



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Adrian Luiz Cinelli

**Desenvolvimento de Extrusora Experimental de Rosca Única Para a
Produção de Filamento de Impressão 3D**

Blumenau
2024

Adrian Luiz Cinelli

**Desenvolvimento de Extrusora Experimental de Rosca Única Para a
Produção de Filamento de Impressão 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr Alex Fabiano Bueno.

Coorientador: Prof. Dr.Fernando Luiz Peixoto

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Cinelli, Adrian Luiz
Desenvolvimento de Extrusora Experimental de Rosca Única
Para a Produção de Filamento de Impressão 3D / Adrian Luiz
Cinelli ; orientador, Alex Fabiano Bueno, coorientador,
Fernando Luiz Peixoto, 2024.
90 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Extrusão. 3.
filamento. 4. extrusora de rosca única. 5. impressão 3D.
I. Bueno, Alex Fabiano . II. Peixoto, Fernando Luiz . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Adrian Luiz Cinelli

**Desenvolvimento de Extrusora Experimental de Rosca Única Para a
Produção de Filamento de Impressão 3D**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 09 de Julho de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Fernando Luiz Peixoto
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Maryah Elisa Morastoni Haertel
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Guilherme Brasil Pintarelli
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e a minha irmã. Sem o apoio deles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus queridos pais e minha irmã que sempre estiveram do meu lado em todas as etapas desta graduação, me apoiando e orientando em todas as decisões tomadas no decorrer de minha vida.

Aos meus amigos que ouviram minhas lamentações e sempre me deram força neste período em que não estive tão presente. Em especial, meu amigo Gabriel Perin Pieta.

Aos colegas que agora tenho como amigos, Alex Lago e Vitor Sartori, sem a amizade de vocês e as valiosas contribuições durante o desenvolvimento deste projeto, nada disto seria possível.

Ao Maurício de Oliveira, pela ajuda e materiais emprestados para o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu primo Luiz Henrique Lagni, por me mostrar que há outros caminhos que podem ser seguidos além daquele a minha frente, o mundo precisa de mais pessoas como você.

Ao meu Coorientador Professor Dr Fernando Luiz Peixoto pelas valiosas contribuições durante o desenvolvimento deste projeto, assim como a amizade criada durante este último semestre.

Ao meu orientador Professor Dr Alex Fabiano Bueno, pelos ensinamentos durante o decorrer do curso de Engenharia de Controle e Automação, pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste projeto e principalmente pela amizade criada durante estes anos.

“The only thing standing between you and your goal is the bullshit story you keep telling yourself as to why you can’t achieve it.”(BELFORT, Jordan)

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) teve como objetivo o desenvolvimento de uma máquina de extrusão para a produção de filamentos de impressão 3D. Devido ao elevado custo de fabricação da rosca extrusora projetada, optou-se por utilizar uma broca de construção como substituto, o que resultou em desafios significativos. A broca, com um canal mais profundo, passo maior e ângulo de hélice também maior do que o especificado, comprometeu a eficiência do processo. Adicionalmente, as resistências projetadas tiveram que ser substituídas por duas unidades em vez de três, devido à dificuldade em encontrar componentes nas dimensões originais. A folga entre a broca e a parede do cilindro, que era três vezes maior do que a projetada, causou problemas adicionais, como o travamento do material na rosca quando operado nas temperaturas recomendadas, e a degradação do material quando a temperatura era aumentada. Esses fatores impediram que o processo de extrusão fosse realizado de maneira satisfatória, evidenciando a necessidade de ajustes nos componentes e nas condições operacionais para alcançar os resultados desejados.

Palavras-chave: Extrusão; extrusora de rosca única; filamento; impressão 3D; .

ABSTRACT

This project aimed to develop an extrusion machine for producing 3D printing filaments. Due to the high manufacturing cost of the designed extruder screw, a construction drill bit was chosen as a substitute, which presented significant challenges. The drill bit had a deeper channel, larger pitch, and a greater helix angle than specified, which compromised the process efficiency. Additionally, the designed heaters had to be replaced with two units instead of three because the original dimension components were difficult to find. The clearance between the drill bit and the cylinder wall was three times larger than designed, causing additional issues such as material jamming in the screw at recommended temperatures, and material degradation when the temperature was increased. These factors prevented the extrusion process from being carried out satisfactorily, highlighting the need for adjustments in components and operating conditions to achieve the desired results.

Keywords: Extrusion; single screw extruder; filament; 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de impressão 3D.	18
Figura 2 – Classificação dos Materiais Poliméricos.	21
Figura 3 – Inchamento do extrudado.	22
Figura 4 – Efeito viscoelástico.	23
Figura 5 – Pele de Cação.	23
Figura 6 – Fluxo de fusão	31
Figura 7 – Resistência ao impacto	31
Figura 8 – Extrusora de rosca única	35
Figura 9 – Estágios da rosca extrusora	36
Figura 10 – Rosca extrusora Para PP	36
Figura 11 – Geometria da rosca extrusora	38
Figura 12 – Resistência do tipo coleira mica	40
Figura 13 – Sistema de refrigeração a ar e a água	41
Figura 14 – Sistema de alimentação de uma extrusora	41
Figura 15 – Molde/Matriz	43
Figura 16 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: sistema em malha aberta	44
Figura 17 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: sistema em malha fechada	44
Figura 18 – Topologia da malha de controle de temperatura	45
Figura 19 – Dimensões da rosca	47
Figura 20 – Rosca Extrusora	49
Figura 21 – Cilindro	50
Figura 22 – Resistência Coleira Mica	51
Figura 23 – Desenho do Funil	52
Figura 24 – Desenho do Molde	54
Figura 25 – Montagem do Cilindro com o Sistema de Acionamento	55
Figura 26 – Montagem Cilindro, Molde e Sistema de alimentação	55
Figura 27 – Montagem Final	56
Figura 28 – Diagrama elétrico	57
Figura 29 – Diagrama elétrico adaptado	57
Figura 30 – Montagem dos Componentes eletrônicos	58
Figura 31 – Resposta ao degrau de 35% da potência da resistência 1	59
Figura 32 – Resposta ao degrau de 35% da potência da resistência 2	60
Figura 33 – Resposta ao degrau do controlador $U1(s)$	63
Figura 34 – Resposta ao degrau do controlador $U2(s)$	64
Figura 35 – Resposta do modelo simulado planta $H1(s)$	65
Figura 36 – Resposta do modelo simulado planta $H2(s)$	66
Figura 37 – Broca de construção utilizada no projeto	67

Figura 38 – PLA moído	68
Figura 39 – PLA degradado solidificado	69
Figura 40 – PLA retraído na zona de alimentação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energias de ligação para algumas das ligações químicas frequentes em polímeros comerciais.	26
Tabela 2 – Características e propriedades do PLA	28
Tabela 3 – Temperatura de impressão do PLA de diferentes cores.	29
Tabela 4 – Ensaio de tração ASTM D638-14.	32
Tabela 5 – Ensaio de Cisalhamento ASTM D732-10.	32
Tabela 6 – Ensaio de Dureza - ASTM D 2240.	32
Tabela 7 – Geometria da rosca para polipropileno.	36
Tabela 8 – Geometria da rosca.	48
Tabela 9 – Variáveis calculadas da rosca.	50
Tabela 10 – Lista de materiais	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CR	Taxa de compressão
D	Diâmetro da rosca
h	Profundidade do canal zona de vazão
H	Profundidade do canal zona de alimentação
I	Controlador Integral
L	Comprimento da rosca
L/D	Razão comprimento e diâmetro
MA	Manufatura Aditiva
ON-OFF	Controlador ON-OFF
P	Controlador Proporcional
PD	Controlador Proporcional + Derivativo
PI	Controlador Proporcional + Integral
PID	Controlador Proporcional + Integral + Derivativo
PLA	Poliácido Láctico
PP	poli-propileno
PVC	poli(cloreto de vinila)
TC	Temperatura de cristalização
TG	Temperatura Vítria
TM	Temperatura de fusão cristalina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	MANUFATURA ADITIVA	17
2.2	POLÍMEROS	18
2.2.1	Introdução aos polímeros	19
2.2.2	Classificação dos Polímeros	19
2.2.3	Reologia	21
2.2.3.0.1	Inchamento do Extrudado	22
2.2.3.0.2	Efeito Viscoelástico	22
2.2.3.0.3	Pele de Cação	23
2.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO EM POLÍMEROS	24
2.3.1	Temperatura de Transição Vítrea (T_g)	24
2.3.2	Temperatura de fusão cristalina (T_m)	24
2.3.3	Temperatura de cristalização (T_c)	25
2.3.4	Temperatura de Degradação	25
2.4	FILAMENTOS POLIMÉRICOS PARA IMPRESSÃO 3D	27
2.4.1	Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS	27
2.4.2	Poliácido Láctico - PLA	27
2.4.3	Degradação do PLA	29
2.4.4	Diferenças entre PLA e ABS.	30
2.5	RECICLAGEM DE (PLA)	30
2.6	PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS	33
2.6.1	Injeção de Plástico	33
2.6.2	Sopro	33
2.6.3	Termoformagem	33
2.6.4	Extrusão	34
2.6.5	Sistema de Plastificação	35
2.6.5.1	<i>Rosca extrusora</i>	35
2.6.5.2	<i>Cilindro ou barril</i>	39
2.6.5.3	<i>Sistema de aquecimento</i>	39
2.6.6	Sistema de alimentação	40
2.6.7	Sistema de acionamento	41
2.6.8	Molde/Matriz	42
2.7	SISTEMA DE CONTROLE	43

2.7.1	Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID) . . .	44
3	DESENVOLVIMENTO	46
3.1	PROJETO MECÂNICO	46
3.1.1	Dimensionamento da Rosca Extrusora	46
3.1.2	Dimensionamento do Cilindro	49
3.1.3	Sistema de Aquecimento	51
3.1.4	Sistema de Alimentação	51
3.1.5	Sistema de Acionamento	52
3.1.6	Molde/Matriz	53
3.1.7	Lista de Componentes	54
3.1.8	Montagem dos Componentes Mecânicos	54
3.2	PROJETO ELÉTRICO E ELETRÔNICO	56
3.2.1	Montagem dos Componentes Eletrônicos	58
3.3	CONTROLE DA TEMPERATURA	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	ADAPTAÇÕES REALIZADAS	67
4.1.1	Dependência da rosca extrusora	67
4.1.2	Projeto elétrico/eletrônico	68
4.2	TESTES DE EXTRUSÃO	68
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR	70
4.4	TRABALHOS FUTUROS	70
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Código para obtenção de dados da resistência	78
	APÊNDICE B – Código movimento motor NEMA 23	80
	APÊNDICE C – Desenho rosca extrusora	82
	APÊNDICE D – Desenho cilindro	83
	APÊNDICE E – Desenho suporte	84
	APÊNDICE F – Desenho funil	85
	APÊNDICE G – Desenho flange	86
	APÊNDICE H – Desenho molde	87
	APÊNDICE I – Cálculo da vazão mássica	88
	ANEXO A – Orçamento rosca extrusora	89

1 INTRODUÇÃO

Extrusoras de rosca única são os tipos mais comuns encontrados atualmente, sendo equipamentos cruciais para a produção de materiais ou peças cuja matéria-prima são polímeros. A extrusão é o processo de fabricação de produtos forçando uma massa polimérica através de um molde (COMPRADO *et al.*, 2021). Essas extrusoras são comumente encontradas em processos na indústria alimentícia, moldagem por injeção e produção de plásticos. No processo de extrusão de termoplásticos, o material é fundido por aquecimento externo ou fricção e é transportado até a abertura do molde, que dará a forma ao produto a ser extrudado (FADEYIBI *et al.*, 2016). Nos dias atuais o uso de polímeros na indústria está cada vez mais comum com a popularização da Indústria 4.0 e de materiais e peças fabricados com o auxílio de impressoras 3D. No processo de impressão 3D, o objeto é impresso camada por camada, acumulando material até obter a forma pré-desenhada (TAMIR *et al.*, 2022).

No processo de manufatura aditiva, o produto é construído camada por camada, em contraste com o processo de manufatura subtrativa, no qual o produto é cortado de um bloco sólido até que o produto final seja formado (LINKE, 2017). Os produtos produzidos através da manufatura aditiva Kopsacheilis *et al.* (2020), podem ter características complexas e estrutura leve, características que não podem ser obtidas em processos tradicionais como torneamento e fresamento. A qualidade desses produtos pode ser caracterizada por diversos fatores, como precisão dimensional, qualidade da superfície, propriedades mecânicas e conformidade com especificações. Para Hamad, Kaseem e Deri (2013), existem várias opções para a reciclagem de polímeros, incluindo reuso, reciclagem mecânica e reciclagem química. Neste trabalho, será abordada a reciclagem mecânica do polímero. De acordo com os mesmos autores, ao utilizar a reciclagem mecânica, o polímero é reprocessado, podendo ou não ser destinado ao seu uso original. Dessa forma, os resíduos provenientes da manufatura aditiva, como os polímeros ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Poliácido Láctico), podem ser reprocessados e, conseqüentemente, reutilizados no processo de impressão 3D.

Este trabalho enfatiza o desenvolvimento de uma extrusora de rosca única para a confecção de filamentos de PLA, com a possibilidade de estudos com outros polímeros, como ABS. O projeto inclui o desenvolvimento em software CAD (*Computer-Aided Design*) dos principais componentes da extrusora, como a rosca extrusora, cilindro e molde, além do desenvolvimento do controle de temperatura, sendo este um PID (Controlador Proporcional + Integral + Derivativo).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma abordagem teórica e desenvolver uma extrusora de rosca única para a fabricação de filamento para impressão 3D, utilizando PLA como matéria-prima. O projeto enfatiza a análise do material a ser extrudado, bem como os aspectos mecânicos, como a geometria da rosca.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para que o objetivo de construir uma extrusora de rosca única para a produção de filamento de impressão 3D tem-se como objetivos específicos:

- a) Projetar em software CAD os componentes da extrusora com base nos parâmetros a partir da fundamentação teórica e dos requisitos de projeto;
- b) Projetar o controlador de temperatura PID;
- c) Fabricação de um protótipo da extrusora projetada;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 capítulos:

- Capítulo 1: Introduz o tema a ser abordado no desenvolvimento do projeto, assim como os objetivos propostos;
- Capítulo 2: Apresenta uma extensa revisão de literatura sobre polímeros, sua classificação, comportamento térmico e processamento, com ênfase na extrusão, bem como uma revisão sobre sistemas de controle;
- Capítulo 3: Aborda o desenvolvimento do projeto mecânico, elétrico e eletrônico, bem como o controle de temperatura das resistências;
- Capítulo 4: Apresenta os resultados e discussões;
- Capítulo 5: Conclusão;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A MA (Manufatura Aditiva) surgiu na década de 1980 com o advento dos softwares CAD, que mudaram a forma como as peças mecânicas são modeladas, possibilitando a manipulação da peça desenhada em ambientes computacionais e permitindo uma análise completa do projeto (GOMES, J. F. B.; WILTGEN, 2020).

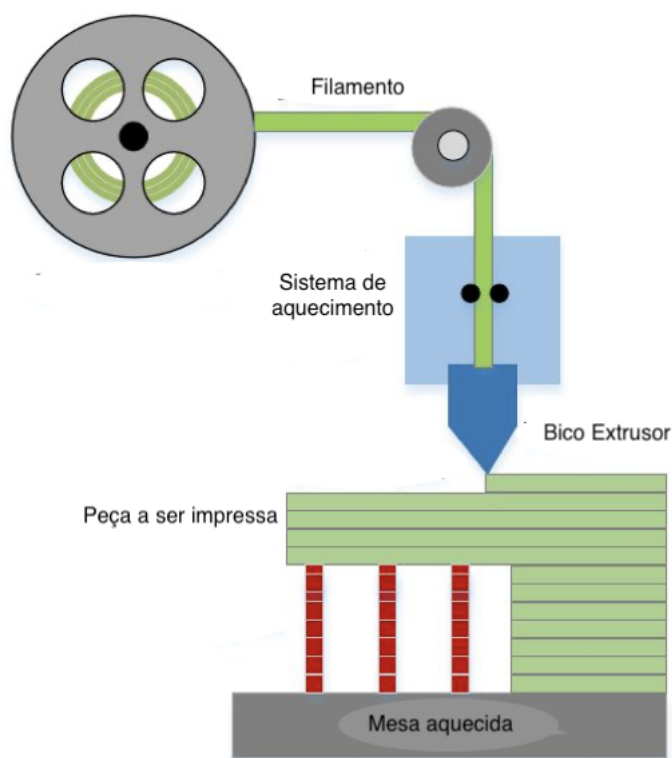
A MA popularizou-se nos últimos anos com o advento da Indústria 4.0. Atualmente, a MA está inserida na indústria como um todo, tendo aplicações desde a medicina até a indústria aeroespacial. Os projetos a serem fabricados a partir de tecnologias de MA são projetados em softwares CAD e impressos em impressoras 3D, com um custo mais baixo que os processos convencionais, evitando os processos de fabricação tradicionais (CULMONE; SMIT; BREEDVELD, 2019).

Conforme destacado por Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris (2015), atualmente existem cinco processos de manufatura aditiva. Nos processos baseados em laser, utiliza-se o laser para fundir, solidificar ou curar o material. Na extrusão, um material plástico é aquecido para fundir ou amolecer. O jateamento de material emprega um bico para pulverizar de forma controlada, com o propósito de ligar um pó a um objeto sólido. Os processos baseados em adesivos têm seu uso limitado, onde um laser é empregado para cortar uma fina camada de material nos contornos desejados. Por último, há o processo de feixe de elétrons, que é idêntico ao processo de fusão a laser, utilizando um feixe de elétrons como fonte de energia para fundir ou sinterizar o material. Entre os processos de MA existentes, destaca-se a manufatura aditiva via impressão 3D, que, por meio do processo de extrusão, tem permitido o desenvolvimento de peças com uma ampla variedade de materiais. Essas peças podem ser empregadas em diversos setores da indústria, como a indústria aeronáutica, aeroespacial e automobilística (GOMES, J.; WILTGEN, 2020).

Na impressão 3D, o modelo geométrico criado em software CAD é formado a partir da extrusão do filamento e depositado até formar o modelo projetado. Quanto à escolha da impressora, há alguns fatores que devem ser analisados tais como velocidade, custo do protótipo e cor do material a ser extrudado. (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

No processo de impressão 3D visto na Figura 1, observa-se o filamento sendo impulsionado por um motor passando por um sistema de aquecimento e, posteriormente em sendo extrudado pelo bico extrusor.

Figura 1 – Exemplo de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de João Francisco Bueno Gomes e Wiltgen (2020).

2.2 POLÍMEROS

Os primeiros contatos com materiais resinosos e graxas ocorreram na antiguidade, quando os romanos e egípcios utilizaram esses materiais para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames. Com o descobrimento da América pelos espanhóis e portugueses, houve os primeiros contatos com as seringueiras, surgindo, através da coagulação e secagem do látex, o que hoje é conhecido como borracha (CANEVAROLO, 2010). Materiais resinosos e de borracha são exemplos típicos de polímeros, compostos por longas cadeias de moléculas repetitivas que conferem propriedades únicas a esses materiais. De acordo com Young e Lovell (2011), os polímeros são macromoléculas formadas por unidades estruturais repetitivas chamadas monômeros. No caso dos materiais resinosos, como as epóxis e os poliésteres, a rede de polímeros tridimensionais proporciona rigidez e resistência ao material. Já as borrachas, como o polibutadieno e o poliisopreno, são caracterizadas por sua elasticidade devido à estrutura flexível de suas cadeias de polímeros. Esses materiais demonstram como a estrutura molecular dos polímeros influencia diretamente suas propriedades físicas e mecânicas, fazendo com que sejam amplamente utilizados em diversas aplicações industriais.

Os materiais poliméricos desempenharam um papel significativo no desenvolvimento industrial durante o século XX. Por volta de 1920, Hermann Staudinger apresentou um trabalho que considerava a borracha natural e outros produtos de síntese, com estrutura química desconhecida, como materiais compostos por moléculas de cadeias longas, em vez de agregados coloidais de pequenas moléculas. Somente em 1928, foi documentado que os polímeros eram substâncias de elevado peso molecular. Devido à falta de métodos adequados para avaliar com precisão o tamanho e a estrutura química de moléculas de grande dimensão, eles foram tratados como "High Polymer" (MANO; MENDES, 2004).

2.2.1 Introdução aos polímeros

Proveniente do grego *poli* (muitos) e *meros* (iguais), os polímeros são macromoléculas formadas através de várias repetições de unidades químicas iguais, e sua massa molar pode ser de centenas de milhares de unidades de massa atômica (DE PAOLI, 2009). Os polímeros são caracterizados pelo tamanho de sua estrutura química e pelas interações intra e intermoleculares. As unidades químicas são unidas por ligações covalentes, que se repetem ao longo da cadeia (SPINACÊ; PAOLI, 2004).

Materiais como a madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda são polímeros que ocorrem naturalmente, sendo derivados de plantas e animais. Após a Segunda Guerra Mundial, houve muitos avanços no campo dos materiais com o advento dos polímeros sintéticos. Esses materiais sintéticos são produzidos a um custo mais baixo e suas propriedades podem ser modificadas a ponto de torná-los superiores aos polímeros naturais (CALISTER; RETHWISCH, 2012).

Tais materiais contribuíram para o desenvolvimento econômico, gerando avanços na ciência e no desenvolvimento tecnológico. Com o passar dos anos, o uso de materiais poliméricos tornou-se indispensável na rotina do ser humano, sendo aplicados em várias áreas do conhecimento e da indústria, como nos setores aeroespacial, medicina, moda e construção civil, uma vez que esses materiais são duráveis, flexíveis, possuem baixo peso e um custo atrativo em comparação a outras indústrias (LU, 2023).

2.2.2 Classificação dos Polímeros

Os polímeros são classificados de diversas formas, sendo distribuídos em dois grandes grupos: os polímeros naturais e os polímeros sintéticos. Os polímeros naturais são aqueles encontrados no meio ambiente, enquanto os polímeros sintéticos são produzidos através de processos químicos (MANO; MENDES, 2004).

Segundo Canevarolo (2010) dentre as diversas classificações dos polímeros estão o método de preparação e o comportamento mecânico, com relação ao modo de preparo há duas divisões:

- a) Polímeros de Adição: Neste tipo de polímero não há perda de massa na forma

de compostos de baixo peso molar. Com isso, o peso do polímero formado será igual ao peso do monômero adicionado. Exemplos : PP, PVC.

- b) Polímeros de Condensação: São originados da reação que ocorre entre dois grupos funcionais reativos, ocorrendo a eliminação de moléculas de baixo peso molar, como a água e a amônia.

Para Canevarolo (2010) ao analisar o comportamento mecânico dos polímeros, tem-se:

- a) Plásticos: são polímeros que estão em estado sólido na temperatura de utilização, ou seja, na temperatura ambiente ou próxima a ela.

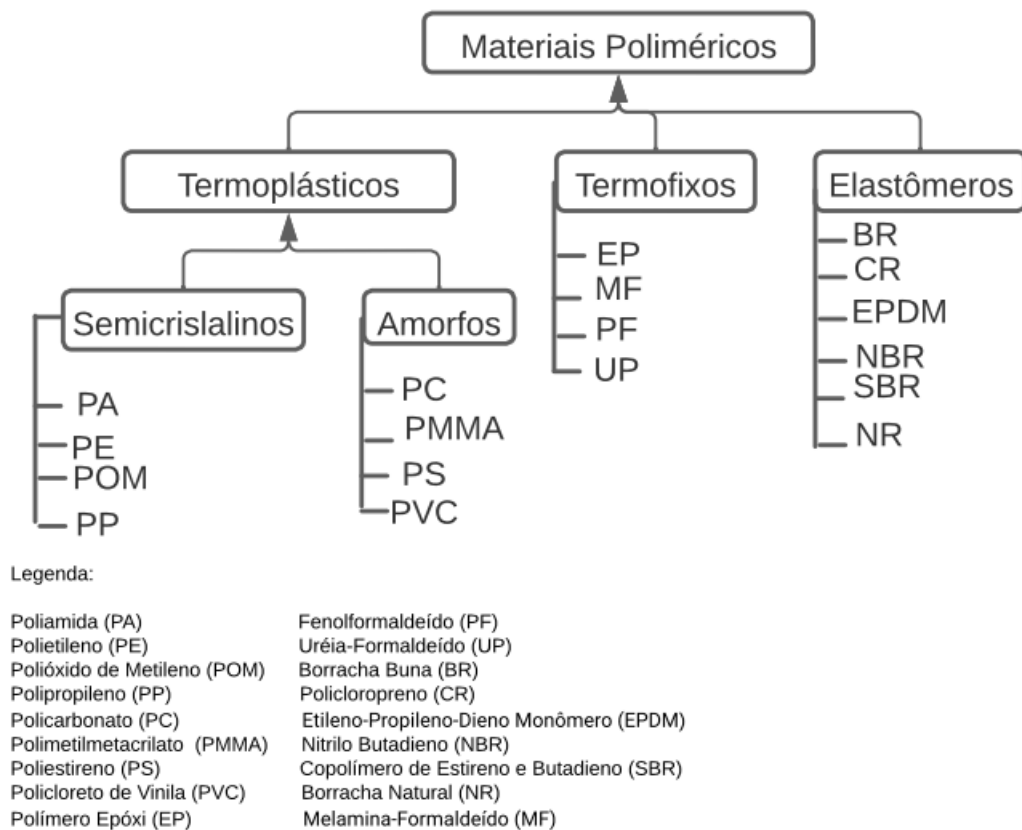
- Termoplásticos: são plásticos que, quando a temperatura e a pressão são aumentadas, amolecem e fluem, podendo ser moldados, voltando a se solidificar assim que essas condições são retiradas. Os termoplásticos são polímeros recicláveis. Exemplo: PP, PVC.

- Termorrígidos: quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão, amolecem e fluem assim como os termoplásticos, reagindo quimicamente, formando ligações cruzadas entre as cadeias e se solidificam. Quando novas alterações na temperatura e pressão ocorrem, não há alteração na sua forma, sendo assim, os termorrígidos são insolúveis, infusíveis e não recicláveis. São exemplos de termorrígidos o poliuretano (PU) e poliacetato de etileno vinil (EVA), resinas epóxi, entre outros, que podem ser aplicados na produção de peças de automóveis, aeronaves, pneus, e muitas outras aplicações.

- b) Elastômeros: em temperatura ambiente, este tipo de polímero pode se deformar até duas vezes o seu comprimento inicial. Ao retirar o esforço, retorna ao seu comprimento original. Os elastômeros apresentam cadeias flexíveis amarradas umas às outras, possuindo uma baixa densidade de ligação cruzada.
- c) Fibras: são um termoplástico orientado, com sentido longitudinal dito eixo principal da fibra. Suas cadeias e cristais são orientados de modo forçado durante a fiação, ocasionando um aumento da resistência mecânica desses materiais. Devido a esse aumento da resistência mecânica, essas fibras podem ser usadas na forma de fios finos.

Alguns exemplos de materiais poliméricos bem como a sua classificação podem ser vistos na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos Materiais Poliméricos.



Fonte: Adaptado de Michaeli *et al.* (2001).

2.2.3 Reologia

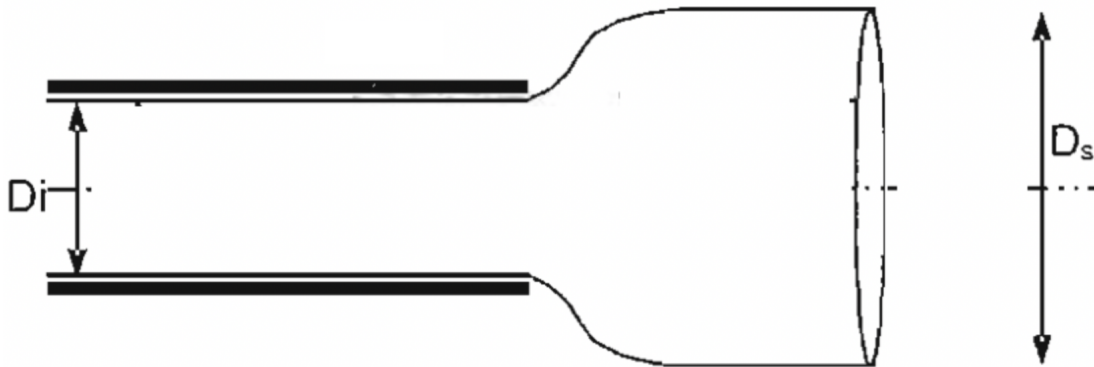
Reologia é o estudo da deformação e do fluxo da matéria. Todos os materiais fluem, sendo uns mais facilmente que outros, havendo a necessidade de pouca energia e pouco tempo para que esse material se deforme ou flua, ou o oposto, onde há a necessidade de muita energia e muito tempo para realizar o processo. Os materiais, ao sofrerem deformação, podem ter comportamento elástico, viscoso, viscoelástico ou viscoinelástico (MANRICH, 2005).

Por terem comportamento viscoso e também elástico, os polímeros são materiais viscoelásticos. Há duas formas de medir a viscosidade de um polímero: viscoelasticidade linear e viscoelasticidade não linear. Quando aplicadas baixas deformações, os polímeros apresentam uma relação linear da deformação com a tensão, mas, à medida que a deformação aumenta, essa relação se torna não linear (TIGGEMANN, 2017).

2.2.3.0.1 Inchamento do Extrudado

O polímero é deformado por cisalhamento entre as paredes da matriz, tendo suas cadeias orientadas na direção do fluxo e, ao mesmo tempo, tentando recuperar essa deformação elástica ainda dentro da matriz. Este processo gera um desequilíbrio entre a deformação e a recuperação. Tal recuperação ocorre quando o polímero sai da matriz, causando um aumento do diâmetro do material extrudado (MANRICH, 2005). Este processo pode ser visto na Figura 3, onde D_i é o diâmetro do molde e D_s é o diâmetro do material extrudado.

Figura 3 – Inchamento do extrudado.

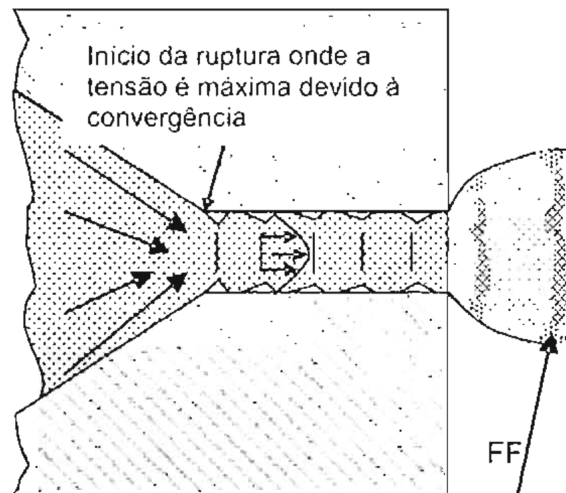


Fonte: (MANRICH, 2005).

2.2.3.0.2 Efeito Viscoelástico

Este efeito ocorre quando a massa formada pelo polímero passa de regiões mais largas para regiões mais estreitas, fazendo com que ocorra um aumento de energia nesse ponto. Em consequência desse aumento, o polímero pode não ter tempo para responder e se deformar de forma viscosa. Com isso ocorre o que é chamado de fratura do fundido (FF). Caso essa fratura seja muito profunda, pode permanecer na massa até que a mesma seja extrudada (MANRICH, 2005). Este processo pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Efeito viscoelástico.

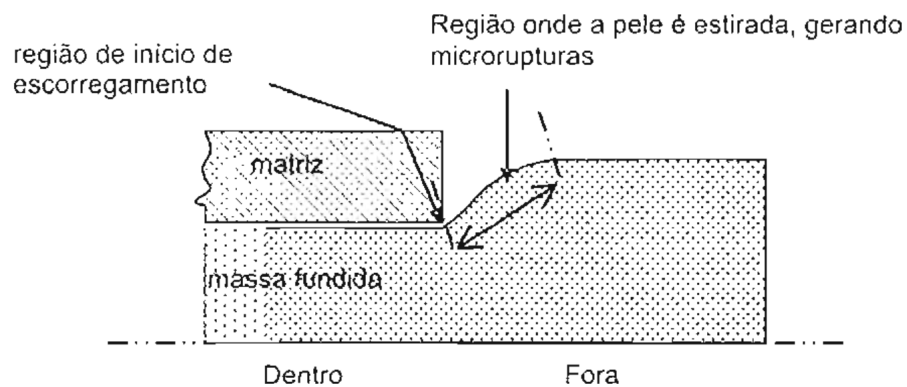


Fonte: Manrich (2005).

2.2.3.0.3 Pele de Cação

Neste defeito, ocorrem irregularidades ou falta de uniformidade no perfil extrudado. Isso acontece devido à falta de adesão da massa fundida nas paredes da matriz, principalmente na saída, uma vez que a pressão hidrostática chega a ser nula (MANRICH, 2005). Este processo pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Pele de Cação.



Fonte: Manrich (2005).

2.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO EM POLÍMEROS

As características de um produto, seja ele um plástico duro e frágil, borrachoso e tenaz ou fluido viscoso, são definidas pela mobilidade da cadeia polimérica. Isto é, a agitação dos átomos nas moléculas é diretamente proporcional à temperatura. Assim, as características físico-químicas inerentes a um polímero são fundamentais para a compreensão do desempenho termomecânico. Quando processado em altas temperaturas, o polímero apresenta um comportamento fluídico viscoso (CANEVAROLO, 2010).

Os materiais poliméricos apresentam diferentes características quando aquecidos. Essas características dependem de diversos fatores, como a estrutura química e o tipo das forças intermoleculares. Em temperatura ambiente, um polímero é um material sólido e duro, uma vez que as macromoléculas quase não se movem. Ao aumentar a temperatura do material, as macromoléculas começam a se agitar, fazendo com que a força intermolecular diminua, ocorrendo uma diminuição da resistência do material e um aumento da extensibilidade e ductilidade do material (MICHAELI *et al.*, 2001).

Uma vez que os polímeros apresentam características diferentes quando em temperatura ambiente ou quando aquecidos a altas temperaturas, alguns fenômenos devem ser levados em consideração, sendo eles: Temperatura Vítria ou TG, Fusão, Cristalização e Degradação.

2.3.1 Temperatura de Transição Vítria (TG)

Quando os polímeros adquirem energia suficiente para superar as barreiras necessárias à rotação de ligações, ocorre a transição vítrea. Assim, o polímero passa do estado vítreo, onde há uma mobilidade limitada, para o estado de maior mobilidade, atingindo assim o equilíbrio termodinâmico (PAIVA; NOGUEIRA; REZENDE, 2007).

Segundo Canevarolo (2010) temperatura de transição vítrea é o valor médio da temperatura do material durante o aquecimento. Quando a temperatura está abaixo de TG, o polímero não tem energia suficiente para que as cadeias se desloquem em relação a outras mudanças conformacionais. Assim, o polímero apresenta características de um vidro, duro e rígido, porém quebradiço.

Ao aquecer um polímero amorfo por meio de transição vítrea, ocorre a transformação de um estado rígido para um estado borrachoso. O valor da TG depende de características moleculares que afetam a rigidez da cadeia (CALISTER; RETHWISCH, 2012).

2.3.2 Temperatura de fusão cristalina (T_m)

A transformação de um cristal polimérico em um material sólido, é conhecida como fusão, este fenômeno ocorre ao aquecer o polímero a T_m (Temperatura de fusão cristalina) (CALISTER; RETHWISCH, 2012). T_m é o valor médio da temperatura em que as regiões

cristalinas desaparecem quando os cristalinos são fundidos. Ou seja o sistema atinge a quantidade de energia necessária para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias de fase cristalina, mudando assim o estado do polímero de borrachoso para o estado viscoso (fundido) (CANEVAROLO, 2010).

Ainda segundo o mesmo autor, uma vez que esta transição ocorre na fase cristalina, só é aplicada em polímeros semicristalinos, isto é uma mudança termodinâmica de primeira ordem onde variáveis como volume específico e entalpia são alterados.

As forças intermoleculares da zona cristalina são mais fortes que as das zonas amorfas. Os polímeros amorfos amolecem em temperaturas acima da temperatura TG. Por sua vez a zona cristalina de um polímero funde quando a temperatura T_M é excedida (MICHAELI *et al.*, 2001).

2.3.3 Temperatura de cristalização (T_c)

O estudo e a compreensão da cristalização são muito importantes, uma vez que o grau de cristalinidade tem grande influência nas propriedades mecânicas e térmicas dos polímeros (CALISTER; RETHWISCH, 2012). Uma estrutura cristalina forma-se quando um polímero semicristalino começa a se resfriar a partir do seu estado fundido, ou seja, quando o polímero está a uma temperatura acima de T_M , fazendo com que as cadeias poliméricas se organizem de forma regular, ocorrendo então a formação da estrutura cristalina (CANEVAROLO, 2010).

A cristalização de um polímero pode ocorrer de duas formas. A primeira forma é a isométrica, que ocorre quando sua temperatura é rapidamente reduzida a um valor T_M ; então, esta temperatura é estabilizada e mantida constante até que a cristalização ocorra. A outra forma é a dinâmica, na qual a temperatura do polímero é reduzida de forma constante e a cristalização ocorre dentro de uma faixa de temperatura. A cristalização ocorre quando um polímero é resfriado normalmente entre as temperaturas T_M e TG. Usualmente, é definido um único ponto de temperatura, uma vez que a cristalização ocorre em uma faixa de temperatura; este ponto é chamado de T_C (Temperatura de cristalização) (CANEVAROLO, 2010).

2.3.4 Temperatura de Degradação

De acordo com Canevarolo (2010), a degradação é qualquer fenômeno que, ao incidir sobre um polímero, faz com que ele tenha mudanças na química de sua cadeia polimérica, geralmente ocorrendo uma redução da massa molar e, assim, provocando quedas nas propriedades físico-mecânicas. Em decorrência da degradação térmica, ocorre a cisão de cadeias moleculares quando elevadas a altas temperaturas. Em alguns polímeros, um dos possíveis resultados dessa degradação é a produção de alguns gases, ocorrendo a redução do peso do material. Já a estabilidade térmica é a medida da resistência de um polímero a essa decomposição (CALISTER; RETHWISCH, 2012).

A estabilidade térmica dos polímeros está relacionada à magnitude das energias de ligação. Essas ligações podem ser quebradas se uma energia igual ou superior for fornecida em um curto período de tempo (PAOLI, 2009). Conforme listado na Tabela 1, são encontrados os tipos e os valores das energias de ligações químicas mais frequentes em polímeros.

Tabela 1 – Energias de ligação para algumas das ligações químicas frequentes em polímeros comerciais.

Tipo de Ligações	Energia de ligação/kJmol ⁻¹
C-H primário	432
C-H secundário	410
C-H terciário	390
C-H aromático	610
C-F	486
C-Cl	340
C-Br	285
C-I	214
C-C	348
C=C	612
CC	828
CN	893
C-O	419
O-CO	461
C=O aldeído	742
C=O cetona	746
C=O éster	750
C=O amida	750
S-S	226
O-O	138
O-H	465
N-CO	360

Fonte: Paoli (2009)

Em geral, os polímeros são bons isolantes térmicos. A sensibilidade térmica dos polímeros é afetada quando são expostos a uma determinada temperatura por um longo período de tempo, bem como pela velocidade de aquecimento do material, que também provoca mudanças na sensibilidade térmica do polímero (PAOLI, 2009).

A temperatura de degradação é a temperatura em que os componentes do plástico começam a se decompor, também conhecida como temperatura máxima. Essa temperatura ajuda a determinar os limites máximos de uso e indica quando um plástico deixará de manter suas propriedades (LOBO; BONILLA, 2003)

2.4 FILAMENTOS POLIMÉRICOS PARA IMPRESSÃO 3D

Os métodos de MA, foram rapidamente disseminados, chamando a atenção para outros tipos de materiais. Atualmente, a impressão 3D é um método de prototipagem rápida que utiliza não somente materiais poliméricos, mas também metais, cerâmicas e compósitos (NGO *et al.*, 2018).

O processo de extrusão é utilizado para a produção de filamentos para impressão 3D, onde os grânulos do material são derretidos. Após a extrusão, o filamento é resfriado, seja por água ou ar. O diâmetro do filamento está disponível em dois tamanhos: 1,75 mm e 2,85/3 mm (IZDEBSKA-PODSIADŁY, 2022).

Segundo Izdebska-Podsiadły (2022), os materiais mais comuns na impressão 3D são os termoplásticos amorfos, como ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Poliácido Láctico). Uma vez que há inúmeros tipos de polímeros disponíveis para utilização nos processos de impressão 3D, este trabalho abordará os dois tipos mais comuns, sendo eles o ABS e o PLA, com uma ênfase maior no segundo.

2.4.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS

O ABS é uma resina termoplástica derivada do petróleo, desenvolvida a partir da combinação de três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Surgiu em 1948 nos Estados Unidos da América e passou a ser largamente utilizado a partir da década de 1960 (ALVARO, 2021).

Segundo Izdebska-Podsiadły (2022), o ABS é um material forte, rígido e durável, sendo quimicamente resistente, apresentando alta rigidez, resistência ao impacto, à abrasão e à deformação.

De acordo com o mesmo autor, algumas propriedades do ABS, como o tempo de pré-secagem e a temperatura de derretimento, são: 3 horas a 80°C e 196°C a 245°C, respectivamente.

O polímero ABS é usado em diversas áreas da indústria, comumente empregado em eletrodomésticos, indústria automotiva, brinquedos e muito utilizado na MA devido às suas propriedades mecânicas. As peças produzidas com este polímero podem receber acabamentos, como tintura e lixamento (SALINAS, 2014).

Uma vez que há diversos fabricantes, é natural que sejam encontrados filamentos de ABS com diferentes faixas de temperatura de extrusão (OSEJOS, 2016).

2.4.2 Poliácido Láctico - PLA

PLA (Poliácido Láctico) um polímero biodegradável, produzido a partir de trigo, milho, beterraba e outros produtos ricos em amido. O PLA é 100% reciclável, possuindo características parecidas ou melhores que alguns plásticos derivados do petróleo (OSEJOS, 2016). O PLA é um polímero termoplástico que possui alta resistência, podendo ser usado

na indústria ou até mesmo em dispositivos médicos biocompatíveis/bioabsorvíveis para que o PLA seja produzido em larga escala nos vários processos, como extrusão e injeção, entre outros, o polímero deve possuir estabilidade térmica adequada, com o intuito de prevenir a degradação e manter o peso molecular e suas propriedades (GARLOTTA, 2001).

Sintetizado em 1932, o PLA foi produzido por Wallace Carothers na DuPont durante o aquecimento do ácido láctico em um processo a vácuo para a remoção de água condensada. Carothers pode ser considerado o pai da ciência por trás dos polímeros sintéticos. Ele foi um químico e inventor americano responsável por invenções como o náilon (BELLIS, 2019). Segundo Osejos (2016), o PLA pode ser fabricado para ser rígido ou flexível, podendo ser copolimerizado com outros materiais, e suas características mecânicas podem mudar dependendo da forma como o polímero for fabricado.

Uma das principais características do PLA é a cristalinidade do material, que indica a quantidade da região cristalina em relação ao conteúdo amorfo. Características como dureza, módulo, resistência à tração, rigidez e ponto de fusão são influenciadas pela taxa de cristalinidade do PLA (FARAH; ANDERSON, D. G.; LANGER, 2016). PLA pode ser produzido como amorfo ou semicristalino, tendo uma taxa de cristalinidade de 40% (GREGOR-SVETEC, 2022). Possuindo diversas características: é incolor, brilhante e rígido, tendo características semelhantes ao PE (Polietileno). As propriedades em relação à tração variam dependendo se o polímero é recozido ou orientado e do grau de cristalinidade. A vida útil do PLA, devido à degradação no ambiente, varia de 6 meses a 2 anos (GARLOTTA, 2001).

A temperatura de extrusão do PLA no processo de MA varia entre 180°C e 200°C, enquanto a temperatura da mesa de impressão varia entre 60°C e 80°C. Tais características diferem devido à composição do termoplástico, apresentando temperaturas mais baixas em comparação ao ABS (OSEJOS, 2016).

Tabela 2 – Características e propriedades do PLA

Propriedade	PLA
Tipo de polimerização	Policondensação
Tipo de Cadeia	Linear
Densidade [g/cm ³]	1,24
Cristalinidade [%]	até 40
T _m [°C]	130-180
T _g [°C]	50-80
Índice de fluidez a 190°C [g/10min]	10

Fonte: Osejos (2016), Garlotta (2001).

Uma vez que as características químicas e mecânicas do PLA mudam de acordo com os aditivos adicionados para fornecer as diferentes cores encontradas no mercado, observam-se diferentes temperaturas de impressão.

Na Tabela 2 podemos ver a algumas características e propriedades do PLA:

As características técnicas do PLA de diferentes cores podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura de impressão do PLA de diferentes cores.

Cor	Temperatura de Fusão [°C]	Temperatura da mesa [°C]
Natural	180-200	71
Amarelo	215-230	69
Vermelho	190-220	58
Preto	185-210	71

Fonte: Pastor (2013).

2.4.3 Degradação do PLA

Assim como inúmeros outros materiais utilizados nos dias atuais, os filamentos também sofrem degradações por diversos fatores, incluindo os efeitos de altas temperaturas e até mesmo por agentes biológicos. Uma vez exposto a altas temperaturas o PLA pode sofrer degradação, resultando em defeitos termicamente instáveis, além de mudanças estruturais devido à despolimerização ou cisão aleatória (MIKULA *et al.*, 2021). A degradação do PLA pode ocorrer de várias formas, como a ação da água, luz solar, micro-organismos e enzimas. A ação da água é a principal forma de degradação do PLA (FENG *et al.*, 2021).

Para Fried (2014), quando expostos ao meio ambiente, os polímeros podem sofrer diversas ações que causam a degradação deste material. Sendo elas:

- Degradação térmica;
- Degradação mecânica;
- Presença de oxigênio e ozônio;
- Ondas eletromagnéticas (radiações gama, radiação ultravioleta, luz visível, próximo infravermelho);
- Ondas de ultrassom;
- Umidade;
- Agentes químicos.

Outro fator que pode causar degradação é o processo de reciclagem, uma vez que este ocorre em altas temperaturas. O processo de reciclagem resulta em uma perda de 20% do peso molecular do PLA, mas a degradação não tem efeitos significativos em outras propriedades, como a estrutura, o grau de cristalinidade e a estabilidade térmica do material, a degradação do PLA ocorre em temperaturas que variam na faixa de 300°C até 400°C (MIKULA *et al.*, 2021).

2.4.4 Diferenças entre PLA e ABS.

Por meio das propriedades de ambos os polímeros citadas nos capítulos anteriores, é possível realizar uma comparação entre o PLA e o ABS. Nesse sentido, observa-se que o PLA, por ser derivado de fontes naturais e renováveis, não causa o mesmo impacto ambiental que o ABS.

Segundo Osejos (2016) algumas vantagens do PLA em relação ao ABS são:

- Não emite gases nocivos ao usuário e ao meio ambiente;
- Maior variedade de cores;
- Menor Temperatura de TG (Temperatura Vítria);
- Maior resistência a tração;
- Menor temperatura de extrusão e da mesa durante a impressão;
- Biodegradável.

2.5 RECICLAGEM DE (PLA)

Segundo Pillin *et al.* (2008) o maior problema na reciclagem do PLA é a instabilidade térmica do material, sendo que a presença de umidade, resíduos de ácido láctico e catalisadores metálicos são elementos que favorecem a degradação térmica do polímero.

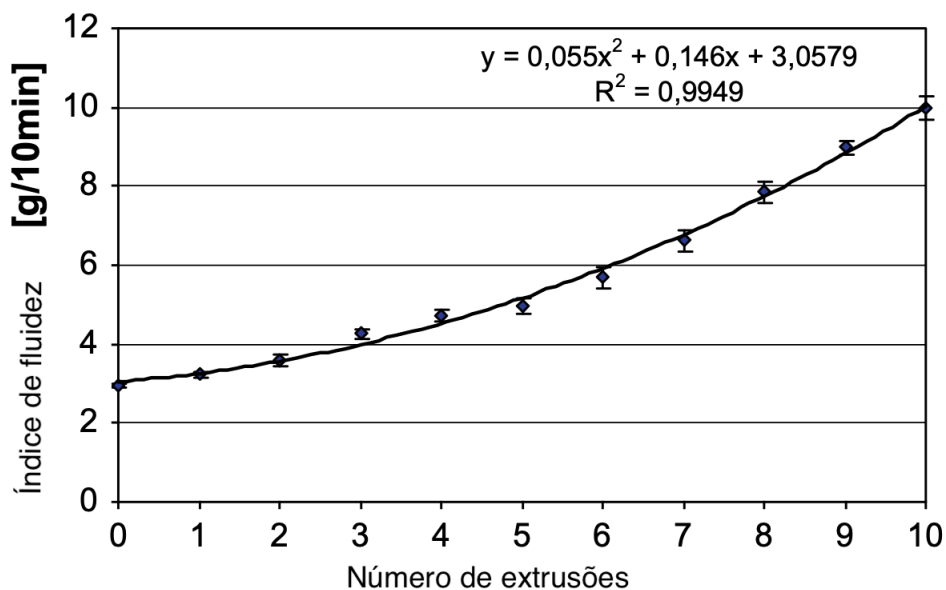
Em estudo realizado por Pillin *et al.* (2008), aonde o PLA foi reprocessado por vários ciclos, concluiu-se que, quando o polímero foi reprocessado em até 7 ciclos de moldagem por injeção, houve uma diminuição em características como tensão e deformação na ruptura, módulo de Young, dureza, bem como nas propriedades reológicas. Os autores atribuíram esses efeitos à degradação do polímero, que após 3 ciclos aumenta em 30% e após 7 ciclos aumenta em 60%, devido à cisão da cadeia durante o processamento, resultando assim em uma diminuição do peso molecular do PLA.

As mudanças nas propriedades dos polímeros ocorrem não só por variações na temperatura, mas também pela quantidade de vezes que o material é extrudado. Usando uma extrusora de duas roscas, em testes realizados com material extrudado 10 vezes, a tensão de tração e a resistência ao impacto diminuíram com o aumento dos ciclos de extrusão, diminuindo também a estabilidade térmica do PLA, mas não havendo alterações na TG (ŻENKIEWICZ *et al.*, 2009).

Assim quanto maior o número de extrusão há um aumento na fluidez do polímero conforme pode ser visto na Figura 6.

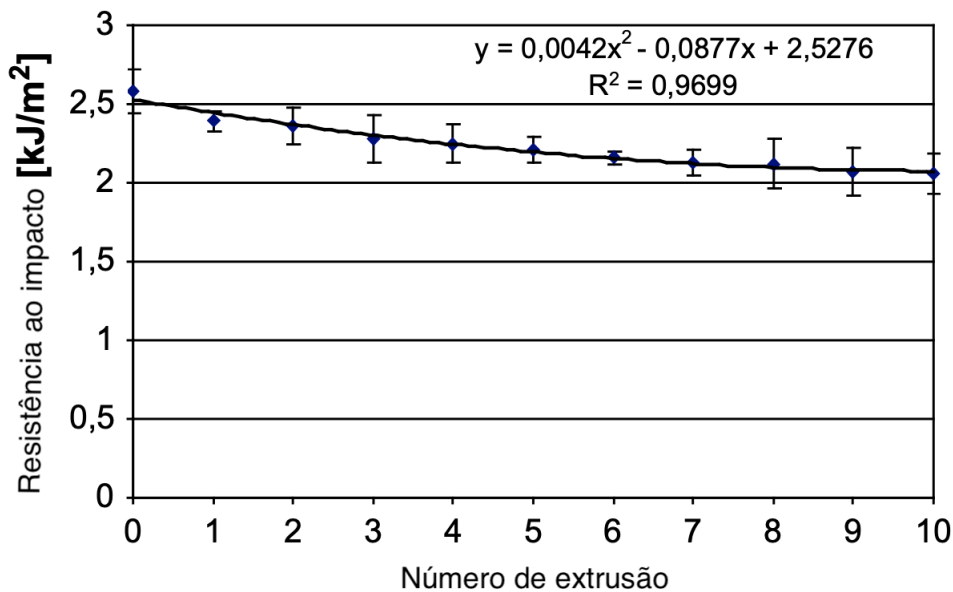
Conforme observado na Figura 7, nota-se que com o aumento do número de extrusões ao qual o material é submetido, ocorre uma diminuição na resistência ao impacto. Segundo Żenkiewicz *et al.* (2009), houve um aumento na transmissão de vapores de água em até 40% e de oxigênio em até 20% conforme foram feitos novos ciclos de extrusão. Já outros autores como Zhao *et al.* (2018) propõem revestir o polímero com uma solução

Figura 6 – Fluxo de fusão



Fonte: Adaptado de Żenkiewicz *et al.* (2009).

Figura 7 – Resistência ao impacto



Fonte: Adaptado de Żenkiewicz *et al.* (2009).

aquosa adesiva de polidopamina para resolver os problemas que causam a redução da resistência mecânica do PLA.

Há poucos estudos realizados sobre os impactos nas propriedades mecânicas devido a reciclagem de materiais poliméricos. Assim Isabelle Anderson (2017) apresenta um estudo sobre os impactos causados pela reciclagem do PLA. O PLA é triturado e extrudado

novamente a fim de realizar uma análise entre o PLA virgem e o PLA reciclado, para isso foram feitos corpos de prova impressos em 3D. Assim após dois ciclos de extrusão e um processo de impressão, o material manteve o mesmo diâmetro e acabamento superficial que o PLA virgem havendo ligeiras deteriorações nas propriedades mecânicas. Foram realizados três testes.

Os ensaios de tração podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de tração ASTM D638-14.

Propriedade	PLA Virgem	PLA Reciclado
Amostras	25	25
Resistência ao escoamento em tração	40.43 MPa	35.85 MPa
Desvio Padrão	1.849	3.348
Módulo de Elasticidade em tração	4258 MPa	4032 MPa
Desvio Padrão	260	498

Fonte: Isabelle Anderson (2017).

Já para os ensaios de cisalhamento o autor apresentou os seguintes dados conforme a Tabela 5. Enquanto ensaios de dureza foram apresentados os dados conforme a Tabela 6

Tabela 5 – Ensaio de Cisalhamento ASTM D732-10.

Propriedade	PLA Virgem	PLA Reciclado
Amostras	31	31
Resistência ao escoamento em Cisalhamento	33.00 MPa	35.25 MPa
Desvio Padrão	0.80	2.40

Fonte: Isabelle Anderson (2017).

Segundo Isabelle Anderson (2017), os resultados obtidos em seu estudo são promissores mas não sem risco, uma vez que há diferenças quando comparado com o PLA virgem. Uma vez que há diferenças entre o PLA virgem e o PLA reciclado, tanto em características térmicas quanto mecânicas, Zhao *et al.* (2018) sugerem a adição de PLA virgem ao PLA reciclado para obter melhores resultados.

Tabela 6 – Ensaio de Dureza - ASTM D 2240.

Propriedade	PLA Virgem	PLA Reciclado
Amostras	32	32
Dureza [Shore D]	84.8	82.8
Desvio Padrão	0.841	2.400

Fonte: Isabelle Anderson (2017).

2.6 PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS

Na indústria de polímeros, há diversas formas de processar esses materiais. Nesta seção, serão abordados os métodos mais comuns, com ênfase no processo de extrusão para o desenvolvimento do projeto de uma extrusora.

2.6.1 Injeção de Plástico

A injeção de polímeros é um dos métodos de processamento de polímeros mais utilizados atualmente, sendo um processo de alta produtividade e que produz peças com bom acabamento. No processo de injeção, é possível fabricar apenas produtos iguais, não havendo versatilidade na produção.

O processo de moldagem por injeção consiste em introduzir a massa moldada do polímero dentro de um molde através de um cilindro aquecido, sendo depositada com o auxílio de um êmbolo que exerce pressão sobre essa massa polimérica (MANO; MENDES, 2004).

A máquina injetora é um sistema capaz de homogeneizar a massa polimérica e injetar o polímero fundido. A rosca é acionada por um sistema que pode ser elétrico, mecânico ou até mesmo pneumático, transportando o material até o molde (MANRICH, 2005).

Segundo Mano e Mendes (2004), o processo de injeção é descontínuo, sendo aplicável a termoplásticos para a obtenção de pequenas peças em curtos ciclos produtivos. É bastante utilizado para a produção de utensílios domésticos, brinquedos e bijuterias.

2.6.2 Sopro

O processo de sopro tem como objetivo obter peças ocas, onde o ar é inserido no interior de uma pré-forma posicionada em um molde (MANO; MENDES, 2004). Assim ao inserir o ar dentro a peça irá tomar a forma do molde.

Segundo o mesmo autor, o processo de moldagem por sopro é amplamente usado na indústria de embalagens, como garrafas plásticas para refrigerantes e frascos para usos gerais.

2.6.3 Termoformagem

O processo de termoformagem consiste em esticar uma lâmina de material termoplástico aquecido sobre um molde e, em seguida, aplicar uma força, que pode ser vácuo ou pressão (PRODUCTIVE PLASTICS, 2021). Este processo utiliza moldes de baixo custo, sendo usado para a fabricação de protótipos industriais, peças de grandes dimensões e artefatos descartáveis. Produz produtos que não têm necessidade de acabamento, como copos, pratos e bandejas de lanchonetes (MANO; MENDES, 2004).

2.6.4 Extrusão

O processo de extrusão é contínuo e consiste em passar a massa polimérica fundida por um molde/matriz com o perfil desejado. O extrudado pode ser enrolado em bobinas, cortado em peças com dimensões especificadas ou cortado em grânulos regulares (MANO; MENDES, 2004).

Segundo Manrich (2005), o componente mais importante de uma extrusora é a rosca, cuja função é transportar, fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. Uma extrusora pode ser de rosca única ou dupla, sendo que a rosca única gera aproximadamente 80% da energia térmica e mecânica necessária para transformar o polímero.

A rosca extrusora possui diversas funções e deve ser projetada para que sua geometria promova máxima eficiência, vazão constante, plastificação e homogeneização adequadas (MANRICH, 2005).

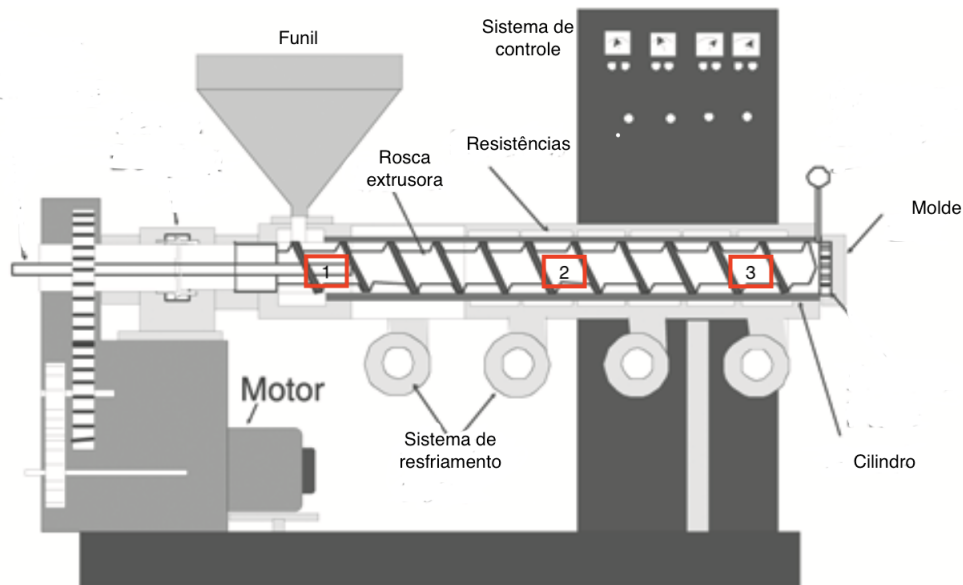
Segundo o mesmo autor, o aquecimento da massa polimérica ocorre através do atrito da massa com as paredes do cilindro e das resistências elétricas acopladas ao cilindro. Assim, o material é levado do funil até a matriz/molde, aumentando a pressão exercida ao longo do cilindro.

As extrusoras de rosca única estão disponíveis em diferentes tamanhos e formas. Componentes como a rosca e o cilindro podem variar para atender às diferentes características do produto a ser produzido. A grande vantagem das extrusoras de rosca única em relação às de rosca dupla é que elas são mecanicamente simples e custam metade do valor de uma extrusora de rosca dupla (IBRAHIM; MOHAMMED; AHMED, 2018). Ao entrar em funcionamento, a rosca transporta o material pelo cilindro, que possui aquecedores para que o material seja fundido e homogeneizado, sendo empurrado para fora através do molde, resultando em um longo filamento que se esfria rapidamente, tornando-se sólido (COMPRADO *et al.*, 2021). A rosca é o componente principal de uma extrusora, é dividida em três partes: 1) zona de alimentação, 2) zona de compressão e 3) zona de vazão, conforme pode ser visto na Figura 8.

Segundo Giles, Wagner e Mount (2013) uma extrusora de rosca única possui cinco componentes principais:

- Sistema de acionamento: Possuindo motor, caixa de engrenagens e mancal;
- Sistema de alimentação: Compreende o funil, a garganta de alimentação e a seção de alimentação da rosca;
- Sistema de rosca, cilindro e aquecimento: Sistema onde a matéria prima é transportada, fundida, misturada e bombeada para o molde;
- Conjunto da matriz: Sistema onde a massa polimérica é forçada, tomando como forma o molde projetado;
- Unidade de controle: Controla todos os sistemas, como aquecimento e acionamento.

Figura 8 – Extrusora de rosca única



Fonte: Adaptado de: Giles, Wagner e Mount (2013).

2.6.5 Sistema de Plastificação

2.6.5.1 Rosca extrusora

Há diversos tipos de roscas para diferentes tipos de materiais. As roscas são colocadas dentro do cilindro e sustentadas pelo mancal (MANRICH, 2005). O cilindro e a rosca têm a função de misturar a matéria-prima fundida, além de gerar pressão para extrudar o polímero através do molde (GOFF; WHELAN, 1988).

Pouco se encontra na literatura sobre roscas extrusoras para PLA. Assim, após pesquisa, foi optado pelo desenvolvimento de uma rosca extrusora para PP (poli-propileno), uma vez que o ponto de fusão de ambos os polímeros é próximo, em torno de 165°C (MANRICH, 2005). Uma rosca extrusora normalmente tem três seções diferentes. Na seção de alimentação, a matéria-prima é transportada para dentro do cilindro. Já na seção de compressão, a área muda de maior, com o material não fundido, para menor, com o material fundido, conforme pode ser visto na Figura 9.

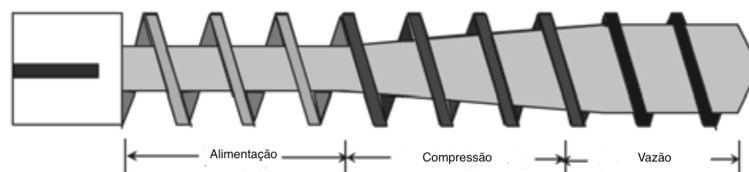
As roscas extrusoras são especificadas com relação ao L (Comprimento da rosca) e o D (Diâmetro da rosca) conforme Equação (1).

$$L/D = \frac{L}{D} \quad (1)$$

A geometria da rosca varia conforme o material fabricado, assim a rosca extrusora para o PP possui quatro seções, onde há uma seção de compressão a mais, conforme pode ser visto na Figura 10.

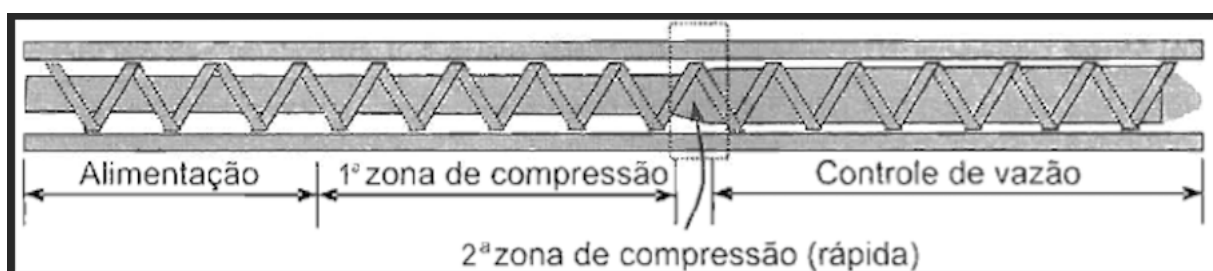
Assim, Manrich (2005) divide-se em quatro seções, e cada seção está atrelada a um

Figura 9 – Estágios da rosca extrusora



Fonte: Adaptado de: Giles, Wagner e Mount (2013).

Figura 10 – Rosca extrusora Para PP



Fonte: Manrich (2005).

valor multiplicado pelo diâmetro, bem como estipula a produção e a velocidade da rosca, conforme pode ser visto na Tabela 7. As razões L/D típicas são 18:1, 20:1, 24:1, 30:1, 36:1 e 40:1, a razão L/D descreve a relação entre o comprimento da rosca e o comprimento do cilindro. A razão L/D está diretamente ligada ao rendimento da extrusora, sendo que uma extrusora com uma razão L/D maior possui maior capacidade de fundir e homogeneizar o polímero a ser extrudado (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013).

Tabela 7 – Geometria da rosca para polipropileno.

Rosca para PP	Zona de alimentação	1ª zona de compressão	2ª zona de compressão	zona de dosagem	Produção estimada Kg/h	Velocidade da rosca (rpm)
Comprimento	3D	8D	1D	12D		
D	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)		
45	8.4	8.4 a 6.3	6.3 a 2.2	2.2	27	120
60	10	10 a 7.6	7.6 a 2.3	2.3	54	120
90	12.7	12.7 a 7.6	7.6 a 3	3	130	100
120	14	14 a 10	10 a 3.3	3.3	280	100

Fonte: Manrich (2005).

Segundo Giles, Wagner e Mount (2013) há extrusoras maiores em que a relação L/D menor possui vantagens, como: serem mais compactas, menor custo e menor custo de peças para manutenção, menor tempo de residência do polímero na extrusora quando processado materiais com maior sensibilidade à temperatura, e menor potência. Ainda segundo o

mesmo autor, quando extrusoras possuem um L/D maior, há um maior rendimento, melhor capacidade de mistura e a extrusora pode bombear a massa fundida a uma pressão maior.

É necessário ter uma folga entre o cilindro e a rosca extrusora para que, durante o processo de extrusão, não haja atrito entre as peças. Ambos os componentes devem ser resistentes à corrosão e ao desgaste (MANRICH, 2005).

Como pode ser visto na Figura 10 a rosca extrusora possui três zonas: alimentação, compressão e dosagem. Segundo Harper (2000) tanto a zona de alimentação quanto a zona de dosagem possuem uma profundidade do canal constante, ao contrário da zona de compressão, em que a profundidade diminui gradativamente, visto que o polímero fundido requer menos volume que o polímero em estado sólido.

Para Harper (2000), a zona de alimentação e a zona de dosagem possuem profundidade constante como também pode ser verificado na Tabela 8, já para a zona de compressão a profundidade vai diminuindo gradativamente uma vez que o polímero fundido requer menos volume do que quando em estado sólido.

A compressão do polímero é quantificada pela CR (Taxa de compressão) como visto na equação (2):

$$CR = \frac{H}{h} \quad (2)$$

Assim temos que: H (Profundidade do canal zona de alimentação) e h (Profundidade do canal zona de vazão).

A taxa de compressão é fundamental para o processamento de diferentes materiais poliméricos. Embora seja desejável ter uma rosca extrusora de propósito geral que possa processar todos os tipos de polímeros com eficiência, na prática isso não acontece devido às diferentes viscosidades dos materiais (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013).

Segundo Harper (2000), as roscas extrusoras têm uma taxa de compressão que pode variar de 1.5:1 até 4.5:1. Conforme (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013), alguns materiais poliméricos trabalham melhor a uma taxa de 2.5:1, enquanto outros com taxas de compressão mais altas como 3.5:1 ou 4:1.

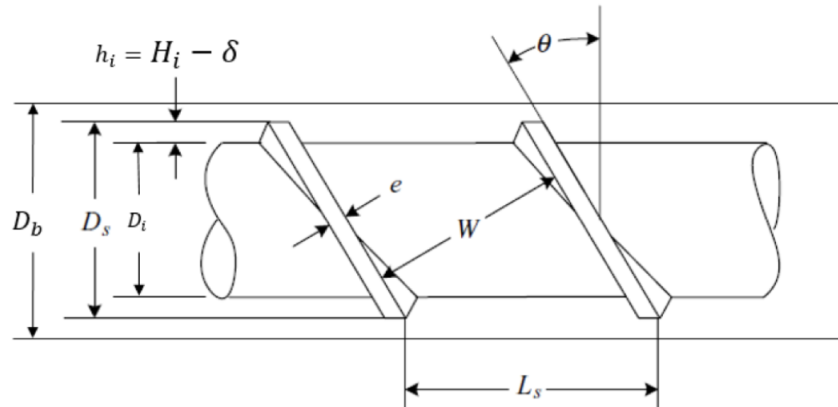
Geometria varia de 20 mm até 750 mm de diâmetro, CR (Taxa de compressão) que varia de 24 até 26 em média, podendo haver extrusoras com valores de CR de até 40 ou baixos variando até 8 (TADMOR, 2006) . Na Figura 11 é apresentada a geometria da rosca.

Conforme ilustrado na 11 observa-se que L_s representa o passo, que é a distância radial entre o centro do filete e o centro do próximo filete (TADMOR, 2006).

O passo da rosca L_s é calculado pela seguinte Equação (3).

$$L_s = \left(\frac{L}{D}\right) \quad (3)$$

Figura 11 – Geometria da rosca extrusora



Fonte: Giles, Wagner e Mount (2013).

Segundo Manrich (2005) a maioria das roscas extrusoras usa a roscas de dosagem quadrada, isto é tanto o passo quando o avanço são iguais ao diâmetro.

O ângulo da hélice é calculado segundo a seguinte fórmula (4).

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{L_s}{\pi D}\right) \quad (4)$$

A largura do filete precisa ser forte o suficiente para evitar lascas ou quebrar, deixando espaço suficiente para o canal processar o polímero, normalmente a largura do filete representa 0.1D (MANRICH, 2005).

A largura do filete pode ser calculada conforme a Fórmula (5).

$$e = (0.1D) \quad (5)$$

A largura do canal W é a distância perpendicular entre os filete (TADMOR, 2006). Sendo calculada pela seguinte Fórmula (6).

$$W = (L_s \cos(\phi) - e) \quad (6)$$

Segundo Giles, Wagner e Mount (2013), a folga entre a rosca e o cilindro é pequena sendo considerado para extrusoras de pequeno porte 0,025 calculado pela Fórmula (7), para determinar a folga é preciso levar em consideração o diâmetro da rosca ao invés de ter valores fixos.

$$\delta = (0.025 \cdot D_s) \quad (7)$$

Como forma de avaliação o cálculo da vazão mássica empírico pode ser calculado conforme a equação (8) (RAO; SCHOTT, 2012).

$$G = 60 \cdot \rho \cdot N \cdot \eta f \cdot \pi^2 \cdot H_i \cdot D \cdot (D - H_i) \cdot \frac{W}{W + e} \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{cos}(\phi) \quad (8)$$

Onde:

- G: vazão mássica (kg/h);
- ρ : densidade (kg/m^3);
- N: rotação angular (rpm);
- ηf : eficiência de transporte .

2.6.5.2 Cilindro ou barril

O cilindro ou barril pode ser fabricado com diversos tipos de aços, mas características como desgaste, corrosão e pressão de trabalho são fatores que precisam ser levados em conta na escolha do material. As pressões dentro de um cilindro de extrusão podem chegar à ordem de 75 MPa (MANRICH, 2005). Segundo Giles, Wagner e Mount (2013), a alta pressão gerada durante o processo de extrusão pode ser muito perigosa, e dispositivos de segurança devem ser considerados no momento do projeto.

O conjunto cilindro/rosca é o componente que mais sofre desgaste, sendo que a zona de compressão é o local que mais sofre desgaste devido às maiores pressões e à presença do material ainda sólido. Já a zona de alimentação é o segundo local onde mais há desgaste, visto que o material ainda está em estado sólido, mas com baixas pressões (MANRICH, 2005).

Os aquecedores e os sensores termopares são acoplados ao longo do cilindro para assim controlar a temperatura em cada zona. Em uma extrusora, podem ser colocados até três conjuntos de aquecedores e termopares (MANRICH, 2005).

Ao analisarmos a Figura 11, observa-se que o diâmetro interno do cilindro é dado pela Fórmula (9).

$$D_b = D_s + 2 \cdot \delta \quad (9)$$

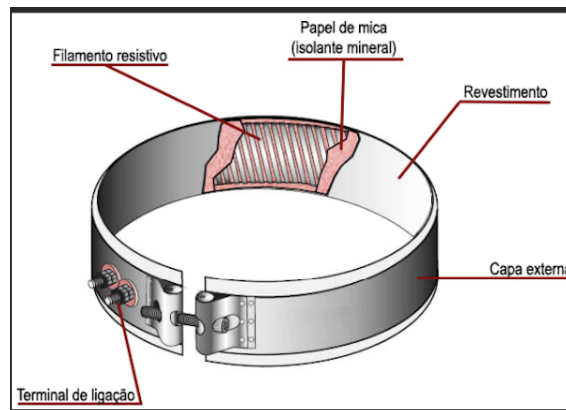
Onde D_s é o diâmetro da rosca e δ é a folga entre a rosca e o cilindro determinada pela Equação (7)

2.6.5.3 Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento em uma extrusora é composto por resistências elétricas responsáveis por aquecer o cilindro e fornecer energia suficiente para a plastificação do material. Segundo Giles, Wagner e Mount (2013) temos três tipos de resistências disponíveis para aquecer extrusoras: mica, cerâmica e embutida. Essas resistências precisam cobrir o máximo possível do cilindro. Ainda segundo o mesmo autor, extrusoras grandes normalmente utilizam aquecedores do tipo embutido, enquanto para extrusoras pequenas

são comumente usadas resistências do tipo mica ou cerâmica. A Figura 12 ilustra uma resistência do tipo coleira.

Figura 12 – Resistência do tipo coleira mica



Fonte: Adaptado de RESISTEN (2024).

Cada zona de aquecimento de uma extrusora tem pelo menos um aquecedor/resistência, podendo possuir mais do que apenas um. A temperatura é obtida com o auxílio de sensores termopar, comunicando ao controlador se a temperatura está dentro do estipulado para que ações sejam tomadas (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013).

Com o intuito de manter uma temperatura constante, também podem ser instalados sistemas de resfriamento no cilindro. Para Giles, Wagner e Mount (2013) tanto água quanto ar podem ser usados para resfriar o cilindro, sendo a água a melhor forma de controlar a temperatura. O autor também cita como vantagem a água, pois não há liberação de ar quente no ambiente de extrusão. O sistema de resfriamento do cilindro pode ser visto na Figura.13.

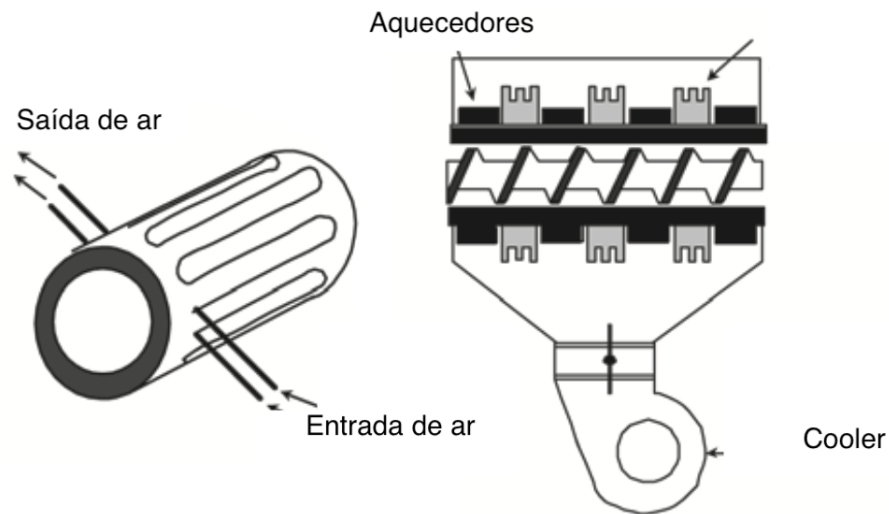
2.6.6 Sistema de alimentação

A alimentação da matéria-prima no processo de extrusão ocorre com o auxílio da gravidade, onde a matéria-prima é depositada em um funil. Os pellets de matéria-prima são em forma granulada, não havendo maiores problemas para fluir, ao contrário de outras partículas ou pós. (HARPER, 2000).

O funil é colocado diretamente na garganta de alimentação da extrusora, sendo a garganta de alimentação acoplada diretamente ao cilindro. Esta seção deve estar quente ao toque, mas não muito quente a ponto de derreter o material. Um sistema de refrigeração pode ser usado para manter a temperatura constante nessa seção (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013).

Alguns fabricantes incorporam nos funis sistemas para a desumidificação dos grânulos para extrair a umidade durante o processamento (ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Donald V.; ROSATO, M. G., 2020).

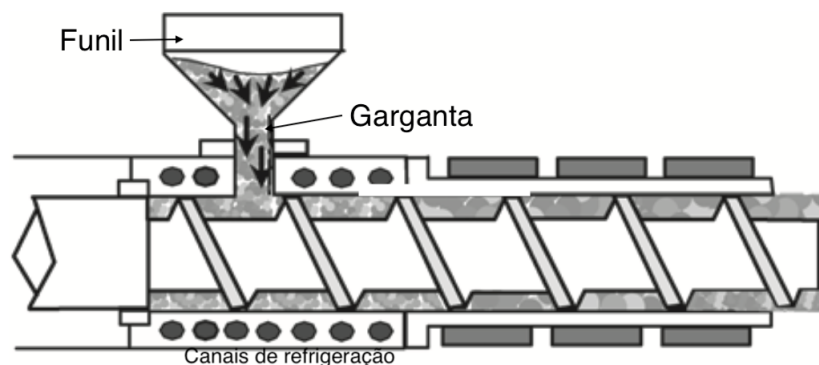
Figura 13 – Sistema de refrigeração a ar e a água



Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount (2013).

A geometria do sistema de alimentação pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Sistema de alimentação de uma extrusora



Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount (2013).

2.6.7 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento de uma extrusora é composto por três elementos principais: um motor elétrico, uma caixa de redução e um mancal axial.

O motor da extrusora tem a função de girar a rosca extrusora, maximizando a velocidade que pode variar de 50 até 150 rpm, e manter um torque constante (HARPER, 2000).

Segundo Harper (2000) o escolher o motor, há três fatores que devem ser analisados: a variação da velocidade, a presença ou não de escovas e o custo.

A potência requerida (P), em watts, é necessária para transportar o polímero do estado sólido na zona de alimentação até o estado fundido e extrudá-lo a uma vazão mássica (m) em kg/h, conforme descrito por (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013) é dada por Equação (10).

$$P = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot \Delta H}{3.6} \quad (10)$$

Onde temos:

- C_p é o calor específico, em kJ/kg.K;
- ΔT é a diferença de temperatura do polímero que entra no funil até ser extrudado, em K;
- ΔH é o calor latente de fusão do polímero, em kJ/kg.

Segundo Rauwendaal (2013), o cálculo do torque necessário é realizado através da relação entre torque, frequência angular e potência, conforme Equação (11):

$$P = T \cdot \omega \quad (11)$$

Onde ω , é a rotação da rosca em radianos por segundo. Assim temos que torque gerado na rosca em N.m é obtido através da Equação (12):

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (12)$$

No entanto, há perdas que precisam ser levadas em consideração, como as perdas de calor para o ambiente, as perdas do motor e do sistema de transmissão. De acordo com Rauwendaal (2013), a eficiência total de uma extrusora, que leva em conta todos esses fatores, é aproximadamente 75%.

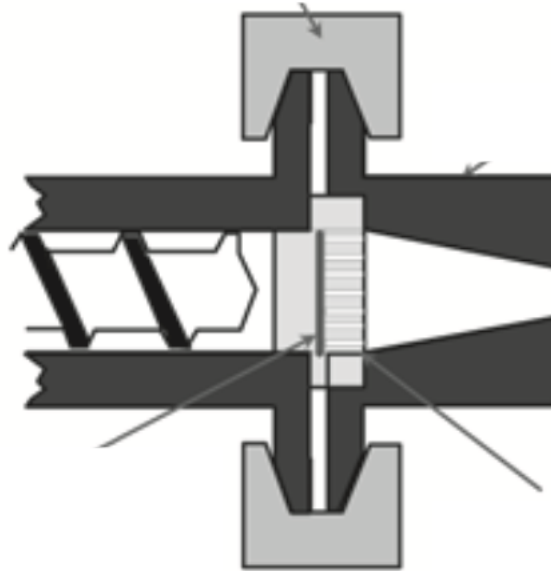
2.6.8 Molde/Matriz

As matrizes são utilizadas em praticamente todos os tipos de processos no processamento de polímeros. Estrategicamente construídas em blocos ou chapas metálicas, as matrizes são locais onde a massa polimérica fundida passa, tomando a forma do objeto esperado (MANRICH, 2005).

A Matriz é acoplada diretamente na extrusora ou através de um adaptador conectado na extrusora e sua função é moldar na forma e nas tolerâncias desejadas, assegurando as propriedades físicas do material e a qualidade superficial (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013). Além de gerar o molde, a matriz tem função de gerar um gradiente de pressão ao longo da rosca (MANRICH, 2005).

Um exemplo de Molde pode ser visto na Figura 15:

Figura 15 – Molde/Matriz



Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount (2013).

2.7 SISTEMA DE CONTROLE

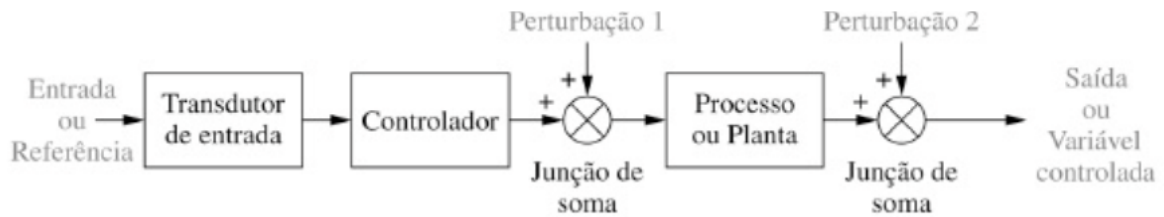
O controle consiste em medir, determinar se algo no processo precisa ser alterado, tomar decisões e agir. Assim, se o sistema está em equilíbrio, a decisão é de que tudo está operando conforme o esperado e nada precisa ser modificado (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013). O controle de um sistema consiste em subsistemas ou processos (plantas) cujo objetivo é obter uma saída desejada com o desempenho desejado, dado uma entrada especificada (NISE, 2013).

No sistema de malha aberta, existe um subsistema denominado transdutor de entrada, cuja função é converter a forma de entrada para um formato utilizado pelo controlador que ativa um processo ou planta. A entrada é frequentemente chamada de referência, enquanto a saída é conhecida como variável controlada. Ao contrário do sistema de malha fechada, o sistema de malha aberta não realiza correções e é apenas comandado pela entrada (NISE, 2013). O sistema de malha aberta pode ser analisado pela Figura 16.

Os sistemas de malha fechada possuem a capacidade de superar os efeitos causados por perturbações no sistema. Nesse caso, a saída do sistema é medida e o sistema é realimentado por meio de uma malha de realimentação que é comparada com a entrada do sistema (NISE, 2013). O sistema de malha fechada pode ser observado na Figura 17.

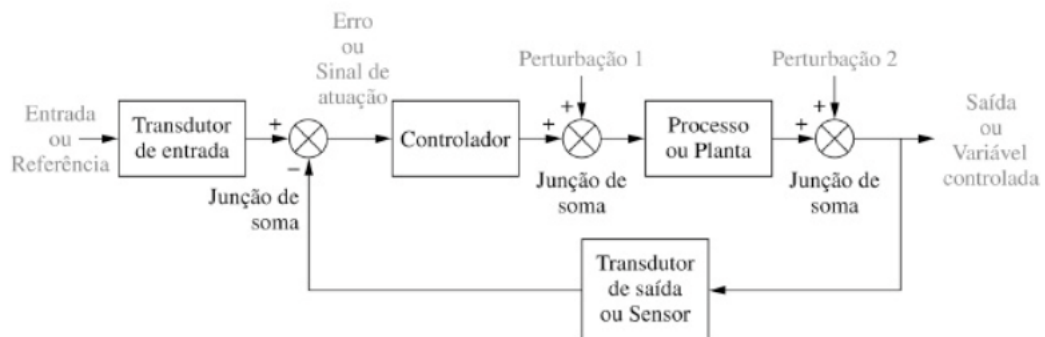
A diferentes formas de controladores, sendo os principais:

Figura 16 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: sistema em malha aberta



Fonte: Nise (2013).

Figura 17 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: sistema em malha fechada



Fonte: textcitebook14.

- Controlador ON-OFF (Liga-Desliga);
- Controlador Proporcional (P);
- Controlador Integral (I);
- Controlador Proporcional + Integral (PI);
- Controlador Proporcional + Derivativo (PD);
- Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID);

Segundo Giles, Wagner e Mount (2013), o modelo de controlador que é atualmente usado em extrusoras é o controlador do tipo PID.

2.7.1 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

O PID (Controlador Proporcional + Integral + Derivativo) é um controlador genérico de feedback, vastamente difundido na indústria (POORANI; ANAND, 2013).

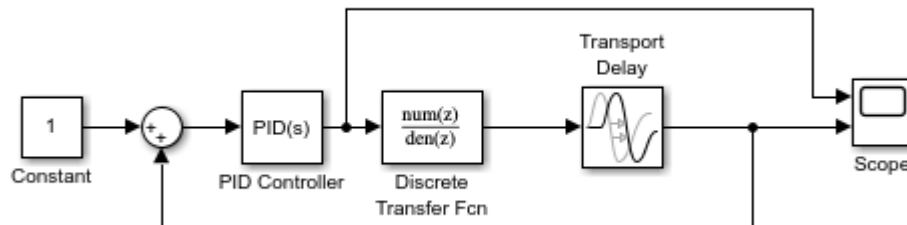
O controlador PID é a combinação dos controladores P + I + D, a parte derivativa adiciona mais estabilidade ao controle compensando rapidamente as mudanças de condições (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013). A equação do controlador PID se da pela fórmula (13).

$$u = Kp e(t) + Ki \int e dt + Kd \frac{de}{dt} \quad (13)$$

Nesse contexto, temos que Kp é o ganho Proporcional, Ki é o ganho Integral e Kd é o ganho derivativo. Portanto, as incógnitas são os ganhos que precisam ser determinados para que o desempenho do sistema seja otimizado.

A arquitetura de um PID é concebida para eliminar o erro de estado estacionário, ou seja, para reduzir a diferença entre o valor esperado e o valor real obtido. Ela busca uma resposta dinâmica eficaz, proporcionando maior estabilidade ao sistema e compensando rapidamente as perturbações (NISE, 2013). O diagrama de blocos do controlador PID pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Topologia da malha de controle de temperatura



Fonte: Autor (2024).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento de uma extrusora de pequeno porte para uso laboratorial, detalhando o projeto mecânico, elétrico e eletrônico, além do controle de temperatura. A partir do que foi desenvolvido, serão extraídas peças com dimensões finais, ou seja, filamentos para impressão.

3.1 PROJETO MECÂNICO

Segundo Collins, Busby e Staab (2006), o projeto mecânico é definido como um processo iterativo de tomada de decisão, cujo objetivo é a criação e a otimização de um novo ou aprimorado sistema ou equipamento que visa atender a uma necessidade ou desejo do ser humano.

O desenvolvimento dos componentes mecânicos da extrusora seguiu as etapas propostas por Giles, Wagner e Mount (2013) e Manrich (2005). A abordagem utilizada neste projeto é a abordagem bottom-up, onde os subsistemas são desenvolvidos com o objetivo de formar um sistema final, neste caso, a extrusora.

3.1.1 Dimensionamento da Rosca Extrusora

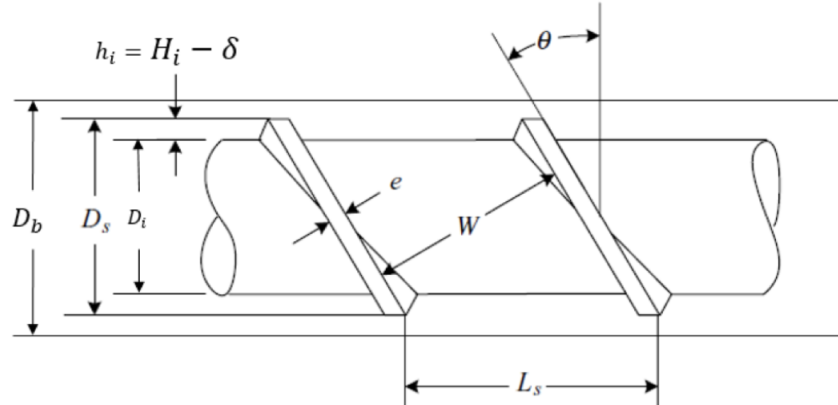
A rosca extrusora é um dos componentes principais de uma extrusora, exercendo funções primordiais no processo, desde o transporte até a plastificação do polímero. O seu projeto deve visar a máxima eficiência, vazão constante, homogeneização e plastificação adequadas.

As especificações de uma rosca dependem do polímero a ser processado e de características como o diâmetro do parafuso, a razão L/D , a taxa de compressão, a profundidade do filete na zona de alimentação ou na zona de dosagem, o número de filetes, a razão de comprimento de cada zona, o ângulo de hélice e a folga entre o parafuso e o barril, que precisam ser calculadas. Essas características podem ser vistas na Figura 19, onde:

- D_b é o diâmetro do barril mm;
- D_s é o diâmetro externo da rosca mm;
- D_i é o diâmetro interno do parafuso mm;
- δ é a folga entre a rosca e o barril mm;
- W é a largura do canal mm;
- h_i é a profundidade do canal na zona de alimentação mm;
- H_i é a folga ente a raiz na zona de alimentação e a parede externa do tubo mm;
- ϕ é o ângulo de hélice ($^\circ$);
- e é a espessura do filete mm;

- L_s é o comprimento do passo da rosca mm;

Figura 19 – Dimensões da rosca



Fonte: Tadmor (2006).

Para o projeto da rosca extrusora, foi definido que será usada uma rosca de característica quadrada, conforme visto na seção (2.7.1.2), utilizando um diâmetro externo (D_s) de 25 mm e a relação L/D de 24:1. A opção de utilização de rosca com 25 mm, fora tomada devido a facilidade de obtenção de tubos com o diâmetro interno com essa dimensão, também por ficar robusto, facilitando a inserção de outros componentes acoplados no tubo, como as resistências, termopares e flanges. Resolvendo a Equação 1, tem-se:

$$L = \frac{L}{D} \cdot D \Rightarrow L = \frac{24}{1} \cdot 25 = 600mm \quad (14)$$

Uma vez encontrado o comprimento (L), e juntamente com o diâmetro (D), é possível calcular o passo (L_s) conforme (GILES; WAGNER; MOUNT, 2013) tem-se a Equação (15).

$$L_s = \frac{L}{D} \Rightarrow L_s = \frac{600}{25} = 24mm \quad (15)$$

Dessa forma, obtém-se um comprimento de rosca de 600 mm. Uma vez que a rosca é quadrada, conforme Giles, Wagner e Mount (2013), o passo da rosca (L_s) é igual ao diâmetro D_s . Com base nesse fator, é possível calcular o ângulo de hélice usando a Equação (4).

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\pi} \right) \quad (16)$$

$$\phi = 17.66^\circ \quad (17)$$

Já a altura h , varia conforme as zonas da rosca extrusora. Segundo Giles, Wagner e Mount (2013) a a largura do filete é calculada conforme a Equação (5).

$$e = (0.1D) \quad (18)$$

$$e = (0.1 \cdot 25) \quad (19)$$

$$e = 2.5mm \quad (20)$$

A largura do canal (W) é a distância perpendicular do canal da rosca, como pode ser visto na Figura 19. Para encontrar a largura do canal, utiliza-se a Equação (6).

$$W = (Lscos(\phi) - e) \quad (21)$$

$$W = (25cos(17.66^\circ) - 2.5) \quad (22)$$

$$W = 21.32mm \quad (23)$$

A folga entre a rosca é calculado pela Equação (7), com isso podemos encontrar o valor da folga entre a rosca e o cilindro:

$$\delta = (0.025 \cdot 25) \quad (24)$$

$$\delta = 0.625mm \quad (25)$$

Após obter o comprimento, é possível calcular as dimensões das zonas da rosca extrusora com base na Tabela 7. Considerando que a zona de alimentação é equivalente a 3 vezes o diâmetro, a primeira zona de compressão corresponde a 8 vezes o diâmetro, a segunda zona de compressão é equivalente a 1 vez o diâmetro, e a zona de compressão totaliza 8 vezes o diâmetro da rosca. Assim, obtêm-se os seguintes valores conforme a Tabela 8:

Tabela 8 – Geometria da rosca.

Rosca para PP	Zona de alimentação	1ª zona de compressão	2ª zona de compressão	zona de dosagem	Produção estimada Kg/h	Velocidade da rosca (rpm)
Comprimento	75	200	25	300		
D	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)		
25	4.2	4.2 a 2.8	2.8 a 2.1	2.1	1.5051	20

Fonte: Adaptado de: Manrich (2005).

Fazendo o uso da Equação (2), podemos calcular a taxa de compressão:

$$CR = \frac{H}{h} \quad (26)$$

$$CR = \frac{4.2}{2.1} \quad (27)$$

$$CR = 2 : 1 \quad (28)$$

Segundo Póvoa (2022), a faixa de velocidade de extrusão do PLA varia entre 20 e 100 rpm. Como forma de avaliar a rosca extrusora segundo Rao e Schott (2012) é possível calcular a vazão mássica empírica através da Equação (8).

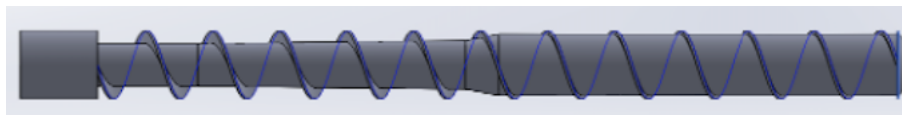
Onde temos:

- $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$;
- $N = 20$ e 100 rpm;
- $H_i = 4.2$ mm;
- $\phi = 17.66^\circ$;
- $e = 2.5$ mm;
- $W = 21.32$;
- $D = 25$ mm;
- $\eta = 0.25$.

Após os cálculos conforme o apêndice I temos que a vazão mássica mínima sendo 1.5058 kg/h e a vazão mássica máxima sendo 7.5290 kg/h. Encontrado o valor da vazão mássica da extrusora projetada, será possível fazer uma comparação com outros modelos disponíveis no mercado.

Conforme a Tabela 9, encontram-se as variáveis necessárias para, com o auxílio de um software CAD, desenhar a rosca extrusora, como mostrado na Figura 20. As dimensões das zonas de alimentação, compressão e dosagem podem ser vistas na Tabela 8.

Figura 20 – Rosca Extrusora



Fonte: Autor,(2024).

3.1.2 Dimensionamento do Cilindro

O diâmetro interno do cilindro pode ser encontrado através da Equação (9) onde temos:

$$D_b = D_s + 2 \cdot \delta \quad (29)$$

Tabela 9 – Variáveis calculadas da rosca.

Variáveis calculadas	
Diâmetro da Rosca (Ds)	25 mm
Comprimento útil da broca (L)	600 mm
Passo (Ls)	25 mm
Ângulo de hélice	17.66°
Largura do filete	2.5 mm
Largura do canal	21.32 mm
Folga entre a rosca e o cilindro	0.625 mm
Taxa de compressão	2:1
Vazão mássica mínima	1.5058 kg/h
Vazão mássica máxima	7.5290 kg/h

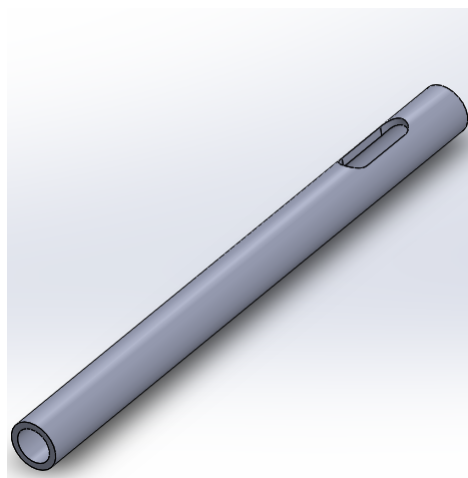
Fonte: Autor, (2024).

$$D_b = 25 + 2 \cdot 0.625 \quad (30)$$

$$D_b = 26.25mm \quad (31)$$

O cilindro é proveniente de material reciclado em boas condições, que esteja dentro das especificações do diâmetro interno (D_b). Em virtude das delimitações deste cilindro, o dimensionamento do projeto foi realizado com base em suas dimensões. Após a definição do diâmetro interno, pode ser feito o desenho em software CAD, conforme mostrado na Figura 21. assim como as características de onde o funil e o molde serão acoplados.

Figura 21 – Cilindro



Fonte: Autor, (2024).

3.1.3 Sistema de Aquecimento

As resistências elétricas, conforme pode ser visto na Figura 22 têm a função de manter e regular a temperatura ao longo do processo de extrusão. Ao longo do cilindro, são acopladas resistências do tipo mica.

Figura 22 – Resistência Coleira Mica



Fonte: Autor, (2024).

Assim, para o projeto, foi definido o uso de 2 coleiras de mica revestidas em inox. A resistência possui diâmetro externo de 40 mm, diâmetro interno de 35 mm e um comprimento de 100 mm. A tensão é de 220 volts e a potência é de 350 watts. A temperatura máxima da resistência atinge 300 °C, estando dentro dos parâmetros de temperatura estabelecidos para o PLA.

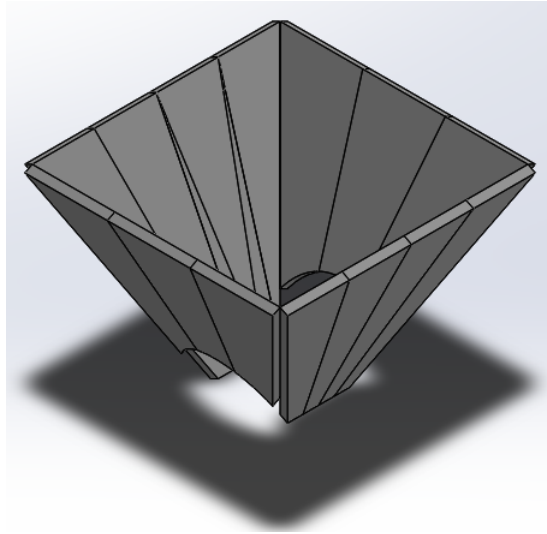
A primeira resistência tem a função de pré-aquecer o material, sendo colocada nas proximidades da zona de alimentação da rosca extrusora, enquanto a segunda é utilizada para o processo de extrusão.

3.1.4 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é composto por um funil acoplado ao cilindro da extrusora. O cilindro possui uma abertura circular na parte superior, medindo 25 mm de diâmetro, para o acoplamento do funil, que será acoplado à extrusora.

O funil foi desenvolvido em forma cilíndrica, com um diâmetro externo de 200 mm. O cilindro possui uma altura de 200 mm. O funil pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Desenho do Funil



Fonte: Autor, (2024).

3.1.5 Sistema de Acionamento

Conforme visto na seção 2.7.3, a escolha do motor partirá do cálculo da potência e do torque exigidos. Segundo Farah, Daniel G. Anderson e Langer (2016), o calor específico (C_p) do PLA, próximo à sua temperatura de transição vítrea, é de 1,59 kJ/kg°C. O calor latente de fusão do PLA é de aproximadamente 93.6 kJ/kg (RONG ZE; ISMAIL; CHOW, 2016).

Considerando uma variação de temperatura entre 55 até 190 °C e usando as Equações (10),(11),(15) podemos então estimar as características do motor.

Fazendo o uso da Equação (10) para calcular a potência requerida tem-se:

$$P_{max} = \frac{7.5253 \cdot 1.59 \cdot 190 - 55 + 7.5253 \cdot 93.6}{3600} \quad (32)$$

$$P_{max} = 0.6444kW \quad (33)$$

Uma vez que o torque do motor é máximo quando operado em velocidades de rotação baixas, a potência é novamente calculada para os parâmetros em que a velocidade mínima de operação é determinada, podendo então calcular a potência necessária conforme a Equação (10).

$$P_{min} = \frac{1.5058 \cdot 1.59 \cdot 190 - 55 + 1.5058 \cdot 93.6}{3600} \quad (34)$$

$$P_{min} = 128.900W \quad (35)$$

O próximo passo é calcular o torque atenuado da rosca, assumindo uma rotação de 20 rpm, com base na Equação (15).

$$T = \frac{0.1289}{2 \cdot \pi \cdot 20} \quad (36)$$

$$T = 1.0258 N.m \quad (37)$$

Segundo Rauwendaal (2013) a eficiência total do processo é de aproximadamente 75%, assim temos que:

$$T_s = 1.0258 \cdot 0.75 \quad (38)$$

$$T = 0.7693 N.m \quad (39)$$

Após os cálculos, prossegue-se com a análise dos tipos de motores disponíveis que se encaixam nas características calculadas. Uma vez que o torque necessário é de aproximadamente 7,845 kgf.cm, após a análise, e considerando que a Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau, por meio do Laboratório de Expressão Gráfica, disponibiliza os motores Nema 23, optou-se por utilizá-los no projeto. Os motores Nema 23 foram escolhidos devido ao seu alto torque e baixo ruído, possuindo um passo de 1,8 graus e um torque de 20 kgf.cm, mais do que suficiente para o projeto. Além disso, o motor possui uma velocidade máxima de 600 rpm e uma temperatura de operação de 80 °C (TECMAF, 2024).

3.1.6 Molde/Matriz

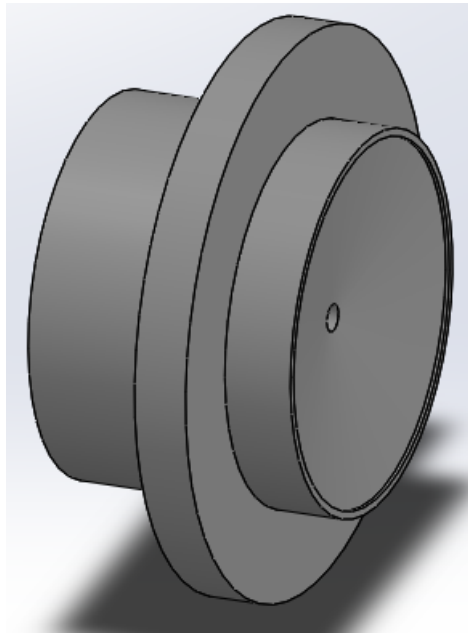
O molde, juntamente com a rosca extrusora e o cilindro, é um componente fundamental do processo de extrusão. Ele é projetado conforme as necessidades e usabilidade, podendo possuir diversos formatos, como tubos, canos, perfis.

Os filamentos de impressoras 3D possuem um molde no formato de perfil, sendo este na forma de fio. O diâmetro do filamento extrudado é de 1,75 mm. Segundo Andrade *et al.* (2020), uma impressora 3D aceita uma variação média na espessura do filamento de aproximadamente 5%.

O molde projetado possui um diâmetro de extrusão de 1,75 mm. Uma vez que a extrusora é destinada exclusivamente à produção de filamentos para impressão 3D, não há necessidade de projetar outros tipos de moldes.

A conexão entre o cilindro e o molde foi feita através de encaixe por pressão, uma vez que não será necessária a troca de moldes. O desenho realizado em software CAD pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Desenho do Molde



Fonte: Autor, (2024).

3.1.7 Lista de Componentes

Nesta seção será apresentado os componentes para o projeto conforme a Tabela 10, onde tem-se a descrição dos materiais para o projetado e para o projeto com as adaptações necessárias.

Material (Projetado)	Quantidade	Material (Adaptado)	Quantidade
Resistência coleira Mica 45x45 mm	3	Resistência coleira Mica 30x100 mm	2
Termopar tipo K	3	Termopar tipo K	2
Controlador PID	3	Controlador PID	2
Motor nema 23	1	Motor nema 23	1
Arduíno Mega	1	Arduíno Mega	1
Rosca extrusora	1	Broca	1
Fonte 24V	1	Fonte 24V	1
Driver DM556	1	Driver DM556	1
Relé de estado sólido	3	Relé de estado sólido	2
Flange	2	Flange	2
Chapa de alumínio 40x40 mm	1	Chapa de alumínio 40x40 mm	1
Cilindro 25 x 600 mm	1	Cilindro 25 x 600 mm	1
Molde	1	Molde	1

Tabela 10 – Lista de materiais

3.1.8 Montagem dos Componentes Mecânicos

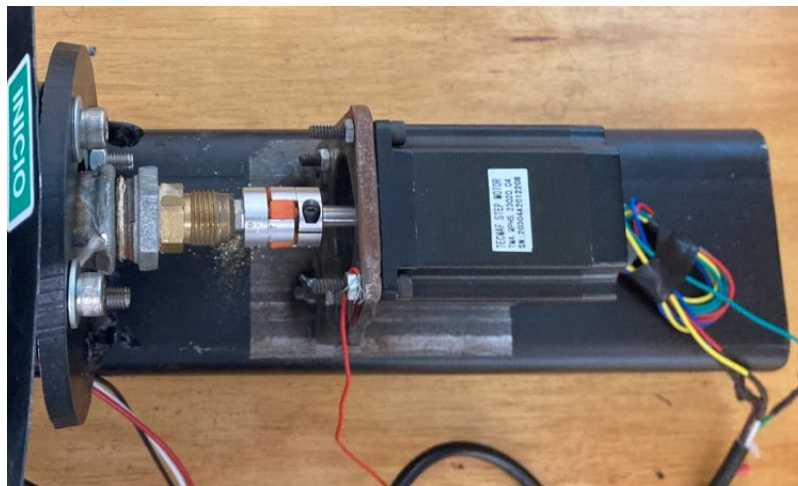
Após a conclusão do projeto mecânico, a próxima etapa consiste em montar cada componente. O molde foi acoplado ao cilindro por meio de uma prensa hidráulica e soldado

em uma flange. Na outra extremidade do cilindro, há o canal de alimentação, onde o funil é acoplado juntamente com outra flange, a fim de ser instalado em um suporte, onde será realizada a junção do sistema de alimentação com o sistema de acionamento.

Foi realizada uma pré-montagem dos componentes para o alinhamento do motor; após esse processo, todos os componentes foram acoplados em suas posições finais.

Na Figura 25, observa-se o acoplamento do cilindro com o sistema de acionamento, de modo que a rosca extrusora é conectada ao motor para realizar o transporte da matéria-prima a ser extrudada.

Figura 25 – Montagem do Cilindro com o Sistema de Acionamento



Fonte: Autor, (2024).

A montagem dos demais elementos, como o molde, as resistências elétricas e o sistema de alimentação, onde a matéria-prima começa a ser aquecida para ser fundida e transportada até o molde, pode ser vista na Figura 26.

Figura 26 – Montagem Cilindro, Molde e Sistema de alimentação



Fonte: Autor, (2024).

Por fim, a montagem final do projeto, onde todos os componentes mecânicos e elétricos/eletrônicos podem ser vistos, está ilustrada na Figura 27.

Figura 27 – Montagem Final



Fonte: Autor, (2024).

3.2 PROJETO ELÉTRICO E ELETRÔNICO

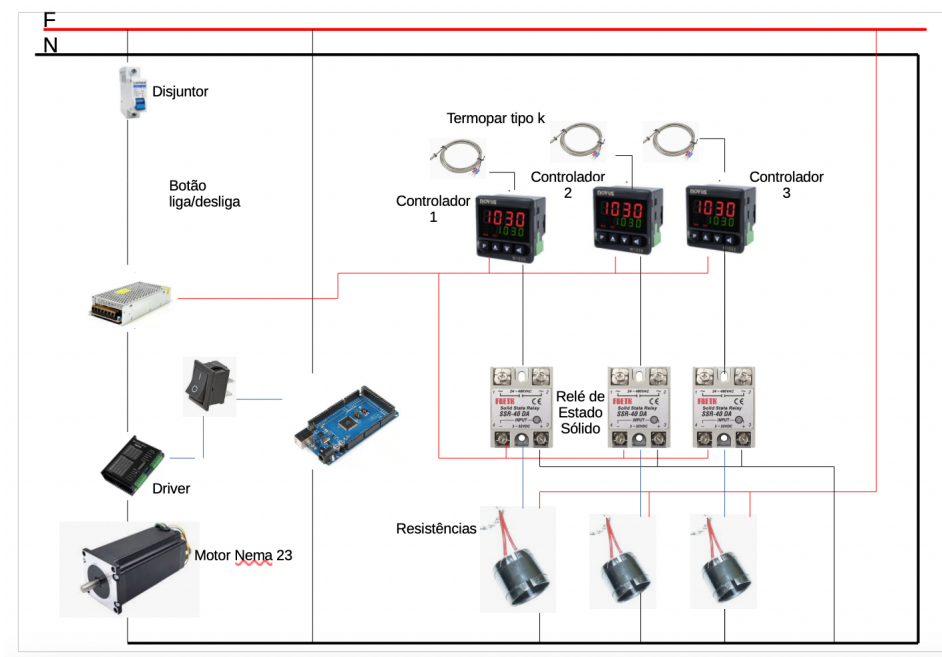
O projeto elétrico tem função de atuar três etapas do processo de extrusão: os sistemas de acionamento, controle e aquecimento, conforme observado na Figura 28.

A tensão da rede elétrica é de 220 volts, destinada a alimentar uma fonte que fornece 24 volts para os sistemas de acionamento, controle e aquecimento. O motor é ativado por meio de um microcontrolador alimentado por uma fonte externa de 5 volts. A medição da temperatura é realizada por sensores termopar do tipo K, com base na medição o microcontrolador aciona o relé que liga e desliga as resistências, aquecendo assim o cilindro e, conseqüentemente, o material a ser extrudado.

Uma vez realizadas as adaptações no projeto, o projeto elétrico também foi ajustado para a nova realidade, a qual será discutida em momento oportuno.

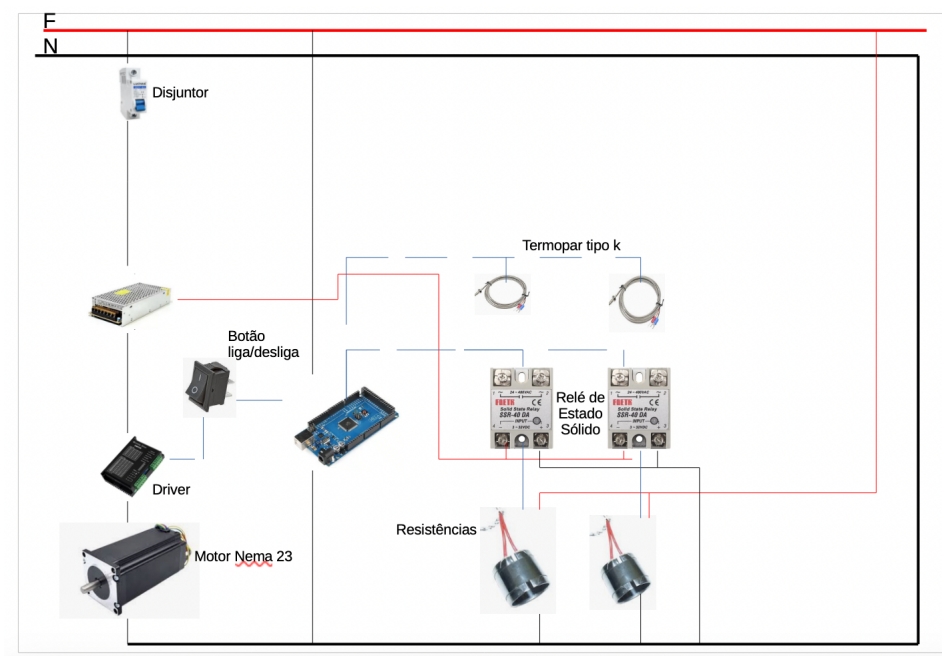
O microcontrolador será responsável pelo controle de temperatura de duas resistências. A medição da temperatura será feita por termopares do tipo K, cuja leitura será processada por um módulo Max 6675. O diagrama elétrico adaptado pode ser visto na figura Figura 29.

Figura 28 – Diagrama elétrico



Fonte: Autor, (2024).

Figura 29 – Diagrama elétrico adaptado

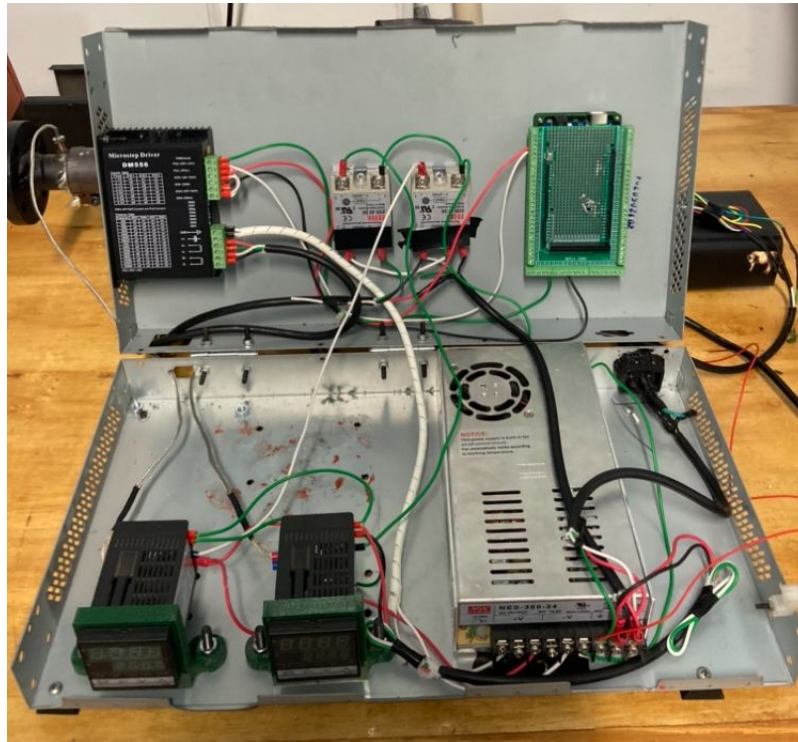


Fonte: Autor, (2024).

3.2.1 Montagem dos Componentes Eletrônicos

Após a elaboração do diagrama elétrico, conforme apresentado na Figura 30, a próxima etapa consiste na montagem dos componentes eletrônicos e elétricos. A montagem dos componentes eletrônicos, incluindo a fonte de alimentação, o driver do motor, os relés de estado sólido e o microcontrolador, pode ser analisada na Figura 30.

Figura 30 – Montagem dos Componentes eletrônicos



Fonte: Autor, (2024).

3.3 CONTROLE DA TEMPERATURA

A planta do sistema foi obtida através da resposta ao degrau do sistema. Os dados foram coletados com o auxílio do microcontrolador, no qual uma potência de 35% da capacidade da resistência foi aplicada. Para a coleta dos dados, foi estabelecido um tempo de amostragem de 1 segundo.

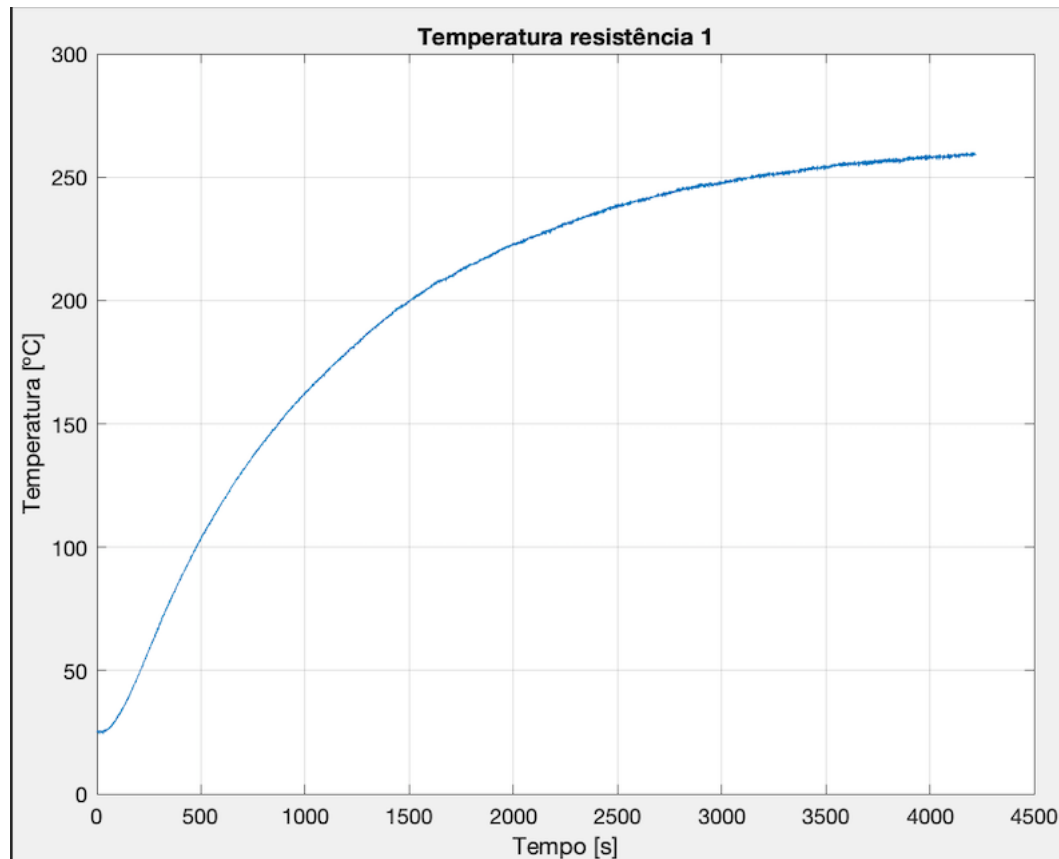
Após a coleta de dados, com o auxílio do software Matlab, foi possível obter a resposta do sistema para ambas as resistências, conforme pode ser analisado nas Figura 31 e 32.

Ao analisar os dados coletados, verifica-se que a planta do sistema pode ser estimada a partir de um sistema de primeira ordem, conforme a Equação (40).

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (40)$$

No entanto, um sistema térmico possui um atraso na resposta. Após análise de ambas as respostas, conforme observado nas Figuras 31 e 32, o sistema apresenta um atraso no tempo de resposta da ordem de 50 segundos. Portanto, o sistema real será aproximado por um sistema de primeira ordem com atraso no tempo, conforme a Equação (41).

Figura 31 – Resposta ao degrau de 35% da potência da resistência 1



Fonte: Autor, (2024).

$$H(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (41)$$

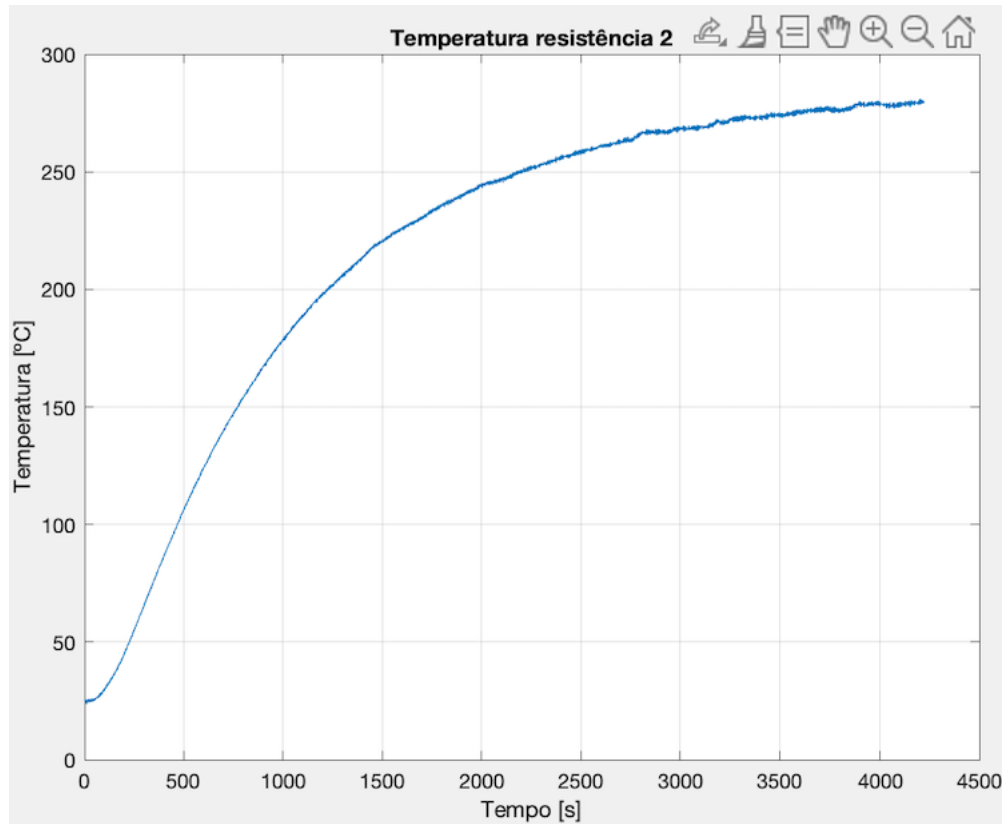
O ganho do sistema é definido pelo parâmetro K , que indica a variação do sistema em função de uma entrada do tipo degrau. O parâmetro τ define a constante de tempo; quanto maior for essa constante, mais lenta será a resposta do sistema. Por outro lado, o parâmetro θ representa o atraso do sistema quando uma entrada é aplicada.

Ganho do sistema é calculado pela Equação (42):

$$K = \frac{T_0 - T_f}{U_f} \quad (42)$$

Segundo Ogata (2002), a constante de tempo é o tempo em que a resposta do sistema vai de 0 até 63,2% do valor final.

Figura 32 – Resposta ao degrau de 35% da potência da resistência 2



Fonte: Autor, (2024).

A partir da análise dos dados obtidos para ambas as resistências, tem-se:

$$T_0 = 25^{\circ}C; T_{1f} = 259^{\circ}C; U_{1f} = 220 \cdot 0.35; t_{163.2\%} = 1027s; t_0 = 50s$$

$$T_{20} = 25^{\circ}C; T_{2f} = 280^{\circ}C; U_{2f} = 220 \cdot 0.35; t_{263.2\%} = 987s$$

Onde T_0 é a temperatura inicial, T_f é a temperatura final, U_f representa a entrada do sistema, onde foi utilizada apenas 35% da potência da resistência e $t_{63.2\%}$ representa a constante de tempo do sistema.

$$K_1 = \frac{260 - 25}{(220 - 0) \cdot 0.35} = 3.0519^{\circ}C/V \quad (43)$$

$$K_2 = \frac{280 - 25}{(220 - 0) \cdot 0.35} = 3.3117^{\circ}C/V \quad (44)$$

$$\tau_1 = t_{163.2\%} - t_0 \quad (45)$$

$$\tau_1 = 1024 - 50 = 977s \quad (46)$$

$$\tau_2 = t_2 63.2\% - t_0 \quad (47)$$

$$\tau_2 = 987 - 50 = 937s \quad (48)$$

Tendo todos os parâmetros encontrados, é possível substituí-los na Equação (41), obtendo assim:

$$H_1(s) = \frac{3.0519e^{-50s}}{977s + 1} \quad (49)$$

$$H_2(s) = \frac{3.3117e^{-50s}}{937s + 1} \quad (50)$$

Obtendo as plantas $H_1(s)$ e $H_2(s)$ na forma mônica tem-se:

$$H_1(s) = \frac{0.003430e^{-50s}}{s + 0.001024} \quad (51)$$

$$H_2(s) = \frac{0.003534e^{-50s}}{s + 0.001067} \quad (52)$$

Uma vez encontradas as plantas do sistema, o próximo passo é projetar o controlador. Como requisito de controle, foi especificado que o sobressinal não ultrapasse 20% uma vez que as resistências possuem uma temperatura máxima de 300 °C, e que o erro em regime permanente seja o menor possível. Para que isso ocorra, deve-se utilizar um controlador do tipo PI, uma vez que ao calcular o Kd, obtém-se um valor igual a zero.

Para encontrar os valores das variáveis Kp e Ki, é necessário fechar a malha do sistema relacionada ao controlador do tipo PI, obtendo assim as seguintes funções:

$$U(s) = \frac{Kps \cdot Ki}{s} \cdot H(s) \quad (53)$$

$$U_1(s) = \frac{3,430 \cdot 10^{-3}Kp + 3,430 \cdot 10^{-3}Ki}{s^2 + (1,024 \cdot 10^{-3} + 3,430 \cdot 10^{-3}Kp) + 3,430 \cdot 10^{-3}Ki} \quad (54)$$

$$U_2(s) = \frac{3,534 \cdot 10^{-3}Kp + 3,534 \cdot 10^{-3}Ki}{s^2 + (1,067 \cdot 10^{-3} + 3,530 \cdot 10^{-3}Kp) + 3,430 \cdot 10^{-3}Ki} \quad (55)$$

Definida as funções gerais nas Equação (54) e Equação (55) é possível determinar os valores ideais de Kp e Ki. É necessário calcular o tempo de assentamento de malha fechada para 5%. Com base nesse valor, calcula-se o polo desejado e, em seguida, o polinômio desejado. Foi escolhido um tempo de assentamento de 600 segundos; com isso, é possível calcular o polo desejado.

Foi escolhido um tempo de assentamento de 600 segundos; com isso, é possível calcular o polo desejado.

$$T_5 = \frac{4.8}{pd} \quad (56)$$

$$pd = \frac{4.8}{600} = 8 \cdot 10^{-3} \quad (57)$$

$$pd(s) = (s + pd)^2 \quad (58)$$

$$pd(s) = s^2 + 16 \cdot 10^{-3}s + 0.064 \cdot 10^{-3} \quad (59)$$

Calculado o polinômio desejado, é possível igualá-lo ao polinômio de $U(s)$ e, assim, encontrar os valores de K_p e K_i .

Cálculo dos parâmetros K_p e K_i para $U_1(s)$:

$$s^2 + 16 \cdot 10^{-3}s + 0.064 \cdot 10^{-3} = s^2 + (1,024 \cdot 10^{-3} + 3,430 \cdot 10^{-3}K_p)s + 3,430K_i \quad (60)$$

$$3,430 \cdot 10^{-3}K_i = 0.064 \cdot 10^{-3} \quad (61)$$

$$K_i = 18,66 \cdot 10^{-3} \quad (62)$$

$$1,024 \cdot 10^{-3} + 3,430 \cdot 10^{-3}K_p = 16 \cdot 10^{-3} \quad (63)$$

$$K_p = 4.37 \quad (64)$$

Cálculo dos parâmetros K_p e K_i para $U_2(s)$:

$$s^2 + 16 \cdot 10^{-3}s + 0.064 \cdot 10^{-3} = s^2 + (1,067 \cdot 10^{-3} + 3,534 \cdot 10^{-3}K_p)s + 3,534 \cdot 10^{-3}K_i \quad (65)$$

$$3,534 \cdot 10^{-3}K_i = 0.064 \cdot 10^{-3} \quad (66)$$

$$K_i = 18,20 \cdot 10^{-3} \quad (67)$$

$$1,067 \cdot 10^{-3} + 3,534 \cdot 10^{-3}K_p = 16 \cdot 10^{-3} \quad (68)$$

$$K_p = 4.22 \quad (69)$$

Substituindo os valores de Kp e Ki calculados em U1(s) e U2(s), para obter a função de transferência do controlador.

$$U_1(s) = \frac{3,430 \cdot 10^{-3} \cdot 4,37s + 3,430 \cdot 10^{-3} \cdot 18,66 \cdot 10^{-3}}{s^2 + (1,024 \cdot 10^{-3} + 3,430 \cdot 10^{-3} \cdot 4,37)s + 3,430 \cdot 10^{-3} \cdot 18,66 \cdot 10^{-3}} \quad (70)$$

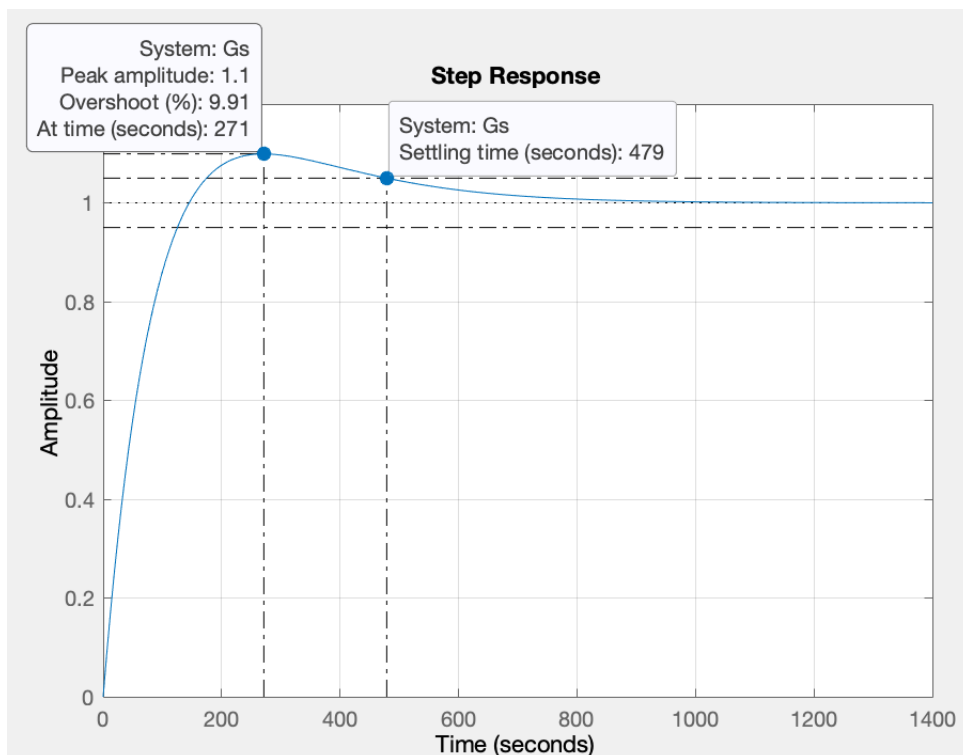
$$U_1(s) = \frac{14,91 \cdot 10^{-3}s + 0,06379 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 16,01 \cdot 10^{-3}s + 0,06379 \cdot 10^{-3}} \quad (71)$$

$$U_2(s) = \frac{3,534 \cdot 10^{-3} \cdot 4,22s + 3,534 \cdot 10^{-3} \cdot 18,20 \cdot 10^{-3}}{s^2 + (1,067 \cdot 10^{-3} + 3,430422 \cdot 10^{-3})s + 3,4530 \cdot 10^{-3} \cdot 18,20 \cdot 10^{-3}} \quad (72)$$

$$U_2(s) = \frac{14,91 \cdot 10^{-3}s + 0,06413 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 15,96 \cdot 10^{-3}s + 0,06413 \cdot 10^{-3}} \quad (73)$$

Utilizando funções do Matlab, simulou-se uma função do tipo step para analisar o controlador projetado, conforme pode ser observado nas Figuras Figura 33 e Figura 35.

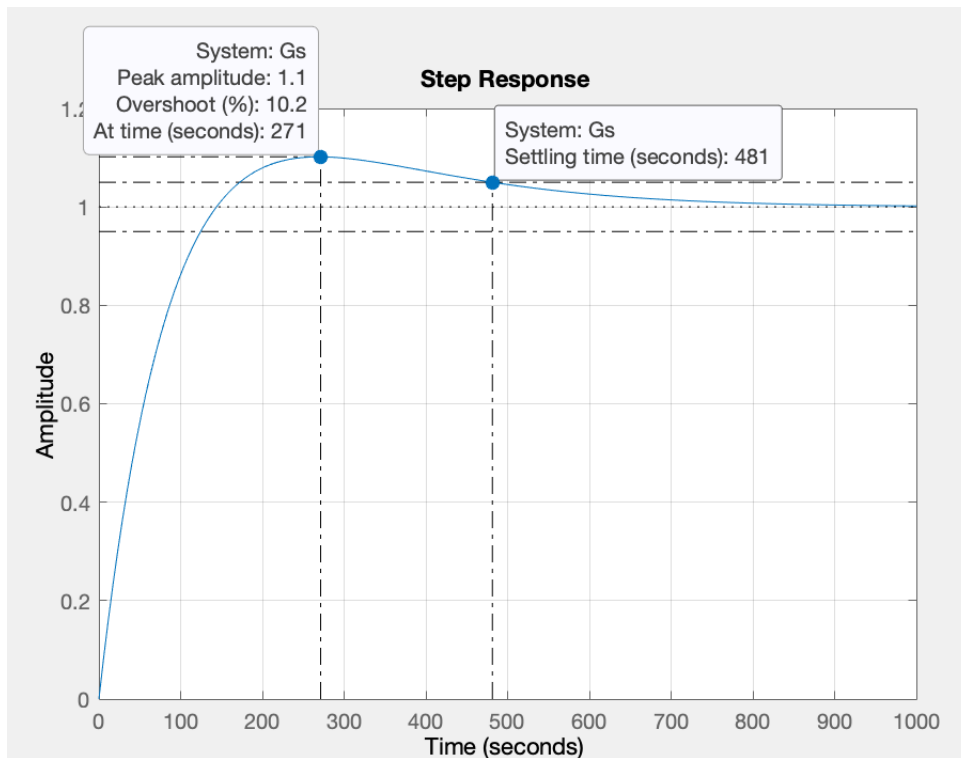
Figura 33 – Resposta ao degrau do controlador U1(s)



Fonte: Autor, (2024).

Ao analisar as respostas de ambos os controladores, nota-se que os requisitos do sistema são atendidos, uma vez que não apresentam um sobressinal maior que 20% e possuem um tempo de assentamento de até 600 segundos.

Figura 34 – Resposta ao degrau do controlador U2(s)



Fonte: Autor, (2024).

Por meio da aplicação Simulink no Matlab, é possível simular o sistema de controle PI. Inicialmente, o sistema é simulado com os valores ideais de K_p e K_i calculados, verificando-se que o sistema se comporta de forma oscilatória. Portanto, torna-se necessário um ajuste fino manual nos parâmetros de K_p e K_i .

Após a realização dos ajustes temos que :

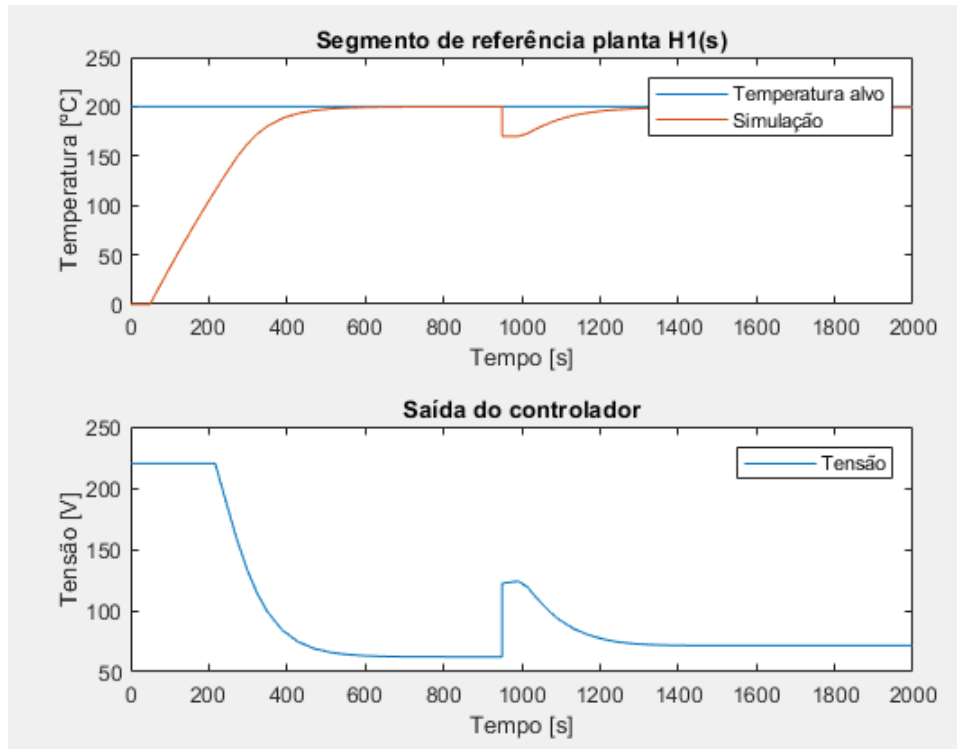
$$K_{i1} = 0.0015 \quad (74)$$

$$K_{i2} = 0.0020 \quad (75)$$

$$K_p = 2 \quad (76)$$

As Figura 35 e Figura 36 mostram a ação do controlador, mantendo-se estável após atingir a temperatura desejada. Na simulação, foram definidas temperaturas desejadas de 200 °C e 80 °C, respectivamente. Para testar o desempenho do controlador e verificar se ele atinge os objetivos, uma perturbação do tipo degrau foi simulada quando a simulação alcançou $t = 950$ segundos. Conforme observado, o controlador entra em ação e leva o sistema à estabilidade com erro em regime permanente nulo, validando assim o projeto do controlador.

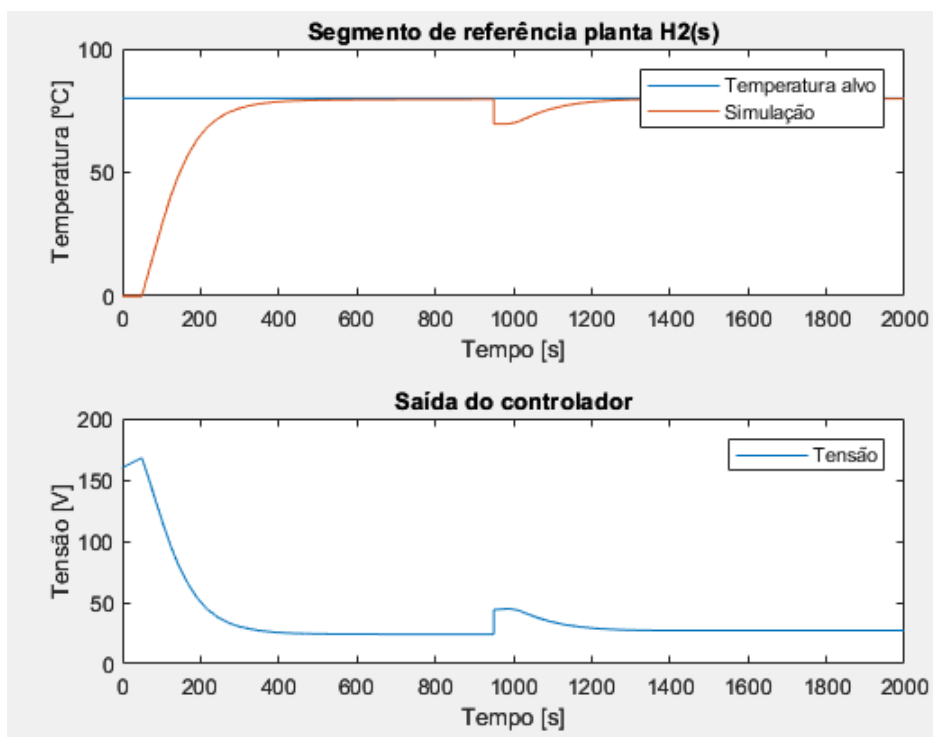
Figura 35 – Resposta do modelo simulado planta H1(s)



Fonte: Autor, (2024).

Após os testes realizados em software, a implementação do controlador não foi realizada, uma vez que problemas na parte elétrica exigiram a substituição do microcontrolador por PID industrial, este que com, onde o relé é ligado e desligado, dessa forma tornando um controle on-off. Este controlador geralmente é tratado como PID.

Figura 36 – Resposta do modelo simulado planta H2(s)



Fonte: Autor, (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As atividades desenvolvidas durante este projeto introduziram uma contextualização do processo de manufatura aditiva, bem como sua utilização nos processos de impressão 3D. Foi realizada uma revisão de literatura sobre materiais poliméricos, incluindo sua classificação, comportamento térmico, processamento e reaproveitamento através do reprocessamento.

A revisão de literatura sobre o processo de extrusão de materiais poliméricos fundamenta a tomada de decisões e o desenvolvimento do projeto, resultando posteriormente na construção do protótipo, conforme ilustrado na Figura 27.

4.1 ADAPTAÇÕES REALIZADAS

Devido ao fato de o projeto da extrusora ser de baixo custo, voltado para a experimentação em laboratório e a reciclagem de polímeros, foram necessárias algumas adaptações.

4.1.1 Dependência da rosca extrusora

Para isso, foram procurados meios de fabricar a rosca nos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau. Constatou-se que os laboratórios não eram adequados para essa fabricação. Não sendo possível a fabricação nas dependências da universidade, buscaram-se empresas no Rio Grande do Sul, São Paulo e Santa Catarina. Apenas uma empresa se dispôs a realizar o projeto, com um orçamento de R\$ 25.820,14, valor que foge do escopo do projeto, conforme pode ser visto no Anexo A. A solução encontrada foi a adaptação de uma broca de construção para substituir a rosca extrusora, sendo sua utilização parcialmente satisfatória, uma vez que a diferenças significativas ao processo como o diâmetro constante e ângulo de hélice de aproximadamente 25° , conforme pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Broca de construção utilizada no projeto



Fonte: Autor, (2024).

4.1.2 Projeto elétrico/eletrônico

O projeto de uma extrusora inclui quatro zonas de aquecimento, resultando em quatro controladores de temperatura. Inicialmente, controladores PID industriais seriam usados para esse processo. No entanto, devido ao objetivo de manter o custo baixo, o projeto elétrico foi adaptado, a solução foi isolar as resistências e substituir os módulos por dois controladores PID industriais. As alterações realizadas foram satisfatórias, com o controle de temperatura das resistências ocorrendo conforme o projetado.

4.2 TESTES DE EXTRUSÃO

Com o protótipo pronto, foi possível iniciar os testes com PLA proveniente de peças defeituosas oriundas da MA. O tamanho médio dos grânulos PLA para o processo de extrusão é do tamanho de um grão de arroz. Esses resíduos foram quebrados e processados em um moinho de facas para reduzir seu tamanho em aproximadamente um décimo do tamanho médio, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – PLA moído



Fonte: Autor, (2024).

Com o material pronto, iniciou-se o processo de extrusão aquecendo as resistências a 200 °C para a resistência próxima ao molde e 100 °C para a resistência próxima à zona de alimentação. Ao adicionar o material, observou-se que grânulos um pouco maiores causavam travamentos na máquina. Inicialmente, a temperatura da resistência próxima à zona de alimentação foi aumentada para 190 °C, a fim de que o polímero começasse a se fundir mais cedo.

Durante os testes, observou-se que o material acabava se degradando no interior do cilindro, o que, juntamente com os travamentos ocorridos, impossibilitou a produção de um filamento. O material era extrudado de forma não contínua, em gotas e respingos, que às vezes jorravam pelo molde. O material já solidificado na mesa pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – PLA degradado solidificado



Fonte: Autor, (2024).

Como forma de ajustar o processo e tentar produzir filamento, foram realizadas mudanças na velocidade do motor e na temperatura das resistências. Nos experimentos, a temperatura da resistência próxima ao molde foi diminuída, enquanto a temperatura da resistência na zona de alimentação foi aumentada, buscando uma mistura homogênea da matéria-prima. Esses ajustes conseguiram produzir uma mistura homogênea do polímero. No entanto, devido à falta de torque no motor, a rosca extrusora não conseguiu transportar o material, resultando na retração do mesmo, conforme pode ser observado na Figura 40.

Devido às adaptações feitas no projeto, como a rosca extrusora apresentou-se parcialmente satisfatória, em uma análise mais profunda, verificou-se: que a folga entre o cilindro e a rosca é maior do que a projetada; a rosca possui diâmetro uniforme ao passo que a projetada é escalonada. Essas modificações influenciaram diretamente no deslocamento do material e sua retração, o que fez com que o motor utilizado não fosse capaz de gerar a pressão necessária para que o material realizasse a plastificação adequada, comprometendo assim a produção do filamento.

Figura 40 – PLA retraído na zona de alimentação



Fonte: Autor, (2024).

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

O controlador PID projetado não pôde ser testado fisicamente devido aos problemas elétricos enfrentados e à substituição dos módulos max6675 por controladores PID industriais, o que impossibilitou a confirmação de seu funcionamento, sendo seus resultados aferidos apenas por simulação.

4.4 TRABALHOS FUTUROS

O protótipo, em seu estado atual, é um projeto com potencial para aprimoramento em trabalhos futuros. Como continuidade deste projeto, podem ser elencadas as seguintes pesquisas:

- Avaliação e substituição do motor atual por um motor de maior potência;
- Estudo sobre a ação da gravidade e como ela pode auxiliar no processo de extrusão com rosca extrusora adaptada;
- Analisar a possibilidade de construção do equipamento com rosca extrusora e cilindro de acordo com a literatura;
- Analisar o comportamento da extrusora com outros materiais como o ABS;
- Fazer estudos sobre o comportamento dos materiais poliméricos reprocessados, testes de tração, cisalhamento e dureza conforme a norma ASTM;
- Avaliação do comportamento da extrusão com rosca dupla.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma extrusora de rosca única voltada para a fabricação de filamento de PLA para impressão 3D, com ênfase na análise do material e dos aspectos mecânicos envolvidos. Através da realização dos objetivos específicos, que incluíam o projeto em software CAD, a implementação de um controlador de temperatura PID e a fabricação do protótipo, foram possíveis importantes avanços e aprendizagens no processo.

A construção do protótipo foi um marco significativo deste projeto. No entanto, a execução enfrentou desafios substanciais, principalmente relacionados à adequação e funcionalidade dos componentes. As adaptações necessárias, como o uso de uma broca de construção como substituto parcial para a rosca extrusora e a adaptação do projeto elétrico para manter os custos baixos, influenciaram o desempenho do equipamento de forma inesperada.

Os testes de extrusão revelaram dificuldades técnicas, incluindo a degradação do PLA e a incapacidade do motor para gerar o torque necessário devido às inadequações na rosca e no controle de temperatura. As variações no design da rosca e as limitações do motor foram identificadas como causas principais para a produção irregular do filamento, manifestando-se em problemas como travamentos e material extrudado em gotas.

Apesar das limitações encontradas, o projeto proporcionou uma rica experiência prática e teórica. A revisão da literatura sobre a extrusão e o processamento de polímeros contribuiu para uma compreensão mais profunda dos requisitos técnicos e desafios envolvidos. As soluções experimentadas durante o desenvolvimento, incluindo ajustes na temperatura e na velocidade do motor, possibilitaram avanços na produção de uma mistura homogênea do PLA, ainda que não tenham resolvido todos os problemas identificados.

Conclui-se que, embora o protótipo desenvolvido não tenha atingido o desempenho ideal esperado, as experiências e aprendizados adquiridos são valiosos para futuras melhorias. As dificuldades enfrentadas ressaltam a importância de um design robusto e de testes rigorosos, além de uma consideração cuidadosa das adaptações necessárias para manter a viabilidade econômica e técnica do projeto. Recomenda-se a continuidade das investigações e a realização de ajustes adicionais na rosca extrusora e no sistema de controle para alcançar uma extrusora mais eficiente e funcional.

REFERÊNCIAS

ALVARO, Julie. **Resina ABS: Acrilonitrila Butadieno Estireno As Características, Fórmula, História e Onde é Aplicado o Plástico ABS**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/acrilonitrila-butadieno-estireno-abs-caracteristicas-e-mais-informacoes/>. Acesso em: 30 jan. 2024.

ANDERSON, Isabelle. Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 4, n. 2, p. 110–115, 2017.

ANDRADE, Diego; VASCONCELOS DE BARROS FERRAZ, Thiago; FORMIGA, André; BONACIN, Juliano. Construção de equipamento de baixo custo para enrolar filamentos de impressoras 3D. **Química Nova**, v. 43, abr. 2020.

BELLIS, Mary. **A History of Nylon**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/wallace-carothers-history-of-nylon-1992197>. Acesso em: 26 mar. 2024.

BIKAS, Harry; STAVROPOULOS, Panagiotis; CHRYSSOLOURIS, George. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, jul. 2015.

CALISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais Uma Introdução**. [S.l.]: LTC Editora, 2012. ISBN 978-85-216-2124-9.

CANEVAROLO, Sebastião. **Ciência dos Polímeros—Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros**. [S.l.: s.n.], jan. 2010. ISBN 85-88098-10-5.

COLLINS, Jack A.; BUSBY, Henry; STAAB, George. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção da Falha**. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2006. ISBN 978-8521614753.

COMPRADO, Christian Dale B.; DIÑO, Justin A.; MATEO, Francis Rafael P.; SALAZAR, Paul Michael H.; MANUEL, Mark Christian E.; CRUZ, Jennifer C. Dela; VERDADERO, Marvin S. Fabrication, Testing and Statistical Analysis of a Project-Based Single-Screw Filament Extruder. *In: 2021 IEEE International Conference on Automatic Control Intelligent Systems (I2CACIS)*. [S.l.: s.n.], 2021. P. 247–252.

CULMONE, Costanza; SMIT, Gerwin; BREEDVELD, Paul. Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 461–473, 2019. ISSN 2214-8604.

DE PAOLI, Marco A. **DEGRADAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE POLÍMEROS**. [S.l.: s.n.], jan. 2009. ISBN 978-8588098442.

FADEYIBI, Adeshina; OSUNDE, Zinash; GBABO, Agidi; EGWIM, Evans. Design of single screw extruder for homogenizing bulk solids. **Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal**, v. 18, p. 222–231, dez. 2016.

FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel G.; LANGER, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review). **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367–392, dez. 2016.

FENG, Pei; JIA, Jiye; LIU, Mingyang; PENG, Shuping; ZHAO, Zhenyu; SHUAI, Cijun. Degradation mechanisms and acceleration strategies of poly (lactic acid) scaffold for bone regeneration. **Materials Design**, v. 210, p. 110066, 2021. ISSN 0264-1275.

FRIED, Joel. **Polymer Science and Technology**. [S.l.]: Pearson, 2014. ISBN 978-0137039555.

GARLOTTA, Donald. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, p. 63–84, abr. 2001.

GILES, H.F.; WAGNER, J.R.; MOUNT, E.M. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. [S.l.]: Elsevier Science, 2013. (Plastics Design Library). ISBN 9781437734829.

GOFF, John; WHELAN, Tony. **Dynisco extrusion processors handbook**. [S.l.]: Dynisco Inc, 1988.

GOMES, João; WILTGEN, Filipe. AVANÇOS NA MANUFATURA ADITIVA EM METAIS: TÉCNICAS, MATERIAIS E MÁQUINAS ADVANCES IN ADDITIVE MANUFACTURING IN METALS: TECHNIQUES, MATERIALS AND MACHINES. **Revista Tecnologia**, v. 41, abr. 2020.

GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 1, jun. 2020.

GREGOR-SVETEC, Diana. Polymers in printing filaments. *In: [S.l.: s.n.]*, jan. 2022. P. 155–269. ISBN 9780128183113.

HAMAD, Kotiba; KASEEM, Mosab; DERI, Fawaz. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, p. 2801–2812, 2013.

HARPER, Charles A. **Modern Plastics Handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000.

IBRAHIM, Salha E. M.; MOHAMMED, Magdi A. O.; AHMED, Yousif E. E. Single Screw Extruder Design Calculations using MatLab and Visual Basic. *In: 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*. [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–5.

IZDEBSKA-PODSIADŁY, Joanna. Polymers in printing filaments. **POLYMERS FOR 3D PRINTING METHODS, PROPERTIES, AND CHARACTERISTICS**, 2022.

KOPSACHEILIS, Charalampos; CHARALAMPOUS, Paschalis; KOSTAVELIS, Ioannis; TZOVARAS, Dimitrios. In Situ Visual Quality Control in 3D Printing. *In: p. 317–324*.

LINKE, Rebecca. **Additive manufacturing, explained**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>. Acesso em: 2 abr. 2024.

LOBO, Hubert; BONILLA, Jose V. **Handbook of Plastics Analysis**. [S.l.]: CRC Press, 2003. ISBN 978-0824707088.

LU, Jiamin. Polymer Materials in Daily Life: Classification, Applications, and Future Prospects. **International Conference on Energy Materials and Environment Engineering**, 2023.

MANO, Eloisa B; MENDES, Luís C. **Introdução a Polímeros**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2004.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos**. [S.l.]: Artliber, 2005. ISBN 978-85-880-9830-5.

MICHAELI, Walter; EHRIG, Frank; KRETZSCHMAR, Gernot; GREIF, Helmut. **Training in Injection Molding**. [S.l.]: HanserPublishers, 2001. ISBN 978-1569903025.

MIKULA, Katarzyna; SKRZYPCZAK, Dawid; IZYDORCZYK, Grzegorz; WARCHOŁ, Jolanta; MOUSTAKAS, Konstantinos; CHOJNACKA, Katarzyna; WITEK-KROWIAK, Anna. 3D printing filament as a second life of waste plastics-a review. **Environmental science and pollution research international**, v. 28, mar. 2021.

NGO, Tuan D.; KASHANI, Alireza; IMBALZANO, Gabriele; NGUYEN, Kate T.Q.; HUI, David. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 2018. ISSN 1359-8368.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas e Controle**. 6. ed. [S.l.]: LTC, 2013. ISBN 978-0470-54756-4.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering**. 4. ed. [S.l.]: Aeeizh, 2002. ISBN 0-13-043245-8.

OSEJOS, Jaime Vinicio Molina. **Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes**. Quito: [s.n.], 2016.

PAIVA, Jane M. Faulstich de; NOGUEIRA, Clara L.; REZENDE, Mirabel C. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA DE MATRIZES DE POLI(PROPILENO) E COPOLÍMEROS UTILIZADOS EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO. **Anais 9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2007.

PAOLI, Marco A De. **DEGRADAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE POLÍMEROS**. [S.l.]: Artliber, 2009. ISBN 978-8588098442.

PASTOR, Antonio Alberto Relaño. **Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida**. [S.l.: s.n.], 2013.

PILLIN, Isabelle; MONTRELAY, Nicolas; BOURMAUD, Alain; GROHENS, Yves. Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid). **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 2, p. 321–328, 2008. ISSN 0141-3910.

POORANI, V. Jenifer; ANAND, L. D. Vijay. Comparison of PID controller and Smith predictor controller for heat exchanger. *In*: 2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN). [S.l.: s.n.], 2013. P. 217–221.

PÓVOA, Gabriel Silva. **PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D**. [S.l.], 2022.

PRODUCTIVE PLASTICS, Inc. **WHAT IS THERMOFORMING**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.productiveplastics.com/thermoforming/>. Acesso em: 6 fev. 2024.

RAO, Natti S.; SCHOTT, Nick R. **Understanding Plastics Engineering Calculations: Hands-on Examples and Case Studies**. 1. ed. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co, 2012. ISBN 978-3446422780.

RAUWENDAAL, Chris. **Polymer Extrusion**. 5. ed. [S.l.]: Hanser Publications, 2013. ISBN 978-1-56990-516-6.

RESISTEN. **Elementos da Resistência Coleira de Mica: Differences and Comparisons**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.resisten.com.br/resistencia-coleira>. Acesso em: 9 fev. 2024.

RONG ZE, Khoo; ISMAIL, Hanafi; CHOW, W.S. Thermal and Morphological Properties of Poly (Lactic Acid)/Nanocellulose Nanocomposites. **Procedia Chemistry**, v. 19, p. 788–794, dez. 2016.

ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Donald V.; ROSATO, Marlene G. **Injection Molding Handbook**. [S.l.]: Springer, 2020. (Plastics Design Library). ISBN 978-1-4613-7077-2.

SALINAS, Richard. **3d Printing With Reprap Cookbook**. [S.l.]: 978-1782169888, 2014. ISBN 978-1782169888.

SPINACÊ, Maria A; PAOLI, Marco A De. A TECNOLOGIA DA RECICLAGEM DE POLÍMEROS. **Quim, Nova**, v. 28, n. 1, p. 65–72, 2004.

TADMOR, Zehev. **PRINCIPLES OF POLYMER PROCESSING**. 2. ed. [S.l.]: A John Wiley Sons, Inc, 2006. ISBN 0-471-38770-3.

TAMIR, Tariku Sinshaw; XIONG, Gang; JIANG, Jingchao; SHEN, Zhen; LODHI, Ehtisham; ALI, Hub; WAN, Li. Terms Development of Additive Manufacturing. *In: 2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. [S.l.: s.n.], 2022. P. 1–5.

TECMAF. [S.l.], 2024. Disponível em:

<https://loja.tecmaf.com.br/motor-de-passo-nema-23-30kgfcm>. Acesso em: 23 fev. 2024.

TIGGEMANN, Hugo Mauricio. **Propriedade de Materiais Híbridos com Matriz de Elastômeros Termoplásticos à base de SEBS**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

YOUNG, Robert J.; LOVELL, Peter A. **Introduction to Polymers**. 3. ed. [S.l.]: Routledge, 2011. ISBN 978-0849339295.

ŻENKIEWICZ, Marian; RICHERT, Józef; RYTLEWSKI, Piotr; MORACZEWSKI, Krzysztof; STEP CZYŃSKA, Magdalena; KARASIEWICZ, Tomasz. Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid). **Polymer Testing**, v. 28, n. 4, p. 412–418, 2009. ISSN 0142-9418.

ZHAO, Peng; RAO, Chengchen; GU, Fu; SHARMIN, Nusrat; FU, Jianzhong. Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1046–1055, 2018. ISSN 0959-6526.

APÊNDICE A – Código para obtenção de dados da resistência

```

1 #include "max6675.h" //INCLUS O DE BIBLIOTECA
2 #include "ctimer.h"
3
4 bool switchState = false;
5 int ktcSO = 8; // 8 > 7 //PINO DIGITAL (SO)
6 int ktcCS = 9; // 9 > 12 //PINO DIGITAL (CSa)
7 int ktcCLK = 10; // 10 > 8 //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
8 int ktcSO2 = 18; //11 > 5//PINO DIGITAL (SO)
9 int ktcCS2 = 17; //12 > 4 //PINO DIGITAL (CSa)
10 int ktcCLK2 = 16; //13 > 11 //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
11 int Interruptor = 3;
12 int InterruptorExt = 2;
13 int SSR = 11; // 4 > 2
14 int SSR2 = 12; // 5 > 3
15 int i;
16
17 MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); // Cria uma instancia com pinos (CLK,
    CS, SO)
18 MAX6675 ktc2(ktcCLK2, ktcCS2, ktcSO2); // Cria uma instancia com pinos (
    CLK, CS, SO)
19 cTimer g_Timer0(true);
20
21 #define TEMPO_0 1000
22
23 void setup() {
24     Serial.begin(9600);
25     delay(1000); // Intervalo de 1000 milissegundos
26     pinMode(Interruptor, INPUT_PULLUP);
27     pinMode(InterruptorExt, INPUT_PULLUP);
28     pinMode(SSR, OUTPUT);
29     pinMode(SSR2, OUTPUT);
30     i = 0;
31
32     g_Timer0.SetTimeOut(TEMPO_0);
33
34     pinMode(SSR, OUTPUT);
35     pinMode(SSR2, OUTPUT);
36
37 }
38
39 void loop(){
40
41     if(g_Timer0.IsTimeOut(true)) {
42
43         float temp = ktc.readCelsius();

```

```
44 float temp2 = ktc2.readCelsius();
45 Serial.print("v(");
46 Serial.print(i);
47 Serial.print(", :) = [");
48 Serial.print(temp);
49 Serial.print(" ");
50 Serial.print(temp2);
51 Serial.println("]");
52
53 bool newSwitchState = digitalRead(Interruptor);
54
55 // Verifique se o estado permanece igual
56 if (newSwitchState != switchState) {
57     switchState = newSwitchState;
58
59     // Se o interruptor for baixo, zerar a saída
60     if (switchState) {
61         analogWrite(SSR, 0);
62         analogWrite(SSR2, 0);
63     } else {
64         analogWrite(SSR2, 255*0.35); // Obtendo dados para 35% da saída em
65         PWM
66         analogWrite(SSR, 255*0.35);
67     }
68 }
69 i++;
70 }
71 }
```


APÊNDICE B – Código movimento motor NEMA 23

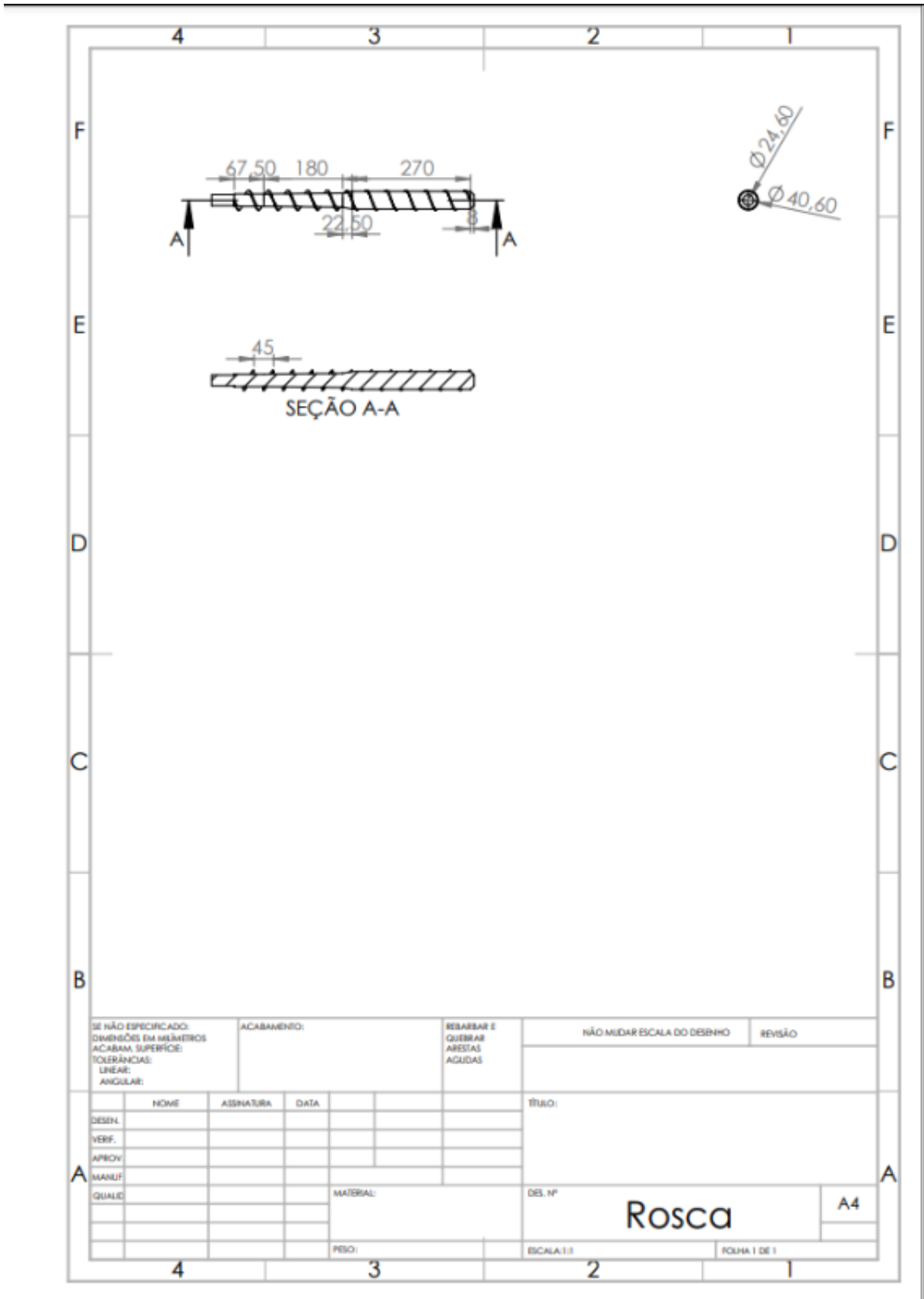
```

1 // Definição das portas
2 const int enablePin = 38;
3 const int dirPin = 40;
4 const int pulPin = 42;
5 const int interruptorPin = 44; // Pino do interruptor
6
7 // Definição de parâmetros padrão
8 int revPerMin = 10; // Padrão em 20 rev/min
9 const int stepsPerRev = 1600; // 400 passos por revolução
10 bool motorLigado = false; // Estado do motor, inicialmente desligado
11
12 void setup() {
13     // Configuração das portas como saída
14     pinMode(enablePin, OUTPUT);
15     pinMode(dirPin, OUTPUT);
16     pinMode(pulPin, OUTPUT);
17     pinMode(interruptorPin, INPUT_PULLUP); // Configura o pino do
18         // interruptor como entrada com pull-up
19
20     // Inicia o Serial Monitor
21     Serial.begin(9600);
22
23     // Habilita o driver
24     digitalWrite(enablePin, LOW); // Ativa o driver
25
26     // Define a direção inicial
27     digitalWrite(dirPin, HIGH); // HIGH para direção normal, LOW para
28         // direção invertida
29
30     // Mensagem de inicialização no Serial Monitor
31     Serial.println("Motor de passo iniciado.");
32     Serial.print("Revoluções por minuto padrão: ");
33     Serial.println(revPerMin);
34     Serial.println("Digite a nova velocidade em rev/min e pressione ENTER:");
35 }
36
37 void loop() {
38     // Verifica o estado do interruptor
39     if (digitalRead(interruptorPin) == LOW) { // O interruptor está ligado
40         motorLigado = true;
41     } else {
42         motorLigado = false;
43     }
44 }

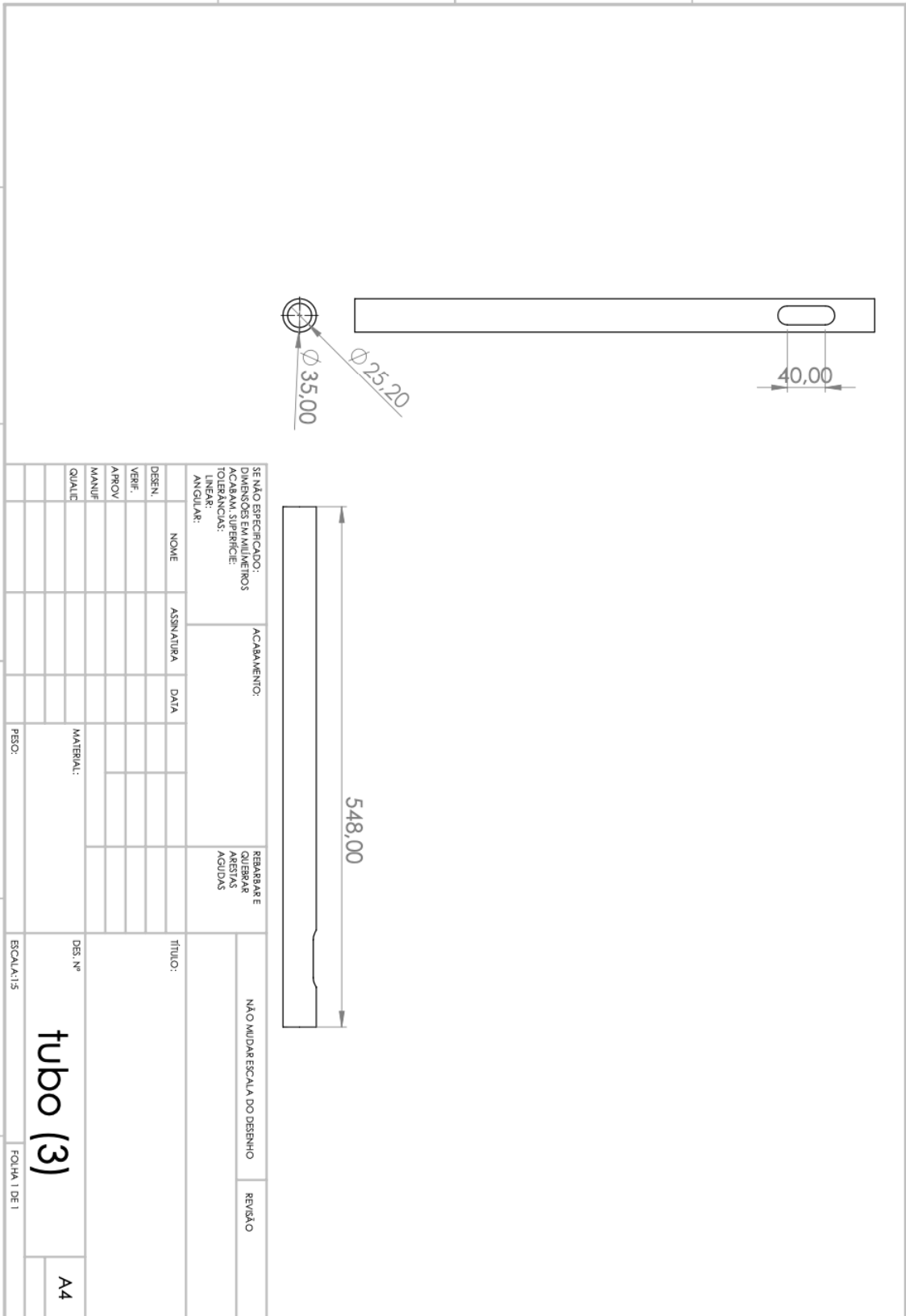
```

```
43 // Verifica se ha dados dispon veis no Serial Monitor
44 if (Serial.available() > 0) {
45     int newRevPerMin = Serial.parseInt(); // Le o valor inteiro do
        Serial Monitor
46
47     if (newRevPerMin > 0) {
48         revPerMin = newRevPerMin;
49         Serial.print("Velocidade atualizada para: ");
50         Serial.print(revPerMin);
51         Serial.println(" rev/min");
52     } else {
53         Serial.println("Valor inv lido. Tente novamente.");
54     }
55     // Limpa o buffer de entrada
56     while (Serial.available() > 0) {
57         Serial.read();
58     }
59 }
60
61 if (motorLigado) {
62     // Calcula o tempo entre os pulsos em microssegundos com base em
        revPerMin
63     int pulseDelay = (60 * 1000000) / (stepsPerRev * revPerMin);
64
65     // Gira o motor continuamente
66     digitalWrite(pulPin, HIGH);
67     delayMicroseconds(pulseDelay);
68     digitalWrite(pulPin, LOW);
69     delayMicroseconds(pulseDelay);
70 } else {
71     // Se o motor estiver desligado, certifique-se de que o pino do
        pulso esteja baixo
72     digitalWrite(pulPin, LOW);
73 }
74 }
```

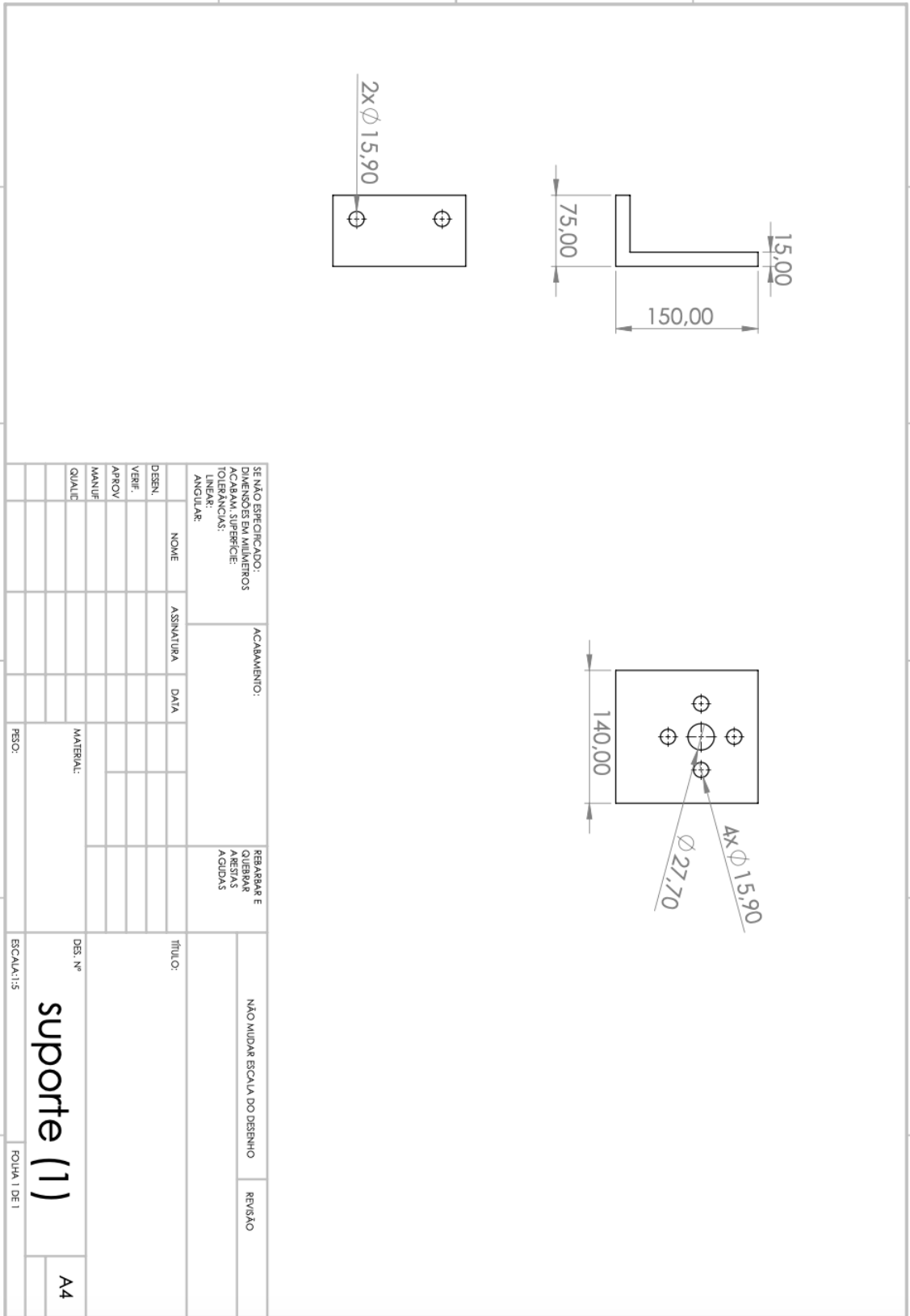
APÊNDICE C – Desenho rosca extrusora



APÊNDICE D – Desenho cilindro



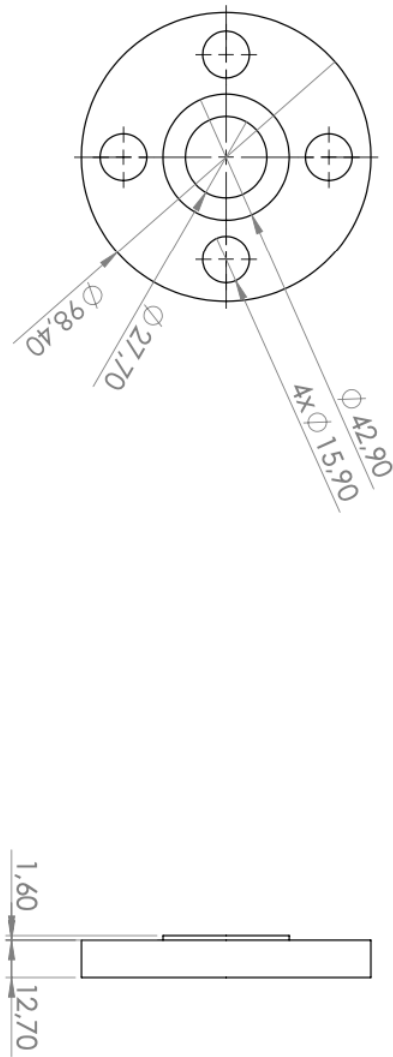
APÊNDICE E – Desenho suporte



APÊNDICE F – Desenho funil

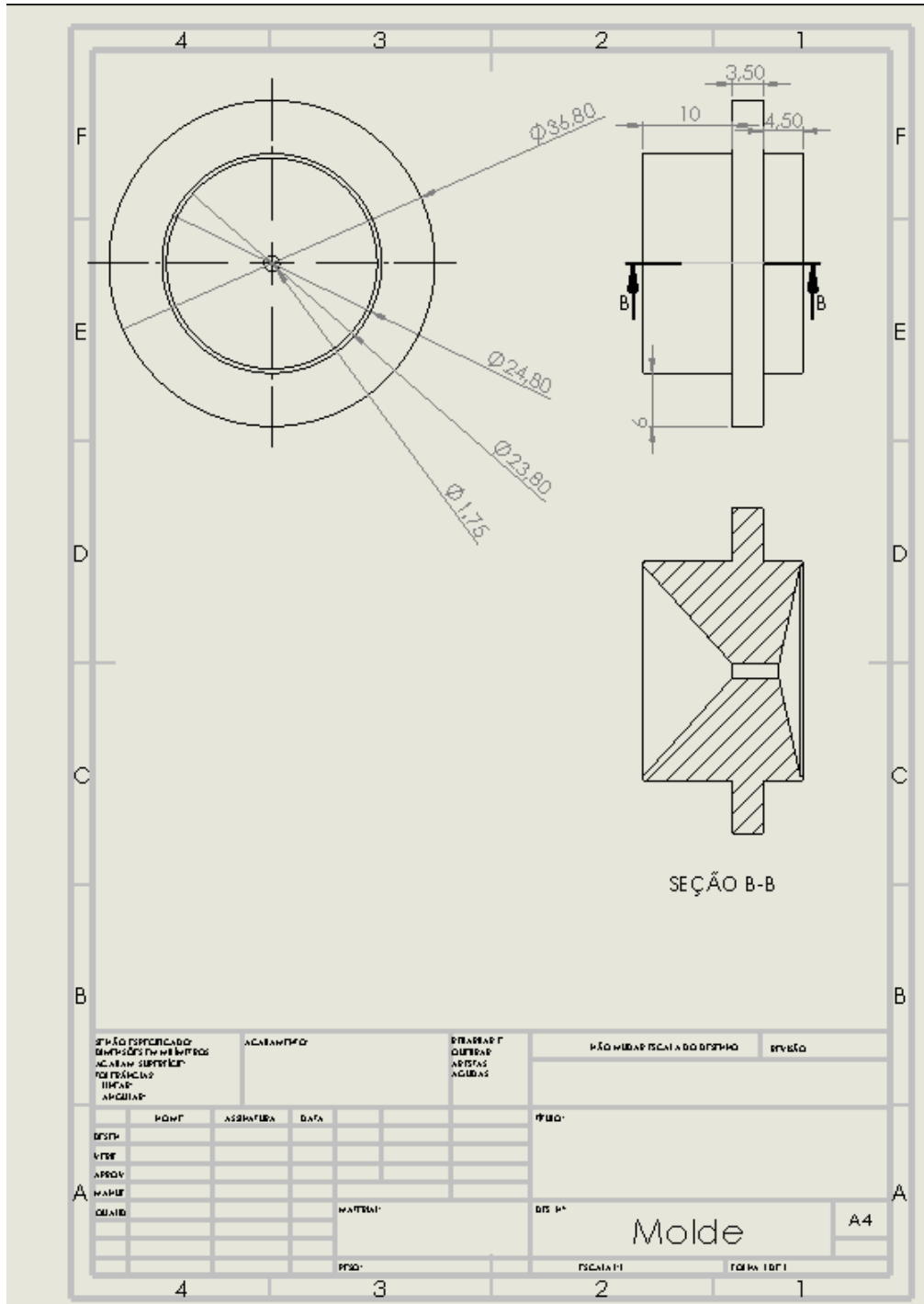
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAMENTO: ACABAMENTO SUPERFÍCIE TOLERÂNCIAS: LINHAS: ÂNGULO:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAS ABERTAS ACRÚS	NÃO MEDIR B/CALA DO DESENHO	REBARBO
NOME		ASSINATURA	DATA	TÍTULO:	
DESENH.					
VERIF.					
APROV.					
MATERIAL				D.B. Nº	
QUANTD.				Funil	
PROJ.				B/CALA:12	
				FOLHA 1 DE 1	
					A4

APÊNDICE G – Desenho flange



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUERENAR MONTAR AGUÇAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	MATERIAL:		TÍTULO:		DES. Nº	
VERIF.						flange		A4	
APROV.						ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	
MANUF.									
QUALID.									
				PEÇO:					

APÊNDICE H – Desenho molde



APÊNDICE I – Cálculo da vazão mássica

$$G_{\min} = 60 \cdot 900 \cdot 20 \cdot \pi^2 \cdot 0.0042 \cdot 0.025 \cdot (0.025 - 0.0042) \cdot \frac{0.02132}{0.02131+0.0025} \cdot \text{sen}(17.66) \cdot \text{cos}(17.66)$$

$$G_{\min} = 1.5058 \text{ kg/h}$$

$$G_{\max} = 60 \cdot 900 \cdot 100 \cdot \pi^2 \cdot 0.0042 \cdot 0.025 \cdot (0.025 - 0.0042) \cdot \frac{0.02132}{0.02131+0.0025} \cdot \text{sen}(17.66) \cdot \text{cos}(17.66)$$

$$G_{\max} = 7.5290 \text{ kg/h}$$

ANEXO A – Orçamento rosca extrusora



ROSCAN
ROSCAS E CILINDROS

Data 22/05/2023

Orçamento 13723

Produto	Quantidade	Valor
<u>Conjunto de extrusão:</u> - Fuso de 45 mm de diâmetro e comprimento total de 540 mm. Nitretada. - Cilindro para fuso com 45 mm de diâmetro interno com diâmetro externo de 55 mm e comprimento compatível com o fuso. Nitretado.	1 cj.	R\$ 25.820,14
Total		R\$ 25.820,14

* Todos impostos estão incluso: ICMS, PIS ,COFINS, IPI

Informações Técnicas:

Material	Roscas—SAE 8550; Cilindro—SAE 8550
Dureza após Têmpera e Revenimento	280 — 320 HB
Espessura da Camada Nitretada	0,50—0,80 mm
Dureza da Camada Nitretada	850 — 1000 HV
Rugosidade superficial	Ra 0,4
Linearidade das roscas	0,015 mm

Roscan Máquinas e Equipamentos Ltda.
 Endereço: Rodovia SC 447 km 1, nº 1.390, Distrito Industrial
 Siderópolis / SC — Brasil
 CEP 88.860-000.

Tel: (48) 3443-5692
 Cel: (48) 99841-0041
 Email: mosart@roscan.com.br