



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO JOSÉ GOMES DE MELO

**METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE MILIVÁLVULAS EM
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO MATERIAIS FLEXÍVEIS**

RECIFE

2022

ANTONIO JOSÉ GOMES DE MELO

**METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE MILIVÁLVULAS EM
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO MATERIAIS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Prototipagem.

Orientador: Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo.

RECIFE

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Melo, Antonio José Gomes de.

Metodologia para o desenvolvimento de miliválvulas em Impressão 3D
utilizando materiais flexíveis / Antonio José Gomes de Melo. - Recife, 2022.
66 : il., tab.

Orientador(a): Justo Emilio Alvarez Jácomo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2022.

1. Microválvulas. 2. Miliválvulas. 3. Prototipagem Rápida. 4. LCD-
SLA. 5. FDM. I. Jácomo, Justo Emilio Alvarez. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ANTÔNIO JOSÉ GOMES DE MELO

**METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE MILIVÁLVULAS EM
IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO MATERIAIS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 01 / 11 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Antônio Marques da Costa Soares Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Nivaldo Antônio Portela de Vasconcelos (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a meus familiares, em especial meus pais Valmir Gomes Cavalcanti e Telma Medeiros de Melo Cavalcanti e a meus amigos que de forma direta ou indireta contribuíram com a minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que, embora não seja uma pessoa que segue à risca os preceitos da religião católica, reconheço sua grande influência e poder em minha vida e naqueles que me cercam.

Agradeço a meus familiares, em especial a meus pais Valmir Gomes Cavalcanti e Telma Medeiros de Melo Cavalcanti por todo o carinho, cuidado e ensinamentos que puderam me transmitir e por serem os principais atores na formação do meu caráter.

Agradeço também aos meus amigos Júlio Cesar de Oliveira, Guilherme José Barbosa, Vinicius Soares de Sena e a todos os outros que não citei por compartilharem comigo momentos alegres, de união, mas principalmente pelo apoio dado em momentos difíceis, de reflexão.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo, pelas orientações e conselhos para a elaboração desse trabalho e a Wagner Rodolfo Lopes e a Marcos Eduardo Araújo de Lima pelos conselhos e auxílio para manusear as impressoras 3D e na impressão das peças.

RESUMO

Os sistemas microfluídicos são aqueles que possuem dezenas a centenas de microns de escala e por isso manipulam quantidades mínimas de fluido. Atualmente esses dispositivos representam um mercado em expansão visto que eles são utilizados em áreas diversas como engenharia biomédica, química e aeroespacial. Dentro dos dispositivos microfluídicos encontram-se as microválvulas, que podem ser válvulas reguladoras de fluxo, direcionais e de retenção. Esse trabalho tem como objetivo elaborar uma metodologia para desenvolvimento de miliválvulas utilizando Impressão 3D e materiais flexíveis, o que possibilita a fabricação em uma única etapa. Como metodologia, inicialmente foi elaborado um *Benchmark* para possibilitar avaliar o quanto menor as impressoras utilizadas conseguem imprimir canais, pois não foi encontrado na literatura um modelo pré-existente, onde o *Benchmark* consistiu em um bloco retangular (49,5x15,0x11,5 mm) com canais de 0,5 a 5,0 mm de diâmetro. Na sequência foi elaborado a modelagem da válvula baseado nos resultados obtidos no *Benchmark*. Após isso foi realizada a simulação para verificar se a válvula resistiria aos esforços mecânicos. Por fim, foi realizada a impressão da válvula e realizado testes para verificar o seu funcionamento. Como forma de validar a metodologia apresentada, foram utilizadas duas tecnologias de Impressão 3D: a Deposição de Material Fundido (FDM) e a *Digital Crystal Liquid* (LCD-SLA) para desenvolver uma miliválvula de retenção do tipo *Flap*, de 2,8 mm de diâmetro. Os resultados evidenciaram que para a tecnologia FDM não foi possível fabricar a válvula por limitações da própria tecnologia, porém para a tecnologia LCD-SLA foram obtidos melhores resultados na fabricação da miliválvula de retenção, pois conseguiu-se fabricar a válvula, porém no sentido de reter o fluxo ela apresentou pequenos vazamentos durante os testes. Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada é promissora para o desenvolvimento de microválvulas, devendo ser realizados testes para imprimir tanto outros tipos de válvulas como válvulas de menores dimensões.

Palavras-chave: Microválvulas; Miliválvulas; Prototipagem Rápida; LCD-SLA; FDM.

ABSTRACT

Microfluidic systems are those that have tens to hundreds of microns in scale and therefore handle minute amounts of fluid. Currently, these devices represent an expanding market as they are used in diverse areas such as biomedical, chemical and aerospace engineering. Within the microfluidic devices are microvalves, which can be flow regulating, directional and check valves. This work aims to develop a methodology for the development of milivalves using 3D printing and flexible materials, which allows manufacturing in a single step. As a methodology, initially a Benchmark was developed to make it possible to evaluate how much smaller the printers used can print channels, since a pre-existing model was not found in the literature, where the Benchmark consisted of a rectangular block (49.5x15.0x11.5 mm) with channels from 0.5 to 5.0 mm in diameter. Then, the valve modeling was elaborated based on the results obtained in the Benchmark. After that, the simulation was performed to verify if the valve would resist the mechanical efforts. Finally, the valve was printed and tests were carried out to verify its operation. As a way of validating the methodology presented, two 3D Printing technologies were used: Molten Material Deposition (FDM) and Digital Crystal Liquid (LCD-SLA) to develop a 2.8 mm Flap-type milicheck valve. diameter. The results showed that for the FDM technology it was not possible to manufacture the valve due to limitations of the technology itself, but for the LCD-SLA technology better results were obtained in the manufacture of the milicheck valve, because it was possible to manufacture the valve, but in the sense of retain the flow it had small leaks during the tests. Therefore, it is concluded that the methodology presented is promising for the development of microvalves, and tests should be carried out to print both other types of valves and smaller valves.

Keywords: Microvalves; milivalves; Rapid Prototyping; LCD-SLA; FDM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Esquema da produção de uma peça em Impressão 3D	18
Figura 2 –	Ilustração da tecnologia Estereolitografia para Impressão 3D	18
Figura 3 –	Esquema de uma impressora FDM	19
Figura 4 –	Ligações entre camadas para as técnicas FDM e SLA	21
Figura 5 –	Tecnologias de Impressão 3D por “fotocura”	22
Figura 6 –	Atuador desenvolvido por Impressão 4D	23
Figura 7 –	Protótipo de circuito 3D, impresso inicialmente em 2D	24
Figura 8 –	Corpos de prova de material híbrido	25
Figura 9 –	Válvula de acionamento pneumático	25
Figura 10 –	Bomba diafragma	26
Figura 11 –	Microválvula reguladora de fluxo	26
Figura 12 –	Prótese de um dedo desenvolvido em material flexível	27
Figura 13 –	Prótese de uma mão em material flexível e rígido	27
Figura 14 –	Valor de mercado para os MEMS em 2010 e 2011 e expectativa de crescimento até 2016	28
Figura 15 –	Escala dimensional para sistemas mili, micro e nanofluídicos	29
Figura 16 –	Quantidade de publicações por ano	32
Figura 17 –	Tecnologias de impressão empregadas nos trabalhos	32
Figura 18 –	Fluxograma para metodologia do projeto para Impressão 3D FDM e LCD-SLA	33
Figura 19 –	Impressora “Anet A8” e “Elegoo Mars 3”	34
Figura 20 –	Softwares Ansys 2021 R1 e Ultimaker Cura 4.11.0	34
Figura 21 –	Tube flexível, tubo metálico, seringa (aparato experimental) e balança	35
Figura 22 –	Cabeçote extrusor da impressora Anet A8 e possível “dobra” do filamento	35
Figura 23 –	Peça para adaptação do cabeçote e sua montagem	36
Figura 24 –	Impressões de microcanais utilizando tecnologia FDM e poliuretano	37
Figura 25 –	<i>Benchmark</i> para microcanais	37
Figura 26 –	Modelo “I” e “c” para válvulas de retenção	39

Figura 27 –	Modelo “ç” e “Ç” para válvulas de retenção	39
Figura 28 –	Contato “ <i>Bonded</i> ” e contato “ <i>Frictionless</i> ”	41
Figura 29 –	Suporte fixo e região onde atuará pressão	41
Figura 30 –	Aparato experimental para testes de funcionamento	42
Figura 31 –	Imagens dos <i>Benchmarks</i> impressos em FDM	44
Figura 32 –	Layout de impressão da peça, apresentando a técnica <i>Brim</i> de impressão	45
Figura 33 –	Imagens dos <i>Benchmarks</i> impressos em LCD-SLA	45
Figura 34 –	Modelos miliválvula “I” à esquerda e “c” à direita	46
Figura 35 –	Modelos miliválvula “ç” à esquerda e “Ç” à direita	47
Figura 36 –	Dimensões padrão para os quatro modelos de válvulas	47
Figura 37 –	Resultados para a simulação do fechamento da válvula para o modelo “I”	48
Figura 38 –	Resultados para a simulação da abertura da válvula para o modelo “I”	49
Figura 39 –	Peças impressas em FDM	51
Figura 40 –	Posição de impressão da peça em LCD-SLA	51
Figura 41 –	Movimentação do Flap para ajustes de impressão	52
Figura 42 –	Imagens de cortes para miliválvulas com problemas de impressão (LCD-SLA)	53
Figura 43 –	Imagens de cortes para miliválvulas com impressão bem-sucedida (LCD-SLA)	53
Figura 44 –	Aparato experimental interligado a miliválvula após ajuste	54
Figura 45 –	Novas dimensões para a miliválvula	55
Figura 46 –	Gráfico apresentando os resultados obtidos nos experimentos	58
Figura 47 –	<i>Benchmark</i> impresso com tempo de exposição 1,5s e altura de camada de 0,05 mm	59
Figura 48 –	<i>Benchmark</i> impresso com tempo de exposição 1,3s e altura de camada de 0,04 mm	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação dos tipos de microválvulas existentes	30
Tabela 2 –	Trabalhos acadêmicos reunidos	31
Tabela 3 –	Principais parâmetros para impressão FDM	38
Tabela 4 –	Principais parâmetros para impressão LCD-SLA	38
Tabela 5 –	Propriedades mecânicas dos materiais para impressão	40
Tabela 6 –	Resultados para a simulação do fechamento das válvulas, considerando 3DLAB FLEX	48
Tabela 7 –	Resultados para a simulação do fechamento das válvulas, considerando TPU	49
Tabela 8 –	Resultados para a simulação da abertura das válvulas, considerando 3DLAB FLEX	49
Tabela 9 –	Resultados para a simulação da abertura das válvulas, considerando TPU	50
Tabela 10 –	Resultados para os testes da abertura das válvulas	57
Tabela 11 –	Resultados para os testes de fechamento das válvulas	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Artigo Científico
CAD	Desenho Assistido por Computador
DLP	<i>Digital light Processing</i>
DM	Dissertação de Mestrado
FDM	Modelagem por Deposição de Material Fundido
IJT	Impressão por Jato de Tinta
LCD-SLA	<i>Liquid Crystal Display</i>
LOC	<i>Lab-on-a-chip</i>
LOM	Manufatura de Objetos por Lâminas
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i>
PLA	Ácido Poliláctico
RS	Revisão Sistemática da Literatura
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
TPU	Poliuretano Termoplástico
UV	Ultravioleta
μTAS	Microsistemas de análise total
2D	Dois dimensões
3D	Três dimensões
4D	Quatro dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral e específicos	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	INTRODUÇÃO A IMPRESSÃO 3D	17
2.2	TECNOLOGIA FDM DE IMPRESSÃO	19
2.3	TECNOLOGIA SLA DE IMPRESSÃO	20
2.4	IMPRESSÃO 4D	23
2.5	MATERIAIS FLEXÍVEIS PARA IMPRESSÃO 3D	24
2.6	SISTEMAS MICROFLUIDICOS E AS MICROVÁLVULAS	27
2.7	REVISÃO DA LITERATURA	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E SOFTWARES UTILIZADOS	33
3.2	PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE <i>BENCHMARKS</i>	36
3.3	IMPRESSÃO DO BENCHMARK E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
3.4	DEFINIÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA MILIVÁLVULA ...	38
3.5	SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MICROVÁLVULA.....	40
3.6	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.....	42
3.7	TESTE DE FUNCIONAMENTO	42
4	RESULTADOS	44
4.1	IMPRESSÃO DO <i>BENCHMARK</i>	44
4.2	MODELAGEM DA MILIVÁLVULA	46
4.3	SIMULAÇÃO DOS MODELOS DE MILIVÁLVULAS	47
4.4	IMPRESSÃO DOS MODELOS	50
4.5	TESTES DE FUNCIONAMENTO.....	54

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A Impressão 3D, embora possua vários métodos, tecnologias associadas, como a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) e Estereolitografia (SLA), pode ser definida como um processo de fabricação onde a peça é gerada pela deposição de camadas planas sucessivas de determinado material (Volpato et al, 2007).

Em seu início, a Impressão 3D basicamente era utilizada na fabricação de protótipos para visualização, sem aplicações mais objetivas devido à baixa precisão dimensional e pouca disponibilidade de matérias para imprimir as peças, o que é natural para um processo que acabara de surgir. Com o passar dos anos e o crescente interesse nesse processo de fabricação, a qualidade do processo evoluiu e, além da boa oferta de matérias primas no mercado, hoje a qualidade e precisão das peças atingiram um patamar onde elas já podem ser utilizadas não somente para o desenvolvimento de protótipos, mas também como peças finais para distintas aplicações (Volpato et al, 2007).

Atualmente existem estudos que apresentam um grande salto nessa tecnologia, nomeada como “Impressão 4D”, onde foram incorporados “materiais inteligentes” para impressão. Esses materiais são caracterizados por responder a estímulos externos (umidade, temperatura, luz), o que ocasiona uma mudança em seu formato original ou propriedades (Lee et al, 2007).

Em outros trabalhos, Padilha Pinto (2019) desenvolveu uma prótese de um dedo indicador utilizando material flexível TPU. Já Silva (2014) desenvolveu uma prótese de uma mão utilizando tanto material flexível quanto rígido. Esses dois trabalhos apresentam um fator comum, além da região do corpo de aplicação das próteses, as duas foram impressas em peça única e ainda assim apresentam graus de liberdade para movimentação, mesmo sem componentes para articulação. Com isso, pode-se ver que a Impressão 3D com materiais flexíveis proporciona à peça impressa características da Impressão 4D, visto que a peça pode ter a sua forma alterada com o tempo, porém não pode ser classificada como tal pois o material utilizado não é um “material inteligente”.

Os MEMS (*Microelectromechanical systems*) são dispositivos que vêm obtendo cada vez mais espaço no mercado, sendo aplicados em vários segmentos da indústria como o médico, automotivo e aeroespacial e seu valor de mercado, em 2017, foi estimado por Perlmutter (2012) em \$21,2 Bilhões de dólares. Dentre os sistemas que englobam os MEMS, estão os dispositivos microfluídicos, que serão objeto de estudo nesse trabalho, e segundo o mesmo autor, para o ano 2017 eles obteriam um valor de mercado entre \$4,0 e \$5,0 Bilhões de dólares.

Baseado no exposto acima, nesse trabalho será desenvolvida uma metodologia para o desenvolvimento de miliválvulas utilizando Impressão 3D e materiais flexíveis, e como prova de conceito será fabricado uma miliválvula de retenção do tipo *Flap*, em peça única. Como a prototipagem rápida é capaz de fabricar peças complexas com rapidez e qualidade e os materiais flexíveis proporcionam elasticidade à peça de forma que ela possua graus de liberdade para movimentação sem a necessidade de juntas, acredita-se que o desenvolvimento de válvulas mecânicas por esse processo seja uma possibilidade real e factível.

Esse Trabalho consistiu em uma pesquisa aplicada, pois busca contribuir com a resolução de um problema específico, no caso, o desenvolvimento de uma metodologia para fabricação de miliválvulas com Impressão 3D e materiais flexíveis. O objetivo da pesquisa será exploratório, porque busca desenvolver novos conhecimentos para o assunto abordado. A abordagem será qualitativa e quantitativa, pois o autor irá buscar o levantamento de dados para embasar suas ideias e analisá-los de forma crítica. Os procedimentos da pesquisa foram bibliográficos e experimentais, já que serão realizadas pesquisas na literatura pré-existente e testes empíricos, a partir do desenvolvimento de peças para testes de sua funcionalidade. Por fim, o método utilizado durante o trabalho será o hipotético-dedutivo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral e específicos

Elaborar uma metodologia para o desenvolvimento de miliválvulas em material flexível utilizando os métodos FDM e LCD-SLA de Impressão 3D. Onde foram estabelecidos como objetivos específicos:

- a) Realizar estudos acerca da tecnologia FDM e LCD-SLA de impressão e aplicações utilizando materiais flexíveis;
- b) Realizar uma revisão da literatura acerca de dispositivos microfluídicos e Impressão 3D;
- c) Pesquisar um modelo de *Benchmark* onde possa ser avaliado o quão as impressoras utilizadas nesse trabalho conseguem imprimir canais menores;
- d) Validar a metodologia fabricando uma miliválvula de retenção do tipo *Flap*.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui seis capítulos, começando pela presente introdução.

O segundo capítulo será sobre a fundamentação teórica desse trabalho, apresentando a Impressão 3D, o método de impressão FDM e os baseados em “fotocura” de resina (LCD-SLA), apresentação da Impressão 4D, apresentação de uma série de trabalhos aplicando a Impressão 3D com materiais flexíveis, dispositivos microfluídicos e uma revisão da literatura sobre esses dispositivos.

O terceiro capítulo apresentará a metodologia do trabalho, que contempla as etapas de desenvolvimento do *Benchmark*, modelagem e simulação da peça, fabricação da válvula tanto por FDM quanto LCD-SLA e, por fim, testes experimentais e análise dos resultados obtidos.

O quarto capítulo apresentará os resultados, começando pela impressão do *Benchmark*, seguindo pela modelagem da válvula, realização de simulação dos esforços mecânicos sob a válvula, análise dos resultados e possíveis ajustes no design inicial do modelo, e os testes de funcionamento.

O quinto e último capítulo conterà as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo busca apresentar a base teórica utilizada no trabalho em questão. Inicialmente será exposto, de forma mais detalhada, o conceito de Impressão 3D, seguido de uma explanação acerca dos métodos FDM e SLA (LCD-SLA) para impressão. Logo após, será abordada a Impressão 4D e a utilização de materiais flexíveis na Impressão 3D. Por fim, será introduzido o conceito de dispositivos microfluídicos e uma revisão da literatura contemplando esses dispositivos.

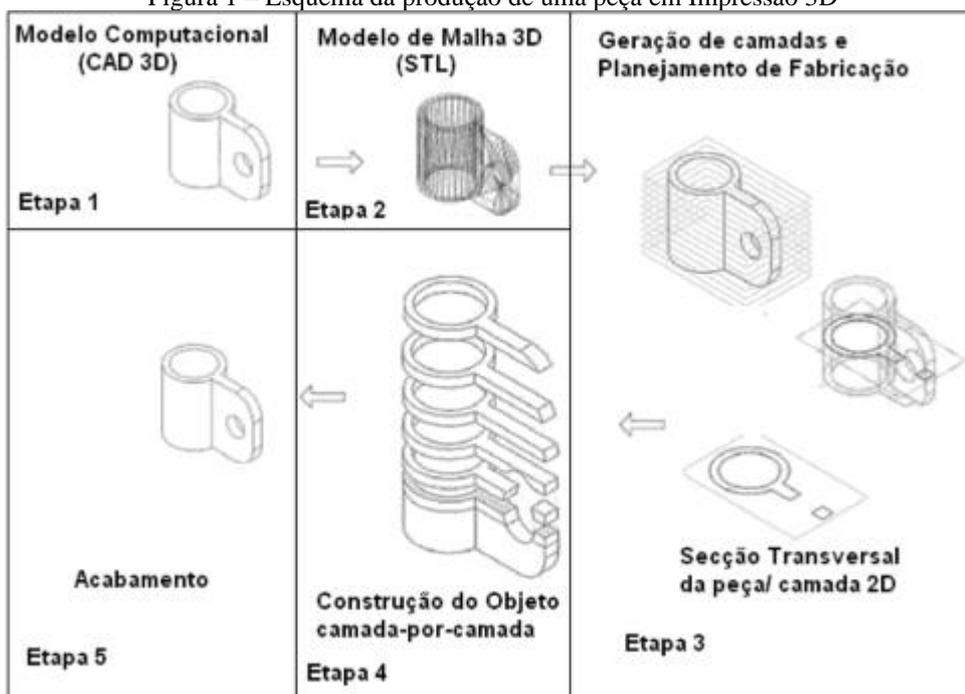
2.1 INTRODUÇÃO A IMPRESSÃO 3D

A Impressão 3D é um processo de fabricação onde é realizada a deposição sucessiva de camadas planas de um determinado material, com o intuito de formar um objeto, uma peça tridimensional (Volpato et al, 2007). Essa tecnologia, ao longo dos anos, foi nomeada de várias maneiras, como “Prototipagem rápida”, “Fabricação por Camadas”, “Impressão 3D”. Inicialmente a Impressão 3D era aplicada principalmente para a obtenção de protótipos, porém hoje ela pode ser usada para a fabricação de peças finais para aplicação nos mais diversos segmentos, como o automotivo, médico, aeroespacial, além de outras inúmeras aplicações (Campbell et al, 2015).

Atualmente há várias tecnologias para Impressão 3D, como a Estereolitografia (SLA), Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM), Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM), Impressão por Jato de Tinta (IJT) e Sinterização Seletiva a Laser (SLS). Essas técnicas geralmente são classificadas em três categorias, levando em conta a matéria prima utilizada para imprimir as peças, que são: 1) baseadas em líquidos (ex: SLA e IJT), 2) baseados em sólidos (ex: FDM e LOM) e 3) baseados em pó (ex: SLS) (Volpato et al, 2007).

Embora haja essa variedade com relação as tecnologias de impressão, todas basicamente seguem as mesmas cinco etapas para produção de determinado objeto, que são: 1) modelagem da peça (software CAD), 2) geração de modelo de malha formato STL, 3) geração de camadas e planejamento da fabricação, 4) impressão do objeto camada por camada e 5) pós processamento e acabamento (Cunico, 2015). Esse processo está esquematizado na Figura 1.

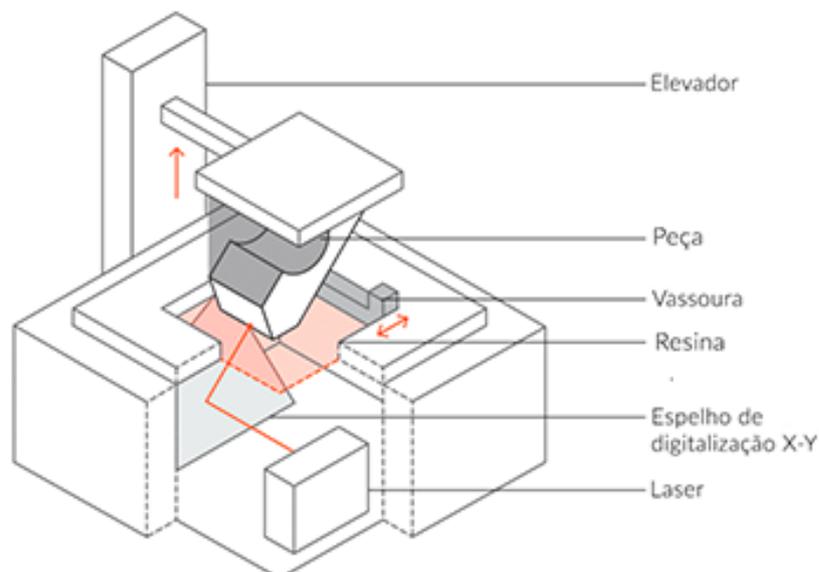
Figura 1 – Esquema da produção de uma peça em Impressão 3D



Fonte: Cunico (2015).

A primeira patente de uma impressora 3D surgiu no ano de 1984, por Charles Hull, onde se detalha uma impressora que seguia uma tecnologia nomeada de Estereolitografia (SLA). Nessa tecnologia, um laser ultravioleta de alta precisão é o responsável pela solidificação de uma resina líquida para a formação das camadas e quando uma camada é formada, a base onde ela está apoiada desce e uma nova é sobreposta, isso ocorre sucessivamente até a finalização do objeto (Weisgrab, 2019). Na Figura 2 é possível ver uma ilustração do processo.

Figura 2 – Ilustração da tecnologia Estereolitografia para Impressão 3D



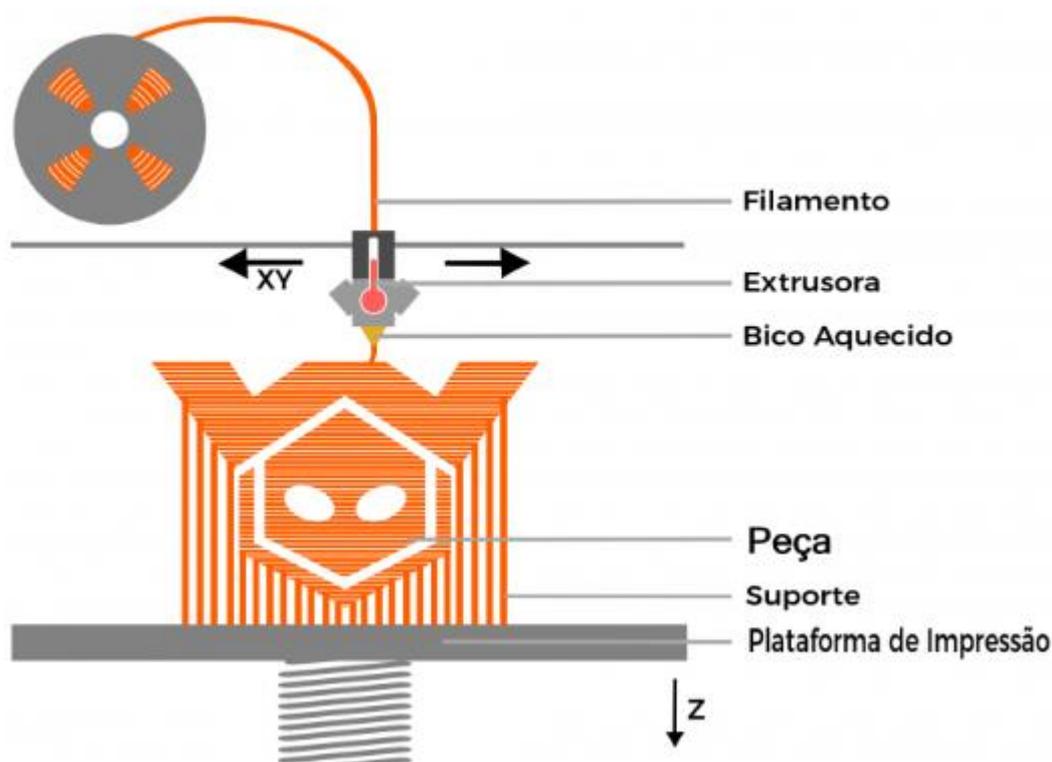
Fonte: 3DILLA (2022).

Outra patente importante de ser mencionada foi registrada por Crump no ano de 1989, que originou a técnica FDM (Cunico, 2015). Essas duas técnicas citadas serão utilizadas para o desenvolvimento desse trabalho e serão apresentadas com mais detalhes nos próximos tópicos.

2.2 TECNOLOGIA FDM DE IMPRESSÃO

A Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) é uma técnica de Impressão 3D que utiliza um bico extrusor para fundir um filamento de material termoplástico, $0,5^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura de transição vítrea, tornando-o maleável o suficiente para que ele seja utilizado para formar as camadas de material. O filamento é transportado para dentro do bico extrusor pela ação de roletes e são fundidos pela ação de resistências elétricas. Para construir a camada, o cabeçote da impressora tem liberdade para se movimentar no eixo “x” e “y” e com isso, ele segue as coordenadas geradas por um arquivo previamente enviado à impressora. Após a camada ser finalizada, o cabeçote se desloca no eixo “z”, permitindo a construção da próxima camada. Esse processo ocorre até a finalização do objeto tridimensional (Li et al, 2016; Pham et al, 1998; Cunico, 2015). A Figura 3 apresenta uma ilustração desse processo.

Figura 3 – Esquema de uma impressora FDM



Fonte: WISHBOX (2019).

Ainda se referindo a Figura 3, pode-se observar que a impressão consiste em um rosto de um personagem e essa peça está apoiada sob suportes. Isso ocorre pois como a impressão é realizada de forma que uma camada é apoiada sobre a outra há regiões, dependendo da geometria a ser impressa, onde isso não ocorre, logo, ocorreria uma falha de impressão. Por isso utiliza-se o material de suporte, que garante que sempre haja material de apoio para as camadas depositadas (Cunico, 2015).

Os materiais para filamentos de impressoras FDM precisam entregar aos usuários parâmetros como velocidade, força, precisão, resolução de superfície, resistência química, propriedades mecânicas. Alcançar soluções que atendam aos parâmetros desejados envolvem uma complexa interação entre as propriedades do material e parâmetros do processo de impressão. Além disso, a geometria do filamento também desempenha um importante papel no que diz respeito a capacidade de impressão e qualidade dos objetos impressos. Diâmetros inconsistentes de filamento podem conduzir a falhas de impressão (Li et al, 2016).

A tecnologia FDM de impressão apresenta como vantagens, perante outras tecnologias, o preço acessível da impressora e filamentos, diversidade de materiais disponíveis, grande comunidade de usuários e possibilidade de uso simultâneo de dois materiais para impressão. Porém, apresenta como desvantagens a limitação de resolução da peça, limitada pelo diâmetro do filamento, restrição ao desenvolvimento de detalhes finos, apresenta-se como um dos processos mais lentos dentre os tradicionais e pode ocorrer a contração (*Warp*) do material durante a impressão, gerando distorções na peça final, devido a um rápido resfriamento que pode ocorrer se não tomada as devidas precauções (3DLAB, 2021; Abreu, 2015).

2.3 TECNOLOGIA SLA DE IMPRESSÃO

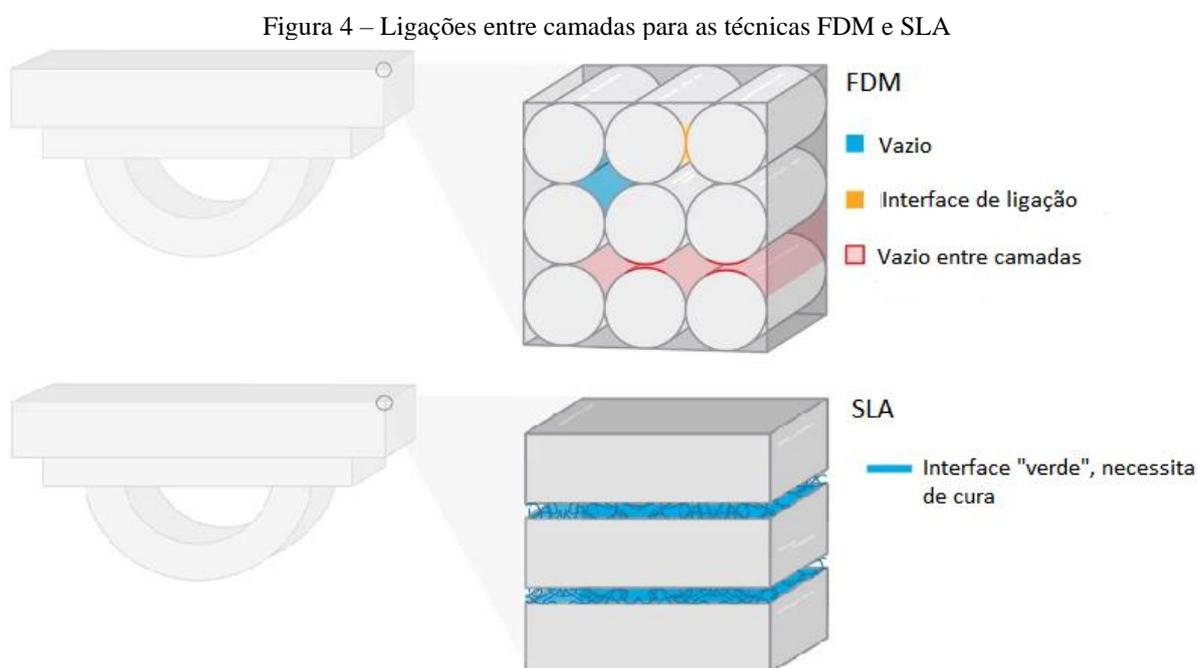
A Estereolitografia (SLA) foi a primeira tecnologia de Impressão 3D a surgir e, conseqüentemente, hoje é uma das mais difundidas no mercado. As impressoras que seguem essa técnica utilizam uma resina fotossensível como matéria prima para a formação das peças, onde essa resina é curada por meio de um laser de raios ultravioleta (UV), a Figura 2 demonstra de forma esquemática esse processo (Cunico, 2015).

As impressoras SLA trabalham da seguinte forma: uma plataforma é posicionada no tanque da resina, a uma distância equivalente a uma camada de impressão; na sequência, o laser UV é direcionado à resina seguindo um trajeto para a solidificação da primeira camada (o trajeto do laser é comandado por um conjunto de espelhos); após isso, a plataforma é movida no eixo “Z” para que a próxima camada seja curada e esse processo é repetido até a finalização da peça;

por fim, a peça ainda necessita de um processo adicional sob um “forno” de luz UV, afim de que a cura da resina seja total e a peça adquira propriedades mecânicas superiores (3DLAB, 2022).

A tecnologia SLA de Impressão 3D é capaz de produzir peças com alto grau de detalhes e de precisão dimensional, apresentando repetibilidade entre peças fabricadas. Isso se deve ao fato de que essa tecnologia trabalha a temperaturas próximas a ambiente, o que não gera dilatações térmicas durante a impressão. As peças fabricadas por SLA também apresentam acabamentos de superfícies suaves, comparáveis a técnicas tradicionais como usinagem, modelagem por injeção, o que podem vir a proporcionar, dependendo da aplicação, a possibilidade de fabricação de peças com estanqueidade para diversos fluidos, o que não pode ser garantido com a tecnologia FDM (FORMLABS, 2022; 3DLAB,2022).

Outro ponto interessante dessa tecnologia é a sua capacidade de produzir peças altamente isotrópicas, diferente de outras tecnologias como a FDM. Isso ocorre pois quando a peça é finalizada, a sua cura não está completa, necessitando passar por um tratamento sob luz UV, onde as camadas de impressão formam ligações mais sólidas, conferindo isotropia e estanqueidade a peça (FORMLABS, 2022). Esse fato pode ser visualizado na Figura 4.

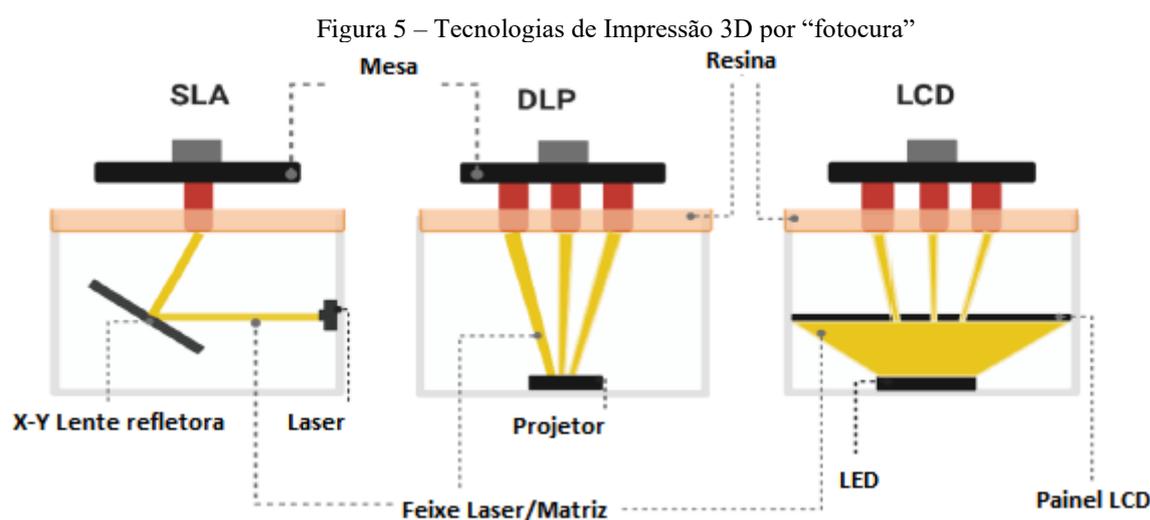


Fonte: FORMLABS (2022), adaptado.

Hoje há vários materiais para resinas utilizadas em Impressão 3D SLA (embora não como para impressão em FDM) disponíveis no mercado. Os materiais apresentam diversas propriedades, podendo ser macios ou duros, flexíveis, com resistência a impactos, preenchidos

com materiais como vidro e cerâmica e, portanto, podem ser utilizados em diferentes aplicações (FORMLABS, 2022).

Além disso, atualmente há outras tecnologias de Impressão 3D, além da já citada SLA, que trabalham com “fotocura” de resina, a *Digital light Processing* (DLP) e o *Liquid Crystal Display* (LCD-SLA). Essas tecnologias se diferenciam basicamente pela fonte de luz e pelo sistema de imagem, conforme pode ser verificado na Figura 5. Nela pode ser verificada que, enquanto para a SLA um laser é o responsável pela formação das camadas, para as tecnologias DLP e a LCD-SLA um feixe de luz UV projeta a camada de uma única vez sob a resina, porém para a impressora DLP um aparelho similar a um projetor de apresentações acadêmicas é o responsável por formar a imagem e emitir a luz UV que irá curar a camada, enquanto que na tecnologia LCD-SLA uma bateria de LEDs UV emitem a luz que é filtrada por uma tela LCD, onde esse LCD permite apenas a passagem da luz conforme a imagem da respectiva camada (Madzarevic, 2021; Quan et al, 2020).



Fonte: Madzarevic (2021), adaptado.

A tecnologia SLA, como já dito, foi a primeira forma de Impressão 3D a surgir e hoje ela apresenta muitos fornecedores. Dos processos por “fotocura” ela é o único capaz de imprimir peças de grandes dimensões, entretanto ela apresenta uma baixa taxa de impressão pois ela depende do movimento de um laser para tanto. A tecnologia DLP apresenta a maior precisão dentre as tecnologias citadas acima, porém ela apresenta limitações quanto ao tamanho das peças que podem ser impressos e hoje esse é um processo dominado pela “Texas Instruments Company”, o que encarece seu preço de aquisição. Por fim, para a tecnologia LCD-SLA, ela é considerada a mais barata das tecnologias mencionadas nesse tópico e apresenta boa resolução, contudo suas peças apresentam baixa vida útil comparada as outras tecnologias,

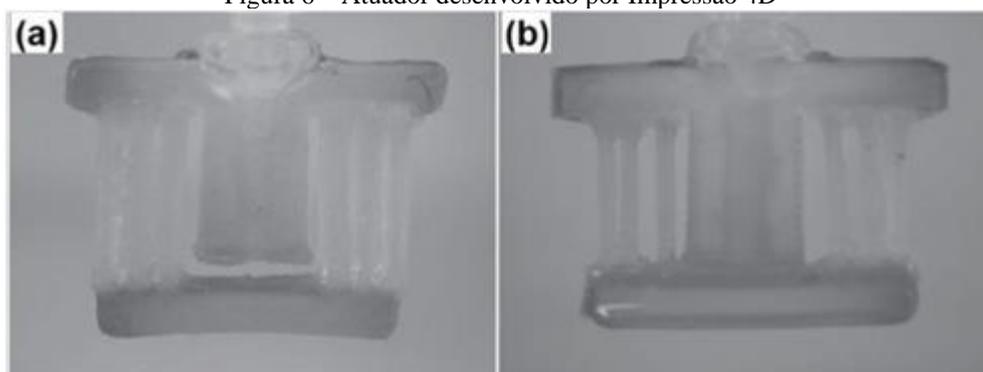
necessitando de trocas com mais frequência, além disso, ela apresenta uma baixa intensidade de luz pois 10% da luz atravessa a tela LCD e os 90% restantes são absorvidos pela mesma (Quan et al, 2020).

2.4 IMPRESSÃO 4D

A Impressão 4D é um conceito novo que surgiu a partir da união entre a Impressão 3D e os ditos “materiais inteligentes”. Esses materiais são nomeados assim pois respondem a estímulos externos, como luminosidade, temperatura e umidade, modificando sua estrutura ou propriedades. Sendo assim, pode-se dizer que uma quarta dimensão foi incorporada a Impressão 3D, o tempo, já que a peça poderá ter a sua estrutura modificada em resposta a estímulos externos no decorrer de sua vida útil (Lee et al, 2017).

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando a Impressão 4D nos mais diversos segmentos, como o trabalho desenvolvido por Duarte (2018), onde foi desenvolvido uma resina plástica biocompatível para a construção de uma prótese para a traqueia humana, que após impressa apresentava boa flexibilidade, mas quando exposta a um líquido similar ao plasma sanguíneo, ela enrijecia. Barkarich et al (2015) desenvolveram um atuador que expande quando em contato com água a 60°C, como pode ser visto na Figura 6.

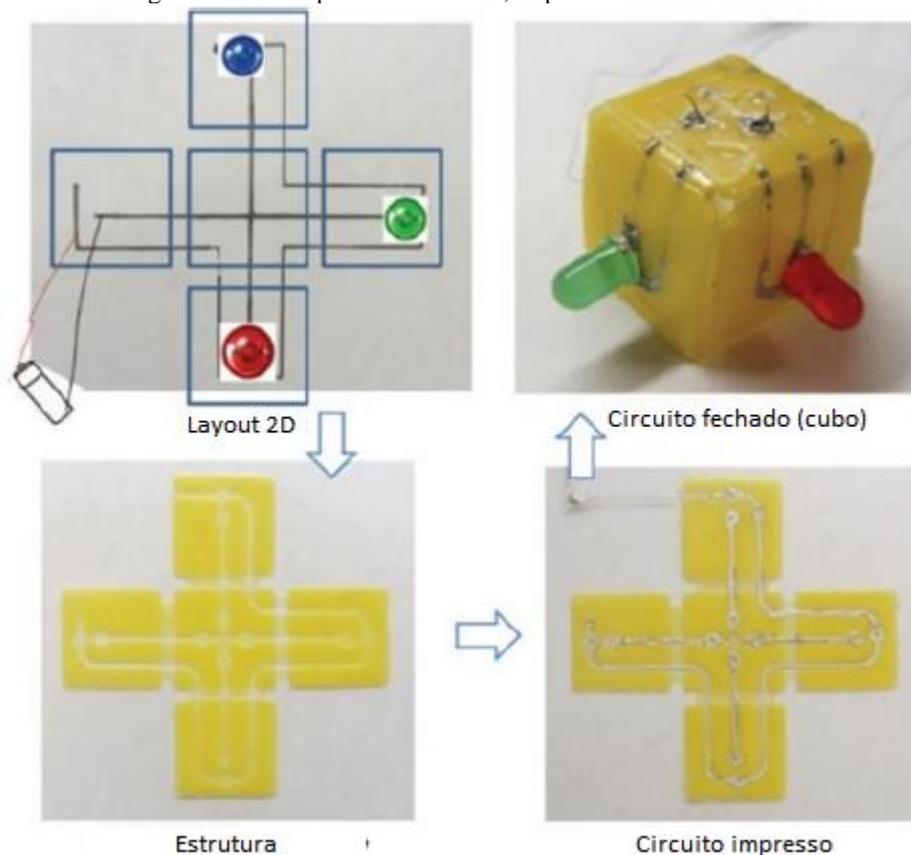
Figura 6 – Atuador desenvolvido por Impressão 4D



Fonte: Barkarich et al (2015).

Por fim, ainda é válido destacar o trabalho desenvolvido por Deng et al (2016), que imprimiu um circuito elétrico em uma estrutura inicialmente em 2D, porém quando aquecido, essa estrutura se deformava, formando um cubo, ou seja, uma configuração 3D para o circuito, que pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 – Protótipo de circuito 3D, impresso inicialmente em 2D



Fonte: Deng et al (2016), adaptado.

2.5 MATERIAIS FLEXÍVEIS PARA IMPRESSÃO 3D

O mercado atualmente oferece uma boa variedade de materiais flexíveis, a exemplo do Soft PLA, PolyFlex, Poliuretano Termoplástico (TPU). Este último engloba outros tipos de matérias flexíveis, como o NinjaFlex, Cheetah e Armadillo. O NinjaFlex é um composto que combina material termoplástico e borracha, conferindo a ele flexibilidade, resistência mecânica e não apresenta grandes problemas para ser extrudado (Padilha Pinto, 2019).

Há uma vasta gama de trabalhos disponíveis na literatura que apresentam aplicações de matérias flexíveis na Impressão 3D. Cunha (2019) desenvolveu estudos acerca das propriedades mecânicas de um material híbrido, feito tanto de material rígido quanto flexível, onde o autor se inspirou em estruturas existentes na natureza. Os corpos de prova utilizados no estudo podem ser analisados na Figura 8.

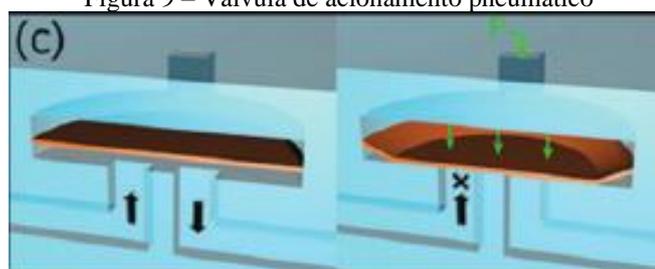
Figura 8 – Corpos de prova de material híbrido



Fonte: Cunha (2019).

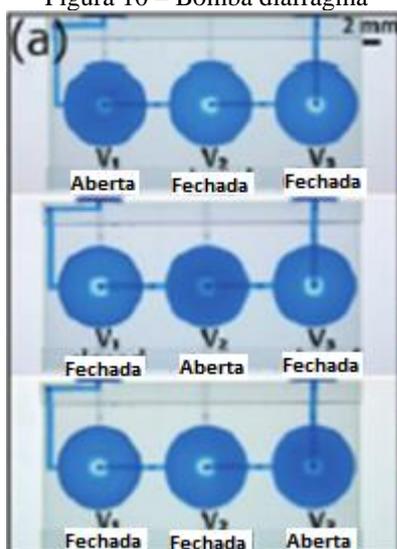
Weisgrab et al (2019) apresentaram uma revisão sistemática da literatura acerca da Impressão 3D aplicada para o desenvolvimento de dispositivos microfluídicos. Nessa revisão são apresentados alguns trabalhos que utilizaram a Impressão 3D com material flexível, como o de Gong et al (2016), onde foi desenvolvido uma microválvula de acionamento pneumático que, associada em série com outras duas válvulas, formava uma bomba diafragma. Na Figura 9 e 10 é possível visualizar as etapas descritas do trabalho.

Figura 9 – Válvula de acionamento pneumático



Fonte: Gong et al (2016), adaptado.

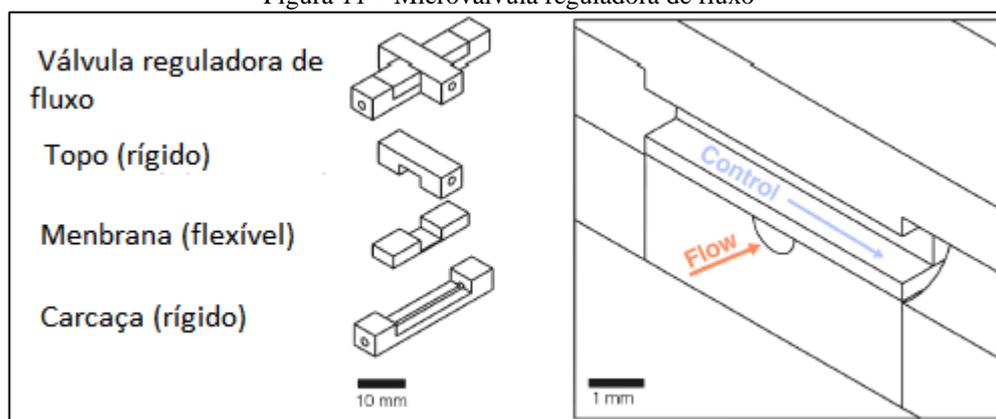
Figura 10 – Bomba diafragma



Fonte: Gong et al (2016), adaptado.

Keating et al (2016) desenvolveram em seu trabalho uma microválvula para regular a passagem de fluxo, a figura esquemática dessa peça pode ser visualizada na Figura 11. A válvula foi desenvolvida utilizando tanto material rígido, para fabricar a “carcaça” da válvula, quanto flexível, para fabricar uma membrana que seria a responsável por restringir o fluxo, atuada pela aplicação de ar comprimido na câmara superior a mesma, apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Microválvula reguladora de fluxo



Fonte: Keating et al (2016), adaptado.

Dois trabalhos realizados na área de bioengenharia que merecem menção nesse tópico foram os realizados por Padilha Pinto (2019) e por Silva (2014). No primeiro foi desenvolvido a prótese de um dedo utilizando apenas material flexível, sendo que as partes rígidas e as articulações se diferenciam pelo preenchimento do material aplicado na região. Já para o trabalho de Cunha da Silva, foi impressa a prótese de uma mão, onde as regiões das articulações foram impressas em material flexível e as demais em material rígido. O interessante desses dois

trabalhos utilizando material flexível foi mostrar que um objeto articulado fabricado com material flexível pode ser impresso em uma única peça, o que não seria possível de ser realizado se as próteses fossem desenvolvidas em materiais rígidos. As Figuras 12 e 13 apresentam as próteses do dedo e da mão, respectivamente.

Figura 12 – Prótese de um dedo desenvolvido em material flexível



Fonte: Padilha Pinto (2019).

Figura 13 – Prótese de uma mão em material flexível e rígido



Fonte: Silva (2014).

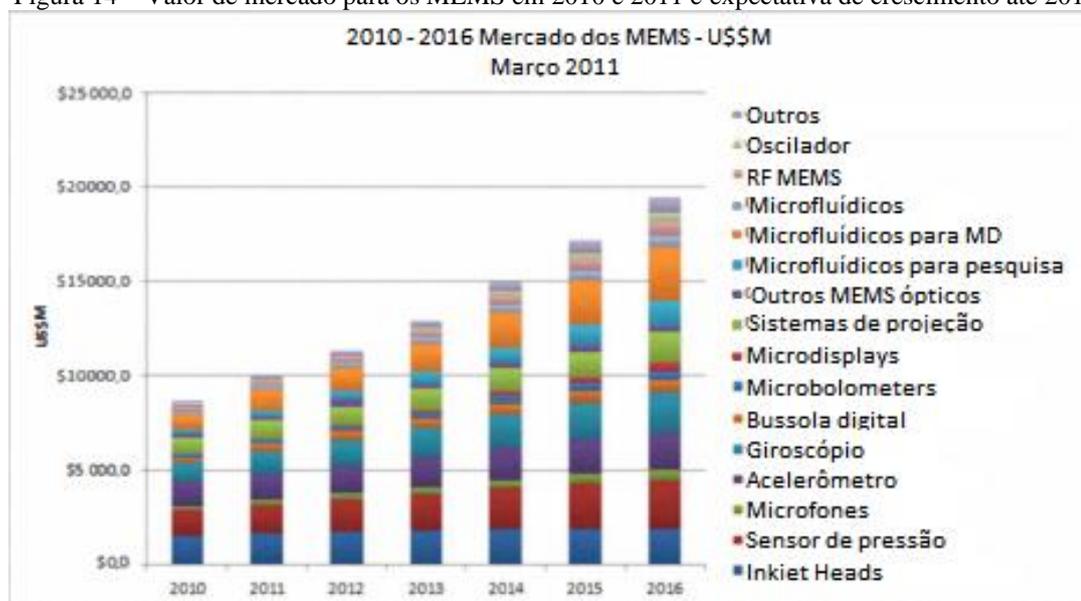
A Impressão 3D utilizando materiais flexíveis apresenta características da Impressão 4D, já que o material pode mudar de forma no decorrer do tempo, porém não utiliza um material inteligente para a fabricação de peças, o que a impossibilita de ser classificada como 4D.

2.6 SISTEMAS MICROFLUIDICOS E AS MICROVÁLVULAS

No ano de 1958 o engenheiro Jack S. Kilby desenvolveu o primeiro circuito integrado e, por conta desse trabalho, no ano 2000 recebeu o prêmio Nobel de Física. A partir do desenvolvimento desse circuito, a miniaturização de dispositivos tornou-se um tópico importante de pesquisa. Na década de 1970, iniciaram-se as pesquisas de microdispositivos que combinavam mecânica com eletrônica, que depois passaram a se chamar de MEMS (*Microelectromechanical systems*). Esses dispositivos têm sido reduzidos com o intuito de serem integrados a sistemas microfluídicos como *lab-on-a-chip* (LOC) e microssistemas de análise total (μ TAS) (Oh et al, 2006).

Eloy (2006) apresentou que no ano de 2005 o mercado dos MEMS alcançou um valor de, aproximadamente, \$5,1 Bilhões de dólares e os dispositivos microfluídicos representaram uma parcela de \$400 Milhões desse total. Já Perlmutter (2012), no ano de 2011 apresentou que o valor desse mercado havia crescido para U\$10,3 bilhões de dólares, com uma expectativa de crescimento para \$21,2 Bilhões em 2017. A Figura 14 demonstra a expectativa de crescimento do mercado para esse autor. Ainda é válido ressaltar que, para o ano de 2016, o mercado dos dispositivos microfluídicos teriam um valor estimado entre \$4,0 e \$5,0 Bilhões de dólares.

Figura 14 – Valor de mercado para os MEMS em 2010 e 2011 e expectativa de crescimento até 2016

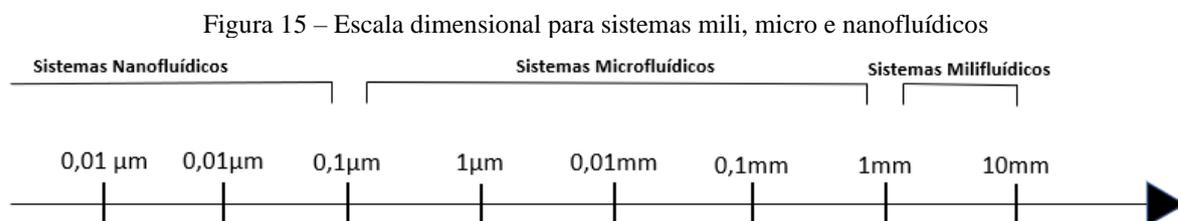


Fonte: Perlmutter (2012), adaptado.

Sistemas microfluídicos são capazes de manipular quantidades reduzidas de líquidos pois são dispositivos que estão em escala de dezenas a centenas de microns de tamanho. Tais sistemas são compostos por: microsensores, microbombas, microválvulas, micromisturadores, microcanais e outros. Esses sistemas são utilizados em áreas como engenharia biomédica, química e aeroespacial. Quando comparado equipamentos tradicionais, os sistemas microfluídicos apresentam vantagens como: baixo custo (amostras reduzidas), alta precisão, pouco espaço ocupado e controle preciso de fluxo (Qian et al, 2020).

As microválvulas compõem os mais variados sistemas microfluídicos, podendo fornecer diversas propriedades ao sistema como: regulagem do fluxo, chaves de liga/desliga, controle de rotação, de tempo e a separação de fluidos. Logo, são fundamentais para esses sistemas alcançarem as mais complexas funcionalidades. As principais características que as micro válvulas devem possuir são pequeno volume morto, baixa taxa de vazamento, baixo consumo energético, rápida resposta, operação linear e resistência a contaminação por particulado (Au et

al, 2011; Qian et al, 2020). Com relação ao tamanho desses sistemas, a Figura 15 abaixo, baseada no trabalho de Chen et al (2021), apresenta a escala dimensional onde são divididos os sistemas mili, micro e nanofluídicos.



Fonte: Chen (2021), adaptado.

Vários autores buscam classificar e agrupar os vários tipos de microválvulas existentes. Dentre os trabalhos, artigos acadêmicos pesquisados o que apresentou uma forma de classificação mais completa e abrangente foi o elaborado por Oh et al (2006), que pode ser visualizado na Tabela 1. Seguindo essa classificação, como poderá ser visto no decorrer do trabalho, a válvula que será objeto de estudo nesse trabalho será classificada como passiva, mecânica, válvula de retenção e *Flap*.

As microválvulas de retenção são dispositivos que possibilitam a “retificação” do fluxo, podendo ser comparados a diodos dos circuitos microfluídicos. Seu funcionamento é simples, no sentido favorável ao fluxo uma pequena pressão é suficiente para permitir a passagem do fluido, porém no sentido inverso uma grande obstrução é formada, impedindo o fluxo nessa direção. Essas válvulas são frequentemente implantadas em microbombas, para controle de fluxo de gás e conectados a sistemas de análise química (Melvin et al, 2018).

Tabela 1 – Classificação dos tipos de microválvulas existentes

Categorias		
Mecânico	Magnético	Campos magnéticos externos Indutores magnéticos integrados
	Elétrico	Eletrostático Eletrocinético
	Piezoelétrico	
	Térmico	Bimetálico Termopneumático Liga com memória de forma
	Biestável	
Ativo	Eletromecânico	
Não mecânico	Mudança de fase	Hidrogel Sol-gel Parafina
	Reológico	Eletroreológico Ferrofluidos
Externo	Modular	Embutido Rotativo
	Pneumático	Membrana Em linha
Mecânico	Válvula de retenção	<i>Flap</i> Membrana Esfera Estrutura móvel em linha
		Difuso
Passivo		
Não mecânico	Capilaridade	Abrupto Líquido acionado Explosão Válvula hidrofóbica

Fonte: Oh et al (2006), adaptado.

2.7 REVISÃO DA LITERATURA

Para esse trabalho, foi realizada uma revisão da literatura nas principais bases de pesquisa. Nessa pesquisa as palavras-chave foram “Impressão 3D”, “Dispositivos Microfluídicos”. O resultado pode ser visto abaixo, na Tabela 2. Inicialmente foram reunidos 29 trabalhos acadêmicos, onde após o filtro permaneceram 15 trabalhos. Na Figura 16, é possível verificar o número de publicações por ano, onde pode ser visto que até o ano de 2019

o gráfico apresenta uma tendência de aumento no número de publicações, porém o ano de 2020 e 2021 apresentou uma queda acentuada, provavelmente devido ao período da pandemia de COVID-19, onde as pesquisas científicas tomaram foco para a área da saúde.

Tabela 2 – Trabalhos acadêmicos reunidos

Autores	Ano	Disp. impresso	Tecnologia	Material utilizado	Observações
Adamski et al	2018	Micromedidor de fluxo de Venturi	Multijet (MJP)	Visijet M3 e S300 wax (rígido)	AC
Ahmed et al	2019	Circuitos	FDM	Composto com líquido iônico, PMMA, nanotubos de carbono (flexível)	AC
Ching et al	2019	Dispositivos microfluídicos	Direct ink writing (DIW)	Resina de silicone (flexível)	AC
Elias	2019	Válvulas Tesla	SLA	PDMS e SU-8 (Rígido)	DM
Gong et al	2016	Microbombas	SLA	Formulação própria (flexível)	AC
Keating et al	2016	Válvula proporcional microfluídica	Polyjet	TangoPlus e VeroWhitePlus (rígido e flexível)	AC
Lee et al	2018	Microválvulas e microbombas	SLA	PEG-DA-258 (flexível)	AC
Mbaye et al	2018	Micro válvulas de retenção	SLA	ABS (rígido)	AC
Nelson et al	2019	microcanais	FDM	TPU (flexível)	AC
Taylor et al	2017	Bombas de vácuo diafragma	Polyjet	TangoBlack Plus (flexível)	AC
Walczak et al	2017	Micro válvulas de retenção	Polyjet	VisiJet M3 Crystal (flexível)	AC
Weisgrab et al	2019	Micro sensores, atuadores, válvulas e bombas	SLA, FDM e Multijet	PDMS, Tango Plus, FLX930, VeroWhitePlus, RGD835, WATERsHED xc 11122, Ecoflex 00-30, PLS, ABS, PEI, PEEK, PMMA, PFPE (rígidos e flexíveis)	RS
Weigel et al	2021	Microreguladores	SLA	Material desenvolvido (flexível)	AC
Yazdi et al	2016	Dispositivos microfluidicos	Estereolitografia suave, FDM	PDMS (rígido)	RS
Zhou et al	2019	Microválvulas e microdecoder	Multijet (MJP)	Visijet M3 Crystal (flexível)	AC

Fonte: O autor (2022).

Onde:

RS – Revisão Sistemática da Literatura;

DM – Dissertação de Mestrado;

AC – Artigo Científico.

Como pode ser visto na Tabela 2, essa lista contempla doze artigos científicos, uma dissertação de mestrado e duas revisões sistemáticas da literatura. Um detalhe interessante de se observar nesses trabalhos são as tecnologias que foram empregadas, essa informação pode ser verificada na Figura 17. Nela indica que 18 trabalhos (42%) utilizaram a técnica SLA, provavelmente pois essa foi a primeira tecnologia a surgir e consequentemente hoje é uma das mais difundidas do mercado, além de que quando comparada a outras tecnologias de qualidade similar apresenta normalmente menor custo.

Figura 16 – Quantidade de publicações por ano



Fonte: O autor (2022).

Figura 17 – Tecnologias de impressão empregadas nos trabalhos

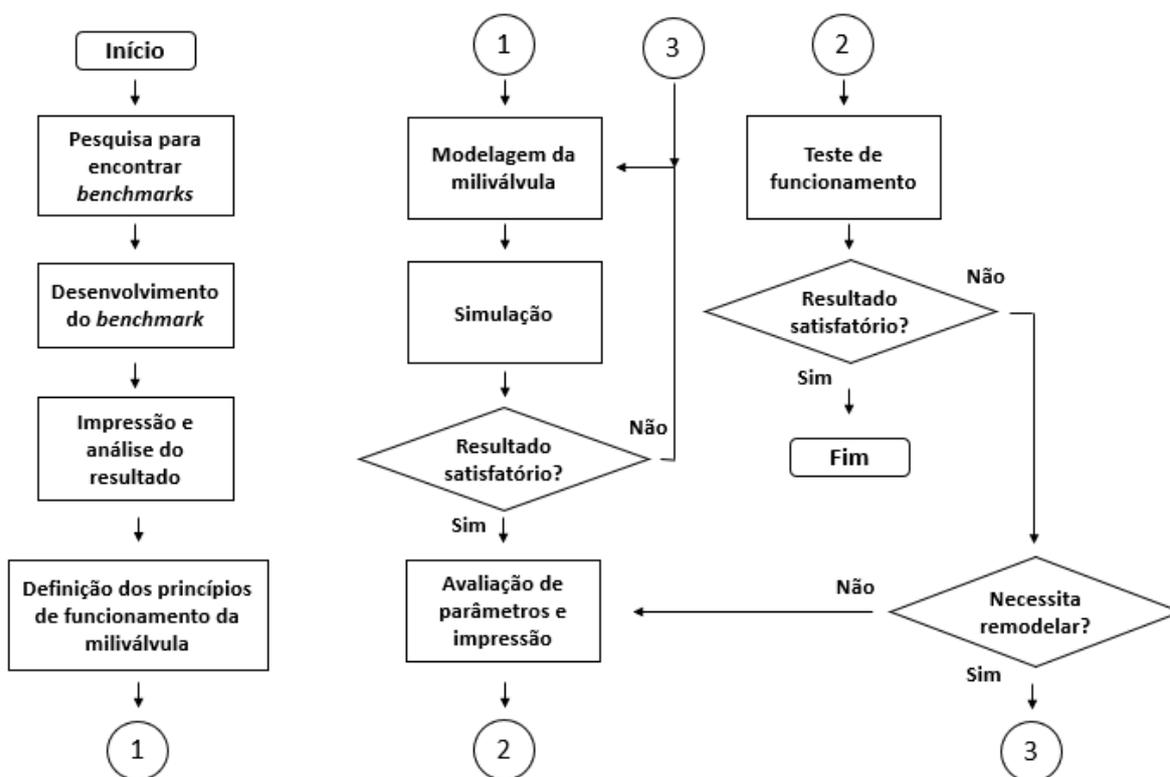


Fonte: O autor (2022).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentada a metodologia proposta para a construção desse trabalho. Inicialmente, foram desenvolvidos *Benchmarks* para avaliar a resolução das impressoras utilizadas no trabalho (Anet A8 e Elegoo Mars 3) no que se refere a impressão de microcanais. Após isso deu-se início a etapa de desenvolvimento das miliválvulas unidirecionais e, por fim, aos testes quanto ao funcionamento e a qualidade da impressão. A Figura 18 apresenta as etapas, na forma de fluxograma, da metodologia desse trabalho.

Figura 18 – Fluxograma para metodologia do projeto para Impressão 3D FDM e LCD-SLA



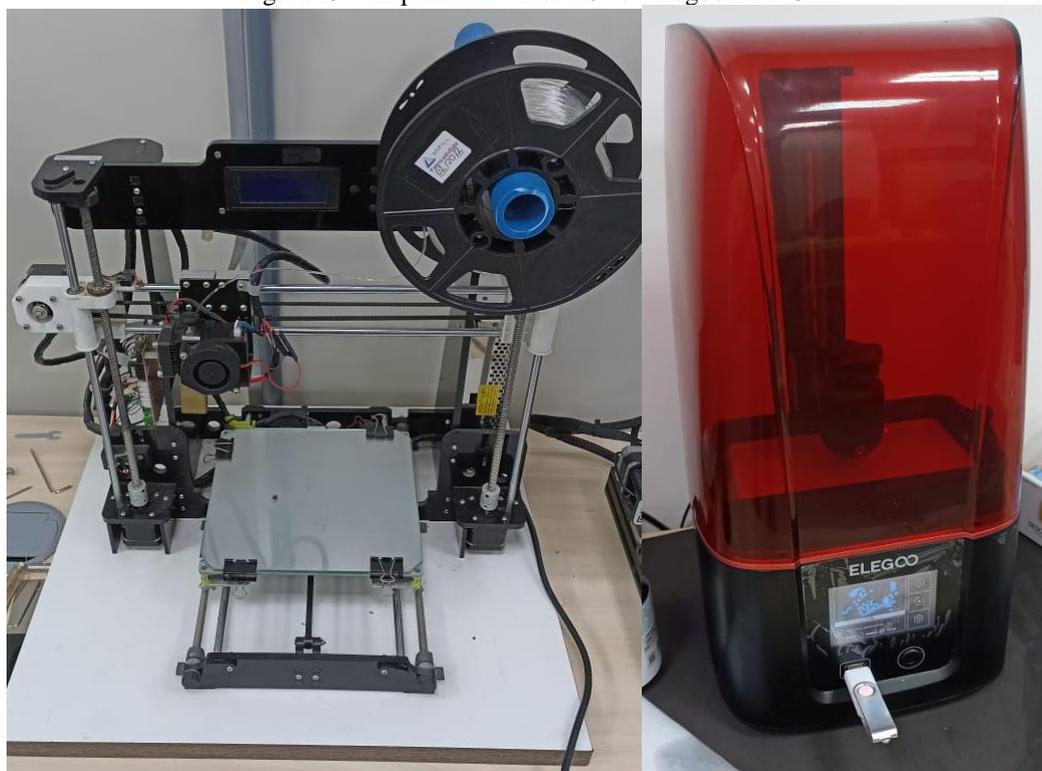
Fonte: O autor (2022).

3.1 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E SOFTWARES UTILIZADOS

Primeiramente, é válido dizer que para o desenvolvimento dessa monografia foram utilizadas uma impressora 3D de tecnologia FDM modelo “Anet A8”; filamento de poliuretano termoplástico (TPU); a impressora 3D de tecnologia LCD-SLA modelo Elegoo Mars 3; resina 3DLAB FLEX; software “Ansys Student 2021 R1”, para realizar a modelagem e simulação do comportamento da peça; os softwares “Ultimaker Cura 4.11.0” e “Chitubox” para realizar o fatiamento das camadas e ajustes dos parâmetros de impressão para a tecnologia FDM e LCD-

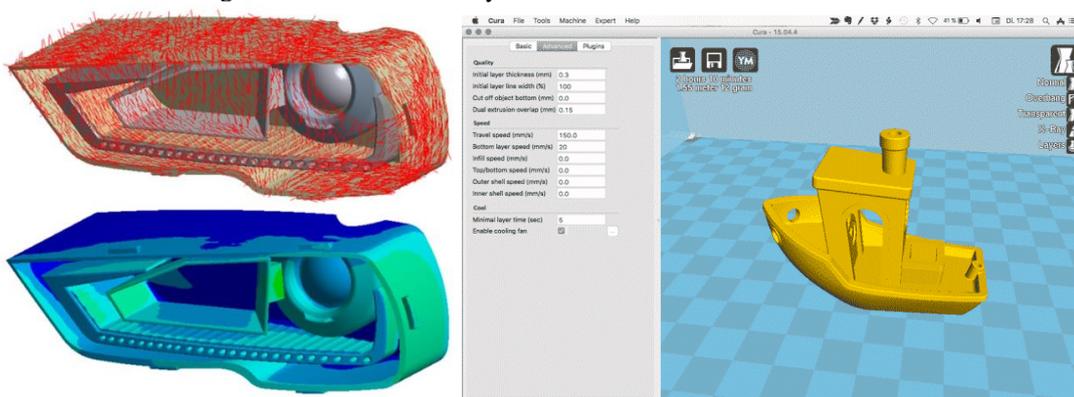
SLA, respectivamente; e para a construção do aparato de testes: seringa, tubo flexível e um tubo metálico; e uma balança de precisão “Casita”. Nas Figuras 19, 20 e 21 é possível visualizar os itens mencionados.

Figura 19 – Impressora “Anet A8” e “Elegoo Mars 3”



Fonte: O autor (2022).

Figura 20 – Softwares Ansys 2021 R1 e Ultimaker Cura 4.11.0



Fonte: Ansys (2021), Sempreupdate (2019); adaptado.

Figura 21 – Tubo flexível, tubo metálico, seringa (aparato experimental) e balança



Fonte: O autor (2022).

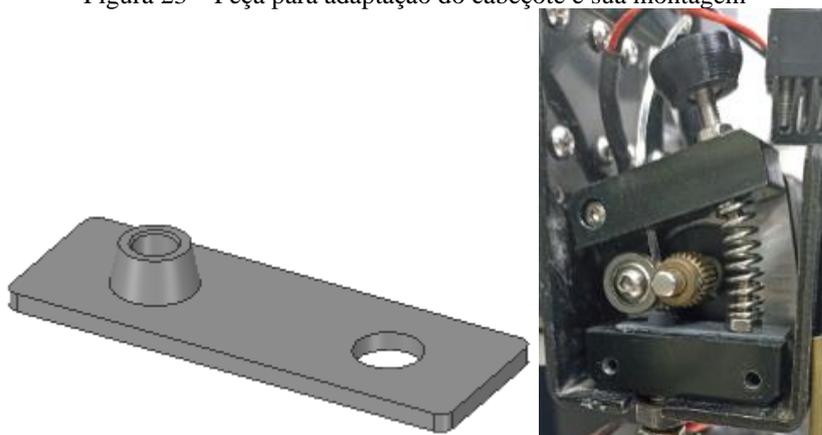
Ainda nesse tópico, é importante citar uma adaptação realizada na impressora 3D Anet A8, para possibilitar que a impressora consiga imprimir com material flexível, limitando o espaço livre dentro do cabeçote extrusor, restringindo a “liberdade” do filamento para dobra. Como pode ser verificado na Figura 22, o cabeçote extrusor internamente possui espaço suficiente para que, em caso de alguma restrição de maior intensidade na saída do filamento (representado pela linha vermelha), o mesmo dobre e conseqüentemente obstrua a saída de material do bico. Para filamentos rígidos esse problema dificilmente ocorre, porém quando se trata de filamentos flexíveis, esse fato acontece com frequência. Portanto, uma peça foi impressa para que fosse adaptada na parte inferior da extrusora. Tal peça pode ser visualizada na Figura 23, bem como sua montagem no cabeçote.

Figura 22 – Cabeçote extrusor da impressora Anet A8 e possível “dobra” do filamento



Fonte: Mercado livre (2021), adaptado.

Figura 23 – Peça para adaptação do cabeçote e sua montagem



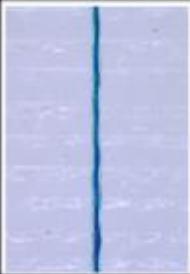
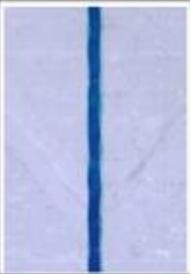
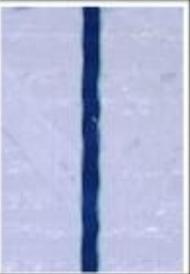
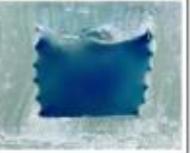
Fonte: O autor (2022).

Além disso, ainda é importante mencionar que após a impressão das peças pela impressora Elegoo Mars 3, elas deveriam ser postas em uma câmara de raios UV para finalização da cura da peça, porém o laboratório não dispunha desse equipamento. Sendo assim as peças foram expostas ao sol para realização da cura.

3.2 PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE *BENCHMARKS*

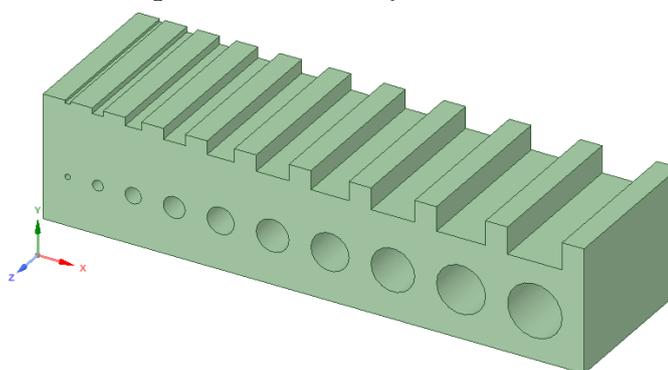
Antes do desenvolvimento dos modelos para miliválvulas, julgou-se necessário realizar testes para avaliar a resolução das impressoras utilizadas para esse projeto (Anet A8 e Elegoo Mars 3) quanto a capacidade delas de imprimir microcanais. Para tanto, foi realizada uma pesquisa em artigos acadêmicos em busca de *Benchmarks* para analisar essa questão, porém a busca não foi bem sucedida pois não foram encontrados modelos que possibilitassem essa análise plenamente. Nelson et al (2019) realizaram um trabalho para avaliar microcanais utilizando a tecnologia FDM e o material poliuretano, porém o artigo não deixou claro o *Benchmark* que os autores utilizaram. Na Figura 24 é possível ver algumas impressões de microcanais apresentados no trabalho citado.

Figura 24 – Impressões de microcanais utilizando tecnologia FDM e poliuretano

Alvo (μm)	50	100	150	200	250
Medição (μm)	40 ± 8	83 ± 13	125 ± 15	176 ± 7	234 ± 6
Topo					
Seção transversal					

Fonte: Nelson et al (2019), adaptado.

Logo, foi visto a necessidade de desenvolver o próprio *Benchmark* para análise, que consistiu basicamente de um bloco retangular com a presença de vários furos, redondos e retangulares, que gradativamente reduziam de tamanho dentro do bloco. O referido bloco pode ser visto na Figura 25. Tal peça possui dimensões de 49,5x15,0x11,5 mm, os diâmetros dos canais vão de 5,0 a 0,5mm, com decrementos de 0,5mm entre canais vizinhos.

Figura 25 – *Benchmark* para microcanais

Fonte: O autor (2022).

3.3 IMPRESSÃO DO BENCHMARK E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a impressão do *Benchmark* anteriormente apresentado, primeiro foram configurados os parâmetro de impressão, tanto para a impressora FDM quanto para a LCD-SLA, os parâmetros principais estão listados nas Tabelas 3 e 4. Caso fossem obtidos problemas de impressão, seriam realizados ajustes nos parâmetros a fim de corrigir tais problemas e

realizado uma nova impressão, esse processo seria repetido até obter uma boa qualidade das peças. A avaliação da qualidade das mesmas será feita por análises visual e na medida do possível dimensional.

Tabela 3 – Principais parâmetros para impressão FDM

Parâmetro	Valor
Temperatura da mesa	55°C
Temperatura do extrusor	220°C
Altura de camada	0,1 mm
Velocidade	12,0 mm/s
Preenchimento	25 %
N° de camadas da base	6
N° de camadas do topo	6
N° de camadas das laterais	4
Diâmetro do bico	0,2 mm

Fonte: O autor (2022).

Tabela 4 – Principais parâmetros para impressão LCD-SLA

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição da camada base	15,0 s
Tempo de exposição das demais camadas	2,0 s
Altura de camada	0,05 mm
Preenchimento	100%
N° de camadas da base	8

Fonte: O autor (2022).

3.4 DEFINIÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA MILIVÁLVULA

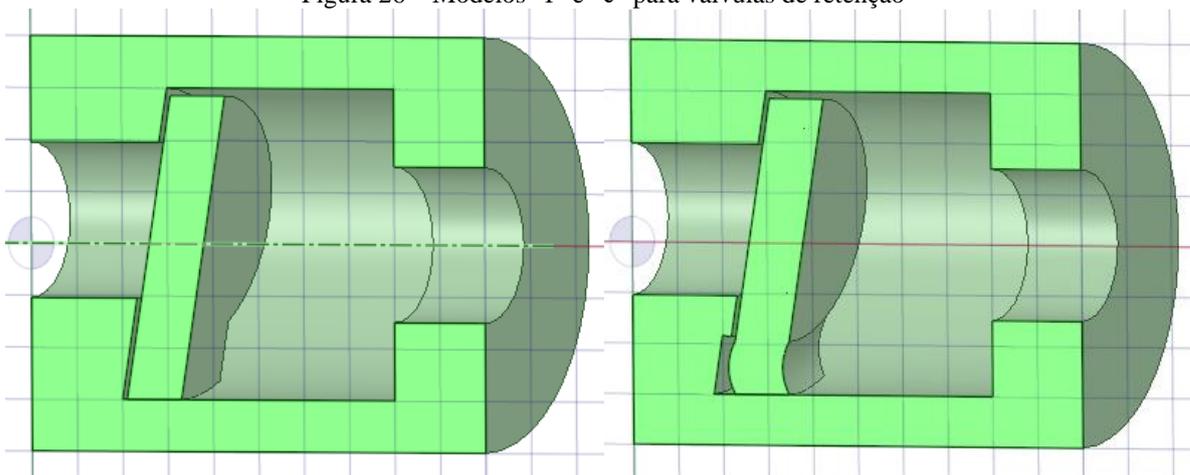
As válvulas unidirecionais, também nomeadas de válvulas de retenção, tem como função permitir a passagem de fluxo em apenas um único sentido, impedindo qualquer contrafluxo. Em princípio, uma pequena pressão seria o suficiente para abrir seu mecanismo interno e permitir a passagem do fluido e, do mesmo modo, uma pequena pressão no sentido contrário deve gerar uma obstrução interna na válvula de forma a impedir o contrafluxo (Von Linsingen, 2001).

Dito isso, foram elaborados alguns possíveis modelos para válvulas unidirecionais, que podem ser visualizados nas Figuras 26 e 27, que apresentam um *Flap* como mecanismo principal de funcionamento, sendo a base deles, onde o elemento é unido a carcaça da válvula, que os diferenciam. A válvula de retenção proposta funciona, tomando como base a Figura 26,

da seguinte forma: o fluido escoar no sentido da esquerda para a direita, fazendo com que o *Flap* flexione e pivote em torno de sua base, o que proporciona a abertura do *Flap* e passagem do fluido; já com o fluxo no sentido contrário, o *Flap* tende a fechar, obstruindo o fluxo. Esse tipo de válvula de retenção foi escolhido (tipo *Flap*) por ele proporcionar que a peça, utilizando materiais flexíveis, seja fabricada em única etapa, sem a necessidade de fabricação de peças individuais e posterior montagem, visto que o *Flap* é unido à carcaça e por conta da flexibilidade do material adotado ele possui graus de liberdade para movimentação.

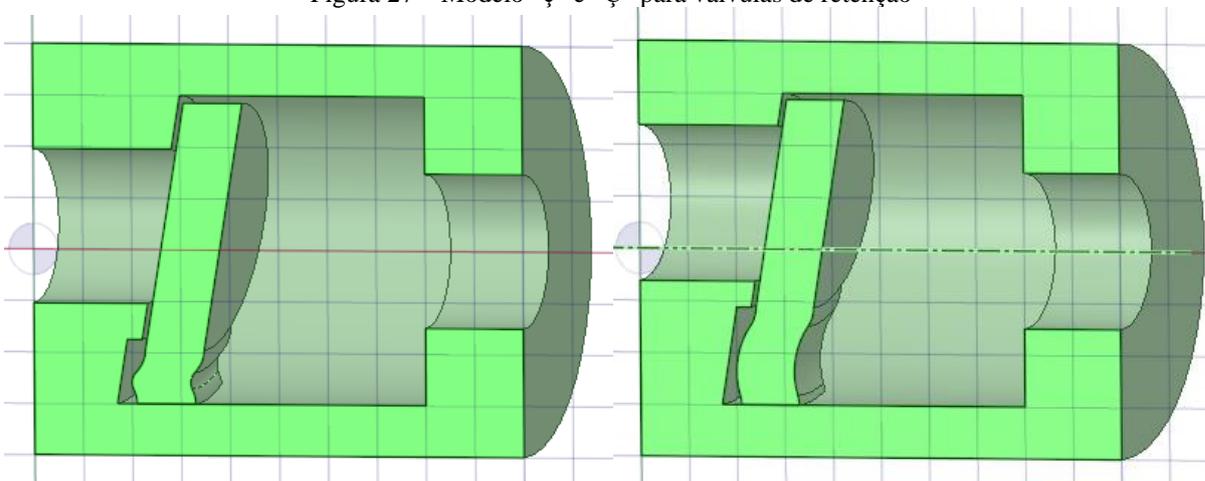
Para a escolha do modelo a ser impresso, dentre os apresentados, primeiro foi realizada a simulação do comportamento na abertura do *Flap* dos modelos, aquele que apresentou o maior deslocamento, ou seja, menor resistência ao fluxo foi o escolhido para o prosseguimento do trabalho.

Figura 26 – Modelos “I” e “c” para válvulas de retenção



Fonte: O autor (2022).

Figura 27 – Modelo “ç” e “Ç” para válvulas de retenção



Fonte: O autor (2022).

Por fim, ainda é válido dizer que as dimensões da miliválvula são totalmente dependentes dos resultados obtidos das impressões dos *Benchmarks*, pois por meio deles é que foi definido o diâmetro do canal a ser impresso e conseqüentemente o tamanho da válvula de forma geral.

3.5 SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MICROVÁLVULA

Para essa etapa foi utilizado o software ANSYS 2021 R2, especificamente a ferramenta “*Mechanical APDL Solver*”. Essa simulação foi realizada para verificar se a miliválvula suportaria os esforços aplicados sem que a falha ocorresse, além de verificar o deslocamento do *Flap*. Inicialmente houve a necessidade de alimentar o programa com as propriedades mecânicas dos materiais utilizados para impressão, para o filamento utilizado na impressora FDM o material utilizado foi o “TPU 95A” e para a resina da impressora LCD-SLA foi a “3DLAB FLEX”. Tais propriedades mecânicas podem ser visualizadas na Tabela 5. Com relação a esses dados, o fabricante não forneceu em sua ficha de dados o Coeficiente de Poisson e o Limite de Escoamento, logo foi adotado nesse trabalho que o limite de escoamento como sendo a metade da Tensão de Ruptura, e para o Coeficiente de Poisson foi realizado uma pesquisa na literatura e segundo Xu (2021) o valor para o TPU seria de 0,48. Para a Resina 3DLAB FLEX, o fabricante dessa resina não diz de que material é composta essa resina, o que impossibilita a busca desse coeficiente na literatura, sendo assim foi adotado o mesmo valor encontrado para o TPU.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos materiais para impressão

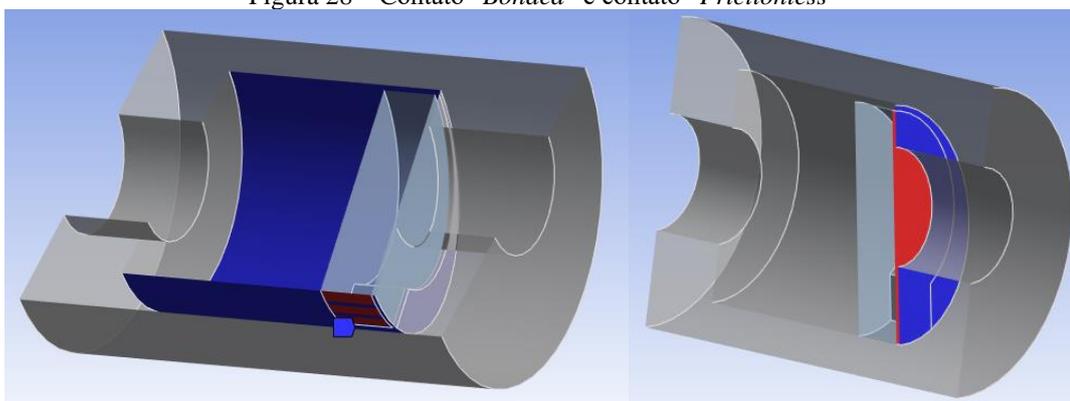
Propriedades mecânicas	TPU 95A	3DLAB FLEX
Densidade (g/cm ³)	1,22	1,1
Módulo de Young (MPa)	9,5	8
Tensão de ruptura (MPa)	29,3	7
Limite de escoamento (MPa)	14,7	3,5
Coeficiente de Poisson	0,48	0,48

Fonte: Raise3D (2021), 3DLAB (2022), Xu (2021).

Após isso, deu-se início as configurações no software *Mechanical APDL Solver*. A simulação foi realizada considerando dois corpos, o primeiro seria a carcaça da válvula e o segundo refere-se ao *Flap* propriamente dito. Como condições de contorno foram impostos um contato tipo “*Bonded*” para unir a base do *Flap* e o canal interno da válvula e outro contato do tipo “*Frictionless*” entre a face do *Flap* e o batente interno do corpo da válvula, esses referidos

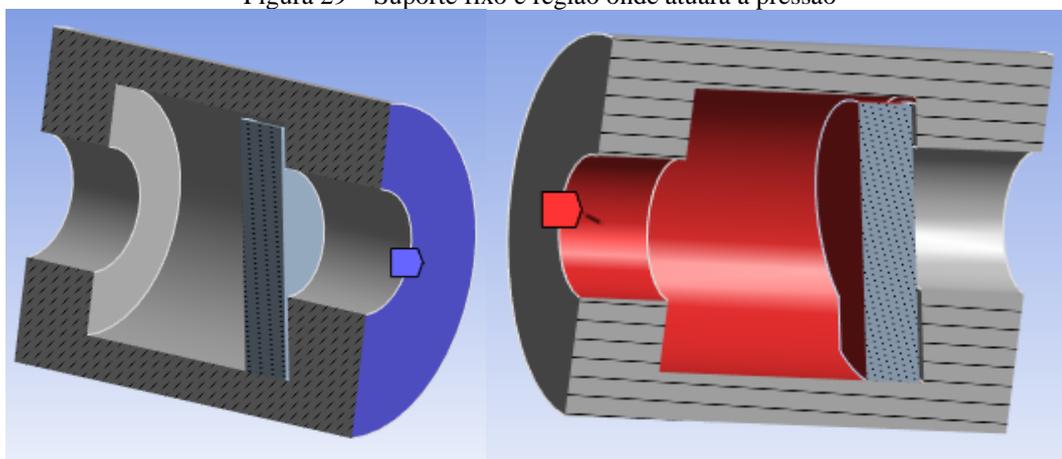
contatos podem ser visualizados na Figura 28. Além disso, como pode ser verificado na Figura 29, a imagem da esquerda apresenta a face onde foi imposto um suporte fixo e na imagem da direita a região onde a pressão irá atuar na válvula (sentido de interrupção do fluxo). Com as condições de contorno impostas, foram adicionados, antes de aplicar a resolução da simulação, os itens “*Equivalent Stress*”, “*Total Deformation*” e “*Safety factor*”, para que possamos verificar a tensão equivalente de Von Mises, o deslocamento total e, principalmente, o fator de segurança mínimo da peça.

Figura 28 – Contato “*Bonded*” e contato “*Frictionless*”



Fonte: O autor (2022).

Figura 29 – Suporte fixo e região onde atuará a pressão



Fonte: O autor (2022).

Com isso as simulações foram realizadas em duas etapas, a primeira considerando o sentido de fechamento da válvula, onde o principal parâmetro avaliado foi o Coef. De Segurança Mínimo, pois a peça deveria apresentar valor superior a 1,0, indicando que a peça suportaria os esforços aplicados, caso algum ponto indica-se um valor inferior a 1,0, a peça deveria ser remodelada, pois isso indica falha da peça. Já para a segunda etapa, seria avaliado o deslocamento do *Flap*, onde foi inserida uma pressão de 0,1bar no sentido da abertura do

mesmo e, dentre as quatro geometrias sugeridas, o *Flap* que apresenta-se o maior deslocamento seria o escolhido para prosseguir com a etapa de impressão.

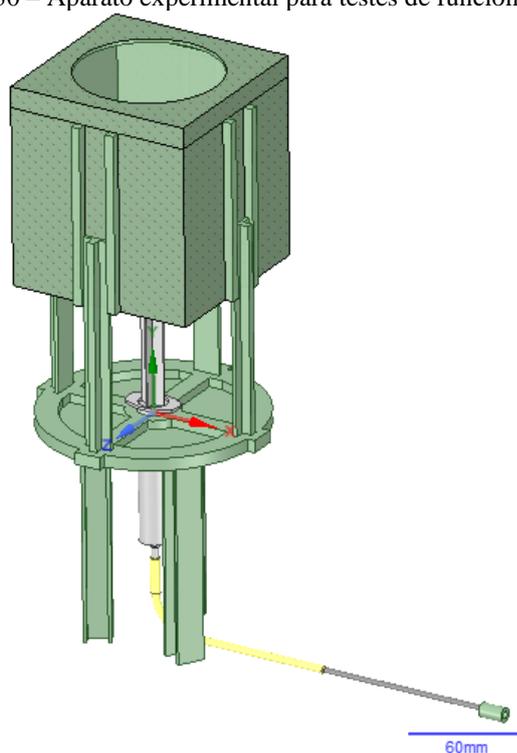
3.6 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Para essa etapa, os parâmetros utilizados, inicialmente, foram os mesmos utilizados para impressão dos *Benchmarks*, apontados nas Tabelas 3 e 4. Caso na etapa de testes seja constatado que as peças apresentam problemas que possam ser solucionados adequando determinados parâmetros de impressão, essa etapa seria retomada e realizada alteração de tais parâmetros para uma nova impressão.

3.7 TESTE DE FUNCIONAMENTO

A válvula impressa foi analisada tanto no que diz respeito a seu aspecto visual (referente a identificação de falhas de impressão) e de funcionamento. Para tanto utilizaram-se lupa, uma seringa, um tubo flexível e um tubo metálico, e a estrutura impressa em FDM conforme pode ser visto no esquema demonstrado na Figura 30, onde de verde estão apresentados as estruturas impressas, de branco a seringa, amarelo o tubo flexível e de cinza o tubo metálico.

Figura 30 – Aparato experimental para testes de funcionamento



Fonte: O autor (2022).

Para a análise de impressão, com o auxílio de câmeras, foi analisada a impressão em si, no que diz respeito a aderência das camadas, a presença de eventuais poros na superfície, presença de rebarbas de material, ou seja, aspectos que iriam influenciar diretamente na qualidade da impressão da peça propriamente dita.

Por fim, para os testes de funcionamento, a válvula foi conectada a um aparato experimental, conforme esquema já apresentado na Figura 30, onde o fluido utilizado para testes foi a água, sendo que a válvula foi conectada ao aparato por meio do tubo metálico. O experimento funcionou da seguinte forma: na caixa superior foi inserido uma massa conhecida e por meio do diâmetro interno da seringa (também conhecido) foi calculada a pressão inserida na seringa e conseqüentemente a pressão aplicada na válvula. Assim, foi possível verificar o funcionamento da válvula tanto no sentido de fluxo livre, como no sentido de fluxo bloqueado, bastando inverter o sentido da válvula.

Ainda é importante lembrar que, caso fosse constatado falhas de impressão nessa etapa, a etapa de análise de parâmetros de impressão seria retomada, afim de corrigir eventuais falhas de impressão na válvula.

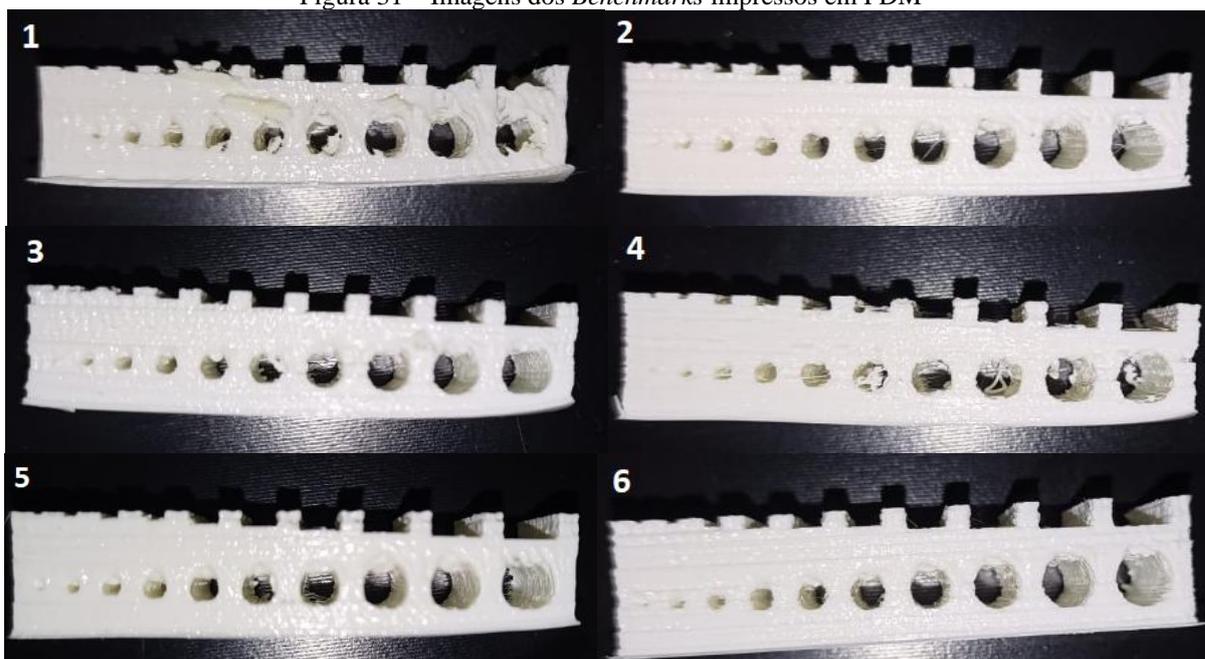
4 RESULTADOS

Nesta seção foram apresentados os resultados da aplicação da metodologia definida para a fabricação da miliválvulas, seguindo as etapas pré-definidas no fluxograma apresentado na Figura 18, utilizando tanto a tecnologia FDM como a LCD-SLA, onde poderá ser visto que a impressão FDM apresentou limitações que impossibilitaram o sucesso do processo, enquanto para a impressão com LCD-SLA foram obtidos melhores resultados.

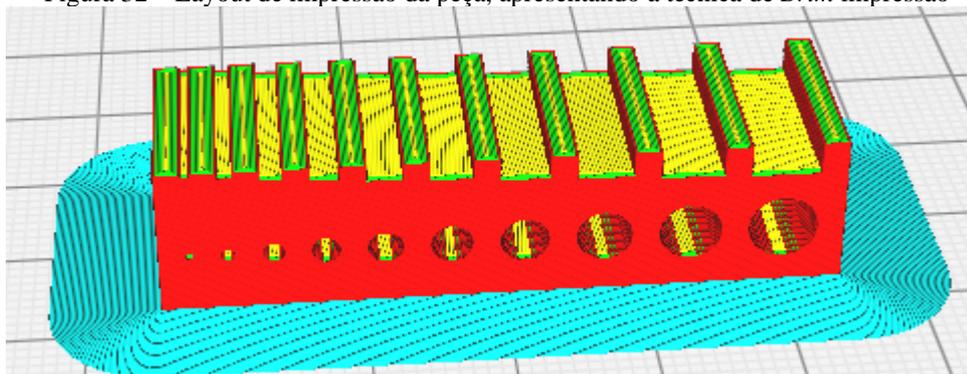
4.1 IMPRESSÃO DO *BENCHMARK*

Iniciando pelos *Benchmarks* impressos em FDM, foram impressas 6 peças, utilizando o material TPU, até atingir o modelo final, que podem ser visualizadas na Figura 31. Esse número de impressões ocorreu pois houveram problemas nos modelos impressos principalmente no que diz respeito a *Warping* (empeno nas bordas da peça) ocorrida devido a elevada taxa de resfriamento da peça durante a impressão. Para corrigir esse problema, após algumas tentativas, elevou-se a temperatura da mesa para 60 °C (alterando o parâmetro indicado na Tabela 3), o que diminui o gradiente de temperatura e habilitando uma técnica chamada *Brim* no fatiador, que cria algo similar a uma “saia” ao redor da primeira camada da peça (Figura 32), o que aumenta a adesão da peça a mesa, impedindo assim os empenos das bordas.

Figura 31 – Imagens dos *Benchmarks* impressos em FDM



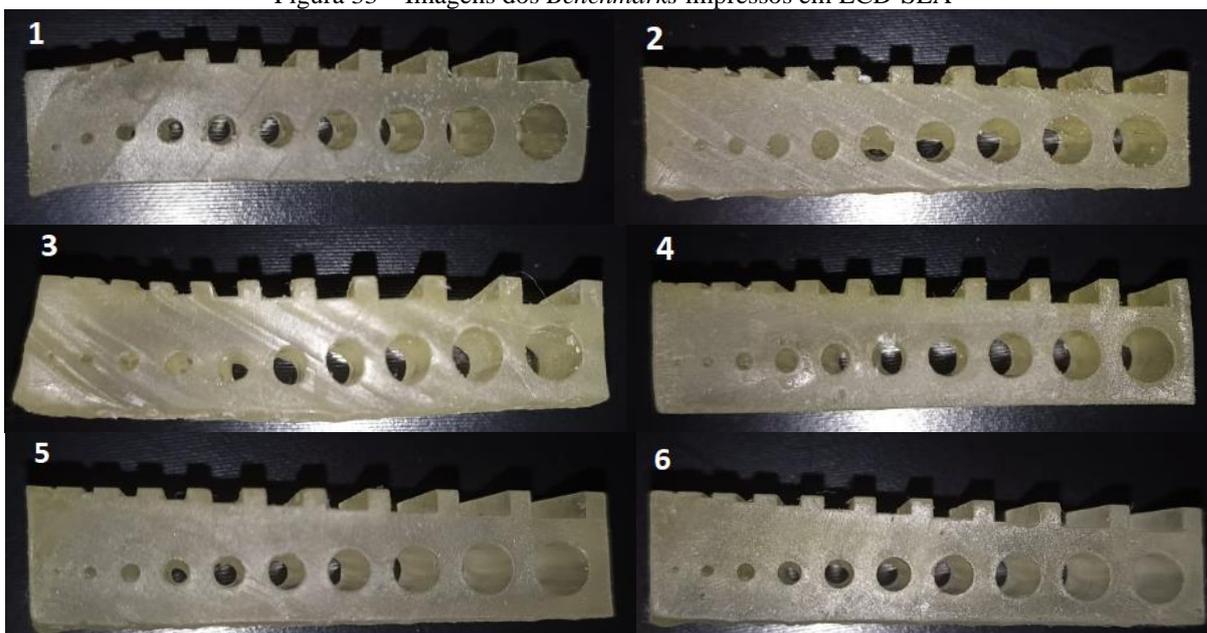
Fonte: O autor (2022).

Figura 32 – Layout de impressão da peça, apresentando a técnica de *Brim* impressão

Fonte: O autor (2022).

Para o modelo n°6 mostrado na Figura 31, os canais de 5,0mm até 1,5mm de diâmetro não apresentaram obstrução, porém em todos apareceu uma falha de acabamento na parte superior do canal. Essa falha poderia ser mitigada modificando a posição de impressão (caso os canais fossem impressos na vertical, ao invés da horizontal, como apresentado na Figura 32), porém essa posição de impressão foi mantida pois a válvula desenvolvida para impressão apresenta uma *Flap* interno que dificulta a impressão com o canal da peça na posição vertical, sendo preferível a posição horizontal para impressão.

Com relação aos modelos impressos em LCD-SLA, também foram impressas 6 peças utilizando a resina 3DLAB FLEX, que podem ser visualizadas na Figura 33. Esse número se deveu a problemas iniciais nos primeiros modelos e posteriormente a tentativas de obter uma melhor impressão.

Figura 33 – Imagens dos *Benchmarks* impressos em LCD-SLA

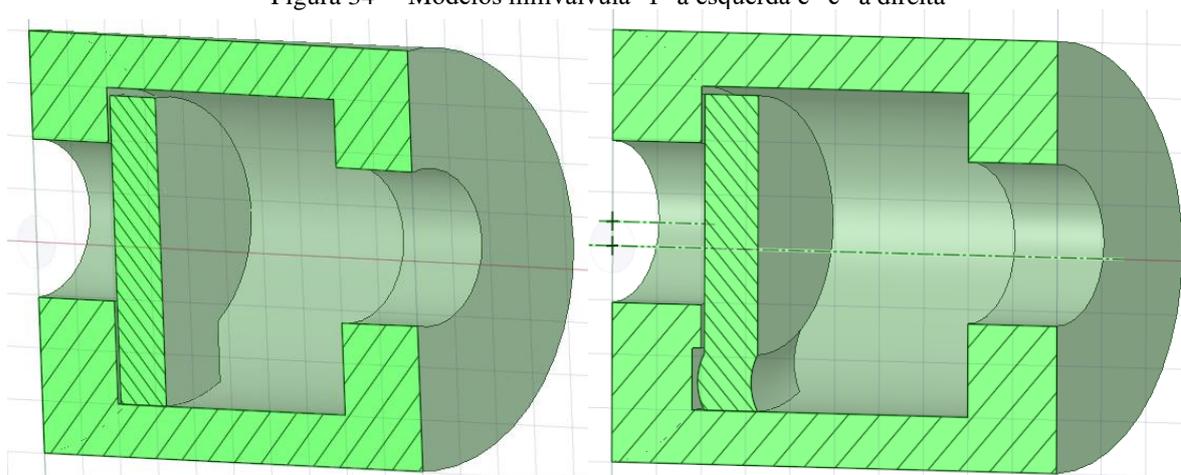
Fonte: O autor (2022).

As peças n° 1, n° 2 e n° 3 apresentaram deformações tanto em suas dimensões como em seus canais internos, esses problemas não foram plenamente esclarecidos, porém após a execução de um *reset* nas configurações do software Chitubox e realimentação dos parâmetros de impressão apresentados na Tabela 4 esses problemas foram solucionados, como pode ser visto nas últimas três peças. Para as peças n°4, n°5 e n°6 foram obtidos resultados similares, onde os canais de 5,0 a 2,0mm não apresentaram obstrução nos canais, essas peças foram impressas em posições diferentes pois imaginava-se que isso pudesse surtir algum efeito na qualidade da impressão dos canais, o que não ocorreu.

4.2 MODELAGEM DA MILIVÁLVULA

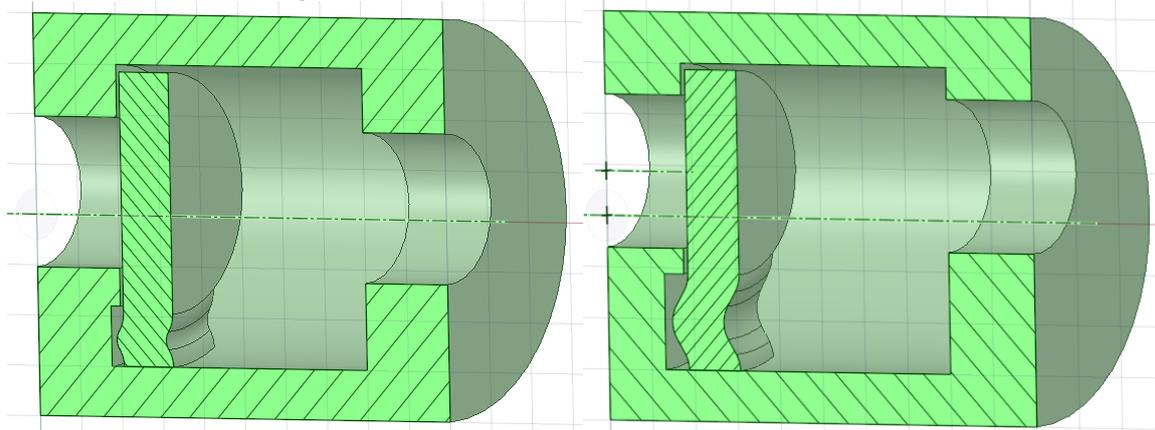
O passo seguinte foi, com base nos resultados obtidos nas impressões dos *Benchmarks*, realizar a modelagem da miliválvula com as dimensões condizentes aos modelos impressos. Como foi dito no tópico anterior, os diâmetros de 5,0mm a 2,0mm não apresentaram obstrução, porém de início foi utilizada uma abordagem mais cautelosa e o canal de menor diâmetro da peça apresentou 3,0mm, e não 2,0mm, que seriam o limite para impressão dos canais de acordo com os *Benchmarks*. Com isso, foram desenvolvidos 4 modelos para a análise das miliválvulas, os modelos “I”, “c”, “ç” e “Ç”, que podem ser vistos nas Figura 34 e 35, onde as dimensões principais são idênticas, apresentadas na Figura 36, diferenciando uns dos outros basicamente pela geometria do *Flaps*.

Figura 34 – Modelos miliválvula “I” à esquerda e “c” à direita



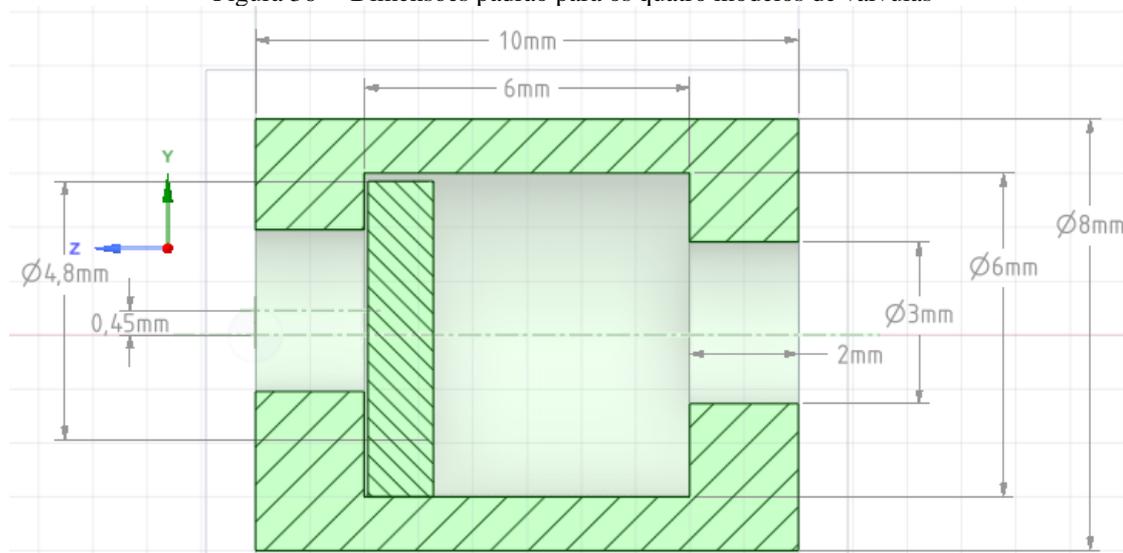
Fonte: O autor (2022).

Figura 35 – Modelos miliválvula “ç” à esquerda e “Ç” à direita



Fonte: O autor (2022).

Figura 36 – Dimensões padrão para os quatro modelos de válvulas



Fonte: O autor (2022).

4.3 SIMULAÇÃO DOS MODELOS DE MILIVÁLVULAS

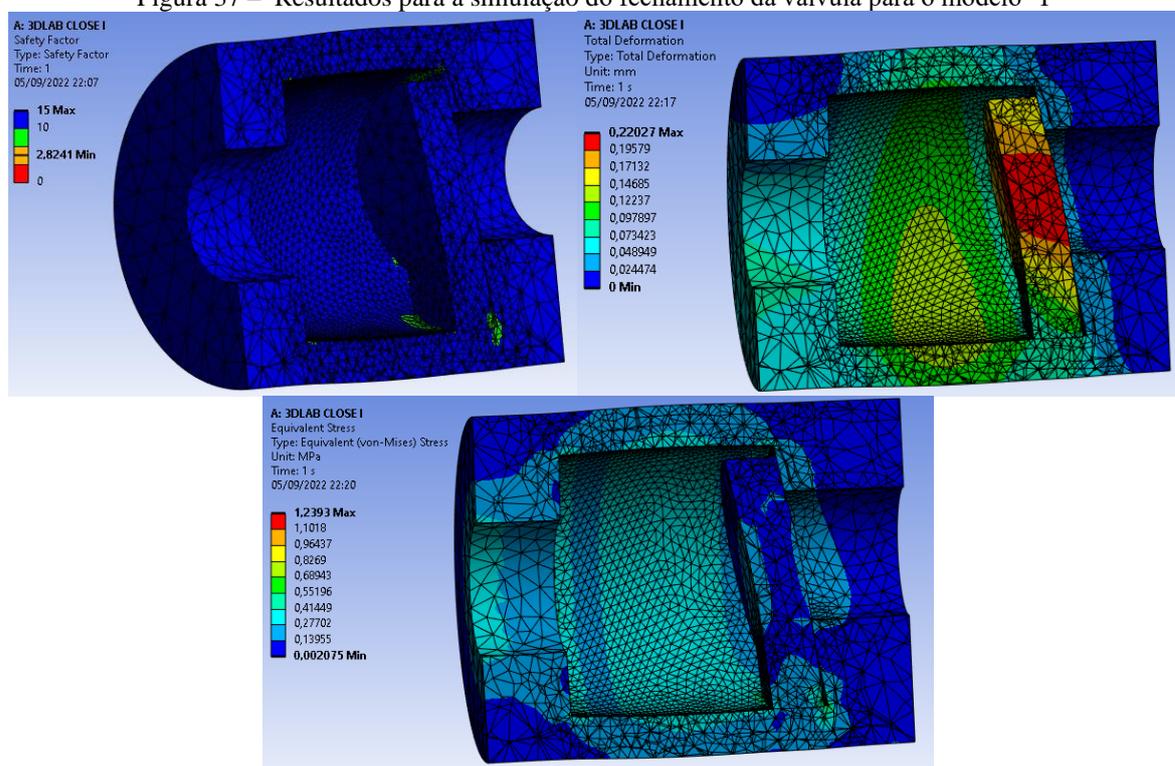
Para essa etapa foram analisados dois fatores, o primeiro foi verificar se a válvula suportaria os esforços aplicados e o segundo seria analisar o quanto o elemento flexível (*Flap*) se deforma, sendo que a válvula que apresentar o *Flap* mais flexível seria o modelo escolhido para a continuidade do trabalho.

Logo, foi realizada a simulação de cada miliválvula de duas formas, considerando para o seu fechamento uma pressão aplicada de 1,0 bar, para que fosse verificado se a válvula suportaria os esforços baseados em seu coeficiente de segurança. Já para a sua abertura, foi considerando uma pressão de 0,1 bar, a fim de verificar o quanto o *Flap* da válvula se desloca, onde a geometria que apresentar o maior deslocamento foi a escolhida pois entende-se que a

mesma será a que irá apresentar menor resistência ao escoamento. Ainda é válido frisar que nessas simulações foram considerados tanto o material TPU para o caso da tecnologia FDM como o material 3DLAB FLEX para a tecnologia LCD-SLA.

Iniciando as simulações com o fechamento da válvula, cujas propriedades mecânicas alimentadas no software encontram-se na Tabela 5, foi verificado que para os quatro modelos o coeficiente de segurança encontra-se acima de 1, para ambos os materiais, um exemplo dos resultados dessa simulação pode ser visto na Figura 37 e o coeficiente de segurança mínimo para cada modelo nas Tabelas 6 e 7. É importante perceber que a região onde foi apresentado o menor coeficiente de segurança e a maior tensão equivalente foram nas regiões da base do *Flap*, enquanto a região onde houve o maior deslocamento foi no centro do *Flap*.

Figura 37 – Resultados para a simulação do fechamento da válvula para o modelo “I”



Fonte: O autor (2022).

Tabela 6 – Resultados para a simulação do fechamento das válvulas, considerando 3DLAB FLEX

Modelos	Coef. De Segurança	Max. Tensão equivalente	Max. Deslocamento
“I”	2,82	1,24 MPa	0,22 mm
“c”	2,95	1,18 MPa	0,24 mm
“ç”	2,48	1,41 MPa	0,23 mm
“Ç”	2,34	1,49 MPa	0,22 mm

Fonte: O autor (2022).

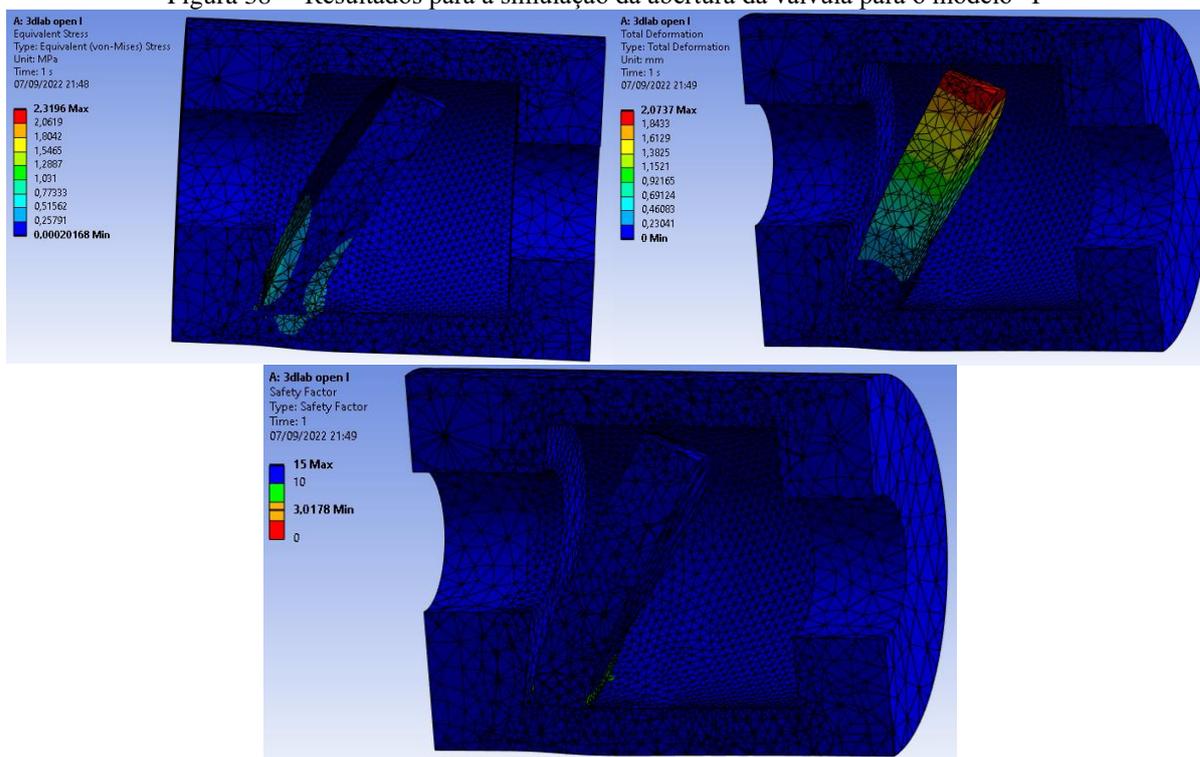
Tabela 7 – Resultados para a simulação do fechamento das válvulas, considerando TPU

Modelos	Coef. De Segurança	Max. Tensão equivalente	Max. Deslocamento
“I”	11,63	1,26 MPa	0,20 mm
“c”	12,93	1,14 MPa	0,14 mm
“ç”	10,10	1,46 MPa	0,21 mm
“Ç”	9,43	1,56 MPa	0,20 mm

Fonte: O autor (2022).

Agora apresentando os resultados para a simulação do fechamento, os mesmos podem ser vistos nas Tabelas 8 e 9, e o exemplo visual dessas simulações na Figura 38. Como pode ser visto, novamente o menor coeficiente de segurança e a maior tensão equivalente encontram-se na região da base do *Flap*, enquanto o maior deslocamento para essa situação foi verificado na ponta superior do *Flap*.

Figura 38 – Resultados para a simulação da abertura da válvula para o modelo “I”



Fonte: O autor (2022).

Tabela 8 – Resultados para a simulação da abertura das válvulas, considerando 3DLAB FLEX

Modelos	Coef. De Segurança	Max. Tensão equivalente	Max. Deslocamento
“I”	1,51	2,32 MPa	2,07 mm
“c”	1,67	2,10 MPa	2,12 mm
“ç”	1,52	2,30 MPa	2,24 mm
“Ç”	1,54	2,28 MPa	2,41 mm

Fonte: O autor (2022).

Tabela 9 – Resultados para a simulação da abertura das válvulas, considerando TPU

Modelos	Coef. De Segurança	Max. Tensão equivalente	Max. Deslocamento
“I”	6,32	2,33 MPa	1,74 mm
“c”	7,62	1,93 MPa	1,81 mm
“ç”	6,26	2,35 MPa	1,90 mm
“Ç”	5,57	2,64 MPa	2,02 mm

Fonte: O autor (2022).

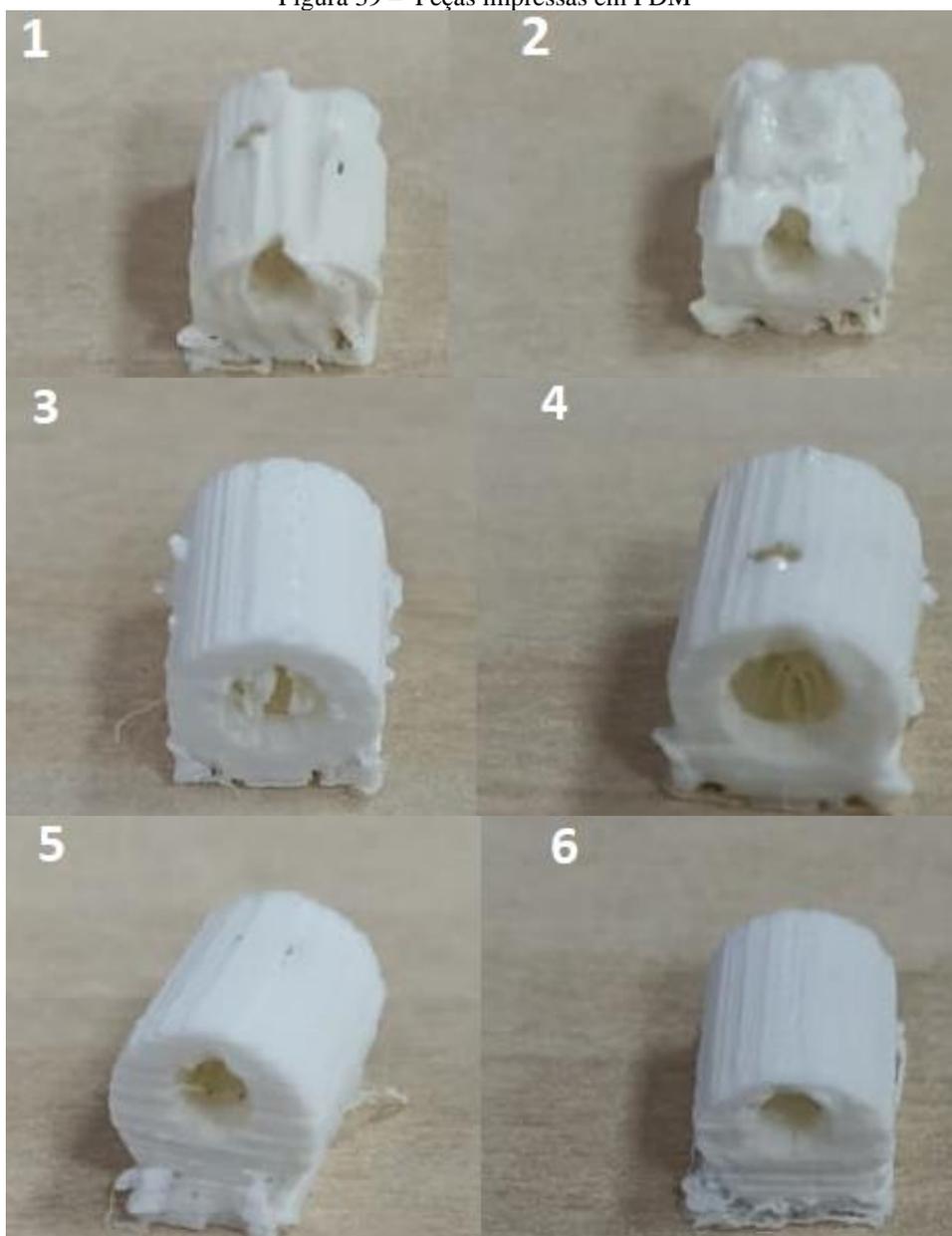
Como pode ser visto, em todos os casos simulados o coeficiente de segurança mínimo encontrou-se acima de 1 (o menor foi 1,51) o que demonstra que a válvula irá resistir aos esforços, enquanto o modelo que apresentou o maior deslocamento do *Flap*, para ambos os materiais, foi o “Ç”. Com isso, o modelo selecionado para prosseguimento do trabalho foi o “ç”, pois como ele é o que apresenta a maior abertura, entende-se que ele será o que irá gerar uma menor resistência ao escoamento, ou seja, menor perda de carga.

4.4 IMPRESSÃO DOS MODELOS

Para a etapa da impressão foram utilizados os parâmetros apontados nas Tabelas 3 e 4, para a tecnologia FDM e LCD-SLA, respectivamente. Iniciando pelas peças obtidas imprimindo em FDM, não foi obtido êxito com a impressão delas, visto que inicialmente as peças apresentaram deformações grosseiras, furos em sua superfície e o *Flap* encontrava-se “soldado” a carcaça da peça, e mesmo após alterações de parâmetros, como velocidade de impressão da peça, temperatura do bico extrusor e velocidade do ventilador de arrefecimento da peça, os defeitos foram atenuados, porém não solucionados. A Figura 39 abaixo apresenta as peças impressas, nela pode-se verificar a evolução durante as tentativas de impressão. Logo, desistiu-se de prosseguir com a impressão das peças em FDM devido aos defeitos obtidos na impressão.

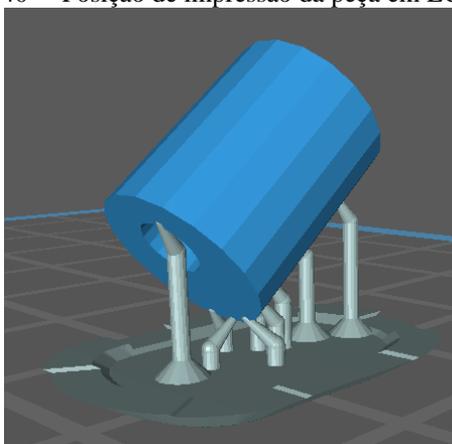
Prosseguindo com as impressões utilizando a tecnologia LCD-SLA, foram impressos vários modelos até chegar a um modelo apto para testes. De início a principal problemática encontrada foi encontrar uma posição ótima para imprimir a peça, visto que alguns detalhes internos da miliválvula dificultavam que ela fosse fabricada em posição horizontal ou vertical, o que após alguns testes chegou-se a um valor de inclinação da impressão de 40°, conforme pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 39 – Peças impressas em FDM



Fonte: O autor (2022).

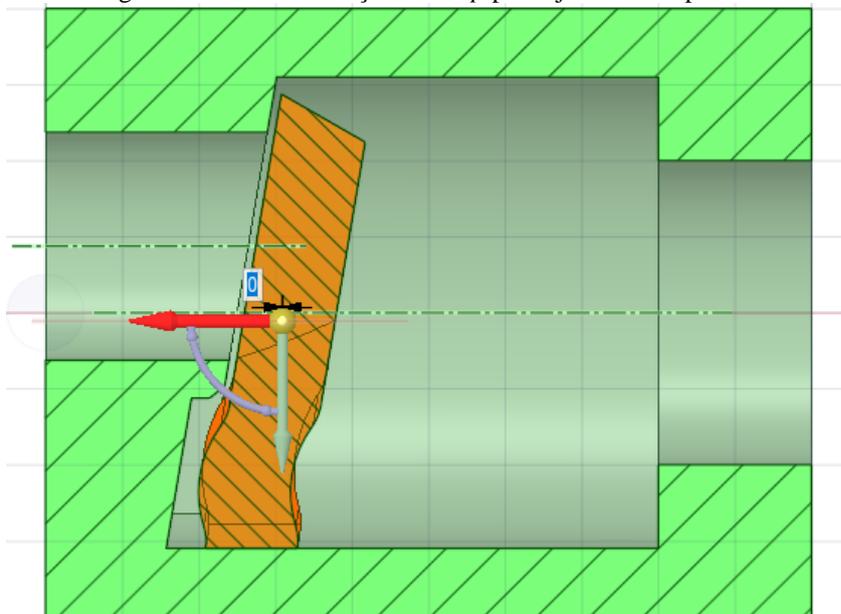
Figura 40 – Posição de impressão da peça em LCD-SLA



Fonte: O autor (2022).

Além disso, outro problema encontrado era que o *Flap* estava “soldado” a carcaça da miliválvula e ao tentar destacá-lo mecanicamente, o *Flap* rompia-se. Para corrigir essa questão, foram realizados alguns ajustes que estão presentes na Figura 41. Primeiramente tentou-se afastar mais o *Flap* da face de contato (inicialmente o afastamento era de 0,1mm), onde foi obtido resultado a partir de 0,3mm, o que foi considerado um afastamento demasiado. Outra medida implementada foi aumentar o diâmetro do canal interno onde o *Flap* está alojado em 0,2mm, o que possibilitou que o *Flap* fosse liberado após utilização de uma chave para destacá-lo, porém o procedimento muitas vezes danificava o *Flap*. Sendo assim, mais um ajuste foi realizado atuando na geometria do *Flap*, onde pode ser visto ao comparar a Figura 36 com a 41, que foi realizado um “entalhe” na superfície do *Flap*, com isso, a superfície superior do mesmo que permanecia unida ao topo do canal teve sua área diminuída, o que facilitou o destacamento do *Flap* sem danificá-lo. Na Figura 42 são apresentados dois cortes para duas válvulas que apresentaram o *Flap* soldado, além da Figura 43 que apresenta o mesmo exemplo porém para *Flaps* livres.

Figura 41 – Movimentação do *Flap* para ajustes de impressão



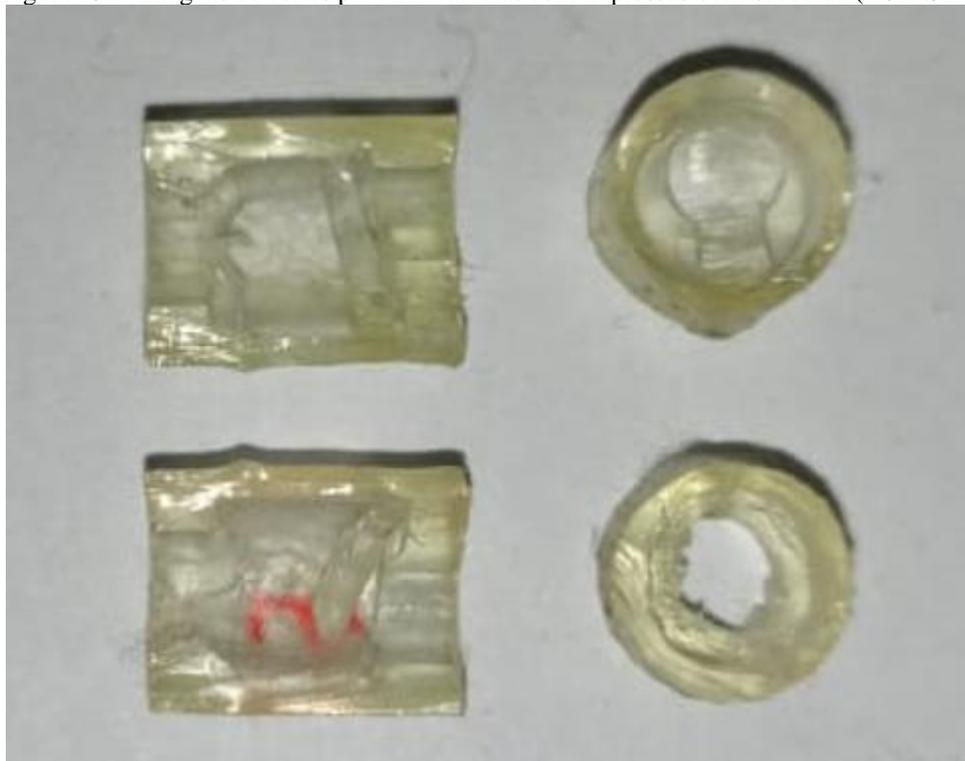
Fonte: O autor (2022).

Figura 42 – Imagens de cortes para miliválvulas com problemas de impressão (LCD-SLA)



Fonte: O autor (2022).

Figura 43 – Imagens de cortes para miliválvulas com impressão bem-sucedida (LCD-SLA)



Fonte: O autor (2022).

4.5 TESTES DE FUNCIONAMENTO

Nesta etapa foram realizados os testes de operação da válvula, a fim de verificar seu pleno funcionamento. Para tanto utilizou-se uma seringa, um tubo flexível, um tubo metálico e uma estrutura impressa, porém de início houve um problema de conexão entre o tubo metálico e a válvula, visto que a conexão entre o aparato experimental e a válvula foi realizada por meio de seu canal interno e esse canal inicialmente possuía 2,0mm de comprimento, além de existir certa folga entre ambos, o que impedia uma ligação entre eles de forma efetiva.

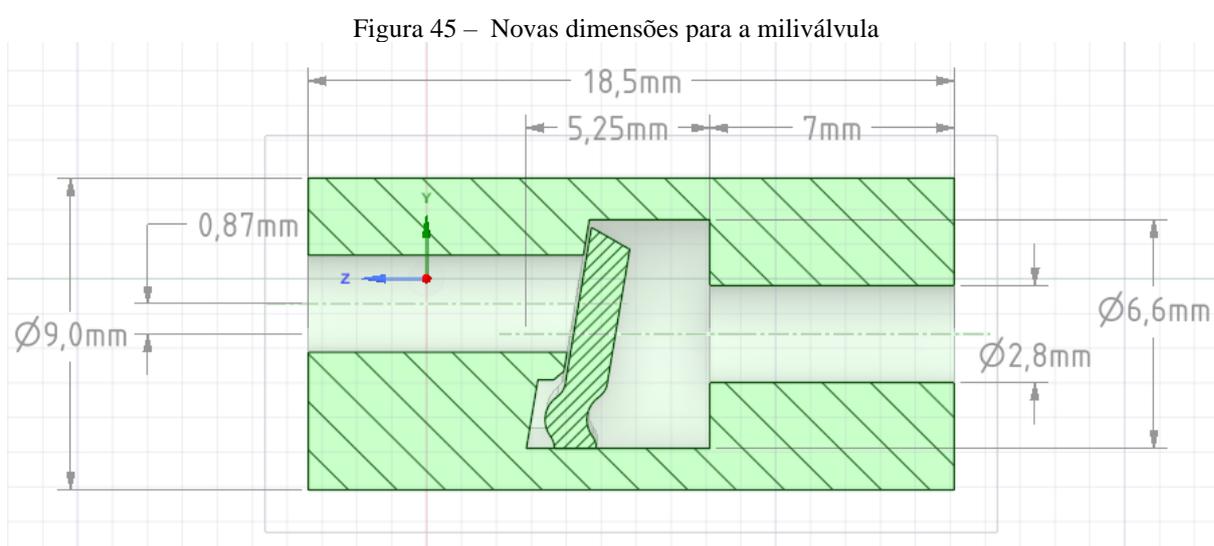
Para correção desse problema foram tomadas duas medidas, a primeira foi o alongamento do canal interno de 2,0mm para 7,0mm, visando aumentar a superfície de contato, e a segunda foi a redução de 0,2mm no diâmetro interno da válvula, para que a conexão entre o tubo e a válvula fosse realizada com interferência, contribuindo para a vedação. A imagem do novo modelo conectado ao tubo pode ser verificada na Figura 44.

Figura 44 – Aparato experimental interligado a miliválvula após ajustes



Fonte: O autor (2022).

Antes de apresentar os resultados, é importante dizer que foram realizados, além dos ajustes na conexão da miliválvula mencionados, ajustes nas dimensões da própria válvula (diâmetro externo sofreu um aumento de 1,0mm) pois ela rompeu durante os testes, na região onde a espessura da parede é menos espessa, embora de acordo com os resultados das simulações isso não deve-se ter ocorrido, provavelmente isso se deve aos parâmetros adotados no Tópico 3.5 que não eram fornecidos pela ficha técnica do fabricante. Além disso, foi feita alteração do parâmetro de impressão “tempo de exposição”, ajustado de 2,0s para 1,5s, para melhorar a qualidade de impressão. Na Figura 45 é possível visualizar as novas dimensões da miliválvula.



Fonte: O autor (2022).

Para os testes de funcionamento, eles foram realizados utilizando medição indireta, pois uma massa conhecida (com o auxílio de balança) era utilizada para gerar a pressão no embolo da seringa (Fórmula 1), onde essa pressão seria transmitida por meio do tubo flexível e tubo metálico a miliválvula.

$$P_{apl} = F_{Peso} / A_{emb} \quad (1)$$

$$F_{Peso} = m * g \quad (2)$$

Onde:

P_{apl} = Pressão aplicada no embolo;

F_{Peso} = Força peso aplicada no embolo;

A_{emb} = Área do embolo (0,0001674 m²);

m = massa aplicada sobre o embolo;

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Inicialmente foi verificado a massa que seria necessária para iniciar o movimento da seringa, pois a própria seringa junto com os tubos metálicos e flexível apresentam uma resistência ao avanço do pistão da seringa (perda de carga), onde foi encontrado o valor de 88g (aproximadamente 0,05bar). Com isso, a pressão que efetivamente atua na válvula será dada por:

$$P_v = P_{apl} - P_c \quad (3)$$

Onde:

P_v = Pressão atuante na válvula;

P_c = Perda de carga (calculada experimentalmente).

Com isso, para calcular a massa necessária para uma dada pressão:

$$\begin{aligned} P_v &= P_{apl} - P_c \\ P_v + P_c &= P_{apl} \end{aligned} \quad (4)$$

Substituindo (1) em (4):

$$P_v + P_c = \frac{F_{P_{eso}}}{A_{emb}} \quad (5)$$

Substituindo (2) em (5) e reorganizando, tem-se:

$$\begin{aligned} P_v + P_c &= \frac{(m * g)}{A_{emb}} \\ \mathbf{m} &= \frac{(A_{emb} * (P_v + P_c))}{\mathbf{g}} \end{aligned} \quad (6)$$

Com isso, sendo conhecida a relação entre a massa e a pressão atuante na válvula foi realizada a medição da vazão média para uma dada pressão atuante na válvula, onde para uma pressão definida era medido o tempo necessário para esvaziar um determinado volume contido na seringa, onde esse tempo era marcado três vezes, pois o tempo médio dessas três medições seria o utilizado para calcular a vazão média, conforme Fórmulas seguintes:

$$t_{med} = (t_1 + t_2 + t_3)/3 \quad (7)$$

$$Q_{Med} = V_d/t_{med} \quad (8)$$

Onde:

t_1, t_2, t_3 = Medições de tempo para esvaziar um volume definido da seringa;

t_{med} = Média dos tempos marcados;

V_d = Volume definido;

Q_{Med} = Vazão média.

Os testes foram iniciados considerando o sentido de fluxo livre, aplicando as pressões conforme Tabela 10. Nela “m” refere-se a massa aplicada; t_1, t_2 e t_3 a três medições de tempo; e Q_{Med} refere-se a vazão média.

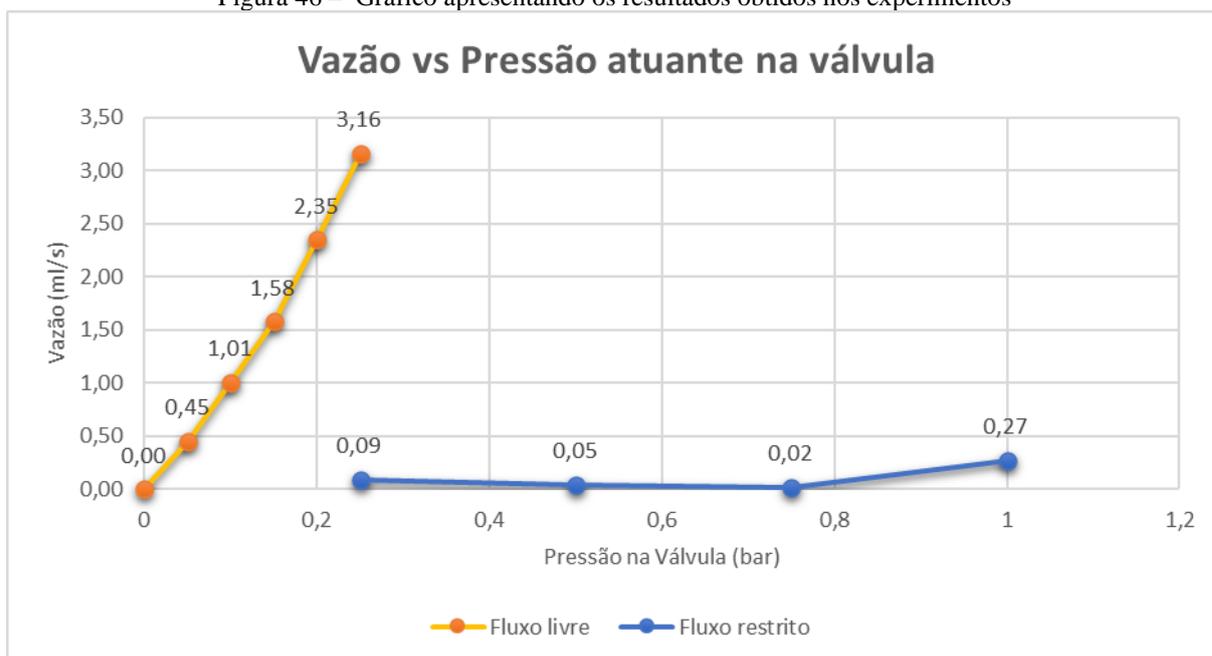
Tabela 10 – Resultados para os testes da abertura das válvulas

m (kg)	P_{apl} (bar)	P_v (bar)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_{med} (s)	Q_{Med} (ml/s)
0,088	0,05	0,00	-	-	-	-	0,00
0,171	0,10	0,05	18,57	17,46	17,62	17,62	0,45
0,256	0,15	0,10	7,62	7,94	8,36	7,94	1,01
0,341	0,20	0,15	5,07	5,00	5,11	5,07	1,58
0,427	0,25	0,20	3,41	3,94	3,37	3,41	2,35
0,512	0,30	0,25	2,17	2,53	2,80	2,53	3,16

Fonte: O autor (2022).

Como dito, os testes no sentido de fluxo livre foram realizados de forma que para cada ponto foram retiradas três medições, onde seria medido o tempo necessário para o esvaziamento de 8ml (V_d) de água contido na seringa, o tempo foi marcado com cronometro. Com isso, dividindo o volume definido (V_d) pelo tempo médio (t_{med}) encontrou-se a Vazão Média (Q_{Med}). Como pode ser visto na Figura 46, onde são apresentados de forma gráfica os pontos medidos, eles apresentaram comportamento próximo do linear. Os testes da abertura não excederam 0,25 bar pois à medida que se aumentava a pressão o tempo de esvaziamento da seringa diminuía (a 0,25 bar o tempo médio foi de 2,53s) e como a medição do tempo era feita de forma manual, a partir de 0,30 bar era difícil de medir com precisão.

Figura 46 – Gráfico apresentando os resultados obtidos nos experimentos



Fonte: O autor (2022).

Com relação ao teste de fechamento, basicamente a válvula teve seu sentido invertido e o volume de líquido ao invés de 8ml foram considerados 4ml (V_d), para encurtar o tempo dos testes. Ademais os procedimentos de medição foram os mesmos da etapa anterior. Os dados coletados podem ser verificados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados para os testes de fechamento das válvulas

m (kg)	P_{apl} (bar)	P_v (bar)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_{med} (s)	Q_{med} (ml/s)
0,512	0,30	0,25	45	40	44	43	0,09
0,938	0,55	0,50	77	93	87	86	0,05
1,365	0,80	0,75	222	210	222	218	0,02
1,792	1,05	1,00	20	11	13	15	0,27

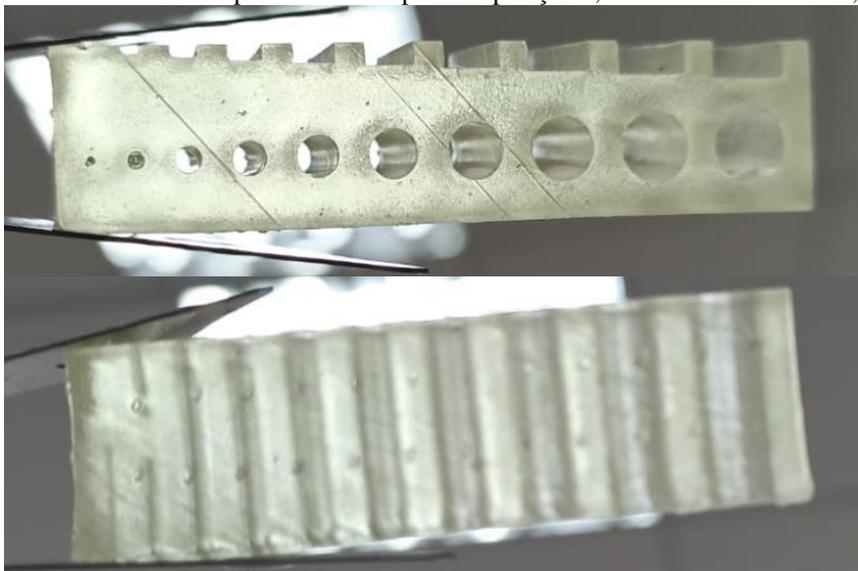
Fonte: O autor (2022).

Para os testes de fechamento, não foi obtida estanqueidade total, porém as vazões medidas foram pequenas, como pode ser visto na Figura 46. Quando comparado a Q_{Med} a 0,25 bar para a abertura e para o fechamento da válvula, verificam-se os valores de 3,16 ml/s e 0,09 ml/s, respectivamente. Logo verifica-se que a válvula restringe o fluxo significativamente no sentido contrário.

Ainda pode-se visualizar na Figura 46 que de 0,25bar a 0,75bar o fluxo é cada vez menor, porém a 1,0 bar (pressão em que havia sido realizada a simulação) há um aumento para Q_{Med} , porém é válido dizer que a miliválvula não rompeu.

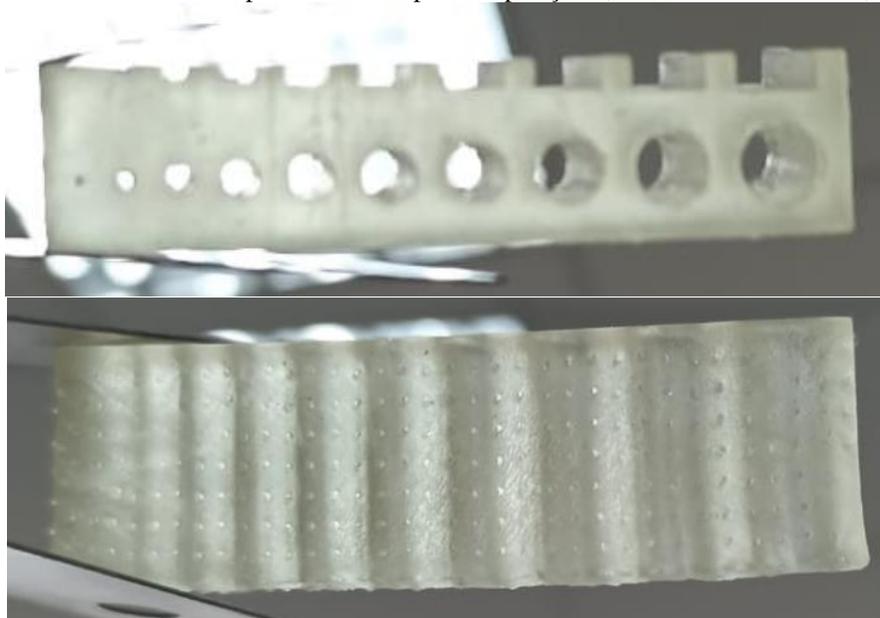
Por fim, como foram modificados parâmetros para a impressão do modelo testado anteriormente, também foram realizadas novas impressões do *Benchmark*, uma considerando o parâmetro “tempo de exposição” e “altura de camada” 1,5s e 0,05mm e outra considerando os parâmetros citados 1,3s e 0,04mm. Como resultados, para o primeiro modelo o menor canal sem obstrução obtido foi de 1,5mm, já para o segundo o menor canal obtido foi de 1,0mm, o que mostra um avanço com relação aos *Benchmarks* impressos inicialmente, visto que o menor canal obtido foi de 2,0mm. Nas Figuras 47 e 48 podem ser visualizadas as peças citadas.

Figura 47 – *Benchmark* impresso com tempo de exposição 1,5s e altura de camada 0,05mm



Fonte: O autor (2022).

Figura 48 – *Benchmark* impresso com tempo de exposição 1,3s e altura de camada 0,04mm



Fonte: O autor (2022).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho consistiu na elaboração de uma metodologia para a fabricação de miliválvulas por Impressão 3D utilizando material flexível, onde como prova de conceito foi modelada, simulada, impressa e testada uma miliválvula de retenção do tipo *Flap*.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa acerca das tecnologias de Impressão 3D FDM e LCD-SLA, com relação principalmente a práticas de impressão. Após isso foi realizada uma revisão na literatura, onde foram reunidos de início 29 artigos, sendo que depois de aplicado um filtro utilizando as palavras-chave “Dispositivos Microfluídicos” e “Impressão 3D” essa coleção se resumiu a 15 trabalhos acadêmicos, onde pode ser visto vários dispositivos desenvolvidos, a exemplo de microbombas e microválvulas.

Como forma de validar a metodologia proposta, foi realizado o desenvolvimento de uma miliválvula de retenção, do tipo *Flap*, utilizando tanto a tecnologia FDM quanto a LCD-SLA. Inicialmente foram impressos os *Benchmarks* elaborados nesse trabalho, de 49,5x15,0x11,5mm, com canais de dimensões de 5,0 a 0,5mm, onde canais vizinhos apresentavam diferenças de 0,5mm. Para as peças impressas em FDM foi obtido um canal mínimo livre de obstrução de 1,5mm (porém com falha de acabamento na região superior do canal). Já para a impressão LCD-SLA foi obtido um canal mínimo livre de 2,0mm. Baseado nesses resultados foi feita a modelagem das miliválvulas de retenção do tipo *Flap*, onde optou-se por uma abordagem conservadora e o canal interno das conexões das miliválvulas foram de 2,8mm (ao invés do mínimo verificado nos *Benchmarks*) e o seu diâmetro externo e comprimento da válvula de 9,0mm e 18,5mm, respectivamente. Além disso, foi elaborado quatro geometrias para as miliválvulas, onde elas eram bastante similares entre si, diferenciando-se basicamente quanto a geometria da base do *Flap*, sendo nomeadas de “I”, “c”, “ç” e “Ç”. Após essa etapa, deu-se início a etapa de simulação, onde foram realizadas no total 8 simulações considerando o material TPU (FDM), onde quatro consideravam o fechamento de cada uma das quatro geometrias (para verificar se a válvula resistiria aos esforços) e outras quatro consideravam a abertura da válvula (para verificar qual geometria apresentava o *Flap* mais flexível). Da mesma forma, foram realizadas outras 8 simulações considerando o material 3DLAB FLEX (LCD-SLA). Como resultado foi obtido que para todas as geometrias propostas, para os dois materiais apresentados, as válvulas resistiram aos esforços (pressão de 1,0 bar) e o modelo que apresentou o *Flap* mais flexível e conseqüentemente o que seria escolhido para o andamento do trabalho (impressão) foi o “Ç”.

Para a etapa dos testes experimentais, ela foi realizada por medições indiretas, onde uma massa conhecida foi posta sobre o embolo de uma seringa (possibilitando o cálculo da pressão aplicada), gerando uma pressão transmitida a miliválvula por um tubo flexível e outro metálico. Com isso foi possível calcular a Vazão média da válvula no sentido de fluxo livre para uma faixa de pressões (de 0,0 a 0,25 bar), além de realizar os testes para o fechamento da válvula (considerando as pressões de 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 bar), que podem ser verificadas nas Figuras 46 e 47. Como resultados, para a impressão realizada com tecnologia FDM não foi possível avançar nessa etapa por problemas na impressão da peça, devido às limitações da tecnologia empregada. Já para a impressão em LCD-SLA, foram obtidos melhores resultados, onde para os testes no sentido de fluxo livre a miliválvula apresentou um comportamento linear com relação a Vazão média a medida que se aumentava a pressão aplicada, e para os testes no sentido da restrição do fluxo, não foi obtido restrição total, porém as Vazões mensuradas eram baixas, como pode ser visto comparando o resultado da Vazão média para 0,25bar, no sentido de fluxo livre e restrito, que foram de 3,16 ml/s e 0,09 ml/s, respectivamente.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de ensaios mecânicos com o material que será utilizado para impressão, a fim de obter todas as propriedades mecânicas necessárias para a simulação. Também recomenda-se utilizar um material flexível mais resistente, pois assim as paredes da válvula podem ser reduzidas, diminuindo seu tamanho, além de utilizar uma câmara de cura para obtenção de uma peça final de melhor qualidade.

Por fim, como foi dito durante o trabalho, não foi desenvolvida uma válvula com o menor diâmetro de canal obtido nos *Benchmarks* (1,0mm), sendo assim recomenda-se tentar realizar o desenvolvimento de uma miliválvula dessa dimensão. Outro ponto importante seria utilizar a metodologia apresentada com outras geometrias ou diferentes modelos de válvulas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Sofia Alexandra Chaves. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. 2015. 259 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2015.
- ADAMSKI, Krzysztof; KAWA, Bartosz; WALCZAK, Rafał. Inkjet 3d printed venturi microflowmeter. *In: 2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE)*. 15, 2018, Warsaw. **Anais[...]**. Warsaw: IOP Publishing, 2019, p. 1-3.
- AFINAL, como funciona uma impressora 3D FDM? 3DLAB, 2021. Disponível em: <https://3dlab.com.br/afinal-como-funciona-uma-impressora-3d-fdm/>. Acesso em 18 abr 2021.
- AHMED, Kumkum et al. Soft, conductive nanocomposites based on ionic liquids/carbon nanotubes for 3D printing of flexible electronic devices. **Polymer Journal**, v. 51, n. 5, 2019, p. 511-521. Doi: 10.1038/s41428-018-0166-z. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41428-018-0166-z>. Acesso em 18 abr 2021.
- AU, Anthony K. et al. Microvalves and Micropumps for BioMEMS. **Micromachines**, v. 2, n.2, 2011, p.179-220. Doi: 10.3390/mi2020179. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/2/2/179>. Acesso em 27 mar. 2022.
- CAMPBELL, Ian; BOURELL, David; GIBSON, Ian. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid prototyping journal**, v.18, n. 4, 2012, p. 255-258. Doi: 10.1108/13552541211231563. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552541211231563/full/html>. Acesso em 13 mar. 2021.
- CHEN, L. et al. Millifluidics, microfluidics, and nanofluidics: manipulating fluids at varying length scales. **Materials Today Nano**, v. 16, 2021, p. 100136. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100136>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588842021000286>. Acesso em: 18/09/2022.
- CHING, Terry et al. Fabrication of integrated microfluidic devices by direct ink writing (DIW) 3D printing. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 297, 2019, p. 126609. Doi: 10.1016/j.snb.2019.05.086. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400519307981>. Acesso em 29 mar 2022.
- CUNICO, Marlon Wesley Machado. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. Curitiba: Concep3d Pesquisas Científicas, 2015.
- CUNHA, Paulo Manuel de Freitas. **Impressão 3D de estruturas híbridas**. 2019. 106f. Tese de Doutorado. (Doutorado em Engenharia de Polímeros) – Universidade do Minho, Minho, 2019.
- CONHEÇA 4 softwares de Impressão 3D. SempreUpdate, 2021. Disponível em: <https://sempreupdate.com.br/software-de-impressao-3d-stl/>. Acesso em 25 abr. 2021.

DENG, D., JAIN et al. Three-Dimensional Circuit Fabrication Using Four-Dimensional Printing and Direct Ink Writing. **Proc. of the International Symposium on Flexible**, v. 1, n. 1, 2016, p. 286-291. Doi: 10.1109/ISFA.2016.7790176. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7790176>. Acesso em 18 abr. 2021.

ELIAS, Adriana Brito Cabral. **Estudo de uma microbomba de água sem partes móveis**. 2019. 108 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Física) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2019.

ELOY, J. C. Status of the MEMS industry in 2006. **Sens Transducers Mag**, v. 66, 2006, p. 521-525. Disponível em: https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/april_06/P_62.pdf.

ESTELIOLITOGRAFIA. 3DILLA, 2021. Disponível em: <https://pt.3dilla.com/impressora-3d/estereolitografia/>. Acesso em 17 abr 2021.

FICHA TÉCNICA RESINA FLEXÍVEL 3D LAB. 3DLAB, 2022. Disponível em: <https://imagens.3dlab.com.br/wp-content/uploads/2021/11/Data-Sheet-Resina-3D-Flexivel-1.pdf>. Acesso em 10 de abr 2022.

GUIDE to Stereolithography (SLA) 3D Printing. FORMLABS, 2022. Disponível em: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>. Acesso em 27 fev. 2022.

H. GONG, A. T. WOOLLEY; G. P. NORDIN. High density 3D printed microfluidic valves, pumps, and multiplexers. **Lab on a Chip**, v. 1, n. 16, 2016, p. 2450. Doi: 10.1039/C6LC00565A Disponível em: <https://pubs.rsc.org/hy/content/articlelanding/2016/lc/c6lc00565a/unauth#!divAbstract>. Acesso em 19 abr. 2021.

IMPRESSORA 3D SLA: entenda tudo sobre essa tecnologia. 3DLAB, 2022. Disponível em: <https://3dlab.com.br/impressora-3d-sla/>. Acesso em 27 fev. 2022.

KEATING, Steven J. et al. 3D printed multimaterial microfluidic valve. **PloS one**, v. 11, n. 8, 2016 p. e0160624. Doi: 10.1371/journal.pone.0160624. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0160624>. Acesso em 12 mar. 2021.

Kit Extrusora Mk8 1.75mm. MERCADO LIVRE, 2022. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1133765912-kit-extrusora-mk8-175mm-_JM?matt_tool=83149186&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413646&matt_ad_group_id=125984292437&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539354956527&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=494562103&matt_product_id=MLB1133765912&matt_product_partition_id=1689910269807&matt_target_id=aud-659781599642:pla-1689910269807&gclid=EAIAIQobChMIwOXxkuH79gIViwaRCh35ZgNaEAQYASABEgJGW_D_BwE. Acesso em 04 abr 2022.

LEE, Jeongwoo et al. A review on 3D printed smart devices for 4D printing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 4, n. 3, 2017 p. 373-383. Doi: 10.1007/s40684-017-0042-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-017-0042-x>. Acesso em 13 mar. 2021.

LEE, Yuan-Sheng; BHATTACHARJEE, Nirveek; FOLCH, Albert. 3D-printed Quake-style microvalves and micropumps. **Lab on a Chip**, v. 18, n. 8, 2018, p. 1207-1214. Doi: 10.1039/C8LC00001H. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/lc/c8lc00001h/unauth>. Acesso em 13 mar 2021.

MADŽAREVIĆ, Marijana; SVETLANA, Ibrić. Evaluation of exposure time and visible light irradiation in LCD 3D printing of ibuprofen extended release tablets. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 158, n. 1, 2021, p. 105688. Doi: 10.1016/j.ejps.2020.105688. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928098720304760?casa_token=dV0umEepOwQAAAAA:manloTiL-Wzhh5E8T6_MVu717CLklg35lfXpX1KqlBbFw7mGTru1EK0kuChd3Pyb-HQniECgLA. Acesso em 30 out. 2022.

MBAYE, Abdou et al. 3d Printed Micro Check Valve for Biomedical Applications. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1., 2018, Tóquio. **Anais [...]**. Tóquio: IOP Publishing, 2018, p. 012041.

MELVIN, Alexa M.; ROUSSEL, Thomas J. Modeling 3D Printed Check Valves for Microfluidic Systems. *In: 2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*. 1., 2018, Louisville. **Anais [...]**. Louisville: IEEE, 2018, p. 179-184.

NELSON, Matt D.; RAMKUMAR, Nirupama; GALE, Bruce K. Flexible, transparent, sub-100 μm microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 29, n. 9, 2019, p. 095010. Doi: 10.1088/1361-6439/ab2f26. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6439/ab2f26/meta>. Acesso em 28 mar 2022.

OH, Kwang W.; AHN, Chong H. A review of microvalves. **Journal of micromechanics and microengineering**, v. 16, n. 5, 2006, p.R13. Doi: 10.1088/0960-1317/16/5/R01. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/16/5/R01/meta>. Acesso em 27 mar. 2022.

PADILHA PINTO, Vitor Vilaça. **Caracterização de materiais flexíveis para fabricação de órtese e prótese por impressão 3d**. 2019. 58 f. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

PERLMUTTER, Michael; ROBIN, Laurent. High-performance, low cost inertial MEMS: A market in motion!. *In: Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. 1., 2012, Myrtle Beach. **Anais[...]**. Myrtle Beach: IEEE, 2012, p. 225-229.

PHAM, Duc Truong; GAULT, Rosemary S. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of machine tools and manufacture**, v. 38, n. 10-11, 1998, p. 1257-1287. Doi: 10.1016/S0890-6955(97)00137-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695597001375>. Acesso em 26 mar. 2021.

QIAN, Jin-Yuan et al. Actuation Mechanism of Microvalves: A Review. **Micromachines**, v. 11, n. 2, 2020, p. 172. Doi: 10.3390/mi11020172. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/2/172>. Acesso em 27 mar. 2022.

QUAN, Haoyuan, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. **Bioactive materials**, v. 5, n. 1, 2020, p. 110-115. Doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452199X19300714>. Acesso em 30 out. 2022.

RAISE3D PREMIUM TPU-95A TECHNICAL DATA SHEET. RAISE3D, 2021. Disponível em: https://s1.raise3d.com/2021/06/Raise3D-Premium-TPU95A_TDS_V1.pdf. Acesso em 10 de abr 2022.

SILVA, Jorge Ribeiro Cunha da. **Método de concepção de articulações flexíveis em impressoras 3D**. 2014. 96 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOLUÇÕES. ProFast, 2021. Disponível em: < <http://protofast.com.br/solucoes.html>>. Acesso em 18 abr 2021.

TAYLOR, Anthony P.; VELÁSQUEZ-GARCÍA, Luis Fernando. Miniaturized diaphragm vacuum pump by multi-material additive manufacturing. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 26, n. 6, 2017, p. 1316-1326. Doi: 10.1109/JMEMS.2017.2743020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8026556>. Acesso em 18 abr 2021.

TOP 3 Features in Ansys Mechanical 2021 R1. Ansys, 2021. Disponível em: <https://www.ansys.com/fr-fr/blog/top-3-features-mechanical-2021-r1>. Acesso em 25 abr. 2021.

TUDO SOBRE IMPRESSÃO 3D: O QUE É, COMO FUNCIONA E TIPOS. WISHBOX, 2022. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>. Acesso em 25 out. 2022.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

VON LINSINGEN, Irlan. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

Xu, Y. X., Juang, J. Y. Measurement of Nonlinear Poisson's Ratio of Thermoplastic Polyurethanes under Cyclic Softening Using 2D Digital Image Correlation. **Polymers**, v.13, n.9, 2021, p. 1498. Doi: doi.org/10.3390/polym13091498. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/1498/htm>. Acesso em: 03 mai. 2022.

WALCZAK, Rafał; ADAMSKI, Krzysztof; LIZANETS, Danylo. Inkjet 3D printed check microvalve. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 27, n. 4, 2017, p. 047002. Doi: 10.1088/1361-6439/aa6152. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6439/aa6152/meta>. Acesso em 25 abr. 2021.

WEIGEL, Niclas; MÄNNEL, Max J.; THIELE, Julian. Flexible Materials for High-Resolution 3D Printing of Microfluidic Devices with Integrated Droplet Size Regulation. **ACS applied materials & interfaces**, v. 13, n. 26, 2021, p. 31086-31101. Doi: 10.1021/acsami.1c05547. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.1c05547>. Acesso em 29 mar 2022.

WEISGRAB, Gregor; OVSIANIKOV, Aleksandr; COSTA, Pedro F. Functional 3D printing for microfluidic chips. **Advanced Materials Technologies**, v. 4, n. 10, 2019, p. 1900275. Doi: 10.1002/admt.201900275. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admt.201900275>. Acesso em 12 mar. 2021.

YAZDI, Alireza Ahmadian et al. 3D printing: an emerging tool for novel microfluidics and lab-on-a-chip applications. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 20, n. 3, 2016, p. 1-18. Doi: 10.1007/s10404-016-1715-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10404-016-1715-4>. Acesso em 12 mar. 2021.

ZHOU, Zhou et al. 3D-printed membrane microvalves and microdecoder. **Microsystem Technologies**, v. 25, n. 10, 2019, p. 4019-4025. Doi: 10.1007/s00542-019-04406-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-019-04406-2>. Acesso em 29 mar de 2022.