

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

VICTOR ESTEVES DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UMA BOBINADORA DE BAIXO CUSTO PARA GARANTIA DA
CONFORMIDADE NA EXTRUSÃO DE FILAMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2023**

VICTOR ESTEVES DE OLIVEIRA

**PROJETO DE UMA BOBINADORA DE BAIXO CUSTO PARA GARANTIA DA
CONFORMIDADE NA EXTRUSÃO DE FILAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Coorientador: Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti

Rio de Janeiro

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

O48 Oliveira, Victor Esteves de
Projeto de uma bobinadora de baixo custo para garantia da conformidade na extrusão de filamentos / Victor Esteves de Oliveira. — 2023.
49f. + apêndice : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 46-49
Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Coorientador: Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti

1. Engenharia mecânica. 2. Processos manufaturados. 3. Impressão tri-dimenssional. 4. Bobinas. I. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). II. Cavalcanti, Daniel Kioshi Kawasaki (Coorient.). III. Título.

CDD 621

Dedico este trabalho à minha família, por
todo suporte.

.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Ricardo Alexandre Amar de Aguiar e Doina Mariana Banea, pela docência durante a graduação, assim como por todo conhecimento, suporte e orientação na elaboração deste trabalho.

Ao pesquisador Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti, sem quem este projeto não seria possível, por toda atenção, cuidado, orientação e disponibilidade durante a elaboração deste trabalho.

À minha família, por todo esforço físico, financeiro e psicológico destinados à minha educação, em especial à minha mãe cuja trajetória me orgulha profundamente.

Ao CEFET/RJ, pelo acolhimento e ensino de qualidade que me possibilitaram redigir este trabalho.

Não há, talvez, melhor demonstração da tola presunção humana do que esta imagem distante do nosso minúsculo mundo. Para mim, destaca a nossa responsabilidade de sermos mais amáveis uns com os outros, e para preservarmos e protegermos o “pálido ponto azul”, o único lar que conhecemos até hoje. (SAGAN, Carl. 1994)

RESUMO

ESTEVEES, Victor. Projeto de uma bobinadora de baixo custo para garantia da conformidade na extrusão de filamentos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

A impressão 3D pelo método FDM (*Fused Deposition Modeling*) é um processo que vem ganhando destaque devido a adoção de seu uso tanto por pessoas físicas quanto por indústrias como as de próteses médicas, aeroespacial, prototipagem, entre outras. Utilizando desta técnica, é possível realizar manufatura aditiva (MA) fora de um contexto industrial permitindo o desenvolvimento de projetos em MA dentro de laboratórios e até mesmo residências. Visto isso, a produção de filamentos como os do tipo PLA (*Polylactic Acid*) e ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), que abastecem as máquinas de impressão 3D do tipo FDM, são essenciais para o funcionamento desta indústria. Estes filamentos, por sua vez, são produzidos através de uma extrusora de filamentos que fundem o material e concedem a ele a geometria necessária para ser utilizada pelas impressoras. Entretanto, para garantir a qualidade do filamento extrudado é muitas vezes necessário que sejam realizadas etapas pós-fabricação como o resfriamento, ajuste de diâmetro e um armazenamento adequado. Acessórios que realizam este tipo de função estão disponíveis no mercado, porém seu custo em 2022 varia numa faixa de R\$ 4000,00 até R\$8000,00. Neste estudo, é proposto um projeto de bobinadora que realiza o tracionamento, ajuste de diâmetro, medição de diâmetro, resfriamento e armazenamento automatizado e possui um custo estimado inferior a R\$ 1000,00.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Bobinadora de Filamentos. Extrusão de Filamentos. Conformidade.

ABSTRACT

ESTEVEES, Victor. Low-cost spooler project to assure filament quality. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

3D printing by the FDM (Fused Deposition Modeling) method is a process that has been gaining prominence due to the adoption of its use both by individuals and by industries such as medical prostheses, aerospace, prototyping, among others. Using this technique, it is possible to perform additive manufacturing (AM) outside an industrial context, allowing the development of AM projects within laboratories and even homes. Given this, the production of filaments such as PLA (Polylactic Acid) and ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), which supply FDM-type 3D printing machines, are essential for the functioning of this industry. These filaments, in turn, are produced through a filament extruder that fuses the material and gives it the necessary geometry to be used by printers. However, to ensure the quality of the extruded filament, it is often necessary to carry out post-manufacturing steps such as cooling, diameter adjustment and adequate storage. Accessories that perform this type of function are available on the market, but their cost in 2022 varies from R\$4000.00 to R\$8000.00. In this study, a spooler project is proposed that performs the traction, diameter adjustment, diameter measurement, cooling and automated storage and has an estimated cost of less than R\$ 1000.00.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Printing. Filament Spooler. Filament Extruder. Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	Carretel de filamento sendo alimentado a uma impressora 3D de pequeno porte.	2
FIGURA 2	Pellets de ABS que, após serem fundidos na extrusora, se tornam os filamentos.	3
FIGURA 3	Filamento de diâmetro constante e Filamento com defeitos que impedem sua passagem pelos canais da impressora 3D.	4
FIGURA 4	Diagrama ilustrando o processo de fatiamento.	8
FIGURA 5	Diagrama ilustrando as etapas para impressão.	8
FIGURA 6	Gráfico que demonstra o aumento de patentes de Manufatura Aditiva registradas em um período de 30 anos.	9
FIGURA 7	Exemplos de métodos classificados pelo estado do material utilizado.	10
FIGURA 8	Diagrama ilustrando as etapas para impressão	12
FIGURA 9	Princípios do processo de manufatura por laminação	13
FIGURA 10	Princípios do processo de estereolitografia.	14
FIGURA 11	Princípios do processo de manufatura por fusão de camadas em pó.	15
FIGURA 12	Prato descartável feita com PLA.	17
FIGURA 13	Peças de brinquedo feitas com ABS.	18
FIGURA 14	Representação de uma extrusora.	19
FIGURA 15	Filamento que sofreu inchamento.	23
FIGURA 16	Filamento que sofreu relaxação.	24
FIGURA 17	Filamento de diâmetro ideal.	26
FIGURA 18	Filamento sendo resfriado em água.	27
FIGURA 19	Modelagem para troca de calor de uma aleta cilíndrica infinita.	30
FIGURA 20	Gráfico comparativo entre diferentes CFMs de Ventoinhas	31
FIGURA 21	Dimensões do Motor de Passo Nema 23.	34
FIGURA 22	Indicação das paredes da estrutura.	35
FIGURA 23	Base montada com furos sinalizados para haste e fixação do motor.	39
FIGURA 24	Área dedicada a alocação das partes elétrica e eletrônica do projeto.	40
FIGURA 25	Exterior e interior do sensor e suas peças.	41
FIGURA 26	Filamento atravessando o sensor durante medição.	41
FIGURA 27	Dimensões e especificações do servo mecânico a ser utilizado.	43
FIGURA 28	Representação da bobinadora de filamentos proposta.	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Dados de Bobinamento.	33
TABELA 2	Consumo Elétrico.	39
TABELA 3	Custo final estimado do projeto.	44

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Introdução	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Organização do Trabalho	5
1.5	Estado da Técnica	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Manufatura Aditiva	7
2.2	Materiais Compósitos	15
2.3	Extrusão	18
2.4	Filamentos	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Introdução	25
3.2	Limitações	25
3.3	Resfriamento	26
3.4	Bobinamento	31
3.5	Estrutura	32
4.	RESULTADOS	33
4.1	Resfriamento	33
4.2	Bobinamento	33
4.3	Estrutura	35
4.4	Elétrica	39
4.5	Sensor	40
4.6	Guia	42
4.7	Esquematização da Montagem	43
4.8	Custo Estimado	44
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.1	Considerações Finais	45
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	45
6.	BIBLIOGRAFIA	46
7.	APÊNDICE A	50
8.	APÊNDICE B	51
9.	APÊNDICE C	52
10.	DESENHOS	53

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A busca por maior eficiência, praticidade e melhor relação custo-benefício no ramo de materiais promoveu, com o avanço da tecnologia através do tempo, o desenvolvimento de materiais cada vez mais leves e resistentes para atender às necessidades de diferentes indústrias como a automotiva, aeronáutica, aeroespacial e naval. Durante a primeira revolução industrial e nas décadas subsequentes, os metais foram os materiais preferenciados pela indústria, porém com o surgimento de novas necessidades e melhorias, como a manufatura de peças complexas, peças grandes contínuas e materiais mais leves, foram desenvolvidos os materiais compósitos, que se apresentam como uma alternativa ao uso de materiais convencionais. [1, 2].

Com o objetivo de operar processos de fabricação com estes materiais emergentes, os métodos de fabricação tradicionais como usinagem, moldagem e conformação tiveram que ser substituídos por métodos mais competitivos e melhor compatíveis com esta nova tecnologia. Sendo uma destas técnicas compreendida pelo conceito fundamental comum da adição de material gradualmente, camada por camada, que dentre outros benefícios promove uma prototipagem rápida, chamada de Manufatura Aditiva. [3].

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como “impressão 3D” é um setor industrial em ascensão que vem ganhando cada vez mais destaque, especialmente na última década com a popularização de impressoras 3D de pequena e média escala. A impressão 3D é um processo de fabricação que permite a produção automatizada de peças e estruturas de diferentes geometrias e pode ser realizada a partir de matérias em diferentes estados como, por exemplo, material em pó, estado líquido ou sólido. O tipo mais comum de aplicação de manufatura aditiva é realizado pelo método chamado de FDM, do inglês, *Fused Deposition Modeling*, Modelagem por Distribuição de Material Fundido, que é um método que utiliza material sólido de geometria cilíndrica chamada de “filamentos” elevado a sua temperatura de fusão para que possa ser distribuído em camadas que dão forma a peça. [4, 5].



Figura 1 – Carretel de filamento sendo alimentado a uma impressora 3D de pequeno porte. [31].

Uma fabricação realizada através destas técnicas possui a vantagem de conseguir confeccionar com alta precisão geometrias complexas com menor consumo de material e oferecer maiores aberturas para adaptações, visto que é um sistema que não depende de moldes. [5, 6]. Contudo, nada disso é possível sem que haja manufatura prévia do material a ser utilizado, no caso do FDM, o filamento, como pode ser visto na Figura 1. O filamento é produzido a partir de pellets de diferentes tipos de polímeros termoplásticos como, por exemplo, os do tipo acrilonitrila butadieno estireno (ABS) ou acetato de vinila (EVA) que são fundidos e posteriormente extrudados com geometria cilíndrica de diâmetros específicos como os Pellets ilustrados pela Figura 2.

O filamento apresenta ainda vantagens relacionadas ao seu armazenamento uma vez que, além de serem mais leves e poderem ocupar uma área otimizada quando enrolados em carretel, os materiais poliméricos estão menos sujeitos a danos a sua estrutura por intemperes ou impacto, não oxidando como materiais tradicionais como o ferro, e pontos de fusão superiores a temperatura ambiente. [3].

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram analisadas as necessidades básicas por trás destes processos e realizadas pesquisas para que pudesse ser construída uma base bibliográfica que disponibilizasse conhecimento teórico sobre este assunto.



Figura 2 – Pellets de ABS que, após serem fundidos na extrusora, se tornam os filamentos. [32].

1.2. MOTIVAÇÃO

A extrusão, entretanto, está sujeita a defeitos que posteriormente podem vir a causar problemas quando o filamento for ser utilizado pela impressora 3D como podem ser vistos na Figura 3, por este motivo é necessário realizar procedimentos pós-extrusão para garantir a qualidade do filamento. Dentre as operações disponíveis para garantia da qualidade estão o ajuste e checagem de diâmetro, redução da temperatura imediatamente após a extrusão e o armazenamento adequado e apropriadamente distribuído através da bobina ou rolo que irá servir de apoio aos filamentos.

Tais cuidados são necessários para garantir a integridade da máquina de manufatura aditiva, uma vez que, diâmetros que ultrapassem os limites superiores e inferiores de raio de filamentos estipulados pelo fabricante podem levar a entupimentos e danos aos sistemas internos de impressão, assim como ao bico de impressão. Mesmo quando não causam problema durante a impressão, filamentos de baixa qualidade produzem peças finais de menor qualidade podendo apresentar defeitos como a descontinuidade a depender do defeito do filamento.

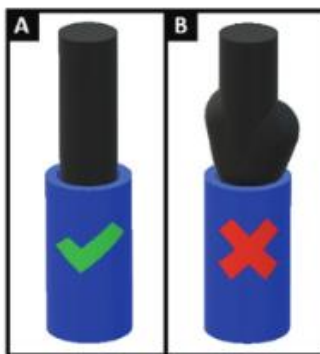


Figura 3 - Filamento de diâmetro constante (A). Filamento com defeitos que impedem sua passagem pelos canais da impressora 3D. [7]

Máquinas que realizam este tipo de operação de garantia da qualidade estão disponíveis no mercado, porém seu custo ainda é pouco acessível apresentando um valor médio de R\$ 6000,00 em modelos completos que incluam o resfriamento, de acordo com valores levantados neste projeto no ano de 2022. Este trabalho é motivado pela possibilidade de construção de uma bobinadora que ofereça todas estas funções, porém com um custo total de peças e montagem menor.

O laboratório LADES do CEFET/RJ, possui a sua disposição uma extrusora de filamentos do modelo FILMAQ 3D CV com controle de velocidade, capaz de produzir filamentos compatíveis com a máquina de manufatura aditiva por FDM também disponível no laboratório.

Entretanto, como citado anteriormente, se faz necessária a presença de uma máquina auxiliar que permita a garantia da qualidade destes filamentos e minimize a possibilidade de que danos sejam causados à impressora 3D por incompatibilidade dos filamentos causada por defeitos mitigáveis com os processos controlados de bobinamento e resfriamento pós-extrusão.

Por este motivo, ao longo deste projeto o modelo de extrusora FILMAQ 3D CV é usado como parâmetro nos dimensionamentos das peças que compõe a proposta da bobinadora de baixo custo. Não obstante, também foi avaliada a possibilidade de adaptação do projeto para outras extrusoras uma vez que é parte da motivação deste trabalho oferecer uma máquina compatível com o estado da técnica.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é projetar uma máquina bobinadora para auxílio de extrusão de filamentos que possua a capacidade de resfriar, medir o diâmetro e distribuir igualmente sobre a superfície de um carretel um filamento contínuo.

Visando a concretização deste objetivo será necessário mais especificamente:

- Analisar as configurações possíveis de peças e disposições de máquinas similares já existentes no mercado.
- Estudar as combinações de componentes que melhor entregam uma relação entre funcionalidade, atendendo às especificações técnicas do escopo deste projeto, e o custo total de confecção.
- Compatibilizar o projeto em referência a necessidade de um maquinário similar nos laboratórios do CEFET, este projeto utilizará como referência de compatibilidade a extrusora de filamentos utilizada no LADES como citado anteriormente.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Visando uma organização do conteúdo, o mesmo foi disposto da seguinte maneira:

Capítulo 1: Apresentação da introdução ao tema, motivações e objetivos.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica dos tópicos importantes à compreensão do projeto, como os tipos de aplicação de manufatura aditiva, os tipos de materiais poliméricos mais utilizados e os tipos de defeitos mais comuns em filamentos extrudados.

Capítulo 3: Neste capítulo são apresentados os componentes necessários para o funcionamento de uma bobinadora de filamentos, assim como as considerações sobre o estado da técnica pertinente ao trabalho.

Capítulo 4: Disposição dos resultados obtidos e os elementos selecionados para compor a bobinadora acompanhados da análise e justificativa para tal seleção.

Capítulo 5: Este capítulo apresenta as considerações finais quanto ao trabalho, assim como, possíveis melhorias futuras.

1.5. ESTADO DA TÉCNICA

Estão disponíveis no mercado bobinadoras de filamento para processamento pós-extrusão de diversos tamanhos e compatibilidades desde aquelas pensadas para produção em massa em uso industrial até aquelas de pequeno porte para uso caseiro. Essas diferentes bobinadoras se valem de métodos e peças divergentes para atingir objetivos similares tendo sido possível observar, entretanto, a predominância de algumas destas técnicas.

Os modelos mais simples que compõe o estado da técnica podem ser exemplificados pela bobinadora da Filastruder, sendo esta uma das bobinadoras de menor custo no mercado. Tais modelos não atendem ao escopo desde projeto uma vez que ofertam apenas o bobinamento do filamento e não submetem o filamento a um resfriamento ou medição de seu diâmetro. A bobinadora Filastruder, em especial, é projetada para o bobinamento vertical do filamento, não sendo uma máquina de bancada e requisitando um espaço dedicado no laboratório para sua alocação.

Já modelos mais tradicionais podem ser exemplificados pela bobinadora da marca FILMAQ3D, sendo vendida em duas unidades, unidade bobinadora e unidade de resfriamento, a unidade de resfriamento fornecendo resfriamento com o uso do método de correntes de ar pela rotação das ventoinhas e imediatamente após, medindo o diâmetro do filamento com o uso de um relógio comparador analógico. Em modelos de uso industrial foi possível identificar metodologias diferentes como o método de resfriamento por submersão em água ou líquidos refrigerantes e o uso de sensores ópticos projetados especificamente para a medição de filamentos, expandindo assim a gama de possibilidades que precisariam ser analisadas para que fosse possível identificar o dimensionamento ideal para o uso deste projeto.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Com o intuito de permitir a plena compreensão do projeto, serão apresentados conceitos que dão suporte a compreensão da aplicação da bobinadora de filamento e seus mecanismos.

2.1. MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) apresenta uma série de vantagens quando comparada com a manufatura tradicional como a liberdade da escolha de designs, minimização de geração de resíduos e a capacidade de fabricar estruturas complexas, assim como também promove um acesso mais fácil à fabricação de protótipos para testes. Tais vantagens tem demonstrado ampla aplicação, levando a soluções revolucionárias, em indústrias como a biomédica, aeroespacial e construção civil. [6].

Cada vez mais acessível, esta forma de realizar fabricação é capaz de reduzir custos de produtos e projetos não apenas diretamente como por custo de material, mas também indiretamente com a simplificação de processos podendo eliminar a necessidade, por exemplo, do uso de ferramentas para acabamento. A facilidade que a fabricação por MA promove em relação a peças de geometria avançada também é outro fator que torna o processo mais econômico, em 2018 a divisão de aviação da General Electric economizou cerca de três milhões de dólares por avião fabricado com a utilização de MA para fabricação de peças de titânio, peças estas que devido a sua complexidade geométricas, cavidades e encaixes, precisariam passar por diferentes processos de fabricação para serem confeccionadas por métodos tradicionais. [8].

Uma outra tecnologia aliada a prática de manufatura aditiva é a de Desenho Assistido por Computador, do inglês *Computer Aided Design* (CAD), que comporta a criação de modelos tridimensionais com possibilidade de gerar estruturas complexas e que, além de ajudar a visualizar o produto ou peça em uma fase pré-manufatura também servem como instrução de impressão para a máquina de manufatura aditiva. Depois de criado o modelo através de um software de modelagem 3D como, por exemplo, o SolidWorks o arquivo CAD é convertido para o formato STL e é enviado para softwares chamados de *slicers*. Nestes programas chamados *slicers* ocorre o

fatiamento, criando segmentações horizontais de espessura fina da peça conforme os parâmetros definidos pelo usuário que são enviados na forma de dados para a máquina que realizará a manufatura aditiva que construirá estas camadas, uma acima da imediatamente anterior como representado no diagrama da Figura 4. [5, 6].

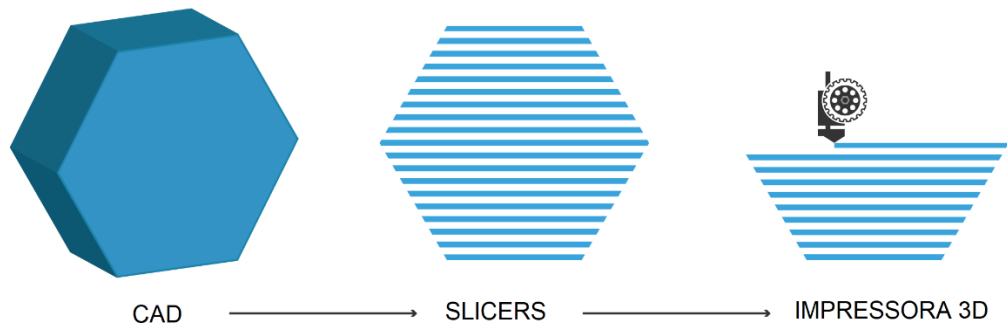


Figura 4 – Diagrama ilustrando o processo de fatiamento. Adaptado de [33].

Um diagrama ilustrando as etapas gerais de impressão pode ser visto na Figura 5.

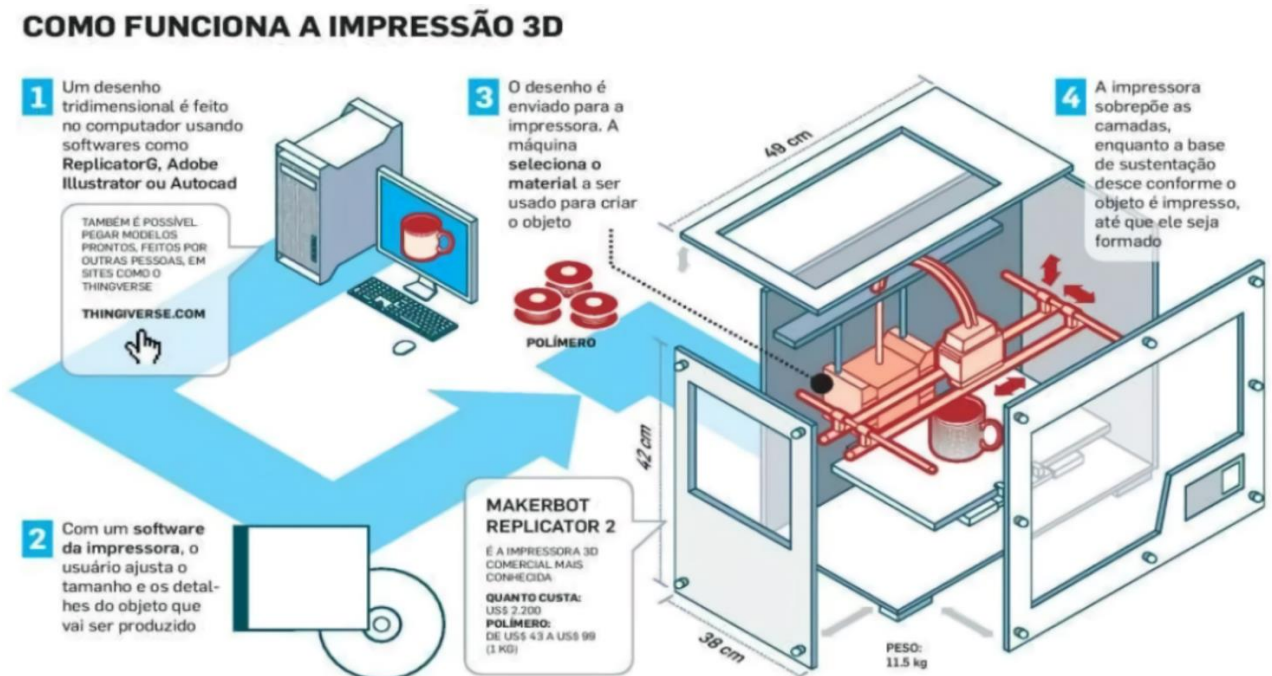


Figura 5 – Diagrama ilustrando as etapas para impressão. [26]

Tal conjunto de vantagens faz com que a manufatura aditiva tenha ganho um grande aumento de interesse do mercado desde suas primeiras patentes na década de 80, este interesse demonstrou aumento anual com o lançamento de novas tecnologias e está sendo cotada como um método de fabricação que irá liderar a indústria 4.0 como pode ser visto na Figura 6 com o aumento de patentes sobre o tema nos últimos anos. [4].

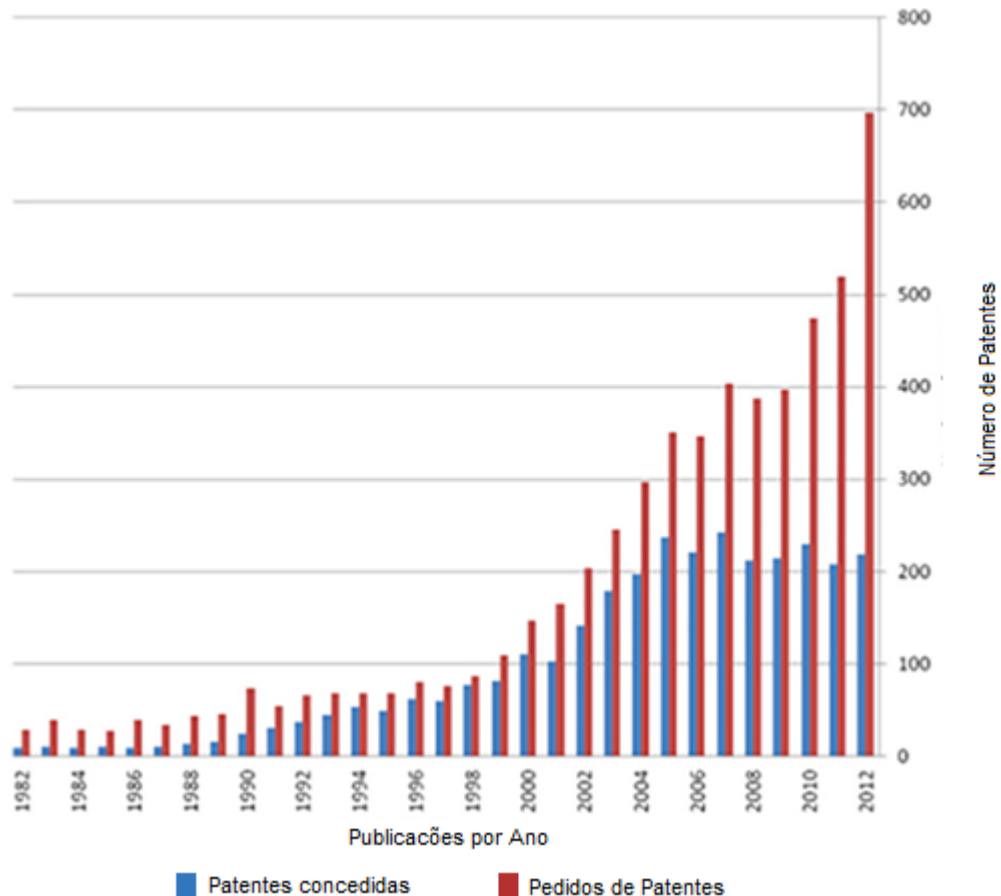


Figura 6 - Gráfico que demonstra o aumento de patentes de Manufatura Aditiva registradas em um período de 30 anos. Adaptado de [4].

2.1.1. Métodos de Impressão

A Manufatura Aditiva pode ser realizada através de diferentes técnicas como ilustrado pela Figura 7, cada uma destas entregando diferentes parâmetros de qualidade, velocidade de impressão, propriedades mecânicas conferidas, entre outros. A técnica a ser escolhida preferencialmente no meio industrial deve vir de uma análise das demandas do projeto [4]. Estas tecnologias podem ser destrinchadas de

maneiras diferentes sendo uma das formas de realizar esta categorização o estado do material base usados na impressão [5,8]:

- Sólido - São exemplos as Manufatura por Laminação (LOM), Manufatura por Fusão e Deposição (FDM), sendo este o método de manufatura aditiva mais relevante para este projeto, entre outras.
- Líquido - É um exemplo a Manufatura por Estereolitografia (SLA).
- Pó - São exemplos as Manufatura de Fusão por camadas de pó (PBF), Manufatura a laser para sinterização (SLS), entre outras.

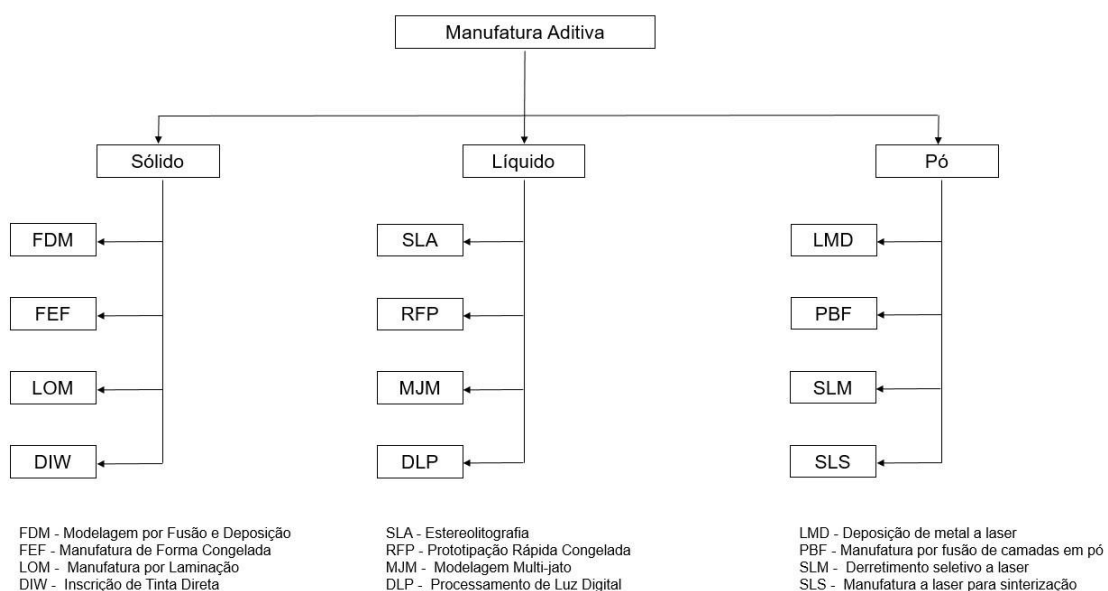


Figura 7 – Exemplos de métodos classificados pelo estado do material utilizado. Adaptado de [4].

Apesar da grande variedade de métodos, quatro destes métodos se destacam como os mais aplicados [9], dentre eles está o método FDM de maior interesse a este projeto como previamente citado. Serão descritos em seguida as peculiaridades de cada um destes quatro métodos.

2.1.1.1. FDM – Modelagem por Fusão e Deposição

Este método prevê o derretimento por fusão de um material previamente em estado sólido para que, enquanto ainda se mantém mais maleável estando em temperaturas elevadas relativas ao ponto de fusão do material e o deixando em um estado semilíquido, este possa ser depositado em camadas dando forma à peça após resfriado e novamente solidificado. Também chamado pelo nome de *Fused Filament Fabrication* (FFF) o material utilizado para este método é polimérico termoplástico e comercializado em forma cilíndrica contínua de pequenos diâmetros chamada de filamentos. Estes filamentos configuram uma solução mais prática no que diz respeito a armazenamento e manuseio de matéria prima para manufatura aditiva devido a sua baixa reatividade em temperatura ambiente comparado a matérias primas de métodos líquidos e em pó além da possibilidade de armazenamento em carretéis. [4].

O método FDM apresenta vantagem em comparação a métodos tradicionais de fabricação por seu custo relativo mais baixo, pela velocidade de impressão e a simplificação do procedimento. As desvantagens envolvidas, entretanto, são a dificuldade de conceder boas propriedades mecânicas à peça, acabamento ruim e baixa variedade de materiais que podem ser utilizados. [5]. Já, quanto a termos de formas, dimensão e tolerâncias, a qualidade final da impressão de peças através do método por FDM são diretamente dependentes dos parâmetros selecionados para serem utilizados durante o processo de MA. Tais parâmetros devem ser determinados em referência ao material que está sendo utilizado como matéria-prima, assim como, as características desejadas para o resultado final após a impressão. Os principais parâmetros que influenciarão o processo são o tempo de aquecimento, a vazão do material, a pressão de trabalho, a velocidade de deslocamento, o tempo de pausa, a vazão de deposição e a espessura de camada. A busca por uma combinação ideal destes parâmetros é objeto de pesquisa de trabalhos científicos que podem variar entre objetivos como obter a maior qualidade superficial de acabamento ou as melhores propriedades mecânicas. As etapas gerais podem ser observadas na Figura 8.

Por dentro de uma impressora 3D

Como funciona uma impressora FDM

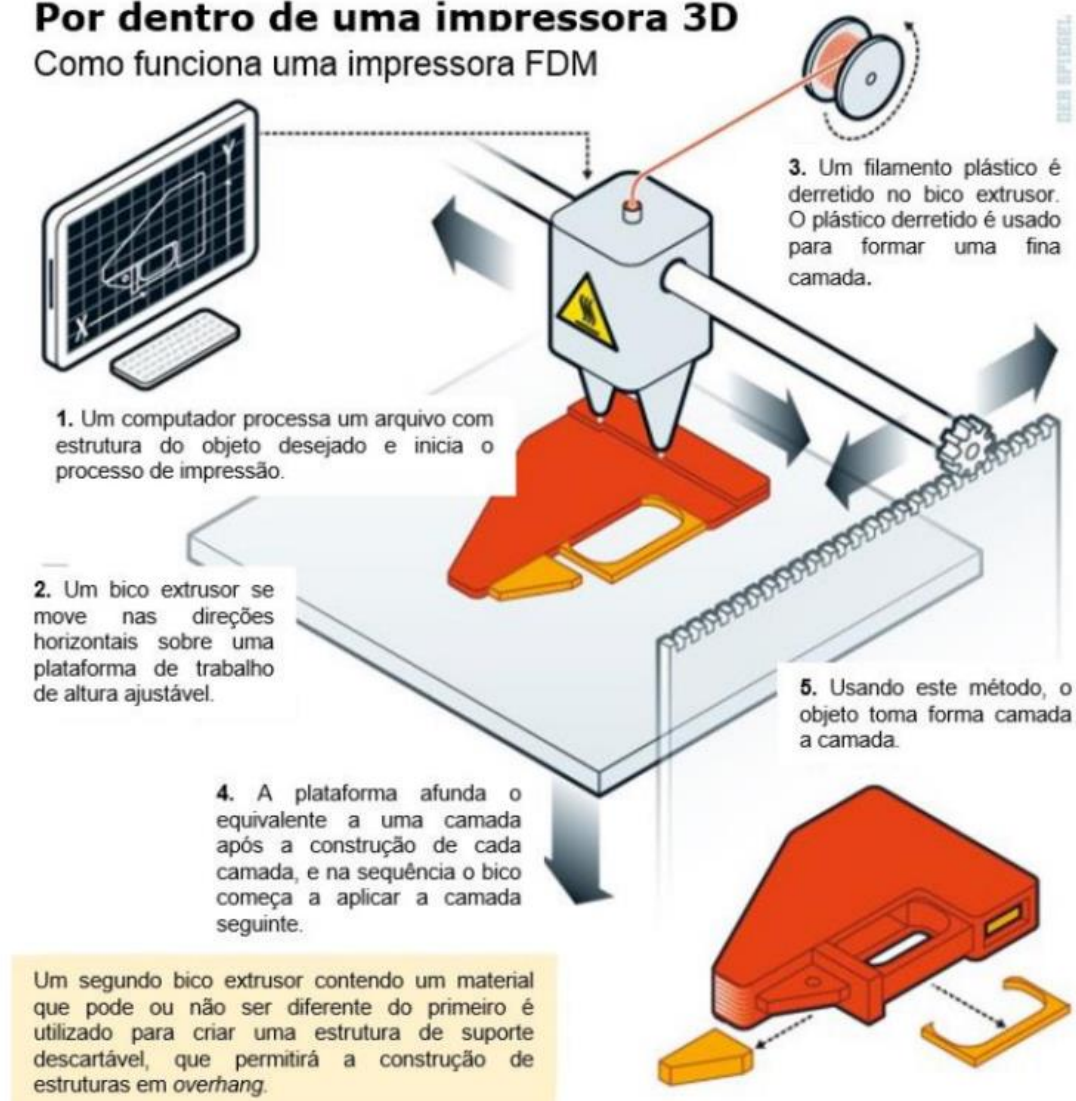


Figura 8 – Diagrama ilustrando as etapas para impressão. [25]

2.1.1.2. LOM – Manufatura por Laminação

Este método utiliza rolos ou blocos do material de alimentação para criar lâminas a partir de fatiamento que posteriormente são unidas através de aquecimento como ilustrado na Figura 9. É possível realizar LOM tanto com polímeros como também com papel e cerâmicas. Este método deixa material em excesso na superfície da peça, o que cria a necessidade de aplicação de acabamento e tratamentos pós-fabricação para tentar alcançar melhoras em propriedades mecânicas. Este material em excesso removido, entretanto, pode muitas vezes ser reciclado e reutilizado na fabricação de outra peça.

Devido a suas características LOM é um método ideal para a fabricação de grandes estruturas por manufatura aditiva. Porém, dada a necessidade de acabamento por excesso de material, não é um método recomendado para peças que possuam detalhes como encaixes e geometrias mais complexas já que isso pode levar o procedimento de acabamento a durar muito mais tempo. [4, 5].

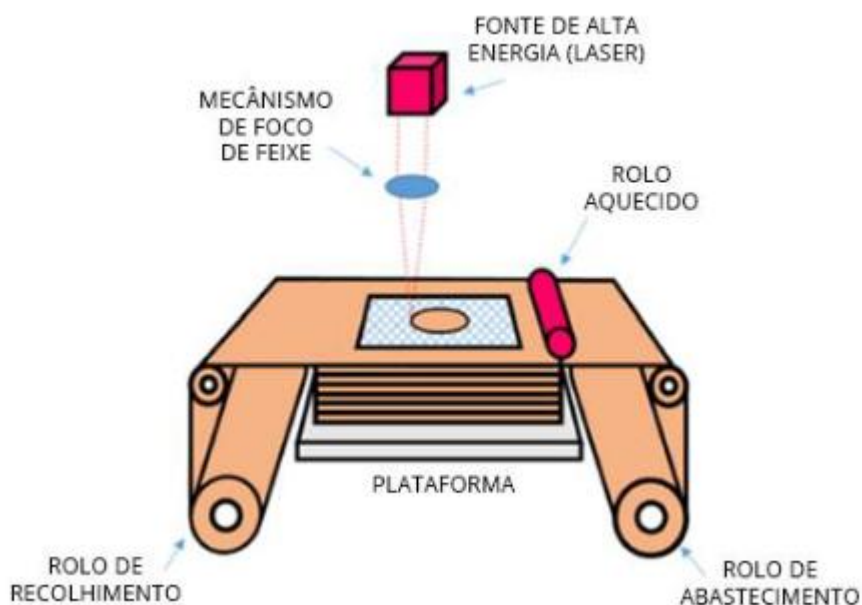


Figura 9 – Princípios do processo de manufatura por laminação. [26]

2.1.1.3. Estereolitografia

Este método fabrica o objeto sob uma plataforma que se movimenta verticalmente, dentro de um tanque preenchido com resina fotocurável, que costuma ser a base de epóxi ou acrílico. É utilizado um feixe de laser ultravioleta que é guiado através de um conjunto de espelhos galvanômetros para realizar a solidificação das seções transversais do objeto conforme o diagrama da Figura 10.

A Estereolitografia permite a impressão de peças de alta qualidade, mas seu custo e tempo levado para fabricação, além da limitação de materiais aplicáveis a este método a tornam uma técnica utilizada majoritariamente por escopos de alta performance. [10].

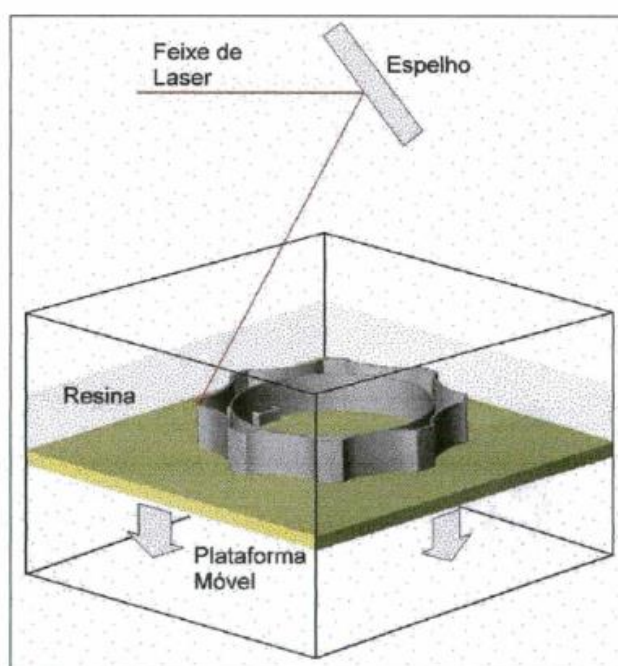


Figura 10 - Princípios do processo de estereolitografia [10].

2.1.4. Manufatura por fusão de camadas em pó

Este método prevê o espalhamento de finas camadas de pó sobre uma plataforma que, assim como na estereolitografia, é fundido por um feixe de laser como

demonstrado pela Figura 11. Estas são depositadas camada sobre camada e são empurradas por um rolo até que a peça esteja completa. É possível remover o pó em excesso através de aspiração e promover detalhamento através de processos de pós-fabricação como revestimento, sinterização e infiltração. A densidade da peça é definida pelo tamanho do pó utilizado e a proximidade entre estes grãos. [5].

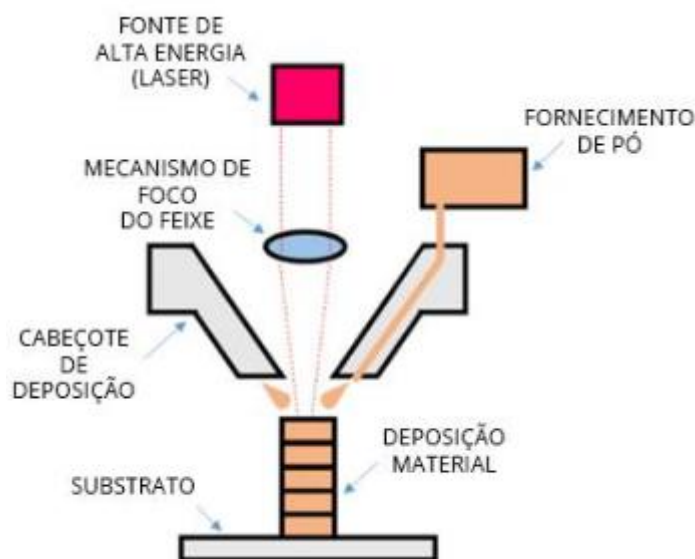


Figura 11 – Princípios do processo de manufatura por fusão de camadas em pó. [26]

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Como definido por Callister, 2002, um material compósito é “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades” sendo então um fruto da combinação sinérgica entre dois ou mais materiais, classificados de matriz ou reforço, obtendo um único produto com características superiores. [1]. Uma nova aplicação em ascensão de materiais compósitos é seu uso no processo de manufatura aditiva através de filamentos compósitos. Tais filamentos tem sido objeto de estudo de universidades como o CEFET/RJ, devido a possibilidade de combinar vantagens dos materiais compósitos como leveza e boas propriedades mecânicas com a simplicidade e capacidade de gerar peças de geometria complexa da manufatura aditiva.

2.2.1. Polímeros

Os materiais poliméricos são compostos por macromoléculas que podem ser caracterizadas por seu tamanho, sua estrutura química e interações intramoleculares e intermoleculares, podendo ser naturais, como a seda, a celulose e as fibras de algodão, ou sintéticos, como o Polietileno tereftalato (PET) e o Policloreto de vinila (PVC). Os polímeros também podem ser classificados como termoplásticos ou termofixos. Os termofixos são materiais que quando recebem calor se decompõe antes de atingir sua fusão devido a sua estrutura molecular mais rígida, não servindo ao processo de FDM. Portanto os materiais termoplásticos são os de maior interesse a este trabalho visto que são moldáveis a quente e possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmico e elétrico, são resistentes ao impacto e possuem baixo custo. [2]. Por estas características são ideais para serem aplicados na técnica de FDM.

2.2.2. Materiais usados em FDM

Conforme revelado anteriormente, uma grande variedade de materiais e em formas diferentes podem ser utilizados na manufatura aditiva concedendo um rico espectro de possibilidades. É importante destacar que determinados métodos de MA permitem a utilização até mesmo de metais como material base, ou ainda apenas como parte de uma impressão. Todavia, para o escopo deste projeto se faz necessário focar nos dois materiais mais utilizados dentro do contexto de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) pois estes serão os utilizados na fabricação de filamentos o qual o projeto visa pleitear sendo estes PLA, do inglês *Polylactic Acid*, e ABS do inglês, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*.

2.2.2.1. PLA – Ácido Poliláctico

Filamentos de PLA são biocompatíveis, podem se apresentar em diferentes cores, possuem baixo ponto de fusão e não são tóxicos, fazendo deles um material de amplo uso em MA especialmente na indústria biomédica. Algumas desvantagens deste material são a sua baixa maleabilidade e propriedades mecânicas inferiores comparado ao ABS. Seu baixo ponto de fusão, apesar de ser um facilitador energético

na hora da impressão, também pode ser prejudicial quando alocado a trabalhar em altas temperaturas. [11].

Sua biocompatibilidade e biodegradabilidade derivam de seu processo de produção, sendo fabricados a partir de recursos renováveis como a cana de açúcar, sendo uma alternativa verde diferente do ABS que deriva do petróleo. Sua aplicabilidade é diversa podendo ser usado em embalagens de alimentos, pratos descartáveis como ilustrado na Figura 12, implantes, elementos estruturais e peças de decoração. [11].



Figura 12 – Prato descartável feita com PLA. [34]

2.2.2.2. ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

Filamentos de ABS promovem a criação de peças duráveis, com melhor resistência a temperaturas mais altas, melhores propriedades mecânicas e apresenta melhor flexibilidade. Suas desvantagens são não ser biodegradável, liberar gases durante seu uso para impressão e ser mais difícil de ser reutilizado. [9].

Tendo como parte de sua composição derivados do petróleo, os filamentos do tipo ABS apresentam reatividade química com alguns compostos, não sendo recomendados em aplicações que os possam expor a hidrocarbonetos solventes. Suas propriedades mecânicas conferidas levam o ABS a ser um destaque na indústria automotiva, substituindo peças metálicas com o objetivo de reduzir o peso total do

conjunto. [5, 7]. Um uso pouco conhecido do ABS é na fabricação do brinquedo Lego® visto na Figura 13.



Figura 13 – Peças de brinquedo feitas com ABS. [35]

2.3. EXTRUSÃO

PESSI (2019), define que a extrusão é um processo de fabricação de perfis de seção transversal única, onde o material é forçado, por compressão, ao longo de um orifício em uma matriz. [29].

A extrusora é normalmente composta por parafuso, barril, unidade de calor e a matriz. A força da gravidade é utilizada para permitir que os pellets de plástico caiam no parafuso rotativo que por sua vez gira e cria fricção, gerando calor por cisalhamento, além do calor conferido ao processo pelo controle de aquecimento elétrico. O isolamento radial do bocal contribui para que não haja fuga de calor indesejada permitindo que o material se mantenha semifundido até chegar na matriz. [12].

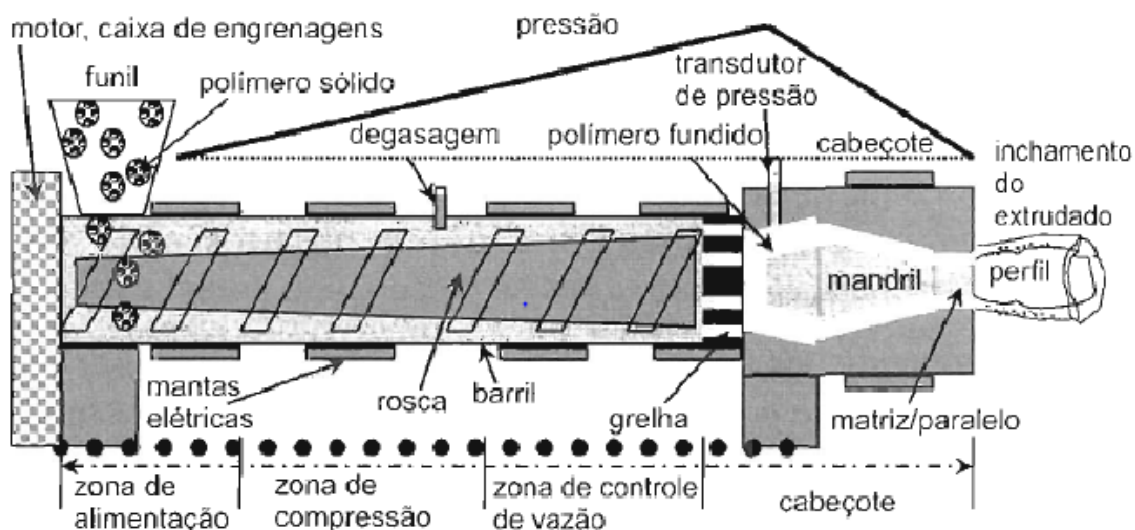


Figura 14 - Representação de uma extrusora. [22]

Como pode ser visto na Figura 14, o funil da extrusora possui a função de alimentar de modo constante a extrusora com o material polimérico desejado, possuindo forma cônica para facilitar que o material deslize pelas paredes tanto pela tendência de queda quanto por atuação do peso dos pellets imediatamente acima. [13].

Já o barril é normalmente fabricado com aço para que seja capaz de suportar as altas pressões necessárias no processo, podendo chegar à ordem de 230 Mpa. O barril deve ser em torno de 2,5 vezes maior que o diâmetro da rosca e é a área onde os pellets caem imediatamente após passarem pelo funil, o barril aloca em seu interior a rosca que irá pressionar os pellets contra as paredes do barril durante sua rotação. Em suas paredes exteriores normalmente se encontram as mantas elétricas que irão transferir o calor para o interior do sistema. [12].

A rosca no interior do barril tem como principal função o transporte, a fundição e a homogeneização do material polimérico termoplástico e é dividida em três zonas. A primeira sendo a zona de alimentação, a segunda à zona de compressão e a terceira a zona de controle de vazão. A rosca precisa ser construída a partir de um material capaz de suportar o torque gerado pelo processo, mas sem que o módulo de elasticidade seja exageradamente elevado para não criar uma zona preferencial para fratura frágil. Como sugerido pelos nomes, quando na zona de compressão, a pressão gerada nos pellets pelo conjunto do barril e da rosca leva a compressão da massa fundida que é movida junto a rotação da rosca na direção zona de controle de vazão

na qual a repetição do processo de compressão e aquecimento contribui para a melhor homogeneização do material até que enfim esteja pronto para ser direcionado à entrada do cabeçote da extrusora. [12, 13].

2.4. FILAMENTOS

A manufatura dos filamentos é dada a partir de pellets, pequenas esferas do material desejado, como PLA ou ABS, que são alimentadas à uma extrusora que às aquece e comprime de maneira a tornar os diversos pellets em uma massa única que é extrudada através do bico da extrusora conferindo ao material o formato necessário para ser recebida posteriormente pela máquina de manufatura aditiva.

Essenciais para o processo de manufatura aditiva por FDM, os filamentos são comercializados prontos ou fabricados proprietariamente na forma de finos cilindros contínuos mais comumente de 1,75 mm a 3,00 mm de diâmetro e armazenados em carreteis para posteriormente serem acoplados à impressora 3D e usados como material na manufatura. Valores mais próximos a 1,75 mm são preferíveis pois filamentos grossos demais podem entupir o bico de impressão da máquina de manufatura aditiva. [7].

Apesar de serem comercializados prontos, a produção de filamentos para uso próprio barateia o custo de projetos e vem se tornando cada vez mais popular com o surgimento de extrusoras menores, podendo ser alocadas em bancadas de laboratório ou até mesmo em residências. [7].

2.4.1. Garantia da Qualidade

Os momentos imediatamente posteriores a extrusão, ou seja, conforme ocorre a saída do filamento, agora pronto, da matriz são essenciais para a garantia da qualidade do material extrudado. Diferentes tipos de falhas podem ocorrer durante o processo de extrusão e para que os parâmetros do filamento possam ser ajustados e mantidos num patamar aceitável é necessário realizar procedimentos de pós-fabricação nos filamentos. [27].

2.4.1.1. Temperatura

Sendo necessário atingir uma temperatura próxima à temperatura de fusão do material para que o processo de extrusão ocorra adequadamente, no momento após a extrusão o filamento ainda está numa temperatura elevada, ainda não se apresentando em um estado perfeitamente sólido. Essa reminiscência de partes ainda fundidas de material ao longo do filamento pode levar ao rompimento, deixando o fio de filamento descontínuo, ou até mesmo deformá-lo caso toque em algum objeto ou superfície antes de ser devidamente resfriado.

É por este motivo que se faz determinante na qualidade do filamento a presença de um método de resfriamento que garanta a solidificação e abrandamento da temperatura para a temperatura ambiente antes que o filamento seja depositado ou armazenado.

2.4.1.2. Constância de Diâmetro

Falhas no processo de extrusão também podem levar a irregularidades na constância do diâmetro, deixando partes pontuais ou seções inteiras do filamento com uma diferença milimétrica significativa de diâmetro. As máquinas de manufatura aditiva por FDM são calibradas para medidas específicas de diâmetro de filamento dependendo do bico e sistema interior da máquina, alimentá-la com filamentos maiores que o bico pode levar a um entupimento, assim como, alimentar com filamentos menores pode impedir o transporte do filamento no interior da máquina ou levar a um rompimento.

A mudança do diâmetro desejado também pode ocorrer em conjunto e por consequência da falta de resfriamento já que, se extrudado com uma parte significativa de sua interidade ainda fundida, a força da gravidade ou o contato com qualquer outro material podem ser suficientes para mudar a forma do filamento.

2.4.1.3. Armazenamento

A maneira como o filamento é transportado e armazenado imediatamente após a extrusão é outro fator determinante para a garantia da qualidade. [27]. Se o filamento

for deixado sem uma guia para transportá-lo ele irá se acumular na área a frente da matriz da extrusora entrando em contato consigo mesmo e podendo se fundir com diferentes seções de si ou até mesmo se embolar ao se amontoar. Por isso é imprescindível que a bobinadora guie e bobine este filamento até um carretel de forma adequada.

Ser movido e armazenado até o carretel com o uso de uma ferramenta imprópria ou com as mãos podem deixar sujeiras e impurezas na superfície do filamento que podem levar a entupimentos e problemas nas peças geradas por esse filamento na impressão.

2.4.2. Efeitos Viscoelásticos

A viscoelasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais que se comportam de maneira viscosa ao sofrer deformação. Tais materiais resistem ao fluxo de cisalhamento e a deformação de maneira linear quando são submetidos à deformação. [23].

Comparativamente a outros materiais como as cerâmicas e os metais, os materiais poliméricos termoplásticos têm baixa resistência a fratura podendo vir a romper tanto frágil como ductilmente. [13]. Alguns exemplos de efeitos que podem levar a esse tipo de falhas na extrusão dos filamentos são o Inchamento e a Relaxação.

2.4.2.1. Inchamento

O inchamento é caracterizado por provocar o aumento do diâmetro do filamento extrudado em relação ao diâmetro definido pela matriz de extrusão como pode ser observado na Figura 15. Ao sair da matriz, a massa polimérica fundida passa por um movimento chamado de browniano que leva ao emaranhamento comum e emaranhamento por nó que por sua vez produzem um encolhimento longitudinal e uma expansão lateral do filamento. Esta falha ocorre quando há um desequilíbrio entre a taxa em que a deformação ocorre dentro da matriz e o fluxo com o qual o material é extrudado. [14].



Figura 15 – Filamento que sofreu inchamento. [14].

A falha que leva ao emaranhamento comum tem origem interna ao sistema de extrusão, o desequilíbrio da taxa de deformação ocorre no interior da extrusora e pode ser causado por restos de material polimérico endurecido de extrusões anteriores. Esta parte do material apresentará uma resistência maior a força de extrusão do que as demais partes do filamento, podendo entupir, enquanto não aquecido o suficiente para atingir a fusão, a matriz da extrusora. O emaranhamento comum pode ser evitado através da manutenção adequada da extrusora, mantendo seu interior limpo de sobras de material após cada extrusão e realizando um processo de pré-aquecimento antes de iniciar o processo para que qualquer vestígio de material polimérico ainda presente em seu interior atinja o seu ponto de fusão para não resistir a extrusão. [28].

Forças aplicadas em excesso sobre o filamento que alterem a constância do fluxo, em especial forças de sentido contrário ao fluxo, como por exemplo, aquelas geradas por outras seções do mesmo filamento que já foram extrudadas, mas que, ao encontrar alguma resistência, tem seu movimento impedido e transferem essa redução do fluxo à saída da matriz impedindo o aumento longitudinal do filamento vão levar ao aumento do diâmetro.

Este tipo de desequilíbrio por ação externa a extrusora é o que leva a falha de emaranhamento por nó. [28]. Uma bobinadora para auxiliar na extrusão, entretanto pode ajudar a manter este fluxo constante reduzindo o risco de falha.

2.4.2.2. Relaxação

Outra categoria de falha são as falhas por relaxação. A relaxação pode ocorrer naturalmente em materiais poliméricos termoplásticos ao longo de anos levando ao surgimento de trincas por mudança da viscosidade. Para que essa falha ocorra em um período de tempo curto após a extrusão, a temperatura de saída da matriz precisa ser próxima da temperatura de fusão do material fazendo com que o material não se mantenha plenamente sólido. [13]. Filamentos que sofreram este tipo de relaxação estão representados na Figura 16.



Figura 16 – Filamento que sofreu relaxação. [13].

É possível observar através de ensaios dinâmicos esta influência direta da temperatura sobre o tempo de relaxação. Tempos de relaxação pequenos estão associados a viscosidades mais baixas e tempos maiores ocorrem devido a viscosidades e módulos elásticos ou de cisalhamentos maiores. [29].

Visto isso, uma calibragem correta da temperatura de extrusão e um imediato resfriamento controlado pós-extrusão são ideias para evitar falhas.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

Foi realizada uma síntese de todas as soluções viáveis para cada etapa do processo como, por exemplo, as possibilidades de realizar o resfriamento por água ou ar e, posteriormente, cada uma destas variações foi avaliada mantendo sempre em mente as especificações do projeto e principalmente o objetivo de atingir um custo baixo sem que haja perda de funcionalidades ou qualidade do projeto. Após selecionados os tipos de elementos que iriam compor o maquinário foram realizados cálculos e análises das peças disponíveis no mercado para avaliar quais marcas e modelos melhor atenderiam as necessidades do projeto. Por fim, foi realizado um esboço do projeto no software SolidWorks 2017 para que pudesse ilustrar o conjunto montado.

3.2. LIMITAÇÕES

Dado o objetivo de compatibilidade com o laboratório do CEFET foi determinada a necessidade de manter um padrão de filamento de $1,75 \pm 0,2$ mm de diâmetro como na Figura 17, tal limitação se origina da faixa aceitável de diâmetro de filamento da impressora 3D disponível no laboratório LADES do CEFET/RJ de tal forma que defeitos como comentados no item 2.4 possam ser evitados. Já a ocupação máxima de 1x1x2 m foi definida pensando na utilização do projeto por um laboratório com espaço limitado que precisará em uma mesma bancada comportar a extrusora e a bobinadora alinhadamente. Ainda, foi definida a necessidade de compatibilidade de velocidade de extrusão de 2,2 m/min de forma a atender os parâmetros de extrusão da extrusora FILMAQ3D também disponível do laboratório.

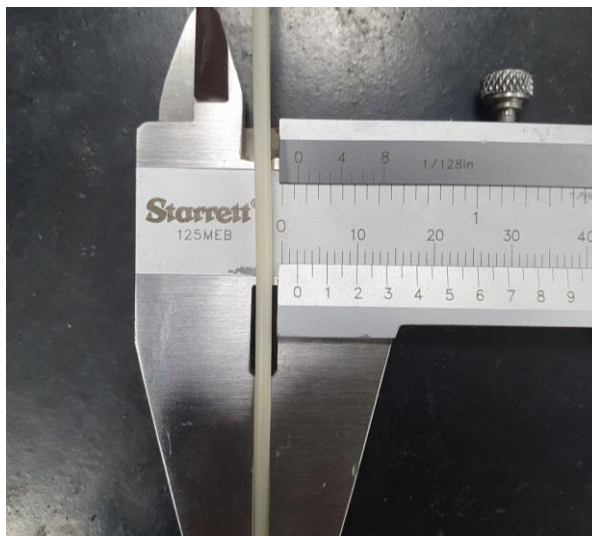


Figura 17 – Filamento de diâmetro ideal.

3.2.1 Premissas de Projeto

Foram definidas ainda premissas de forma a melhor elucidar a aplicação idealizada pelo projeto assim como as condições consideradas para os dimensionamentos. Nesse sentido, o projeto foi idealizado para uso em um laboratório estéril, sem a influência de um ar salino corrosivo ou a presença de insetos, em temperatura ambiente de aproximadamente 24°C, sem exposição a umidade e a nível do mar sob pressão atmosférica de 1atm.

3.3. RESFRIAMENTO

3.3.1. Estado da Técnica

O estado da técnica demonstra uma divisão entre dois tipos principais de métodos de resfriamento quando se referindo ao processo de pós-extrusão de segmentos de filamento sendo estes o resfriamento por correntes de ar e o resfriamento por submersão em água. Dadas as restrições do projeto definidas, entretanto, o método de submersão líquida não extrapola o espaço de bancada necessário encontrado para a implementação de um sistema efetivo deste tipo.

3.3.1.1. Resfriamento por Imersão

O método de resfriamento de filamento através de imersão em fluido refrigerante, como a água, por exemplo, promove a troca de calor entre o filamento aquecido pós extrusão e o líquido em temperatura menor. Este método, entretanto, requer manutenção periódica com a substituição do fluido, além de requisitar um percurso longitudinal longo para que o filamento obtenha uma redução significativa de temperatura. Uma demonstração deste método pode ser vista na Figura 18.



Figura 18 – Filamento sendo resfriado em água. [36].

3.3.1.2. Resfriamento por Ventilação

A seleção de um sistema de resfriamento a ar promove, além de seu espaço ocupado reduzido, menor frequência de manutenção, fácil instalação, menor custo relativo ao resfriamento por líquidos, menor reatividade com tipos específicos de compostos poliméricos e principalmente maior eficiência de resfriamento.

3.3.2. Cálculos Comparativos

De maneira a avaliar quantitativamente a efetividade de cada um dos métodos, foram realizados cálculos aplicando as condições de uso esperadas do equipamento de maneira a tentar determinar, em especial, a temperatura final do filamento após o resfriamento.

Mesmo com o uso do modelo de submersão em água para resfriamento no mercado sendo escasso e todas as referências de uso encontradas na pesquisa possuindo uma área de ocupação maior do que a máxima definida nas limitações deste projeto, foi avaliada a possibilidade de utilização desta metodologia uma vez que o esperado seria a apresentação de maior eficiência com o uso deste. Entretanto, uma vez que já era esperada uma longa extensão de área de submersão, os cálculos para a aplicação deste método foram modelados para segmentos de 30 centímetros, de tal forma que, considerando todo o espaço necessário para as outras etapas do processo e equipamentos auxiliares, foi determinado um máximo de 2 segmentos de 30 centímetros em forma de “L” para que este método pudesse ser viável às limitações de espaço de bancada. Deste modo, foi necessário utilizar modelagens diferentes de dimensionamento para a comparação entre os métodos de submersão e ventilação, a submersão sendo modelada como por segmentos descontínuos e a ventilação como com uma aleta infinita.

3.3.2.1. Aplicando Submersão em Água

Inicialmente foi calculada a quantidade de calor (Q) correspondente ao resfriamento da temperatura média inicial (T_{ini}) para o filamento, definida como 410K, sendo esta a temperatura média de extrusão do ABS que caracteriza o caso mais extremo de aplicação, e para a temperatura ambiente (T_{amb}) 300K, com um calor específico de 1420 J/Kg.K (c) e um valor de condutividade térmica para o filamento de 0,20 W/mK (k), todos considerando os parâmetros de um filamento de ABS para submersão em água.

Para determinação do volume a ser resfriado, foi levada em consideração as limitações de diâmetro e espaço ocupado previstas no projeto como comentado anteriormente. O tamanho máximo viável para a bacia de resfriamento em uma única direção foi modelado como 30cm de maneira a respeitar a área de superfície máxima do projeto, permitindo a multiplicação de seções caso posteriormente necessário. Utilizando a densidade de um filamento de ABS sólido como 1,05 g/cm³, obtemos a quantidade de calor para o resfriamento de segmentos de 30cm de filamentos através da equação 1.

$$Q = m \cdot c \cdot (T_{amb} - T_{ini}) \quad (\text{Equação 1})$$

Uma vez conhecida a quantidade de calor é possível encontrar o tempo total para que este segmento realize a troca de calor até a temperatura ambiente. Assim, como a velocidade de extrusão é um parâmetro pré-definido nas limitações do projeto podemos determinar, comparando a velocidade obtida com a velocidade de extrusão, quão longa precisaria ser a bacia de resfriamento para atingir a temperatura ambiente. Foi possível assim, determinar a necessidade de, pelo menos, 3 segmentos de 30cm contínuos de bacia de submersão. A aplicação determinante para o modelo selecionado pode ser observada no código em linguagem Python apresentado no Apêndice A deste trabalho.

3.3.2.2. Aplicando Correntes de Ar

Para determinar a quantidade de ventoinhas necessárias e suas especificações o sistema do filamento recém extrudado foi modelado como uma aleta infinita cilíndrica onde a base corresponde ao bico injetor, que manterá sua temperatura. O cilindro corresponde ao filete que perde sua temperatura ao longo do comprimento.

A partir do valor de pés cúbicos por minuto (CFM) da ventoinha, é calculada a velocidade do ar (V) que por sua vez permite a obtenção do coeficiente convectivo (h). Então a partir da condutividade térmica (k), da área da aleta cilíndrica (A) e do perímetro (P) aplicamos no modelo de aleta infinita cilíndrica conforme a equação 2 e ilustrado na Figura 19.

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A}} \quad (\text{Equação 2})$$

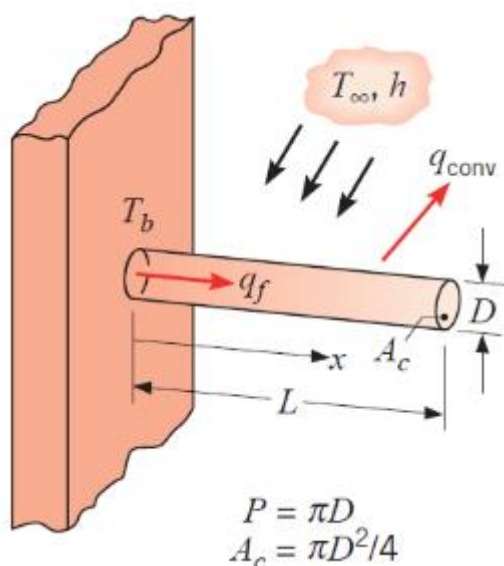


Figura 19 – Modelagem para troca de calor de uma aleta cilíndrica infinita. [5].

Diferentes valores de coeficientes convectivos foram testados para modelos de ventoinhas disponíveis no mercado e ao considerar uma temperatura ambiente (T_{amb}) de 300 K (26,85°C) e uma temperatura média inicial (T_{ini}) para o filamento recém extrudado de 410 K foi possível determinar o modelo que atenderia às necessidades de projeto oferecendo o menor custo.

Dentro do modelo aplicado, a temperatura final (T_x) alcança aproximadamente 302,54 K (29,40°C), que é próxima a temperatura ambiente e um valor aceitável dentro das premissas do projeto.

No gráfico da Figura 20 é demonstrada a comparação feita para ventoinhas de 3,8 CFM, 4,2 CFM e 4,8 CFM. Foi estudado a partir da distância calculada necessária para o resfriamento em comparação com o tamanho individual de cada ventoinha a quantidade de ventoinhas de um determinado valor de CFM que seriam necessárias assim como a diferença de custos entre se utilizar uma maior quantidade de ventoinhas de menor eficiência em contraste a utilizar ventoinhas mais caras e eficientes em menor quantidade. Conclui-se a partir dos dados coletados que o aumento de CFM, apesar de benéfico por diminuir a distância total necessária a ser percorrida pelo filamento para que este perca calor até ser pareado com a temperatura ambiente, não é significativo o suficiente para justificar a grande diferença em custo destes modelos. Outrossim, os modelos de CFM mais baixo requisitariam o aumento

do número de ventoinhas que, por sua vez também aumentariam o custo de produção da máquina. Sendo assim, entendeu-se que os modelos de ventoinha de 4,2 CFM são ideais para esta aplicação. A aplicação determinante para o modelo selecionado pode ser observada no código em linguagem Python apresentado no Apêndice B deste trabalho que permitiu a comparação, como comentado anteriormente, da influência do uso de ventoinhas de capacidades de resfriamento distintas dentro da modelagem proposta para a obtenção da quantidade de ventoinhas necessárias em cada caso a partir da distância de resfriamento definida pela velocidade de extrusão da extrusora e os custos totais do conjunto de ventoinhas em reais.

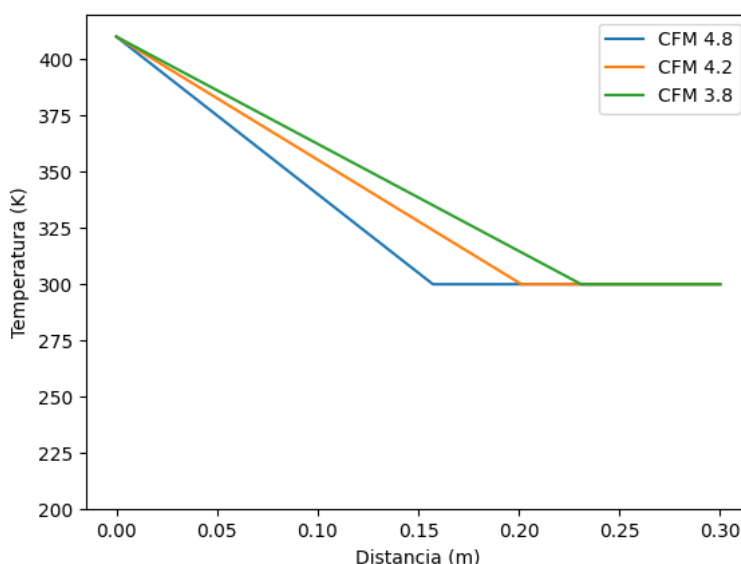


Figura 20 – Gráfico Comparativo entre diferentes CFMs de Ventoinhas

3.4. BOBINAMENTO

3.4.1. Especificações Necessárias

A seleção do motor se deu pela busca de um modelo que atendesse as especificações técnicas definidas, dando destaque para o controle de velocidade e com preferência para um encaixe universal.

3.4.2. Cálculos e Dimensionamento

O modelamento do bobinamento foi realizado levando em conta as dimensões dos carretéis comumente utilizados na venda de filamentos. Encontrada uma relação entre a velocidade da extrusora, junta a velocidade de bobinamento e a velocidade adequada para a distribuição do filamento da bobina.

3.5. ESTRUTURA

3.5.1. Material

Para a escolha do material, foi estabelecido que o material deveria ser de baixo custo, de boa usinabilidade e leve. O material que cumpriu todos os requisitos foi a madeira, sendo esse o material selecionado para formar a base e paredes do projeto.

3.5.2. Cálculos de Dimensionamento

O método utilizado nas paredes e na fixação do motor foi o fluxo de cisalhamento para saber a força exercida sobre os parafusos como pode ser visto na equação 3.

$$q = \frac{VQ}{I} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

- q o fluxo de cisalhamento;
- V a força de cisalhamento;
- I é o momento de inércia de toda a área da seção transversal calculada em torno do eixo neutro;
- Q é $y'A'$, onde y' é a distância do eixo neutro ao centroide da área A' , esta, é a área da seção transversal do segmento acoplado.

Os três principais casos estabelecidos como necessários para o cálculo do dimensionamento foram a parede maior, pensada para o suporte das peças e do carretel, a parede menor, pensada para o apoio apenas da ponta oposta do carretel e, por fim do motor utilizado para o bobinamento do carretel. Ditos cálculos serão explicitados no capítulo de Resultados.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. RESFRIAMENTO

4.1.1. Justificativa da Seleção do Mecanismo

O método de submersão em água foi descartado por requerer uma velocidade de bobinamento muito menor do que a estabelecida ou uma área muito longa para atingir a temperatura ambiente. O modelo de ventoinha para o método de correntes de ar selecionado foi o Micro Ventilador Fan Cooler 12v Dc. Quatro destes que deverão ser colocados em fileira, de acordo com o cálculo de dimensionamento para que haja garantia de que a temperatura será reduzida da média estipulada para a temperatura de extrusão até uma temperatura próxima da temperatura ambiente.

4.2. BOBINAMENTO

Para o dimensionamento do motor de passo foram estimados em milímetros a largura da bobina, assim como seu diâmetro, além do diâmetro do filamento e respeitando a velocidade de extrusão determinada pelo escopo do projeto no item 3.2. Desta maneira foi possível estimar a quantidade de rotações por minuto necessárias para atender o projeto, o código em Python utilizado para este cálculo pode ser encontrado no Apêndice C deste trabalho. Mais especificamente, foram considerados os maiores tamanhos comerciais de bobina e filamento para oferecer ao projeto a capacidade de adaptação para uso também com outras extrusoras. Tais valores podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de Bobinamento

Dados	Valor	Unidade
Largura da Bobina	60	mm
Diâmetro da Bobina	75	mm
Diâmetro do Filamento	1,75	mm
Velocidade de Extrusão	2200	mm/m

Uma vez determinados os valores ideais para o dimensionamento, foi determinada a quantidade de milímetros de filamentos bobinado a cada rotação. De tal forma o RPM necessário a ser entregue pelo motor pode ser obtido a partir da divisão da velocidade de extrusão da extrusora pelos milímetros de filamento bobinados por rotação.

4.2.1. Modelo Selecionado

O modelo selecionado foi o Motor de Passo Nema 23 por atender as especificações de entrada e possuir o preço mais acessível encontrado durante a pesquisa. Este modelo apresenta um custo de R\$ 180,00 pela pesquisa realizada em 2022 e oferece uma faixa de RPM que não apenas compreende o requisitado pelo projeto como o atual, mas também pode oferecer a possibilidade de atuar com outras extrusoras com velocidade de extrusão maior. As medidas fornecidas pelo fabricante, também consideradas na escolha dadas as limitações de projeto, podem ser observadas na Figura 21.

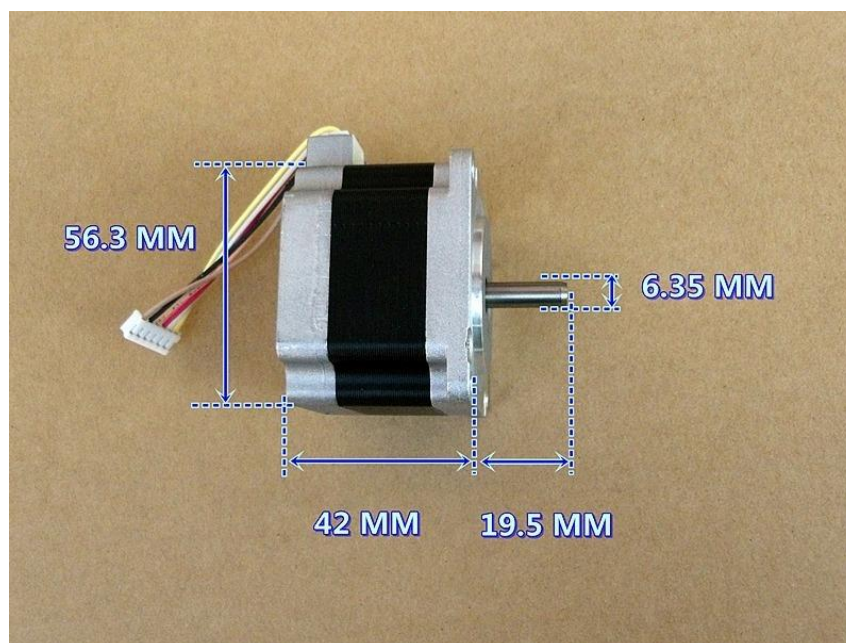


Figura 21 – Dimensões do Motor de Passo Nema 23. [30]

4.3. ESTRUTURA

Primeiramente foram definidos os requisitos espaciais para a que a estrutura pudesse alocar ordenadamente as peças propostas. Nesse sentido a estrutura precisaria comportar ao longo de seu comprimento as ventoinhas dimensionadas, o conjunto de bobinamento, o sensor, a guia e a bobina. Utilizando valores disponíveis nas especificações técnicas das peças foi possível organizar com o devido espaçamento necessário o encaixe para as mesmas. Para as paredes pensadas para compor a estrutura foi idealizada uma altura que permitisse o uso de um carretel de uso comercial padrão com o comprimento das paredes por sua vez idealizado para permitir um acesso mais fácil à bobina e organizando as peças elétricas do projeto em uma área separada. Todos os valores das medidas da estrutura podem ser consultados nos desenhos apresentados nas páginas finais deste trabalho. Sabidas agora as medidas ideais de comprimento, altura e espessura das paredes foi determinada a necessidade de avaliar os casos em que a estrutura precisaria ter os esforços gerados pelas peças analisados. Uma vez estabelecidos os casos necessários de análise, a avaliação do fluxo de cisalhamento se deu da seguinte forma:

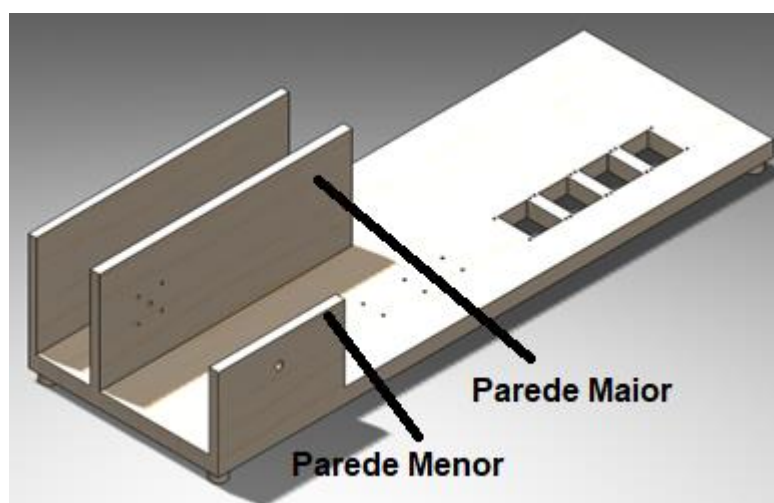


Figura 22 – Indicação das Paredes da Estrutura

- Caso 1: Parede Maior
- Caso 2: Parede Menor
- Caso 3: Motor

A parede maior é aquela que dará suporte a maior quantidade de esforços na estrutura uma vez que a parede posterior, de mesmas medidas da parede maior, serve apenas ao propósito de segregar e conter as partes elétricas e eletrônicas do projeto não tendo nenhuma peça fixada em si. Na parede maior são fixados o motor de passo Nema 23 através do uso dos parafusos e porcas que o acompanham além de suportar o peso do conjunto simétrico apoiado entre a parede maior e a parede menor sendo

estes a haste e a bobina. Os cálculos foram realizados para o caso de peso máximo da bobina, quando esta está no final do bobinamento com sua capacidade de carga de filamento de 1kg atendida. Assim, temos pelas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante uma massa de 700g para o motor, uma massa de 120,98g para a haste de 8mm de diâmetro e 22,55cm de comprimento pré-cortada selecionada do catálogo da fornecedora ZYLtech e uma massa de 1,378kg para a bobina preenchida onde 1kg são do filamento que a preenche e 378g são da própria bobina.

• Caso 1

A força de cisalhamento (V) pode ser calculada através da soma da massa suportada pela parede multiplicada pela aceleração da gravidade, o momento de inércia (I) de toda a área da seção transversal pode ser calculado em com os valores das medidas espaciais idealizadas para a estrutura nos desenhos ao final deste trabalho, a distância do eixo neutro (y') ao centroide da área da seção transversal (A') é utilizado conforme a Equação 3 de forma a obtermos:

$$V = 14,72 \text{ N}$$

$$I = 5,67 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$Q = y'A' = (6,44) \cdot (1,80 \cdot 20) = 231,84 \text{ cm}^3$$

Temos pela equação 4:

$$q = \frac{VQ}{I} = \frac{14,72 \cdot 231,84}{5,67 \cdot 10^3} \quad (\text{Equação 4})$$

$$q = 0,61 \text{ N/cm}$$

Para achar a força de cisalhamento suportada (F) a partir do fluxo de cisalhamento (q) foi utilizada a equação 5 com o espaçamento (s) de 12,5 cm:

$$q = \frac{F}{s}; \text{ onde } s = 12,5 \text{ cm} \quad (\text{Equação 5})$$

$$F = qs = 0,61 \cdot 12,5$$

$$F = 7,63 \text{ N}$$

Foi aplicado um fator de segurança de 1,5 para todo o cálculo estrutural. Tal valor foi escolhido uma vez que não é uma estrutura capaz de colocar pessoas em risco e não ter operador. De acordo com Robert L. Norton em *Design of Machinery* um fator de segurança de 1,5 é suficiente para cobrir os problemas possíveis a este caso

como, por exemplo, um defeito interno da madeira ou o a escolha errada de parafusos com maior segurança. Sendo assim, tem que F_s será de 11,44 N no caso 1.

• Caso 2

Valendo dos mesmos princípios utilizamos no caso 1 sabemos também que:

$$V = 9,81 \text{ N}$$

$$I = 3,9 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$Q = y'A' = (3,94).(1,80 \cdot 15) = 106,38 \text{ cm}^3$$

Obtemos através da aplicação da equação 4:

$$q = \frac{VQ}{I} = \frac{9,81 \cdot 106,38}{3,9 \cdot 10^3}$$

$$q = 0,28 \text{ N/cm}$$

Achando "F" por "q" pela equação 5:

$$q = \frac{F}{s}; \text{ onde } s = 8,33 \text{ cm}$$

$$F = qs = 0,28 \cdot 8,33$$

$$F = 2,33 \text{ N}$$

Aplicado o fator de segurança, se tem F_s de 3,5 N no caso 2.

• Caso 3

Outrossim, pode ser definido para o caso 3 que:

$$V = 6,87 \text{ N}$$

$$I = 2,0 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$Q = y'A' = (64,4).(90 \cdot 50) = 289,8 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Temos pela equação 4:

$$q = \frac{VQ}{I} = \frac{6,87 \cdot 289,8 \cdot 10^3}{2,0 \cdot 10^6}$$

$$Q = 1,0 \text{ N/mm}$$

Resolvendo “F” por “q” através da equação 5:

$$q = \frac{2F}{s}; \text{ onde } s = 47 \text{ mm}$$

$$F = \frac{qs}{2} = \frac{1,0 \cdot 47}{2}$$

$$F = 23,5 \text{ N}$$

Com o fator de segurança aplicado, se chega em Fs igual a 35,25 N.

Por conseguinte, para a haste onde ficará o carretel, foi utilizado o método de cálculo de tensão de cisalhamento média, de modo a simplificar os cálculos e tendo em vista que os esforços seriam desprezíveis de acordo com o apresentado por Robert L. Norton no livro *Design of Machinery*.

Da mesma forma que os cálculos anteriores, foi aplicado um fator de segurança de 1,5. Logo, aplicando a equação 6:

$$\tau_{avg} = \frac{V}{A} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

$$V = 14,715 \text{ N}$$

$$A = 176,71 \text{ mm}$$

Desta forma:

$$\tau_{avg} = \frac{V}{A} = \frac{14,715}{176,71}$$

$$\tau_{avg} = 0,08 \text{ MPa}$$

Após aplicar o fator de segurança, se tem que a tensão cisalhante é de 0,12 Mpa. Uma esquematização da base dimensionada pode ser vista na Figura 22.

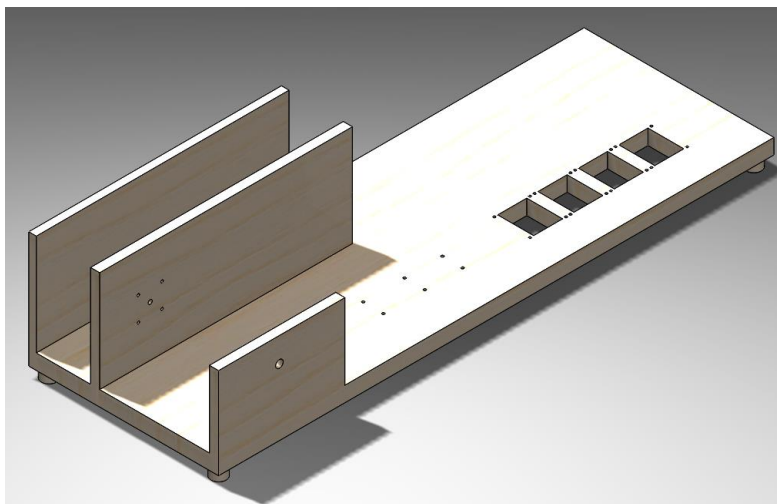


Figura 23 – Base montada com furos sinalizados para haste e fixação do motor.

4.4. ELÉTRICA

4.4.1. Consumo Elétrico

Para determinar o consumo elétrico total da bobinadora e dimensionar uma fonte adequada, foram coletados os dados de tensão, corrente e potência das peças que irão compor o conjunto a partir das especificações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes. Os valores podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo Elétrico. [15, 16, 30].

Componentes	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência(W)
Ventoinhas	12	0,4	4,8
MicroServo	6	0,1	0,6
Driver	12	1,5	18
Motor de Passo	3	2,8	8,4
Arduino	5	1	5
		Total	36,8

Uma vez avaliados os valores e calculada a potência total, pôde, ser dimensionada ao projeto uma fonte de 12V e corrente de 3A com corrente contínua. Não foram encontradas diferenças significativas entre marcas que atendem estas especificações podendo, portanto, ser selecionada a de menor custo disponível. Uma

fonte com estas especificações, entretanto, tem em média 10cm de comprimento podendo atrapalhar o processo de bobinamento dependendo de sua posição. Visto isso, de maneira a melhor alocar a fonte na composição da bobinadora, foi determinado um espaço separado por uma parede na base da bobinadora para alocar a fonte, o Arduino, além de facilitar a organização dos fios.

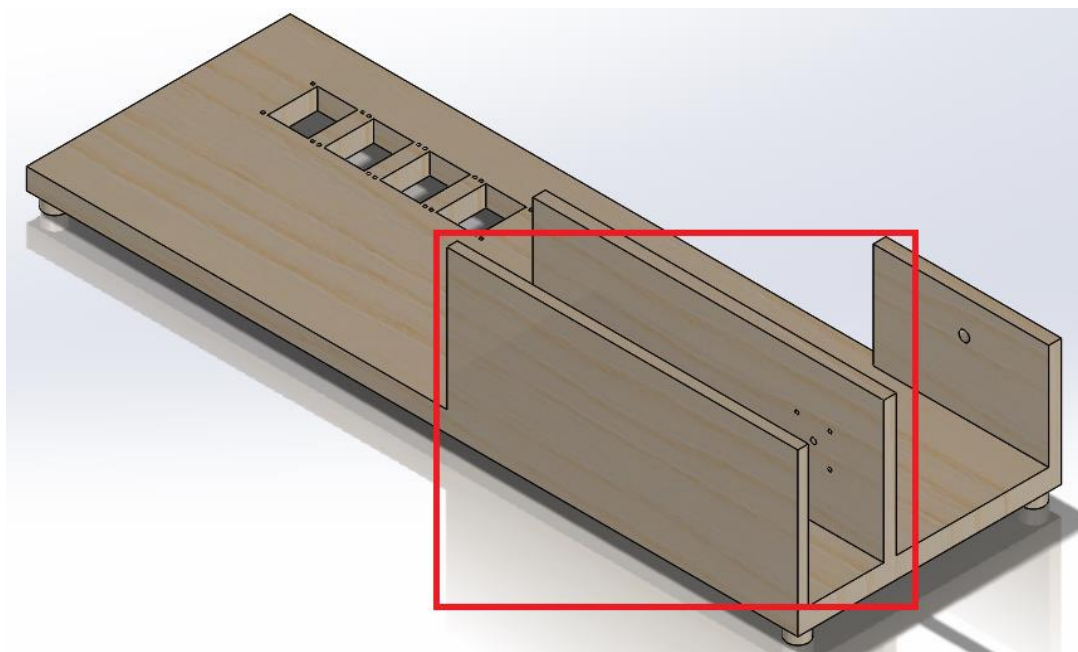


Figura 24 – Área dedicada a alocação das partes elétrica e eletrônica do projeto.

4.5. SENSOR

4.5.1. Monitor de Filamento Duet3D

Foi selecionado um sensor a laser (Figura 23) especializado na medição de filamentos para impressão 3D por possuir funções focadas neste tipo de operação, por sua precisão e por seu preço inferior a medidores como, por exemplo, do tipo magnético.

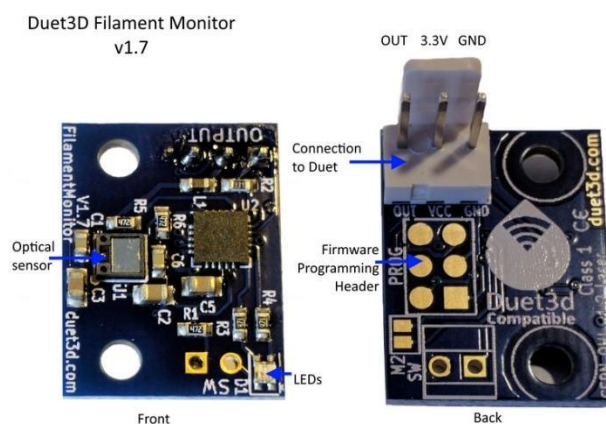


Figura 25 – Exterior e interior do sensor e suas peças. [15]

O funcionamento do sensor se dá de maneira que o movimento do filamento através do monitor de filamento é detectado pelo sensor óptico a laser que, por sua vez, envia a medição para o microcontrolador que lê o diâmetro e a direção do movimento e envia periodicamente a os dados medidos para o firmware associado. A maneira que o filamento interage com o sensor pode ser visto na Figura 24.

No firmware de formato de código aberto (*open-source*), ou seja, livre para uso, é possível configurar os parâmetros E e R, respectivamente o diâmetro esperado e a tolerância admissível. O sistema permite a seleção de medidas para quando for detectado que o diâmetro atual diverge da faixa de tolerância permitida, tanto para cima quanto para baixo, podendo apenas dar um aviso de visual ou sonoro a até mesmo interromper o processo.



Figura 26 – Filamento atravessando o sensor durante medição. [15]

4.5.2. Limitações do Sensor

O fabricante alerta que o sensor foi testado para diferentes materiais e cores de filamentos apresentando alta precisão para os principais tipos de filamento utilizados no mercado. Entretanto para filamentos de diâmetro próximo a 1mm de cores mais claras é necessário ajustar o valor de disparo do sensor. Ainda é importante notar que o sensor não é recomendado para filamentos do tipo PETG e ESUN de cor transparente pois apresenta grande imprecisão devido à baixa reflexão de luz destes materiais.

4.6. GUIA

4.6.1. Servo Mecânico Tower Pro SG90

Para que o filamento fique igualmente distribuído pela superfície da bobina, foi selecionado o Servo Mecânico da marca Tower Pro modelo SG90. Ficando alinhado como posição inicial com o centro da bobina, o servo mecânico permite encaixe com acessórios como, por exemplo, uma paleta com furo que permita a passagem do filamento por seu interior. Com o ajuste do acessório é possível controlar a altura na qual o filamento será distribuído.

Podendo realizar rotações ajustáveis de até 180 graus para ambos os lados com um toque máximo de 2,5 (kg-cm) o servo atende as necessidades do projeto como guia podendo orientar o filamento da maneira que for desejada. Neste sentido, foi considerado para o dimensionamento o caso mais extremo de requisição de torque com filamentos densos de ABS e do maior diâmetro comercial disponível e, ainda assim, o peso total de filamento se mantém desprezível perante a capacidade máxima da guia de 2,5 kg-cm

A seleção pelo modelo SG90 da marca Tower Pro se deu pelo grande reconhecimento de seu nome no mercado, sendo uma das marcas mais bem avaliadas na pesquisa, mas especialmente por seu preço mais acessível que seus concorrentes ou até outros modelos da mesma marca. As demais especificações podem ser observadas na Figura 25.

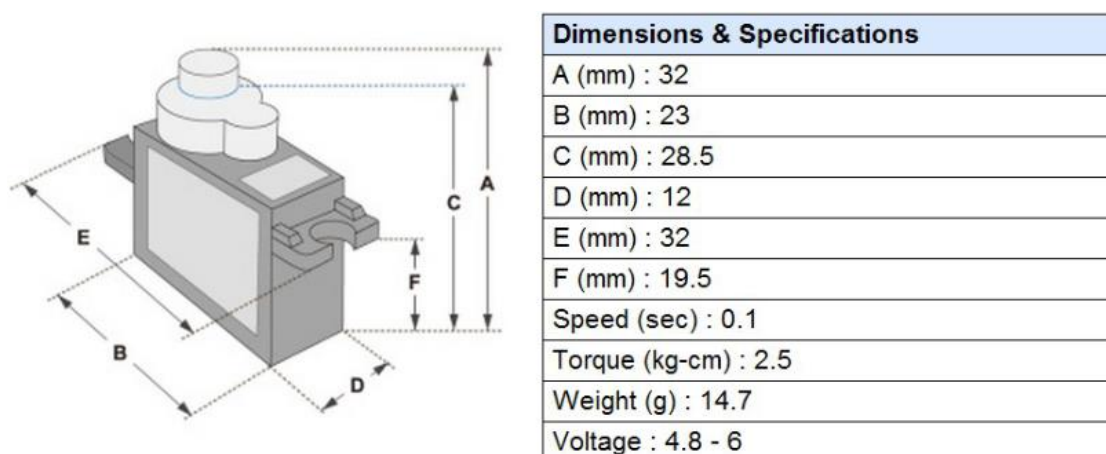


Figura 27 - Dimensões e especificações do servo mecânico a ser utilizado. [16].

4.7. ESQUEMATIZAÇÃO DA MONTAGEM

Uma vez obtidos todos os dimensionamentos, foi possível ilustrar a composição da montagem dos elementos que compõe a bobinadora como pode ser visto na Figura 26. Sendo assim, o caminho percorrido pelo filamento compreendendo, inicialmente o resfriamento sobre a extensão das 4 ventoinhas dimensionadas, posteriormente tracionado para atravessar o interior do sensor óptico informando a adequação do diâmetro e seguindo para a guia que distribui igualmente o filamento para ser armazenado no carretel.

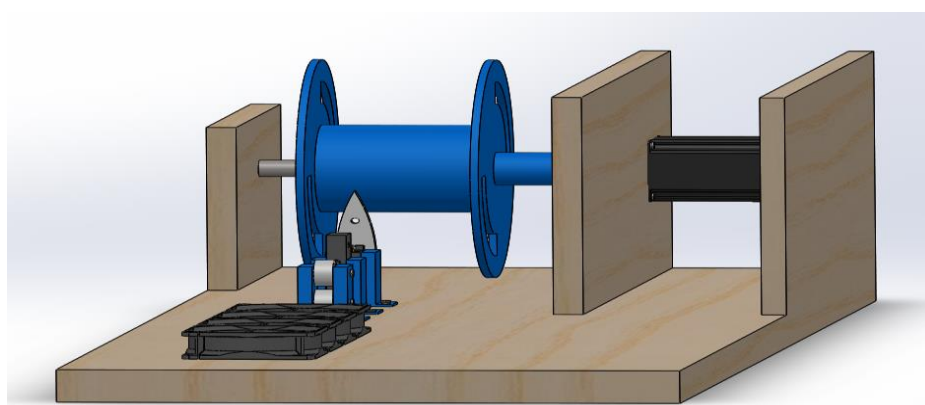


Figura 28 – Representação da bobinadora de filamentos proposta.

A esquematização foi desenhada através do software SolidWorks 2017 e em sua vista frontal, demonstrada na Figura 26, pode ser observada na divisão de paredes direita o espaço intencionado para o motor de passo, Arduino e fonte.

4.8. CUSTO ESTIMADO

Os valores das peças dimensionadas podem ser observados na Tabela 3. Foi realizada uma pesquisa de preços tanto em sites nacionais brasileiros especializados, como em vendedores de varejo e lojas internacionais. Mesmo as peças as quais foram determinadas como mais vantajosas de serem compradas no exterior tem seu custo expressado em real, o custo total calculado para os dimensionamentos deste projeto pode ser observado abaixo.

Tabela 3 - Custo final estimado do projeto

Componentes	Função	Preço estimado em Reais*
Coolers de Resfriamento x4	Pequenos ventiladores responsáveis por diminuir a temperatura do filamento	R\$ 40,00
Motor de Passo NEMA 23	Motor utilizado para bobinar o carretel tracionando o filamento	R\$ 180,00
Tabuas de Madeira	Montagem de suporte do sistema	R\$ 15,00
Fonte de Energia	Fonte para alimentar todo o sistema	R\$ 18,00
Sensor Duet3D	Sensor óptico para monitorar o diâmetro do filamento	R\$ 112,00
Servo Motor TP SG90	Motor utilizado para guiar o filamento e o distribuir igualmente	R\$ 20,00
Arduino	Placa responsável pelas configurações do motor de passo, servo motor, sensor óptico e ventoinhas	R\$ 60,00
Puxador	Conjunto de rolamentos plásticos de diferentes diâmetros para ajuste de diâmetro do filamento	R\$ 10,00
Elementos de Fixação	Cerca de 26 parafusos, 8 porcas e uma haste para fixar os componentes à base	R\$ 5,00
Elementos de Apoio	Peças impressas sob medida por MA para dar a posição e altura desejada para os componentes e transmitir o torque do motor	R\$ 30,00
-	Total:	R\$ 490,00

*Valores estimados no ano de 2022 nas lojas digitais de fabricantes e revendedores.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto da bobinadora para auxílio na extrusão de filamentos teve como objetivo definido em seu escopo desenvolver uma máquina com a capacidade resfriar, transportar e medir filamentos poliméricos de maneira a tornar menos custoso o processo de fabricação de peças 3D. Desta forma, o projeto do equipamento levou em conta a eficiência dos componentes com o foco na qualidade sem a elevação desnecessária do custo. Ainda, peças capazes de oferecer melhor compatibilidade com outras extrusoras foram dimensionadas quando sua oferta de performance e seu valor não destoavam das demais opções do mercado. O equipamento final proposto possui capacidades de garantia da qualidade compatíveis com os modelos disponíveis no mercado, porém com um custo total estimado de 8 a 12 vezes menor do que estes modelos. Os elementos propostos no projeto estão de acordo com os parâmetros de entrada definidos garantindo a compatibilidade com a extrusora FILMAQ3D conforme o solicitado, ainda assim, dada a possibilidade de ajuste de parâmetros dos componentes e mudanças simples em peças menores como os elementos de apoio, é possível adaptar a máquina com baixa diferença de custo para compatibilidade com outras extrusoras. Como considerações finais do projeto podemos concluir que o projeto de uma bobinadora de baixo custo para auxílio na extrusão de filamentos foi satisfatório, uma vez que oferece funções equivalentes às máquinas parte do estado da técnica, porém com valor significativamente reduzido.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, o projeto ainda deixa possibilidades de aprimoramentos futuros como a mudança na maneira como é feita a fixação do carretel e dos puxadores para que sua substituição seja mais prática e requeira menos trabalho. No mais, o projeto atingiu os objetivos e as necessidades definidas como parte de seu escopo e apresenta uma oportunidade promissora para tornar o processo de FDM mais acessível.

Bibliografia

[1] SANTOS, Matheus. Projeto de Máquina de Ensaio de Impacto por Queda de Peso para Materiais Plásticos e Compósitos. CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

[2] SPINACÉ, Marcia A.S, PAOLI, Marco. A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2005.

[3] Marlon W. M. Cunico (2015). Impressoras 3D: O novo meio Produtivo. Curitiba: Cocep3D Pesquisas Científicas Ltda.

[4] Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: challenges, trends and applications. *Advances in Mechanical Engineering*.

[5] SANTOS, M.M. Análise do efeito do material nas propriedades mecânicas de componentes poliméricos produzidos por manufatura aditiva. CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.

[6] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui. Additive manufacturing (3D printing): A review of material, methods, application and challenges. *Composites Part B* 143 (2018) 172-196.

[7] ANDRADE, D.C. Construção de equipamento de baixo custo para enrolar filamentos de impressoras 3D. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2020.

[5] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*, 3ed. McGraw-Hill: New York, 2004, pp. 7-14;

[6] CYCOLAC™ Resin MG94 – Ficha Técnica. Disponível em: <<https://omnexus.specialchem.com/product/t-sabic-cycolac-resin-mg94>>. Acesso em 12 de dezembro, 2022.

[7] GE, Building the Business Case: Identifying Criteria to Measure ROI for Additive Manufacturing. Disponível em: < <https://www.ge.com/additive/what-additive-manufacturing>>. Acesso em 12 de dezembro, 2022.

[8] Joel C. Najmon, Sajjad Raesi, Andres Tovar (2019). Additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry.

[9] Amy M. Peterson (2019). Review of acrylonitrile butadiene styrene in fused filament fabrication: A plastics engineering-focused perspective.

[10] GOMIDE, Ricardo. Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2000.

[11] Liu, Z., Wang, Y., Wu, B. et al. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. Int J Adv Manuf Technol 102, 2877–2889 (2019).

[12] PESSI, Fernando. Projeto de construção de uma mini extrusora de filamentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil, 2018.

[13] MANRICH, Silvio. Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

[14] BRETAS, Rosario E. S.; D'ÁVILA, Marcos A. Reologia de polímeros fundidos. São Carlos: Edufscar - Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2005.

[15] Manual de Instruções de uso Monitor de Filamento Duet3D <https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Duet3dFilamentMonitor_LaserVersion> Acesso em 21 de fevereiro de 2022.

[16] Ficha Técnica Servo Motor Tower Pro 90SG <http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf>. Acesso em 21 de fevereiro de 2022.

[17] F. G Orski, W. Kuczko, and R. Wichniarek, Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling technology, Adv. Sci. Technol. Res. J. 7, 27-35 (2013).

[18] Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. J Mater Process Technol 118(1–3):385–388.

[19] Catálogo de produtos da FILMAQ3D.

< <https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=product/category&path=17> >. Acesso em 15 de janeiro, 2022.

[20] Manual de Instruções de uso Filmaq 3D Ind. e Com.Ltda.

<

https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=information/information&information_id=7 >. Acesso em 15 de janeiro, 2022.

[21] Manual de Instruções de uso Resfriadora Filmaq 3D Ind. e Com.Ltda.

<

https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=information/information&information_id=7 >. Acesso em 15 de janeiro, 2022.

[22] Manual de Instruções de uso Enroladora Filmaq 3D Ind. e Com.Ltda.

<

https://www.filmaq3d.com.br/index.php?route=information/information&information_id=7 >. Acesso em 21 de fevereiro, 2022.

[23] CALLISTER, Willian D. Ciência e engenharia de materiais uma introdução, 5ª ed. Rio De Janeiro: LTC, 2002

[24] Rezende, Mirabel C. 2000. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. <<https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282000000200003>> Acesso em 4 de abril de 2022.

[25] BARBOSA, Ayeska M.P. 2017. Estudo da Degradação de Scaffolds de PLA com Estrutura Biomimética Produzidos Por Modelagem Por Fusão e Deposição.

[26] KABUCHI, Taís A.F. 2020. Manufatura aditiva em materiais metálicos, seus processos e aplicações – um ensaio teórico.

[27] Gabriel Pieter Greeff, Meinhard Schilling. 2017. Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion, Additive Manufacturing, Volume 14.

[28] Jacob J.Fallon, Steven H.McKnight, Michael J.Bortn. 2019. Highly loaded fiber filled polymers for material extrusion: A review of current understanding, Additive Manufacturing, Volume 30.

[29] PAGLIOSA, Thiago Antônio. PESSI, Fernando. 2018. Projeto e construção de uma mini extrusora de filamentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco.

[30] Dados Técnicos dos Motores Nema

< <https://www.nema.org/standards/view/small-electric-motors> >. Acesso em 21 de outubro, 2022.

[31] Imagem da impressora 3D.

< <https://www.thingiverse.com/groups/3drise>>. Acesso em 26 de outubro, 2022.

[32] Imagem dos Pellets.

< <https://bitfab.io>>. Acesso em 26 de outubro, 2022.

[33] Diagrama de Slicers.

< <https://fabheads.com> > services>. Acesso em 26 de outubro, 2022.

[34] Peça em PLA

< <https://www.3dsourced.com> >. Acesso em 26 de outubro, 2022.

[35] Peça em ABS

< <https://all3dp.com>>. Acesso em 26 de outubro, 2022.

[36] Submerção em Água.

< <https://rwgresearch.com/>>. Acesso em 26 de outubro, 2022.

Apêndice A

```
import numpy as np

k = 0.2 # Condutividade Térmica [W/m.K]
Tamb = 300 # Temperatura ambiente [K]
Tini = 410 # Temperatura inicial [K]
x = 0.3 # Comprimento de uma seção [m]
d = 1050 #Densidade [kg/m³]
c = 1420 #Calor Específico [J/Kg.K]
m = d/3,14*(0.009^2)*x
Q = m*c*(Tamb-Tini)
T = Q*0.009/k*2*3,14*0.009*x
V = x/T
print(V)
```

Apêndice B

```
import numpy as np
k = 0.2 # Condutividade Térmica [W/m.K]
Tamb = 300 # Temperatura ambiente [K]
Tini = 410 # Temperatura inicial [K]
CFM = 4.2 # Capacidade da Ventoinha em Pés Cúbicos por minuto
x = 0.16 # Comprimento do filete até atingir a temperatura
P = 1.75*(10**(-3))*np.pi
A = P * x
V = (4.2*(4.72*10**(-4)))/((0.02**2)*np.pi) # Velocidade do ar
h = 13.5*(V**0.6) # Coeficiente convectivo
m = (h*P/(k*A))**(1/2)
Tx = (np.exp(-1*m*x))*(Tini-Tamb)+Tamb
print(Tx)
```

Apêndice C

```
import numpy as np

#Todos os valores em milímetros

LB = 60 # Largura da Bobina

DB= 75 # Diâmetro da Bobina

DF=1.75 # Diâmetro do Filamento

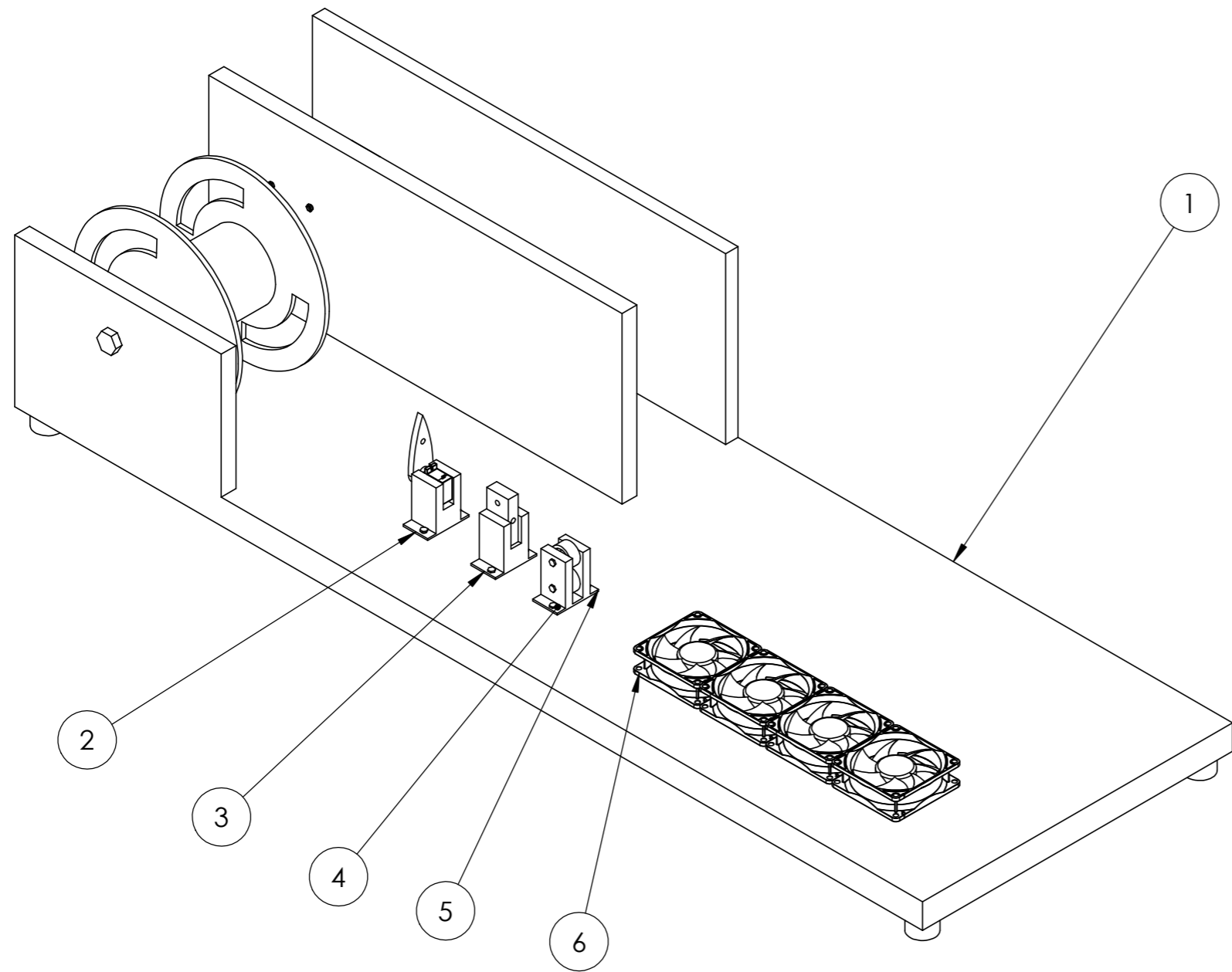
VE= 2200 # Velocidade da extrusão (Milímetro por minuto)

MPR = np.pi*DB # Milímetros de filamento por rotação

RPM = (VE)/(MPR) # Rotação por minuto

print('rpm do motor NEMA-23:')

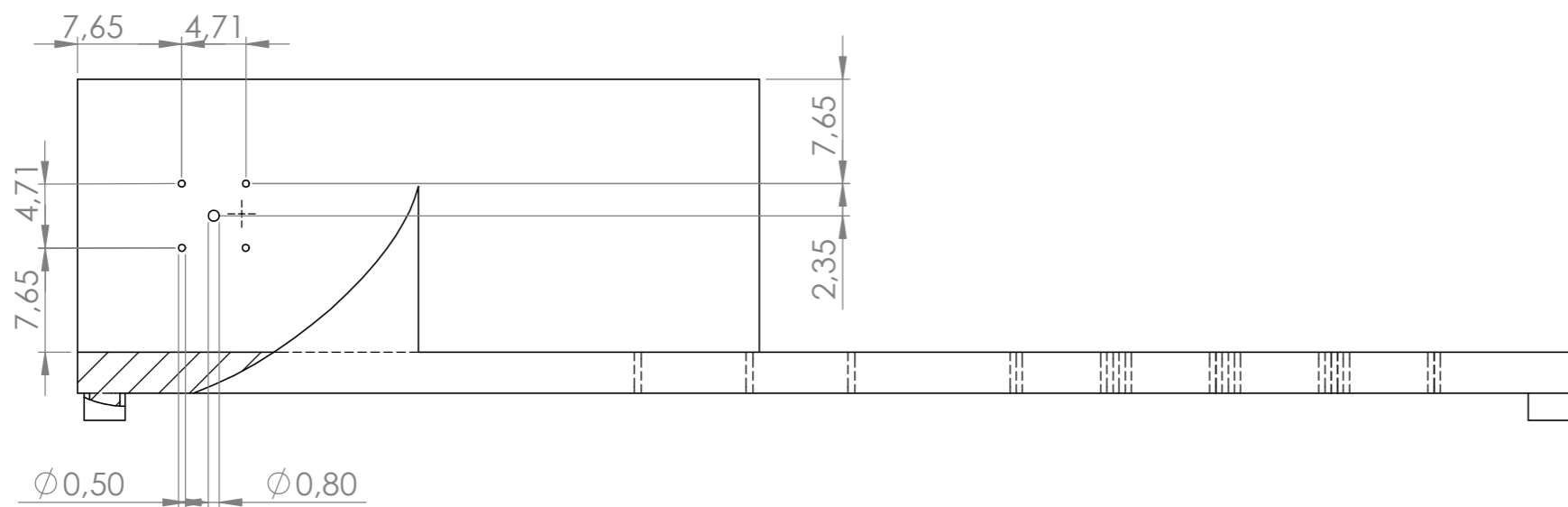
print(RPM)
```



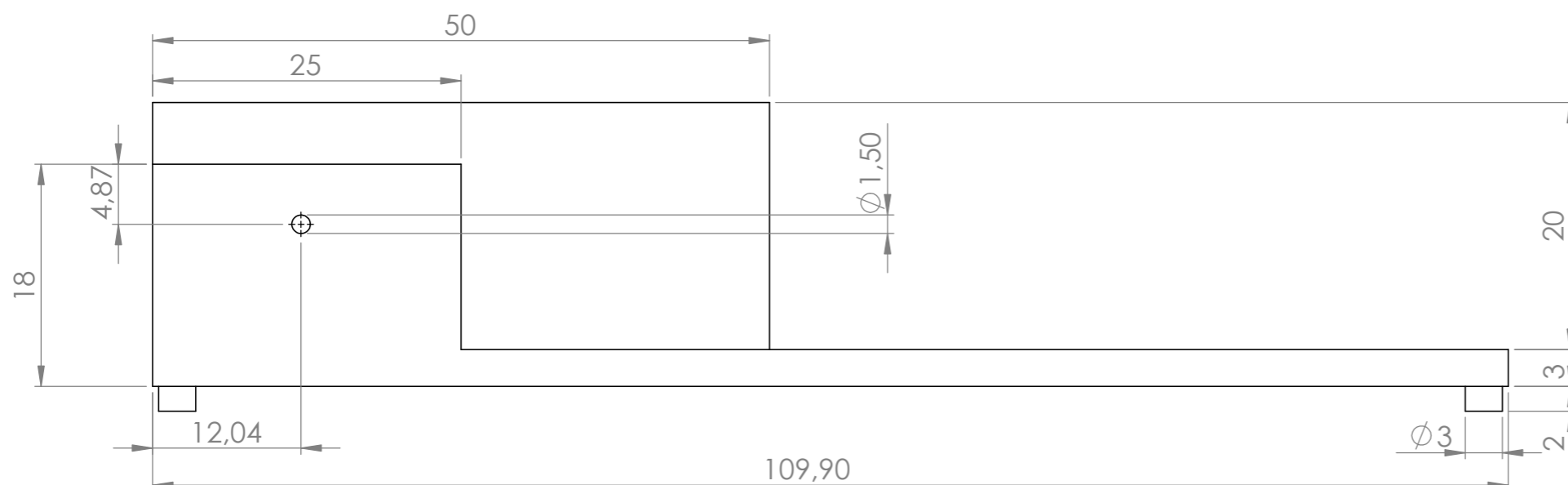
Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	Nº DO DESENHO	QTD.
1	BASE	2	1
2	CONJUNTO DE GUIA	3	1
3	CONJUNTO DE SENSOR	4	1
4	CONJUNTO DE PULLEYS	5	1
5	PARAFUSO PHILLIPS 5 mm	-	12
6	PARAFUSO PHILLIPS 4,5 mm	-	16

ALUNO				
PROF				
Data	VISTO			
Esc.: 1:5	TÍTULO Desenho de Conjunto	UNIDADE mm	NÚMERO -	FOLHA Nº 1
		DESENHO Nº 1		

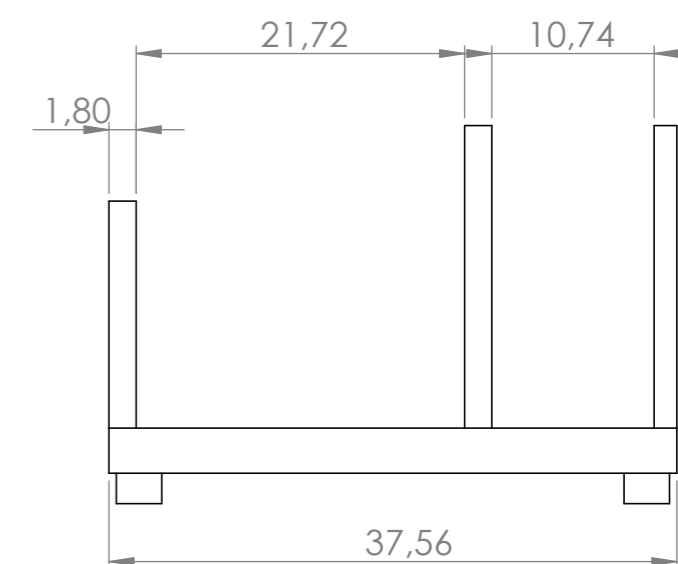
VISTA DE CORTE AUXILIAR LATERAL



VISTA LATERAL

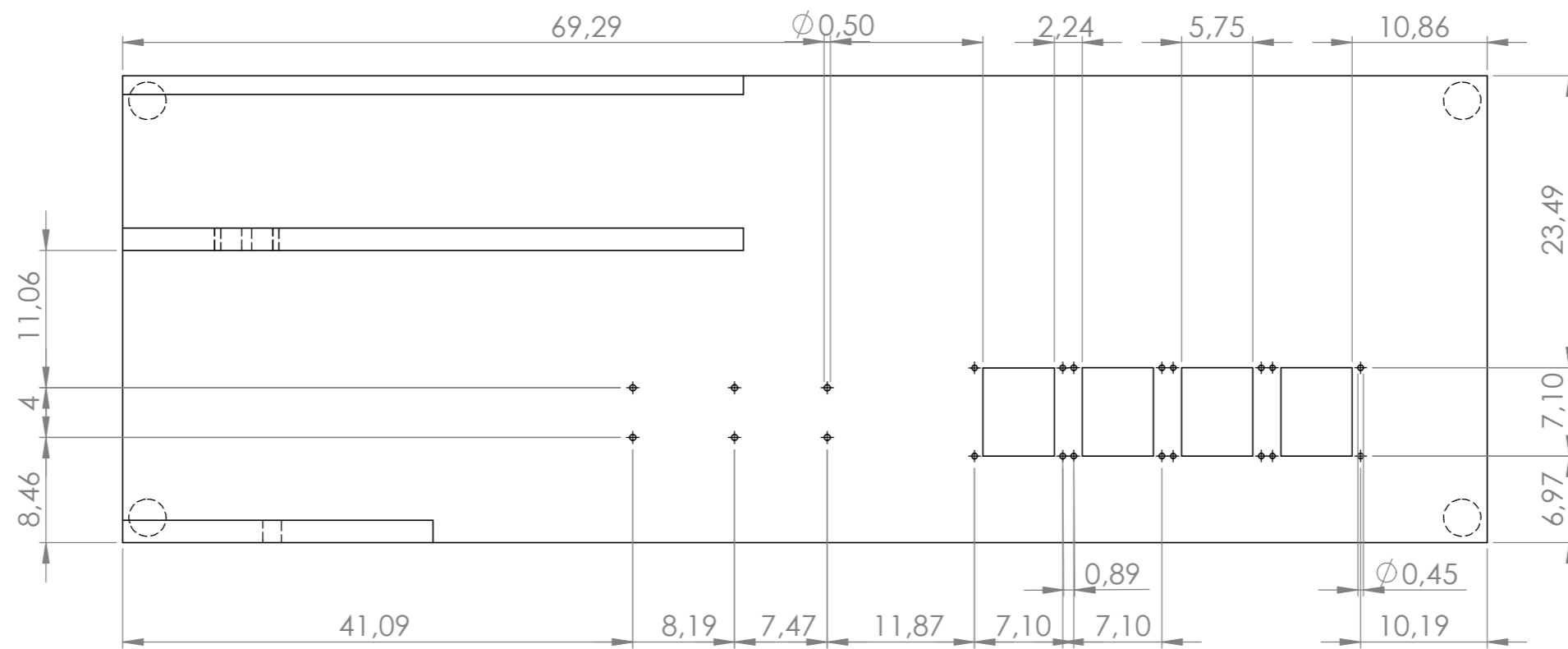


VISTA FRONTAL

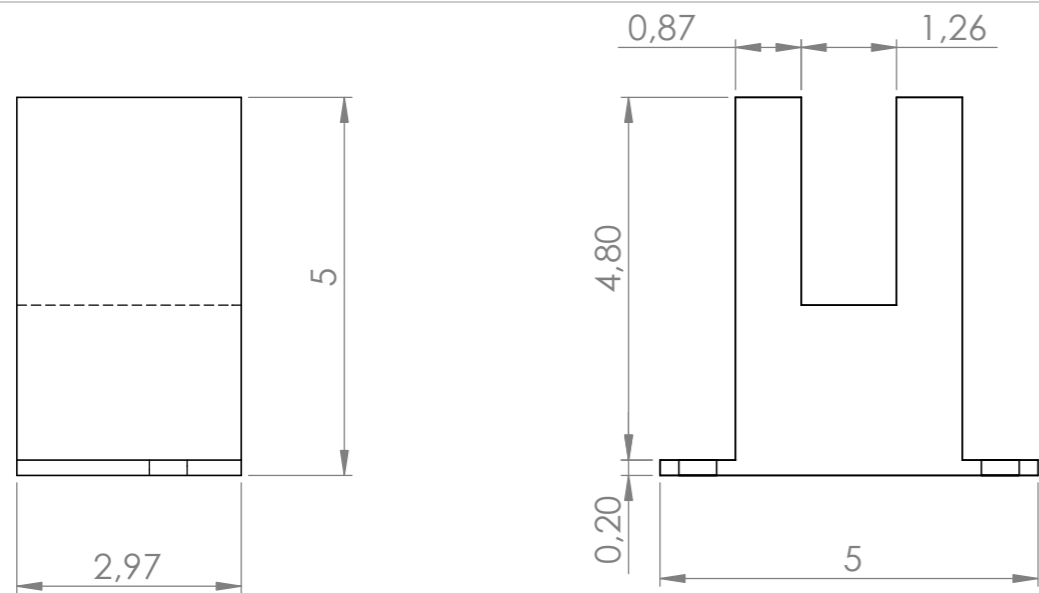


ALUNO				
PROF				
Data	VISTO			
Esc.: 1:10	TÍTULO Estrutura da Base			UNIDADE cm
				NÚMERO
				FOLHA Nº 2
				DESENHO Nº 2
				

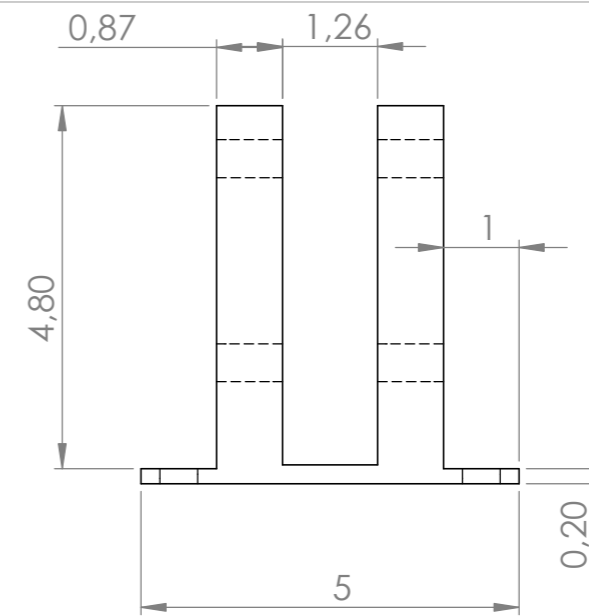
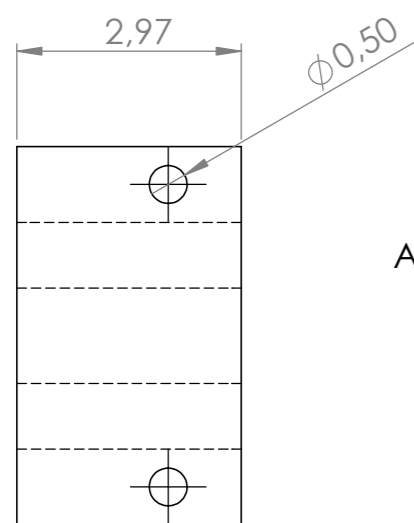
VISTA SUPERIOR



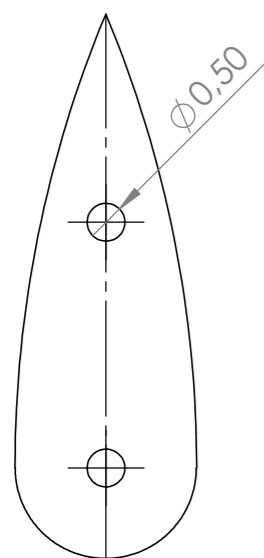
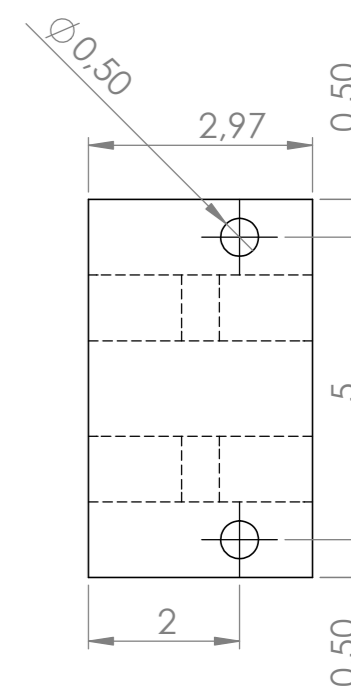
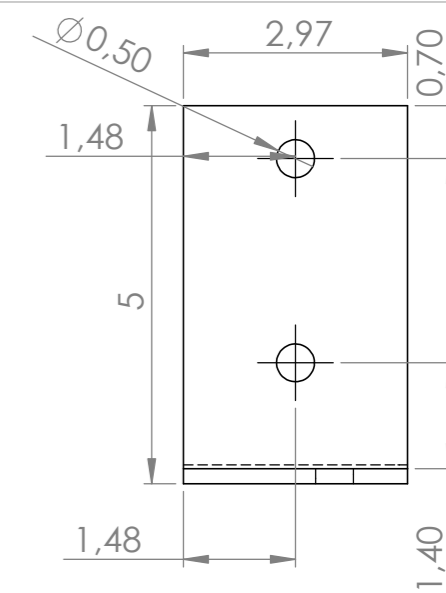
ALUNO						
PROF						
Data		VISTO				
Esc.: 1:10	TÍTULO Estrutura da Base			UNIDADE cm	NÚMERO	FOLHA Nº 3
				DESENHO Nº 2		



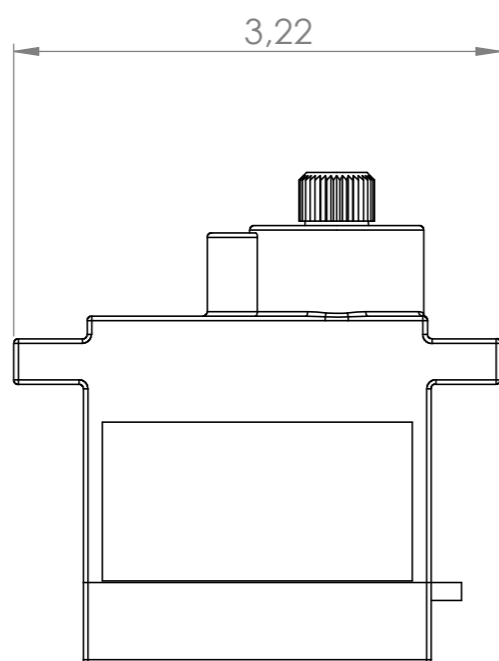
APOIO PARA SERVO E SENSOR



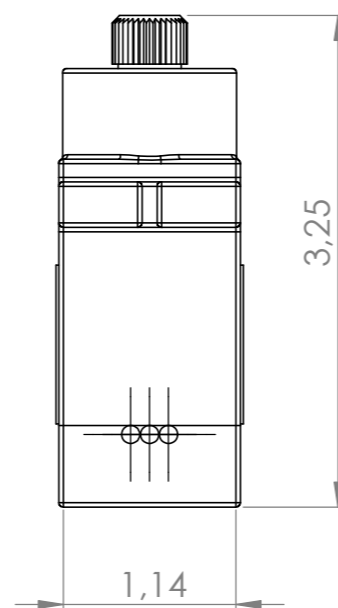
APOIO PARA PULLEYS



SUGESTÃO DE ACESSÓRIO



SERVO MECÂNICO



ALUNO				
PROF				
Data		VISTO		
Esc.: 1:1	TÍTULO Acessórios e Servo Mecânico	UNIDADE cm	NÚMERO	FOLHA Nº 4
		Nº DO DESENHO: 3,4,5		