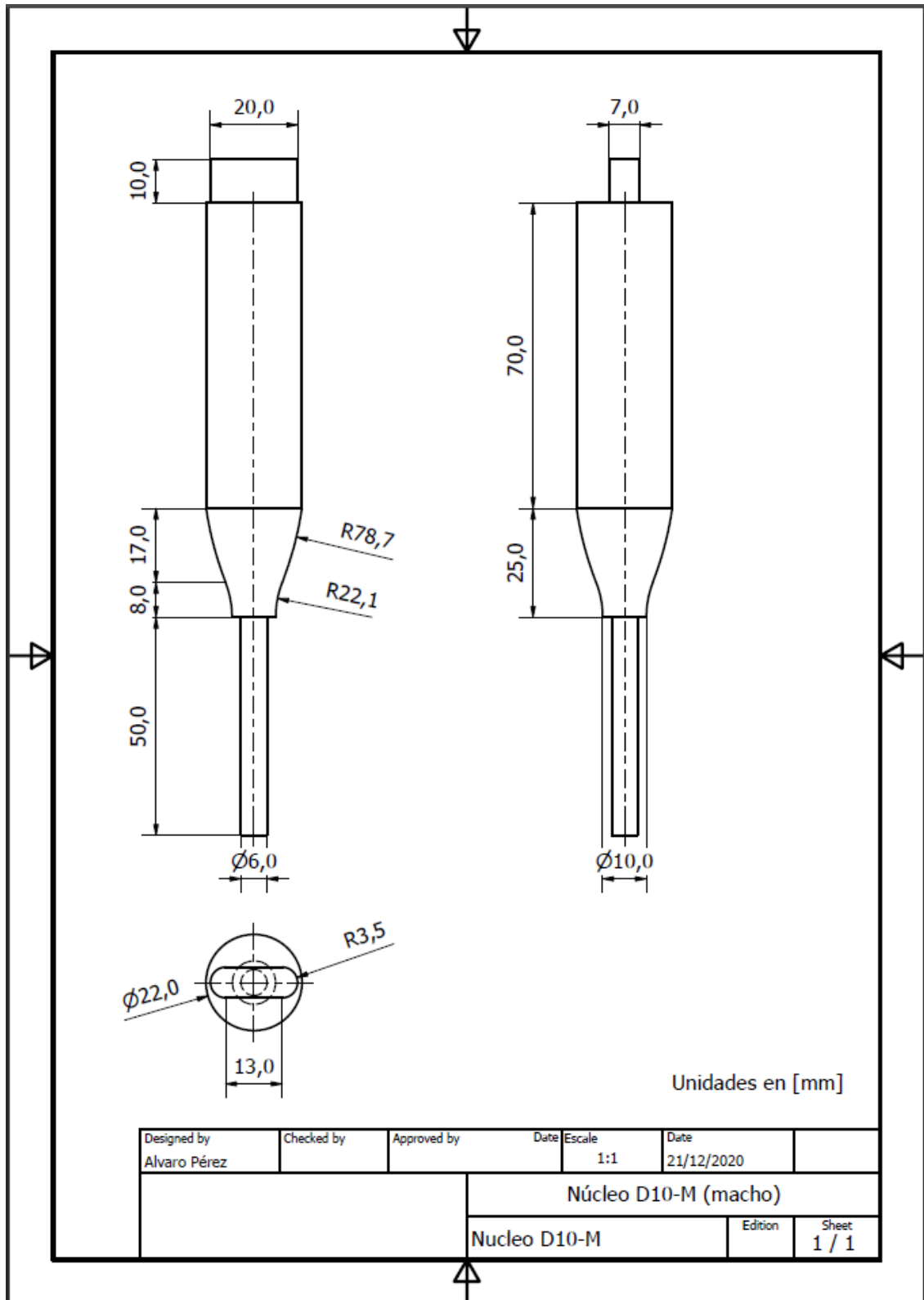


Figura 11.9: Plano de núcleo D10-M.

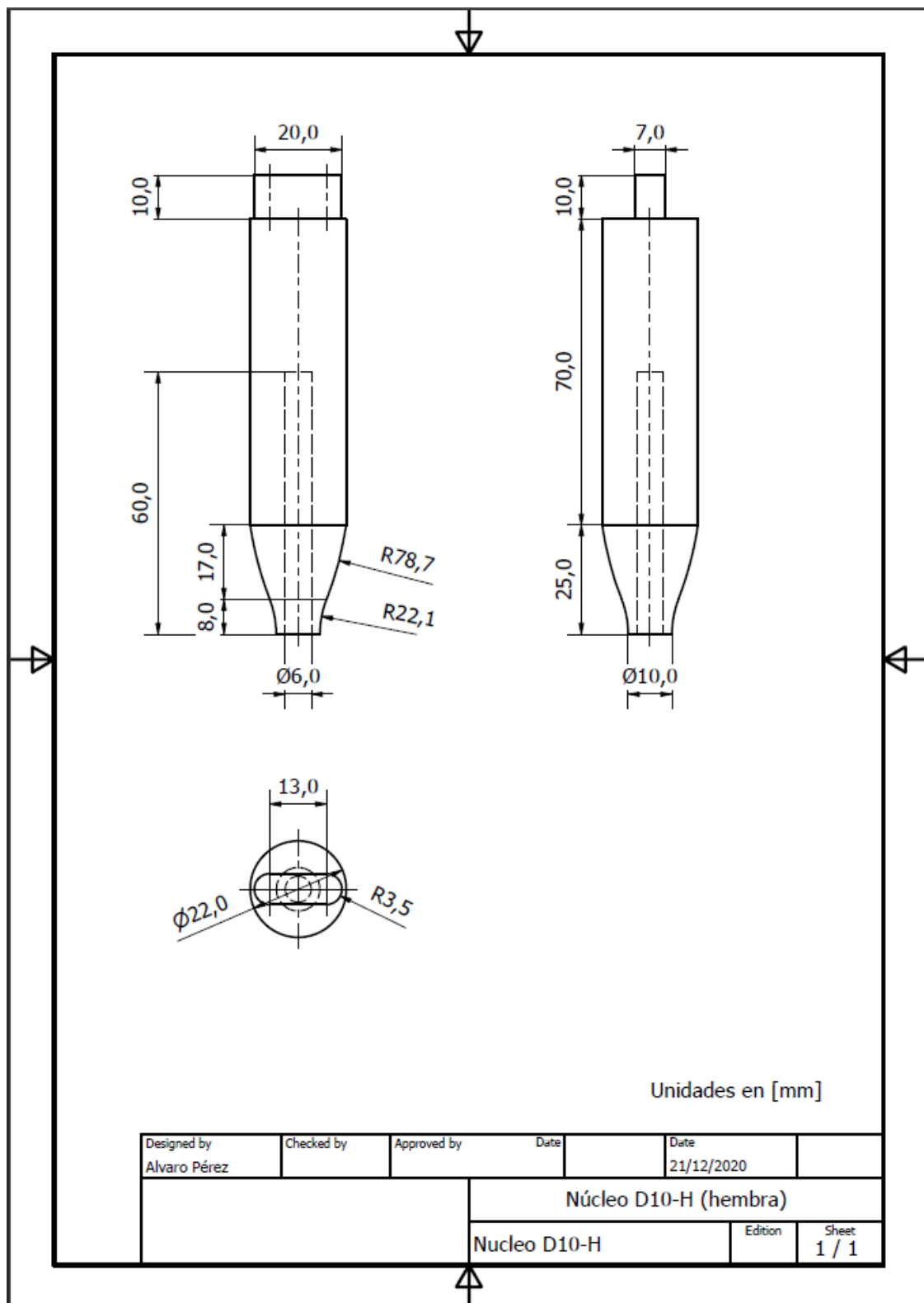


Figura 11.10: Plano de núcleo D10-H.

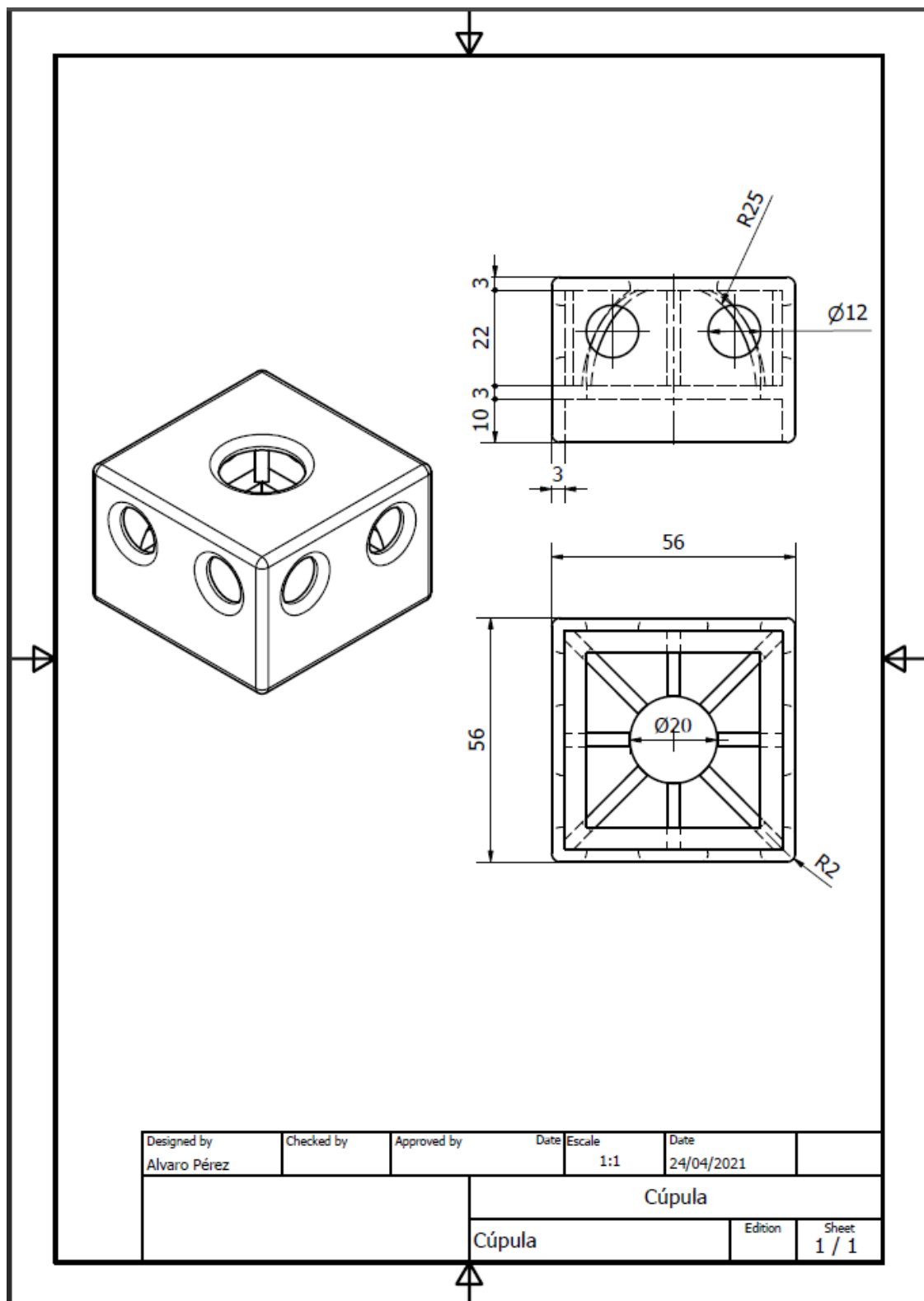


Figura 11.12: Plano de cúpula.

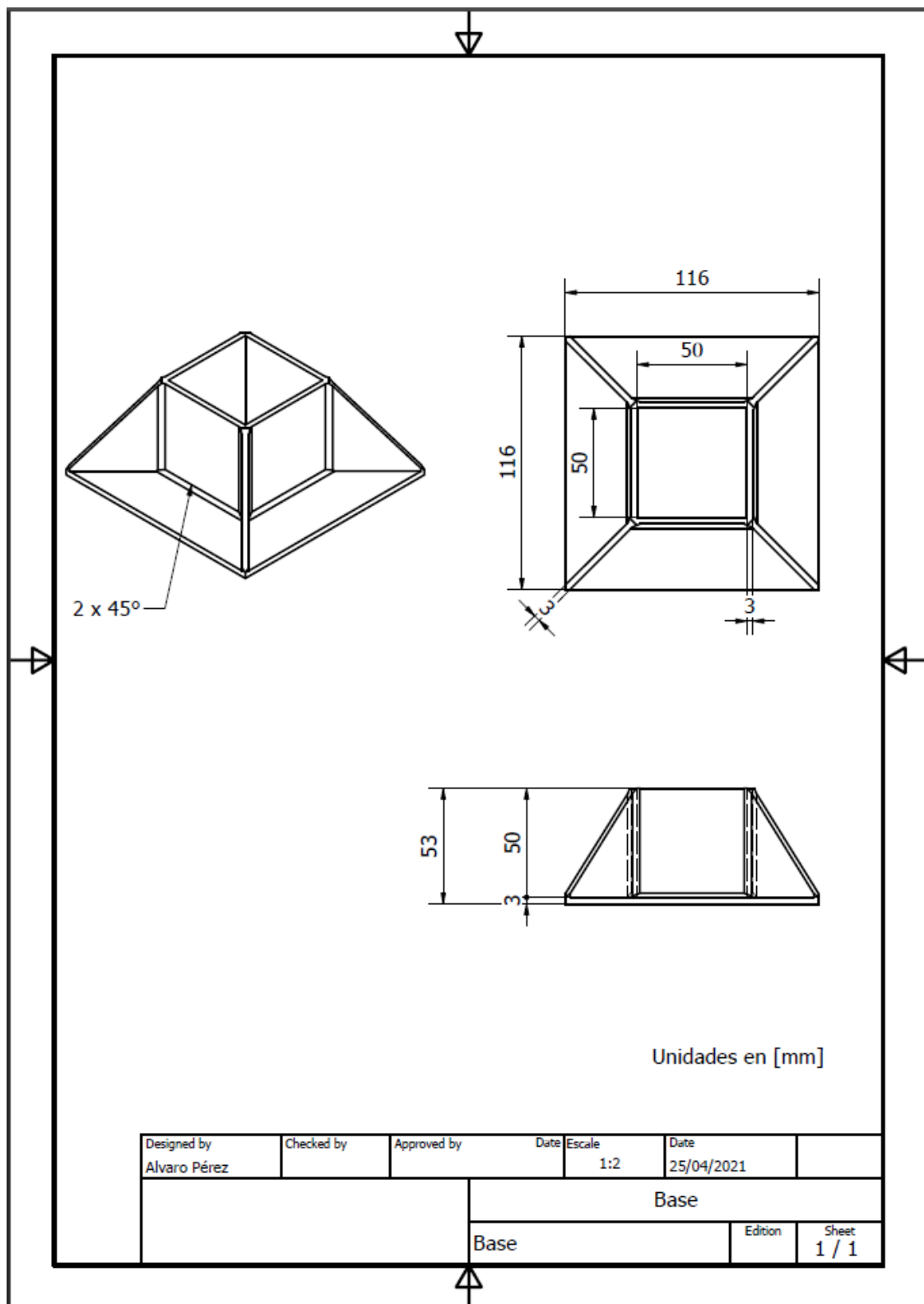


Figura 11.13: Plano de base.

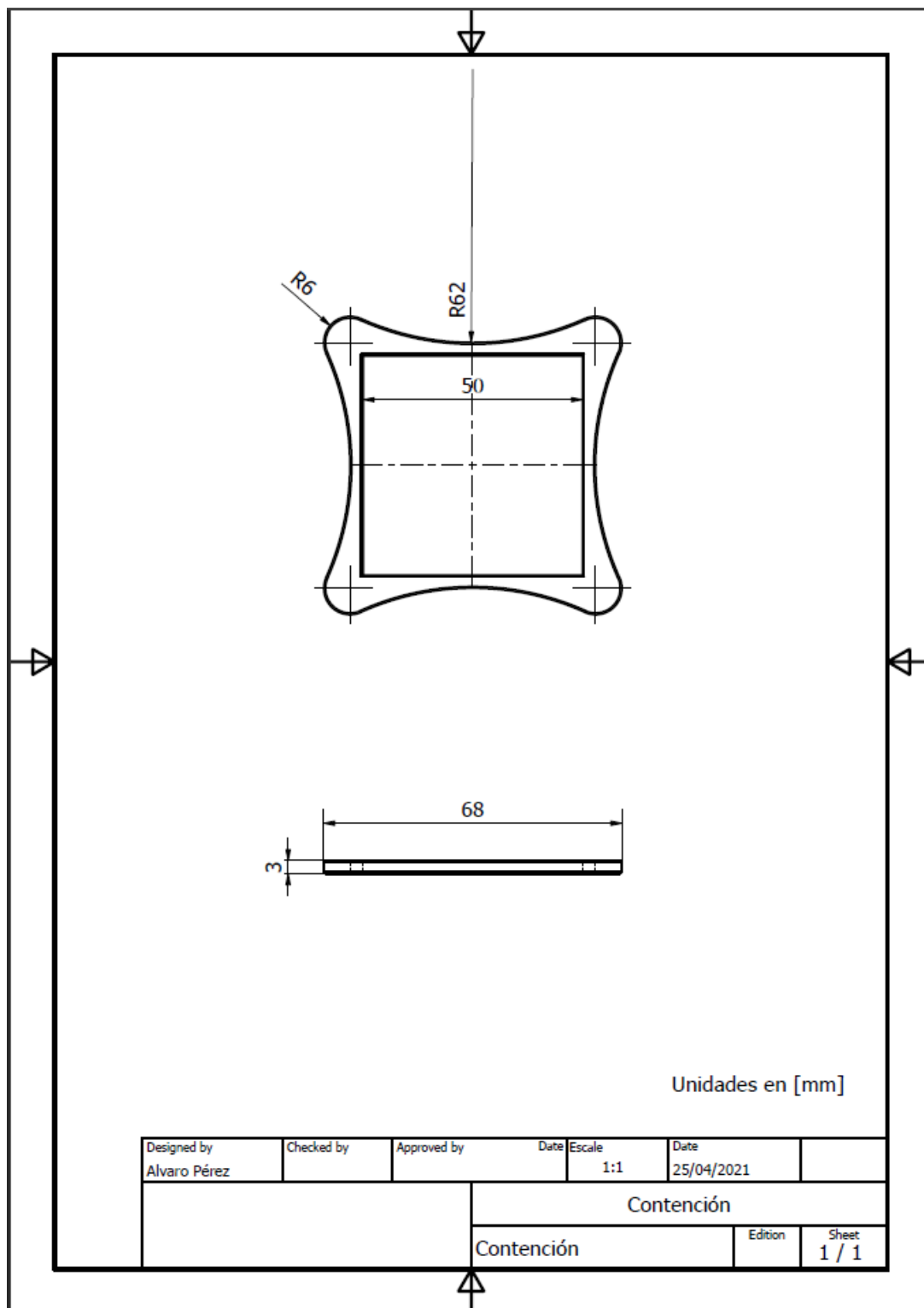


Figura 11.14: Plano de contención.

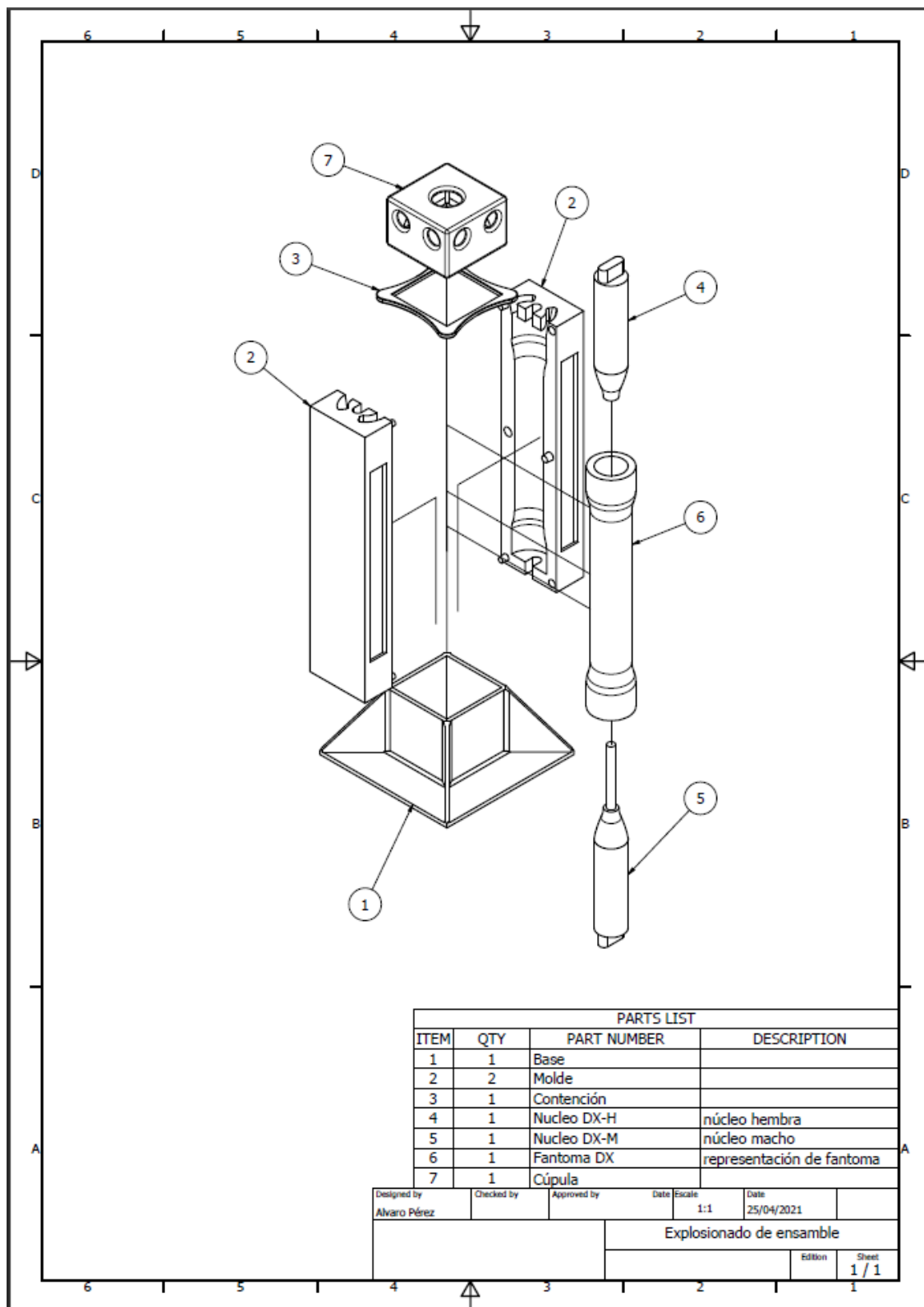


Figura 11.15: Plano de ensamble del molde.

Anexo B. Parámetros de impresión

Altura de la capa

Altura de la capa:

• 0.2

mm

Altura de la primera capa:

• 0.2

mm o %

Carcasas verticales

Perímetros:

• 2

(mínimo)

Modo vaso:

• ☐

Espesor de pared delgada del objeto recomendado para una altura de capa
0.20 y 2 líneas: 0.86 mm , 4 líneas: 1.67 mm**Carcasas horizontales**

Capas sólidas:

Superior:

• 5

Inferior:

• 4

Calidad (laminado más lento)

Perímetros adicionales si es necesario:

• ☐

Asegurar el espesor de la carcasa vertical:

• ☒

Evita cruzar perímetros:

• ☐

Detecta paredes delgadas:

• ☐

Detectar perímetros con puentes:

• ☐

Avanzado

Posición de la costura:

• Más cercano

Perímetros externos primero:

• ☐

Figura 11.16: Página 1/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Relleno

Densidad de relleno:

•
15%

%

Patrón de relleno:

•
Giroide

Patrón de relleno superior:

•
Rectilíneo
Patrón de relleno inferior:

•
Rectilíneo
Reduciendo el tiempo de impresión
Combinar el relleno cada:

•
1

capas

Solo rellenar cuando sea necesario:

•
☐
Avanzado
Relleno sólido cada:

•
0

capas

Ángulo de relleno:

•
45

°

Área del umbral de relleno sólido:

•
0
mm²
Ángulo de puente:

•
0

°

Solo retraer al cruzar perímetros:

•
☐
Rellenar antes que los perímetros:

•
☐

Figura 11.17: Página 2/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Velocidad para movimientos de impresión

Perímetros:		•	45	mm/s
Perímetros pequeños:		•	25	mm/s o %
Perímetros externos:		•	25	mm/s o %
Relleno:		•	80	mm/s
Relleno sólido:		•	80	mm/s o %
Relleno sólido superior:		•	40	mm/s o %
Material de soporte:		•	50	mm/s
Interfaz del material de soporte:		•	100%	mm/s o %
Puentes:		•	30	mm/s
Relleno:		•	40	mm/s

Velocidad para movimientos sin impresión

Recorrido:		•	180	mm/s
------------	--	---	----------------------------------	------

Modificadores

Velocidad de la primera capa:		•	20	mm/s o %
-------------------------------	--	---	---------------------------------	----------

Control de aceleración (avanzado)

Perímetros:		•	800	mm/s ²
Relleno:		•	1000	mm/s ²
Puente:		•	1000	mm/s ²
Primera capa:		•	1000	mm/s ²
Por defecto:		•	1000	mm/s ²

Figura 11.18: Página 3/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Ancho de extrusión

Ancho de extrusión por defecto:	 •	0.45	mm o %
Primera capa:	 •	0.42	mm o %
Perímetros:	 •	0.45	mm o %
Perímetros externos:	 •	0.45	mm o %
Relleno:	 •	0.45	mm o %
Relleno sólido:	 •	0.45	mm o %
Relleno sólido superior:	 •	0.4	mm o %
Material de soporte:	 •	0.35	mm o %

Superposición

Superposición de relleno/perímetros:	 •	25%	mm o %
--------------------------------------	---	----------------------------------	--------

Flujo

Relación de flujo del puente:	 •	0.95
-------------------------------	---	-----------------------------------

Rebanando

Radio de cierre de los huecos al laminar:	 •	0.049	mm
Resolución:	 •	0	mm
Compensación de tamaño XY:	 •	0	mm
Compensación del pie de elefante:	 •	0	mm

Otro

Enlazar objetos de varias partes:	 •	☒
-----------------------------------	---	-------------------------------------

Figura 11.19: Página 4/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Filamento

Color:

Diámetro:

1.75

mm

Multiplificador de extrusión:

1

Densidad:

1.07

g/cm³

Coste:

35.28

dinero/kg

Temperatura °C

Extrusor:

Primera capa:

260

Otras capas:

260

Base:

Primera capa:

105

Otras capas:

110

Figura 11.20: Página 5/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Habilitar

Mantener el ventilador siempre encendido:

Habilitar el enfriamiento automático:

Si el tiempo de capa estimado está por debajo de ~15s, el ventilador funcionará en 20% y la velocidad de impresión se reducirá de modo que no se gaste menos de 15s en esa capa (sin embargo, la velocidad nunca se reducirá por debajo de 15mm/s) .

Si el tiempo estimado de la capa es mayor, pero todavía por debajo de ~20s, el ventilador funcionará a una velocidad proporcionalmente menor entre 20% y 20%.

Durante las otras capas, el ventilador siempre funcionará al 20% a excepción de las 4 primeras capas.

Configuración del ventilador

Velocidad del ventilador:

Min:

20

%

Max:

20

%

Velocidad del ventilador para puentes:

30

%

Desactivar ventilador para la primera:

4

capas

Umbral de enfriamiento

Habilitar ventilador si el tiempo de impresión de la capa está por debajo:

20

segundos aproximadamente

Disminuya la velocidad si el tiempo de impresión de la capa está por debajo:

15

segundos aproximadamente

Velocidad de impresión mínima:

15

mm/s

Figura 11.21: Página 6/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

109

Propiedades del filamento

Tipo de filamento:

ABS

Material soluble:

Anular la velocidad de impresión

Velocidad volumétrica máxima:

11

mm³/s

Primera capa volumétrica se maximiza el flujo de material al imprimir perímetros externos con una tasa volumétrica 1.51 mm³/s a una velocidad de filamento de 0.63 mm/s.
 Volumétrico se maximiza el flujo de material al imprimir relleno con una tasa volumétrica 6.51 mm³/s a una velocidad de filamento de 2.71 mm/s.
 Puente volumétrico se maximiza el flujo de material al imprimir perímetros externos con una tasa volumétrica 3.58 mm³/s a una velocidad de filamento de 1.49 mm/s.

Parámetros de la torre de limpieza

Purga mínima en la torre de limpieza:

15

mm³

Parámetros del cambio de herramienta para impresoras de un único extrusor MM

Velocidad de carga al inicio:

3

mm/s

Velocidad de carga:

28

mm/s

Velocidad de descarga al inicio:

100

mm/s

Velocidad de descarga:

90

mm/s

Tiempo de carga de filamento:

0

s

Tiempo de descarga del filamento:

0

s

Retardo tras la descarga:

0

s

Número de movimientos de enfriamiento:

4

Figura 11.22: Página 7/7 de parámetros de impresión de los elementos del primer molde diseñado.

Anexo C. Pruebas de vapor de acetona

Tabla 11.1: Características del termómetro Cooper-Atkins.

Instrumento	Termómetro Digital
Marca	Cooper-Atkins
Modelo	DPP400W
Rango	(-40) – 200[°C]
Resolución	0.1[°C]
Error	0.1[°C]

Tabla 11.2: Datos e información de las pruebas de pulido por vapor de acetona. Midiendo la cantidad de acetona, temperatura inicial (T_i) y final del agua (T_f), duración del proceso (t) y su descripción.

Prueba	Acetona utilizada [g]	Agua		t [min]	Descripción
		T_i [°C]	T_f [°C]		
1	90	54.6	50.2	2	La pieza no presenta cambios notables.
2	73	58.3	52.3	5	La pieza perdió levemente rigidez.
3	106	62.2	54.5	8	La pieza se nota blanda, pero no se ha reducido el escalonamiento.
4	103	61.3	49.3	15	La pieza se desformó completamente.
5	105	65.7	56.3	10	La pieza presenta leve brillo en la superficie
6	110	68.4	59.1	8	La pieza tiene menor escalonamiento y superficie brillante.
7	115	74.2	65.2	7	La pieza se ve brillante, pero sufrió deformación leve.
8	101	75.2	63.5	7.5	La pieza se ve brillante y lisa en su superficie, pero sufrió deformación en las partes en voladizo.
9	103	70.7	61.2	7.5	La pieza se ve brillante y lisa en su superficie.
10	105	68.5	60.2	7.5	La pieza se ve brillante y lisa en su superficie.

Anexo D. Preparación de pulido químico y fantomas

Tabla 11.3: Características de implementos utilizados en el proceso de pulido por vapor de acetona.

Implemento	Marca	Modelo	Característica	Material
Caja organizadora	Wenco	Mybox	6[l]	Polipropileno
Papel aluminio	Aluhome	Alufoil	4[m]	Aluminio

Tabla 11.4: Características de implementos e instrumentos utilizados en preparación de mezcla.

Instrumento	Báscula Digital	Pipeta
Marca	CARMY	PLASTICENTER
Modelo	EK3252	-
Rango	0 – 5 [Kg]	0 – 3[ml]
Resolución	1[g]	0.5[ml]
Error	1[g]	0.25[ml]

Anexo E. Planos de rediseño

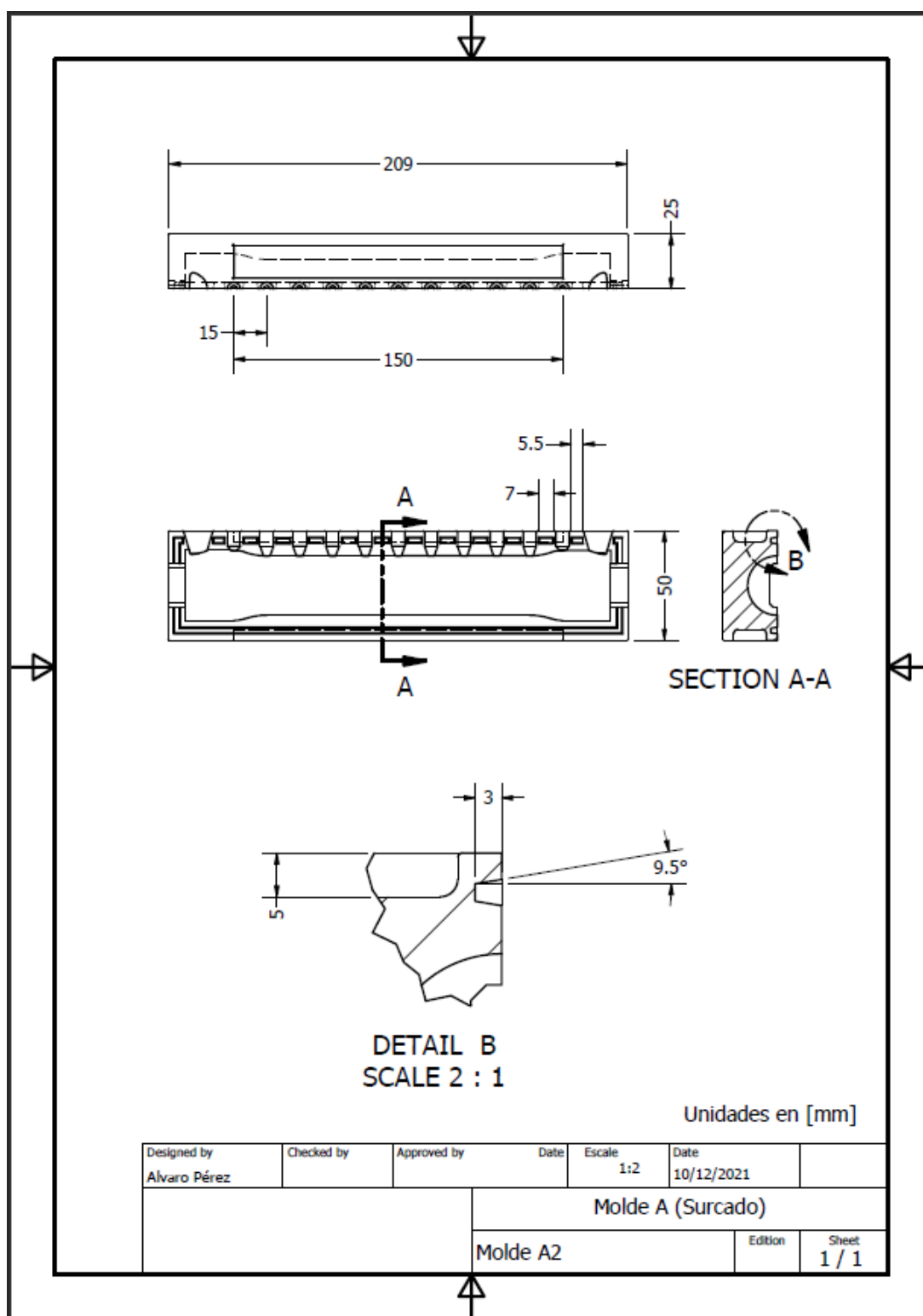


Figura 11.23: Plano de molde A del proceso de rediseño.

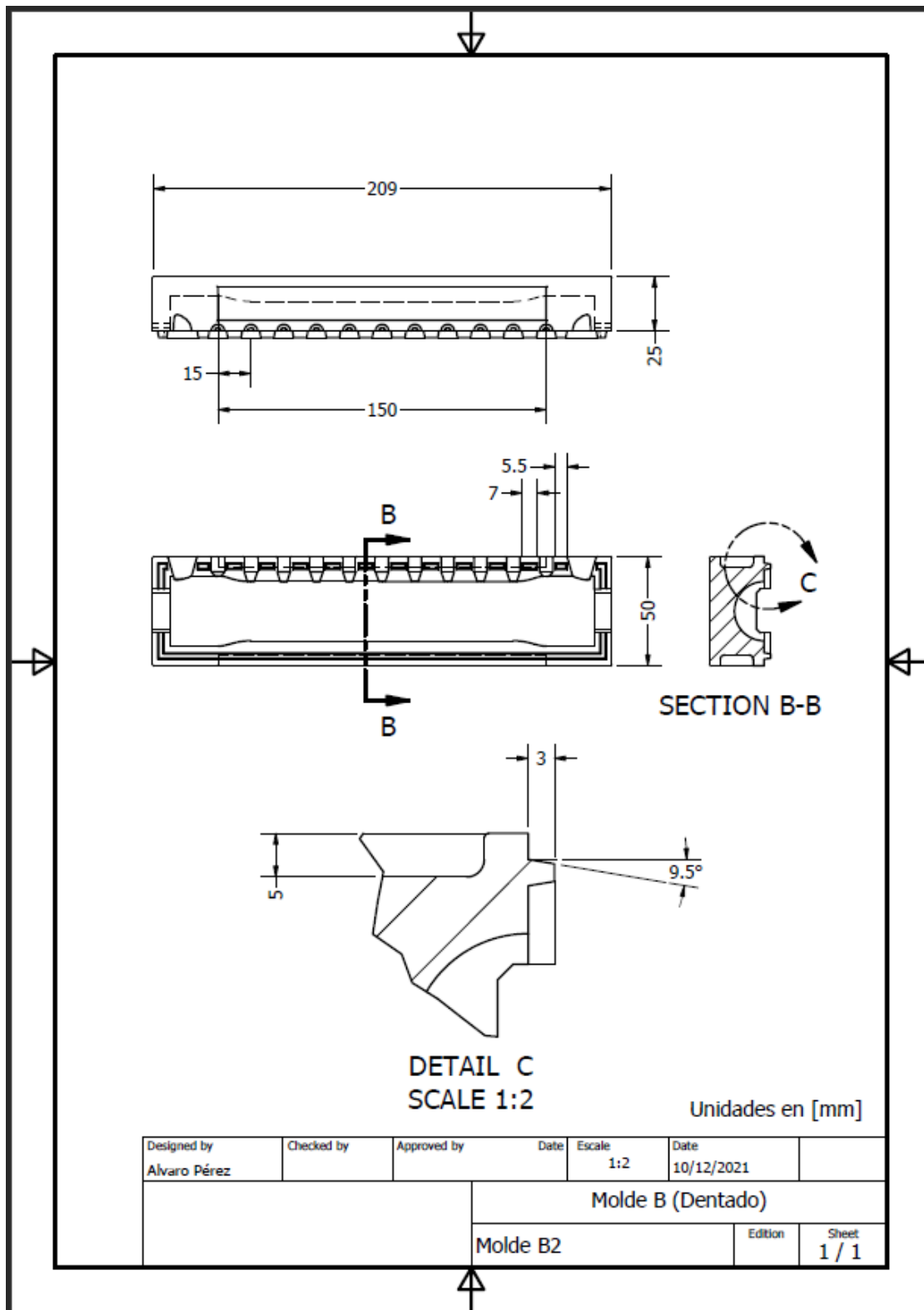


Figura 11.24: Plano del molde B del proceso de rediseño.

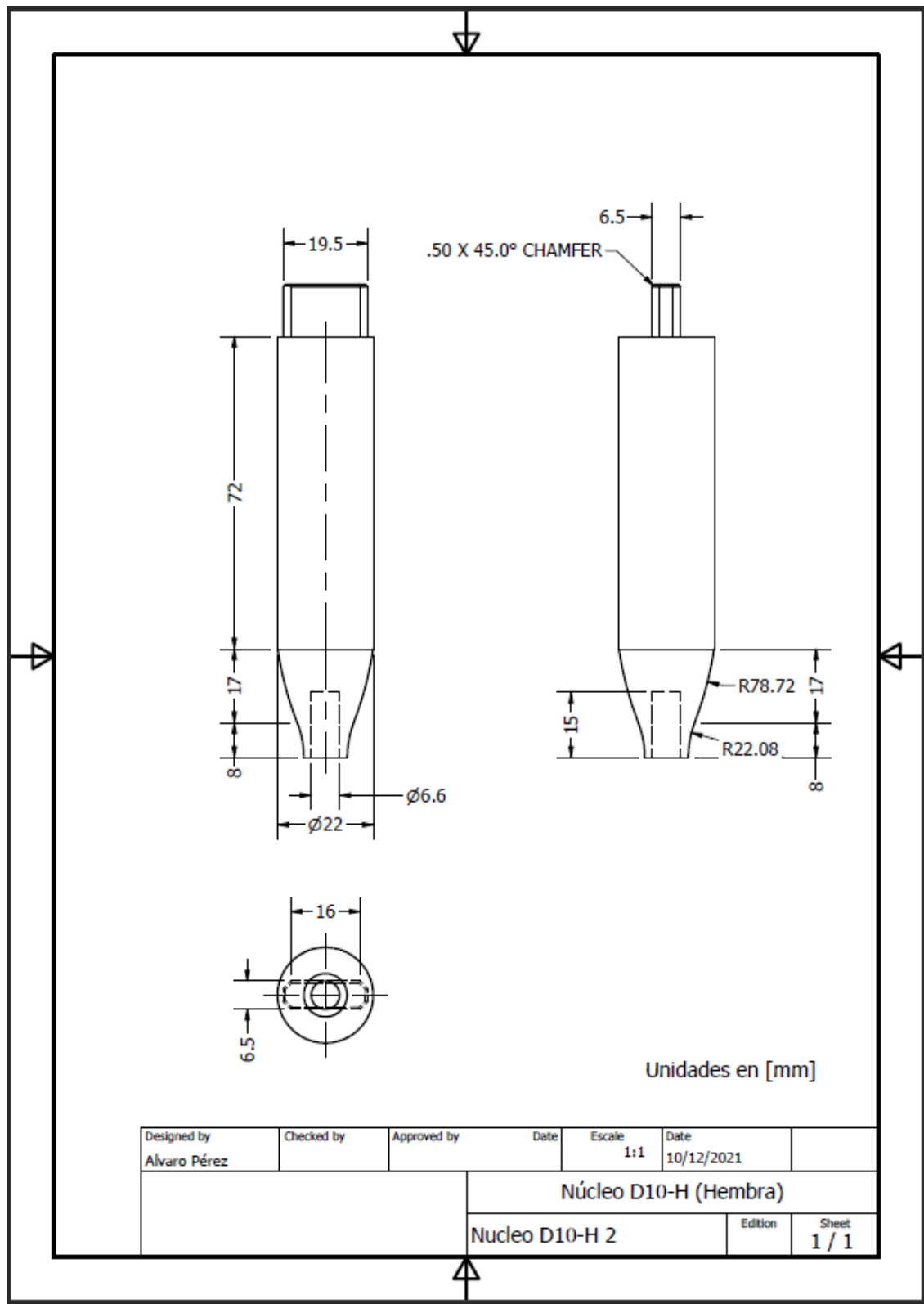


Figura 11.25: Plano del núcleo D10-H del proceso de rediseño

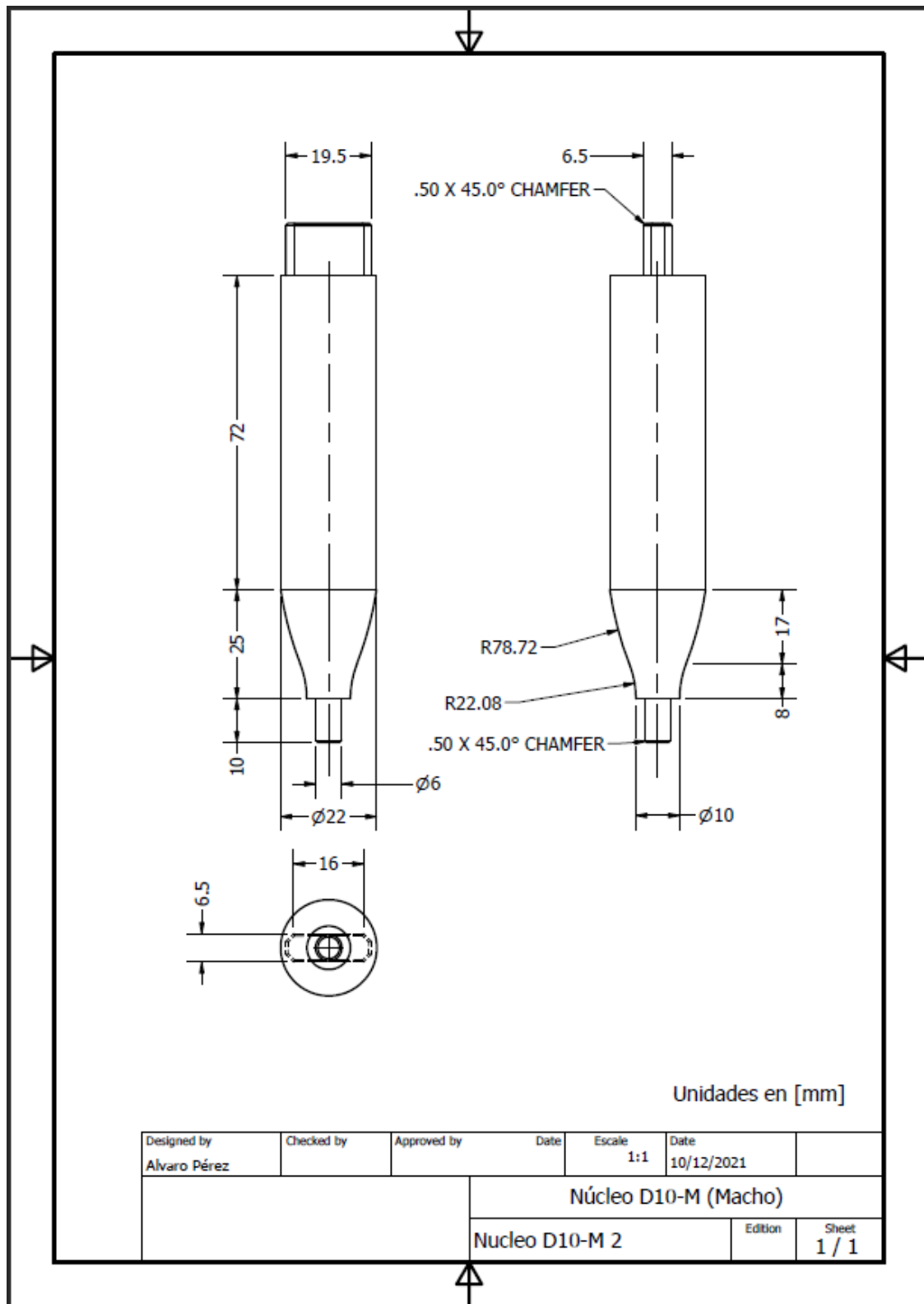


Figura 11.26: Plano del núcleo D10-M del proceso de rediseño.

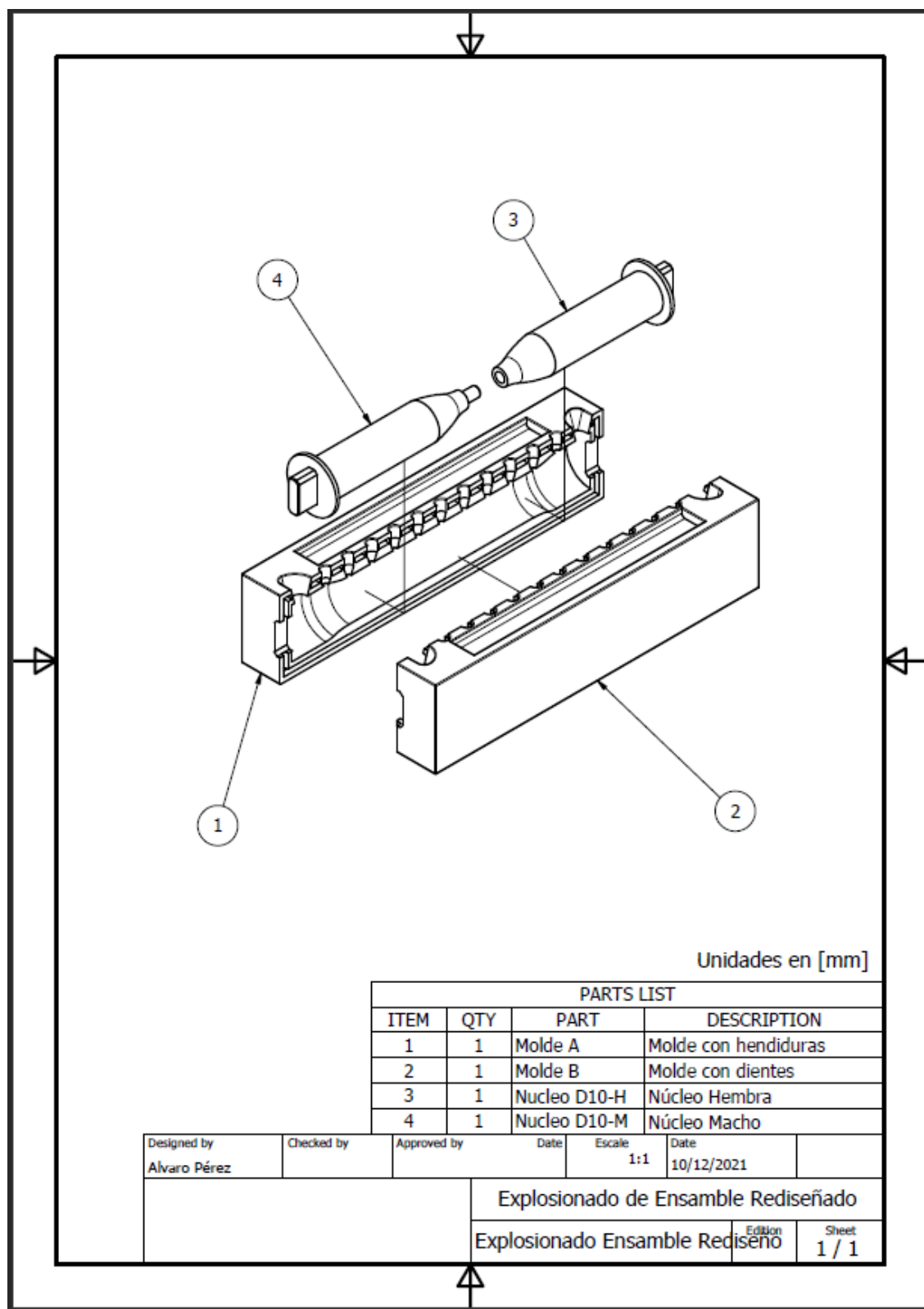


Figura 11.27: Plano de explosionado del ensamble de los elementos rediseñados.

Anexo F. Mejoras de rediseño

Salidas de Aire

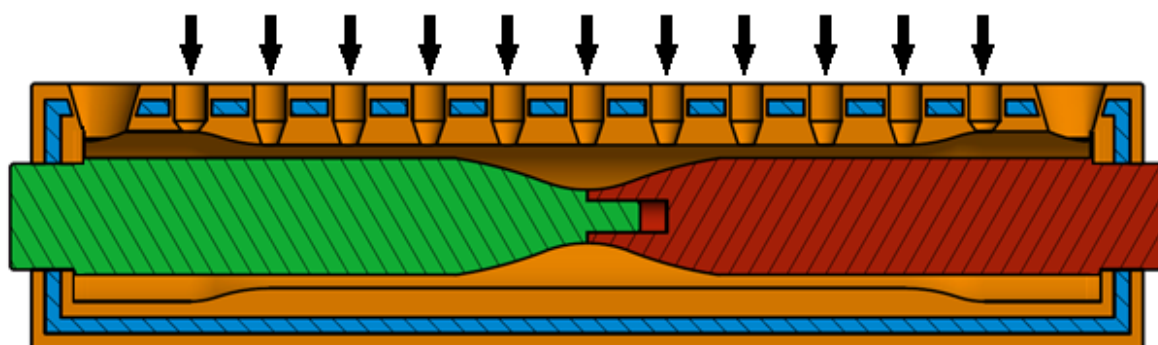


Figura 11.28: Vista en corte del ensamble de los componente rediseñados, indicando las salidas para gases.

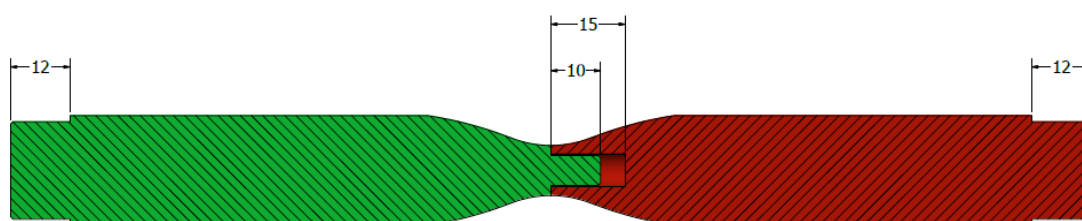


Figura 11.29: Vista en corte del ensamble de los núcleos rediseñados, indicando las medidas modificadas.

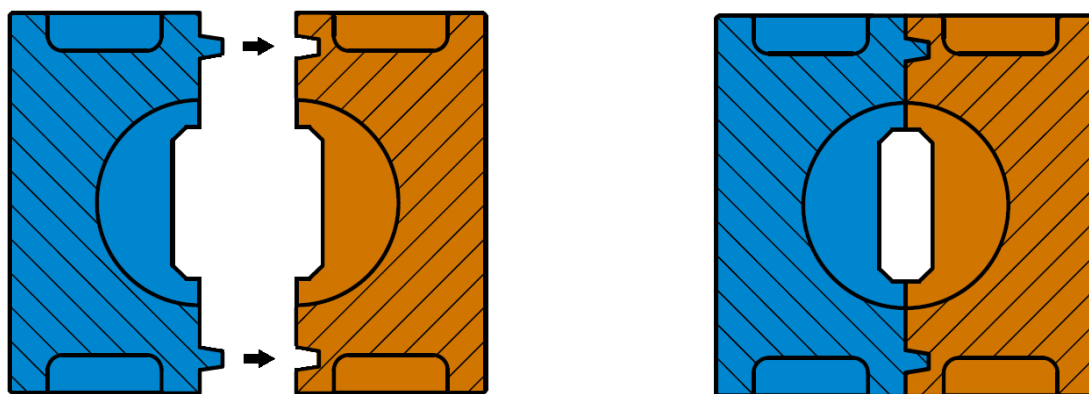


Figura 11.30: Vista en corte de ambas mitades del molde, mostrando el proceso de unión y sellado por las ranuras y dientes.

Anexo G. Impresión de rediseño

Tabla 11.5: Características de la impresora Ultimaker 2+.

Marca	Ultimaker
Modelo	Ultimaker 2+
Resolución	± 0.2 [mm]
Velocidad de impresión	300 [mm/s]
Temperatura de extrusor	240 [°C]
Diámetro de filamento	3.0 [mm]
Volumen de impresión	223 x 223 x 223 [mm]

Tabla 11.6: Propiedades y características del filamento PLA.

Marca	Imperio 3D
Material	PLA
Velocidad de impresión	60 – 110 [mm/s]
Temperatura de impresión	190 – 220 [°C]
Diámetro de filamento	3.0 [mm]
Resolución requerida	0.1 - 0.2 [mm]

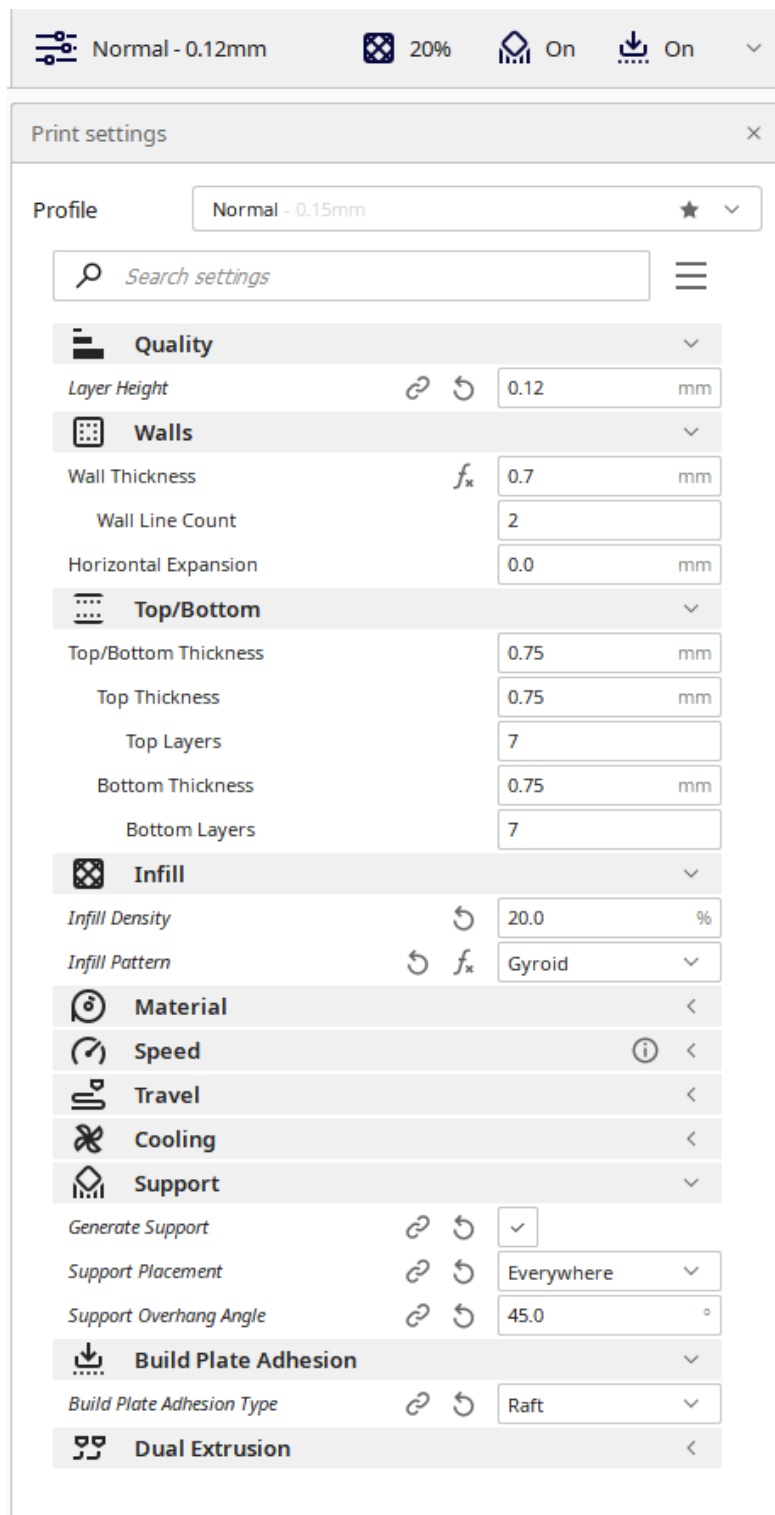


Figura 11.31: Parámetros de impresión de piezas rediseñadas, utilizando el software Ultimaker Cura 4.11.0.

Anexo H. Implemento de prueba de rediseño

Tabla 11.7: Características del agitador Gilson SS3.

Marca	Gilson
Modelo	SS3
Movimiento / Vibración	Martillo / Vibratorio
Temporizador	Hasta 99 [min]
Electricidad	115V / 50-60[Hz] / 2[A]
Dimensiones de uso	203 x 279 x 559 [mm]
Frecuencia de vibrado	60 [Hz]
Frecuencia de golpe	1[Hz]
Nivel de vibración empleado	Nivel 10 (Máximo)

Anexo I. Información de ensayo de microtensión

Tabla 11.8: Dimensiones de las probetas empleadas en el ensayo de microtensión. Denominando con la letra “L” las probetas longitudinales, y “C” a las circulares.

Probeta	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]
L1	2.39	9.28	2.29
L2	2.41	7.17	2.55
L3	2.36	9.13	2.79
L4	2.00	9.42	3.08
L5	2.18	7.89	2.34
C1	2.84	8.59	2.77
C2	2.79	7.86	2.66
C3	2.92	7.50	2.70
C4	2.92	9.29	2.72
C5	2.92	8.42	2.83

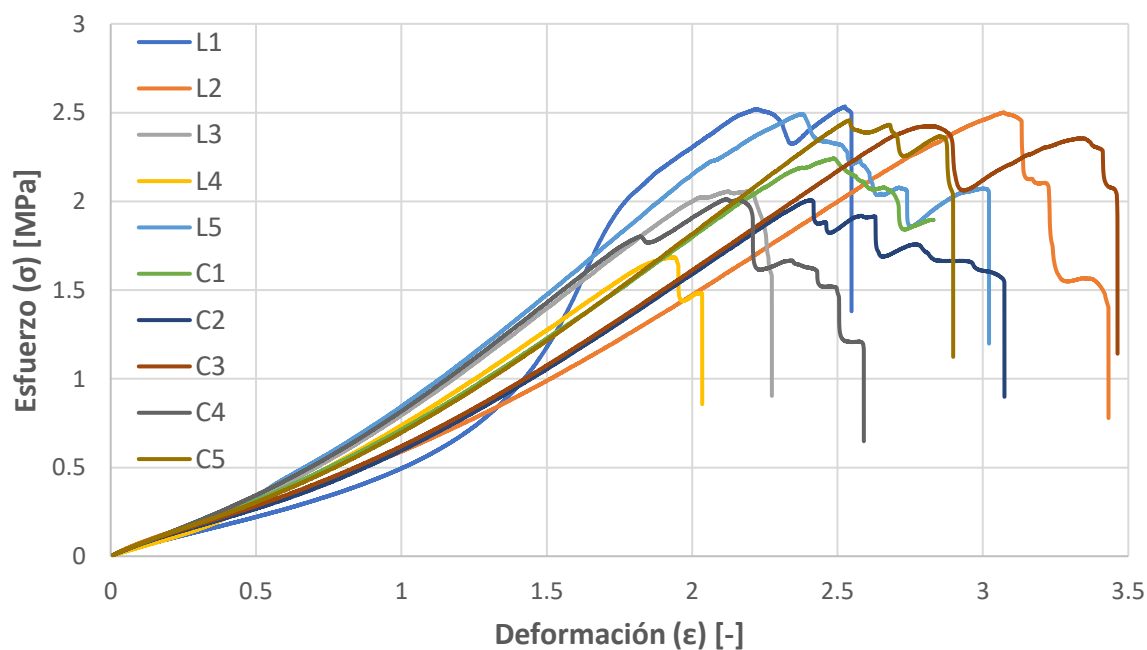


Figura 11.32: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación de las 10 probetas. Cinco circulares (C) y cinco longitudinales (L)

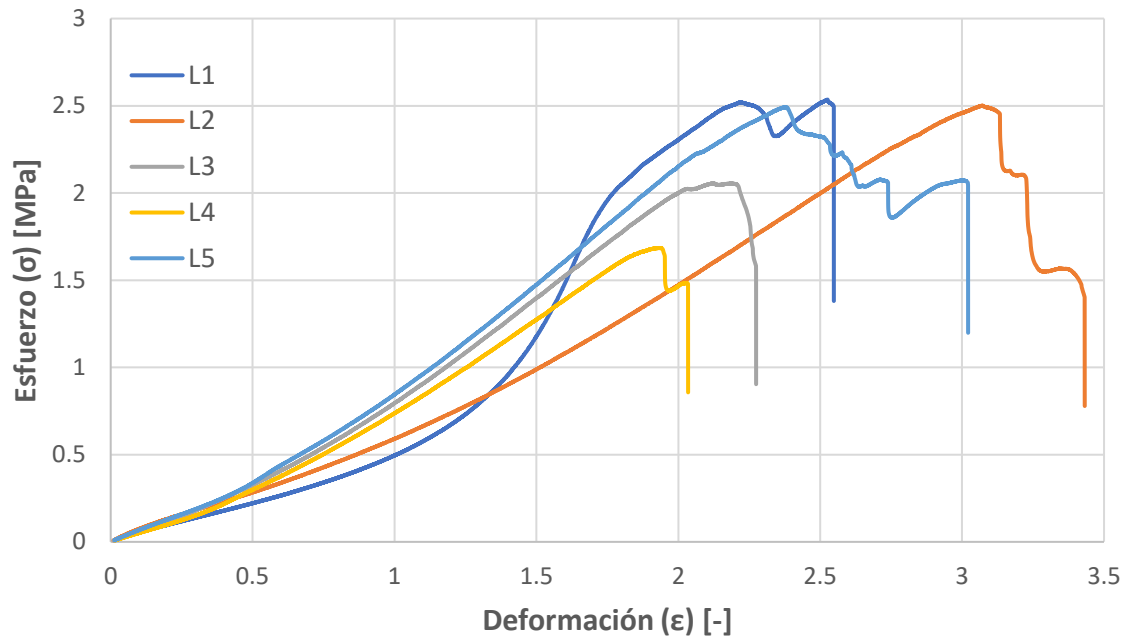


Figura 11.33: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación para las 5 probetas longitudinales.

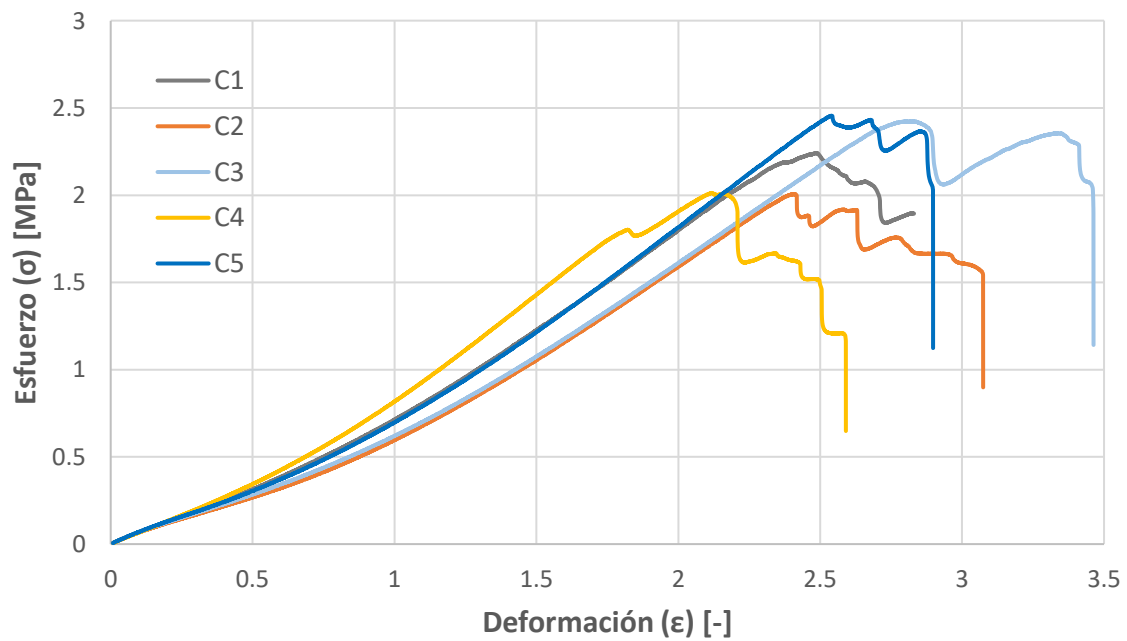


Figura 11.34: Gráfica de esfuerzo en función de la deformación para las 5 probetas circulares.

12 Apéndice

Apéndice A. Catálogo de filamento ABS

Product parameters of various series

Texture Parameter	PLA	ABS	ABS PRO	PA(Nylon)	PC	PETG	PVA	Pearl
Printing Temp.	190~220℃	220~240℃	220~240℃	220~260℃	240~260℃	220~240℃	190~220℃	190~220℃
Printing Speed	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s	60~90mm/s
Suggested Printing Layer Resolution	0.1~0.2mm	0.1~0.2mm	0.1~0.2mm	0.1~0.2mm	0.1~0.2mm	0.1~0.2mm	0.2mm	0.1~0.2mm
Hot Bed Temp.	Not necessary	80~110℃	50~100℃	80~110℃	100~120℃	80~100℃	Not necessary	Not necessary
Printing Raft	Not necessary	Necessary	Not necessary	Necessary	Necessary	Not necessary	Not necessary	Not necessary
Specification	0.5kg / 1.0kg	0.5kg / 1.0kg	0.5kg / 1.0kg	0.5kg / 1.0kg	0.5kg / 1.0kg	0.5kg / 1.0kg	0.5kg	0.5kg / 1.0kg
Tensile Strength	≥ 60MPa	≥ 43MPa	≥ 53MPa	≥ 50MPa	≥ 50MPa	≥ 52MPa	≥ 10MPa	≥ 50MPa
Flexural Strength	≥ 60MPa	≥ 70MPa	≥ 70MPa	≥ 60MPa	/	≥ 88MPa	≥ 15MPa	≥ 50MPa
Flexural Modulus	≥ 2500MPa	≥ 2300MPa	≥ 2300MPa	≥ 1500MPa	≥ 2200MPa	≥ 2200MPa	≥ 190MPa	≥ 2300MPa
Impact Strength (Izod, 23℃)	≥ 16J/m (ASTM D256)	≥ 108J/m (ASTM D256) ≥ 19KJ/m² (ISO 180)	≥ 108J/m (ASTM D256) ≥ 19KJ/m² (ISO 180)	≥ 105J/m (ASTM D256)	≥ 700J/m (ASTM D256)	/	≥ 16J/m (ASTM D256)	≥ 25J/m (ASTM D256)
Elongation at Break	≥ 3%	≥ 30%	≥ 30%	≥ 150%	≥ 50%	≥ 150%	≥ 11%	≥ 50%
Distortion Temp.	≥ 55℃	≥ 88℃	≥ 88℃	≥ 100℃	≥ 125℃	≥ 70℃	≥ 55℃	≥ 125℃

Figura 12.1: Encerrado de color rojo se encuentran las propiedades del filamento ABS Flashforge del catálogo entregado por el proveedor.

Apéndice B. Ficha técnica de acetona industrial



**Química
Universal**

FICHA TECNICA

Química Universal Ltda. a través de su Departamento Técnico, certifica que su producto **Acetona**, cumple con las siguientes especificaciones técnicas:

DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES:

Acetona, DMK, Dimetilcetona, 2-Propanona ($\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$) es un líquido incoloro altamente inflamable. Disolvente para gran variedad de sustancias orgánicas. Se usa en pinturas especialmente para lacas acrílicas y de nitrocelulosa. Para plásticos de celulosa, rayón de acetato de celulosa, papel transparente, película fotográfica, vidrio laminado inastillable, tintas de imprenta. En procesos de extracción de agentes curtientes, resinas, perfumes, productos farmacéuticos, aceites de semillas oleaginosas. Se emplea para el almacenamiento de acetileno. Es un agente deshidratante.

ESPECIFICACIONES:

Método	Propiedad	Min	Max	Unidad
ASTM D1613	Acidez Acido Acetico		0.002	%wt
ASTM E203	Contenido de Agua		0.5	%wt
ASTM D1353	Materia no volatil		10	ppm
ASTM D1722	miscibilidad del agua	Miscible, agua destilada		
ASTM D4052 Mod	Densidad 20/20 °C	0.7910	0.7930	
ASTM D4052 Mod	Densidad 25/25 °C	0.7860	0.7890	
ASTM D1614	Alcalinidad como amoniaco		0.001	%
ASTM D5386	Platino Cobalto Color		5	
ATM-041	Pureza de Acetona	99.5		%wt
ASTM D4176 Mod	Procedimiento 1, Apariencia	Claro, ww liquido		
ASTM D1363	Permanganate tiempo @ 25 °C			Min

Almacenar los envases en un lugar limpio, fresco. No someter los envases a un apilamiento excesivo (seguir las indicaciones del embalaje para ello).

FORMATO: Tambor o Granel.

FECHA EMISIÓN: junio de 2020

Química Universal, Lo Zañartu 092, Quilicura, CP 8720525, Santiago – Chile
Fono: +562 2783 4400
www.quimicauniversal.cl

Página 1 de 1

Figura 12.2: Página 1/2 de ficha técnica de la acetona marca Química Universal de concentración de 99.5%.

Consejos de prudencia - Prevención	: P261 Evitar respirar humos/gases/nieblas/vapores /aerosoles. P264 Lavarse partes del cuerpo que estuvieron en contacto cuidadosamente después de la manipulación P271 Utilizar solo al aire libre o en un lugar bien ventilado. P280 Usar guantes/ropa de protección/equipos de protección para la cara y ojos.
Consejos de prudencia - Intervención	: P331 NO provocar vómito. P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo) quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Enjuagar la piel con agua o ducharse. P304 + P340 EN CASO DE INHALACIÓN transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. P312 Llamar a un centro TOXICOLOGICO si la persona se encuentra mal. P301 + P312 EN CASO DE INGESTIÓN llamar a centro TOXICOLOGICO/médico si la persona se encuentra mal. P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar los lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. P337 + P313 Si la irritación ocular persiste, consultar a un médico.
Señal de seguridad según NCh1411/4	: Azul (Salud)= 1; Rojo (Inflamabilidad)= 3; Amarillo (Reactividad)= 0
	
Clasificación específica	: NA
Distintivo específico	: NA
Descripción de peligros	: El efecto de una sobreexposición aguda (por una vez) puede causar trastornos en el metabolismo, debilidad muscular, náuseas y vómitos. La inhalación de vapores puede producir irritación de las membranas mucosas, conjuntiva y tracto respiratorio, en concentraciones mayores dolor de cabeza, vértigo, narcosis. Al contacto con la piel puede producir irritaciones y en algunos casos dermatitis seca. Al contacto con los ojos puede producir irritación y/o conjuntivitis. La ingestión del producto puede producir dolor de cabeza, narcosis, náuseas, gastritis, depresión del sistema nervioso central llame al médico. Si una pequeña parte del producto o parte del vomito ingresa a los pulmones puede producir bronco pulmonía o un edema pulmonar. Los efectos de una sobreexposición crónica (largo plazo) puede producir una dermatitis permanente, alterar riñones y metabolismo.
Descripción de peligros específicos	: NA
Otros peligros	: No disponible.

Figura 12.3: Página 2/2 de ficha técnica de la acetona marca Química Universal de concentración de 99.5%.

Apéndice C. Ficha técnica de caucho de silicona RTV XL 8830



FICHA TÉCNICA

SILICONA CAUCHO RTV XL 8820

Para la Fabricación de moldes de silicona a base de estaño

CARACTERÍSTICAS

- Buena operatividad y fluidez
- Excelente resistencia a rasgaduras y a fuerza de tensión.
- Excelente flexibilidad y fácil de remover.
- Resistencia a altas temperaturas
- Amplios períodos de duplicación y uso repetido
- Se puede hacer agente tixotrópico para replicación con brocha en superficies verticales

Goma de silicona para fabricación de moldes de alta resistencia

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

XL-8810, XL-8820, XL8825, XL8830 es una goma de silicona a base de estaño ,para la fabricación de moldes, que cura a temperatura ambiente para formar una goma flexible y resistente con una excelente resistencia a la tensión y al desgarramiento en aproximadamente 24 horas.

USOS

La goma de silicona XL-8810, XL-8820, XL8825, XL8830 se utiliza principalmente para la fabricación de moldes para la producción en masa de piezas de diversos materiales (Yeso, cera, piedra reconstituida, diversas resinas (epoxi, acrílico, poliéster), elastómero de silicona, tales como:

- Mobiliario: fundición de muebles y decoración
- Figurillas: juguetes, velas, estatuas, artículos de regalo, jabón, artesanías, esculturas
- Elementos decorativos: cornisas, columnas, adornos, estatuas
- Construcción: prefabricación de elementos decorativos, pavimento, adoquines, mobiliario urbano, fundición de hormigón.

PROPIEDADES TÍPICAS

Modelo	XL-8810	XL-8820	XL-8825	XL-8830
Apariencia	blanco	blanco	blanco	blanco
Viscosidad(cps25°C)	8000-10000	10000-13000	17000-19000	24000-29000
Dureza (shore A)	10	20	25	30
Fuerza de Tensión (MPa)	≥2.6	≥3.0	≥3.5	≥3.9
Resistencia a rasgadura (KN/m)	≥20	≥25	≥28	≥30
Elongación de ruptura (%)	≥400	≥420	≥430	≥450
Relación de mezcla (%)	3%-5%	3%-5%	3%-5%	3%-5%
Retracción (%)	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Densidad (g/cm ³)	1.08	1.08	1.08	1.08
Vida útil (min)	20-40	20-40	20-40	20-40
Tiempo de curado (horas)	2-5	2-5	2-5	2-5

Figura 12.4: Página 1/2 del catálogo de propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 entregado por el proveedor.

NOTA DEL CATALIZADOR

Tabla para catalizador y Temperatura	
Temperatura(° C)	Proporción de Mezcla
7 0C	3.8% to 4%
10	3.5%
15	3.2%
20	3%
25	3%
40	2% to 2.5%

Nota: proporción recomendable de mezcla de referencia

PREPARACIÓN DE SEGURIDAD

Seguridad primero

1. La ficha de seguridad de materiales debe leerse antes del uso. Todos los productos de silicona son seguros de usar si se leen las instrucciones y se siguen correctamente.
2. Mantenga fuera del alcance de los niños
3. Usar sólo con ventilación adecuada. El contacto con la piel o los ojos puede causar irritación. Enjuague los ojos con agua durante 20 minutos y busque atención médica de inmediato. Retire de la piel con un limpiador de manos sin agua seguido de agua y jabón.

NOTA:

La información contenida en esta ficha es precisa. Sin embargo, ninguna garantía está expresa o implícita, ya que las condiciones de uso están fuera de nuestro control. El usuario debe determinar la idoneidad del producto para el uso previsto y asumir todos los riesgos y la responsabilidad en relación con el mismo.

CÓMO USAR LA SILICONA

Aplicación del agente desmoldante

Para asegurar un fácil desmolde, aplique una ligera capa de agente de desmolde con una brocha sobre toda la superficie del molde original. Deje secar por 30 minutos.

Mezcla de los dos componentes

- Es aconsejable mezclar la base de goma de silicona y agitar el agente de curado antes de mezclarlos.
- Tome 100 partes de base de silicona y 3,4 o 5 partes de agente de curado por peso con exactitud.
- Mezcle bien los dos componentes durante 3 minutos con mezclador eléctrico y asegúrese de raspar los lados y el fondo del tambor.

Desgasificación al vacío

Después de mezclar la base de silicona y el agente de curado, se recomienda la desgasificación al vacío para eliminar cualquier burbuja. Desgasificar por 2-3 minutos. Las burbujas desaparecerán gradualmente.

Verter la Mezcla

Para obtener mejores resultados, vierta al tambor los componentes de la mezcla en un flujo uniforme para minimizar el aire atrapado. Tenga en cuenta que el nivel de la goma de silicona debe estar al menos 1.3 cm sobre el punto más alto de la superficie del molde original.

Extrusión y curado

Las mejores condiciones de curado son a temperatura ambiente (25° C) y humedad del 50%. El uso de la silicona a mayor temperatura reducirá la vida útil y el tiempo de curado. Por el contrario, una temperatura más baja aumentará la vida útil y la proporción de la mezcla.

Deje que el molde cure por lo menos 24 horas a temperatura ambiente antes de desmoldar. No cure por debajo de los 20°C. A fin conseguir los mejores niveles de rendimiento posible de los moldes, es preferible usarlos después de 24 horas.

ALMACENAMIENTO Y DURACIÓN

Al almacenar en su envase original cerrado a temperatura ambiente de 25° XL SILICONE puede guardarse por hasta 12 meses. Y el catalizador puede ser almacenado hasta por 24 meses.

Figura 12.5: Página 2/2 del catálogo de propiedades del caucho de silicona RTV XL 8830 entregado por el proveedor.

Modelo	XL-8810	XL-8820	XL-8825	XL-8830
Apariencia	blanco	blanco	blanco	blanco
Viscosidad(cps25°C)	8000-10000	10000-13000	17000-19000	24000-29000
Dureza (shore A)	10	20	25	30
Fuerza de Tensión (MPa)	≥2.6	≥3.0	≥3.5	≥3.9
Resistencia a rasgadura (KN/m)	≥20	≥25	≥28	≥30
Elongación de ruptura (%)	≥400	≥420	≥430	≥450
Relación de mezcla (%)	3%-5%	3%-5%	3%-5%	3%-5%
Retracción (%)	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Densidad (g/cm³)	1.08	1.08	1.08	1.08
Vida útil (min)	20-40	20-40	20-40	20-40
Tiempo de curado (horas)	2-5	2-5	2-5	2-5

Tabla 12.1: Propiedades de caucho de silicona, extraída de Figura 12.4. De color amarillo se destaca el caucho de silicona RTV XL 8830.



Figura 12.6; Caucho de silicona RTV XL 8830 1[Kg] junto con su catalizador.

Apéndice D. Asignación de puntaje en matriz de pesos ponderados

Tabla 12.2: Asignación de puntaje para método de selección de matriz de pesos ponderados.[38]

11-point Scale	Description	5-point Scale	Description
0	Totally useless solution	0	Inadequate
1	Very inadequate solution		
2	Weak solution	1	Weak
3	Poor solution		
4	Tolerable solution	2	Satisfactory
5	Satisfactory solution		
6	Good solution with a few drawbacks	3	Good
7	Good solution		
8	Very good solution		
9	Excellent (exceeds the requirement)	4	Excellent
10	Ideal solution		