



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO
PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D**

Gabriel Silva Póvoa

Brasília, 11 de Maio de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO
PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D**

Gabriel Silva Póvoa

*Projeto de Graduação submetido ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro em Engenharia Mecânica*

Banca Examinadora

Prof.^a Dianne Magalhães Vianna, ENM/FT-UnB _____
Orientadora

Prof. Adriano Possebon Rosa, ENM/FT-UnB _____
Orientador

Prof. Jones Yudi Mori Alves da Silva, ENM/FT-UnB _____
Examinador Interno

Prof.^a Andréa Cristina dos Santos, ENM/FT-UnB _____
Examinadora Interno

FICHA CATALOGRÁFICA

PÓVOA, GABRIEL SILVA

PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D [Distrito Federal] 2022.

xvi, 137 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Mecânica, 2022).

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. Extrusão | 2. Polímeros |
| 3. Manufatura Aditiva | 4. Reaproveitamento |
| 5. Simulações | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PÓVOA, G.S. (2022). *PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gabriel Silva Póvoa

TÍTULO: PROJETO DE EXTRUSORA DE PARAFUSO ÚNICO PARA FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D .

GRAU: Engenheiro em Engenharia Mecânica ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gabriel Silva Póvoa

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

A minha família e amigos que estiveram sempre presentes durante minha graduação.

Gabriel Silva Póvoa

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, pelas maravilhas que Ele vêm realizando nela, e por me inspirar a sonhar os sonhos Dele que são maiores e melhores.

Agradecimentos aos meus pais, meus irmãos, minha avó, e toda minha família por sempre me apoiarem incondicionalmente em todas etapas de minha vida.

Agradecimentos a minha namorada, Bruna Bastos, por todo apoio e companheirismo durante a nossa caminhada ao longo da graduação. Obrigado por estar sempre comigo, ser o meu exemplo de dedicação acadêmica e a minha motivação para sempre buscar o melhor para nosso futuro. Espero que não demore muito para colhermos os frutos dessas nossas lutas diárias, e que sempre sejamos o porto seguro um do outro.

À família de minha namorada, por me receberem como família e me apoiarem.

À professora Dianne por orientar-me durante a concepção deste e de outros projetos.

Aos meus antigos colegas da GDM: Sandro, Arthur, Jhonantan, Aroldo, Jonatas, Solda, Pedro Henrique, João Gabriel e Felipe pelo tanto que me ensinaram durante o meu período de estágio, e um agradecimento especial ao Miguel por ter me aceitado na equipe durante os dois anos que estive na Autotrac.

Aos meus amigos desde o Colégio Militar, por modelarem quem eu sou hoje e serem pessoas tão incríveis para mim. Obrigado Caio, Fernando, João Poças, João Zago, Marcos Lima, Moraes, Tabak, Lanfredi e Quintanilha. E aos novos amigos que fiz graças a vocês, Caik, Gago e João Veiga.

Aos meus amigos do grupo N.A.T.A.L, por toda a amizade e companheirismo de sempre, por acompanharem a minha jornada não só na fé, mas também minha jornada acadêmica. Agradeço por todas vezes que estivemos juntos, por cada vez que rezaram por mim e minhas dificuldades e por todos os lanches e risadas que compartilhamos.

Aos meus amigos da faculdade que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional e, em especial, para os membros da TECMEC.

Aos meus queridos Instamigos, por estarem ao meu lado durante tantos desafios. Obrigado Ana, Gustavo, Izael, Jaque, Juan, Lucio, Paiva, Pimenta, Renan e Rodrigo.

Aos meus colegas do Taekwondo, em especial ao mestre Marcos, por contribuírem na formação do meu caráter.

À UnB, à FT e ao CNPq, por fornecerem todo auxílio que precisei durante a graduação.

Gabriel Silva Póvoa

"Dê-me, Senhor, inteligência para compreender, memória para reter, facilidade para aprender, sutileza para interpretar, graça abundante para falar, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir."

São Tomás de Aquino.

RESUMO

O presente trabalho objetiva apresentar uma abordagem teórica e construtiva de uma máquina extrusora para produção de filamentos destinados à manufatura aditiva, com ênfase inicial na análise do material a ser extrudado e nos aspectos fabris da máquina, como material de fabricação das peças e seus respectivos tratamentos térmicos e superficiais. O dimensionamento dos componentes é realizado a partir de relações geométricas, estimativa de rendimentos, análise de fluxos viscosos e relações termodinâmicas. A revisão bibliográfica aborda temas relacionados a teoria de polímeros, efeitos viscoelásticos, comportamento térmico de materiais poliméricos, características do poliácido láctico e processos de fabricação.

Palavras-chaves: Extrusora, Polímeros, Manufatura Aditiva, Reaproveitamento.

ABSTRACT

The present work is intended to present a theoretical and constructive approach of an extrusion machine for the production of filaments for additive manufacturing, with an initial emphasis on the analysis of the material to be extruded and on the manufacturing aspects of the machine, such as material for the fabrication of parts and their respective treatments thermal and superficial. The dimensioning of the components is made from geometric relations, output estimation, viscous flow analysis and thermodynamic relations. The bibliographic review will go over the topics related to polymer theory, viscoelastic effects, thermal behavior of polymeric materials, characteristics of polylactic acid and manufacturing processes.

Keywords: Extruder, Polymers, Additive Manufacturing, Reuse.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS	1
1.2	MANUFATURA ADITIVA	2
1.3	RELEVÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE POLÍMEROS	4
1.4	CONTEXTO DE MERCADO	6
1.5	OBJETIVOS	8
	1.5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
	1.5.2 JUSTIFICATIVA	8
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	INTRODUÇÃO A POLÍMEROS	10
	2.1.1 CLASSIFICAÇÕES	11
	2.1.2 VISCOSIDADE E EFEITOS VISCOELÁSTICOS	13
	2.1.3 PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS	17
	2.1.4 DEFEITO PELE DE CAÇÃO	18
2.2	COMPORTAMENTO TÉRMICO EM POLÍMEROS	18
	2.2.1 CRISTALIZAÇÃO	18
	2.2.2 TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTRICA	19
	2.2.3 TEMPERATURA DE FUSÃO	20
	2.2.4 TEMPERATURA DE DEGRADAÇÃO	21
	2.2.5 MÉTODOS DE ACOMPANHAMENTO POR PROCESSOS TÉRMICOS	23
2.3	POLIÁCIDO LÁTICO	25
	2.3.1 PROPRIEDADES DO PLA	26
	2.3.2 DEGRADAÇÃO DO PLA	27
	2.3.3 IMPACTO NAS PROPRIEDADES	29
	2.3.4 ADITIVOS PARA POLÍMEROS	32
2.4	EXTRUSÃO	33
	2.4.1 SISTEMA DE PLASTIFICAÇÃO	36
	2.4.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	44
	2.4.3 SISTEMA DE ACIONAMENTO	45
	2.4.4 MONTAGEM DO CABEÇOTE E MATRIZ	47
	2.4.5 SISTEMA DE CONTROLE	48
2.5	SEGURANÇA NO PROCESSO DE EXTRUSÃO	51
	2.5.1 RISCOS ASSOCIADOS A UMA EXTRUSORA	52
	2.5.2 QUEIMADURAS	52
	2.5.3 CHOQUES ELÉTRICOS	53

2.5.4	QUEDAS	54
2.5.5	RUÍDO	54
2.5.6	PARADA EMERGÊNCIA	54
2.5.7	EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO PESSOAL	55
2.5.8	PROCEDIMENTO DE BLOQUEIO, ETIQUETA E LIBERAÇÃO	55
2.5.9	TREINAMENTO ADEQUADO	56
2.5.10	INSPEÇÃO E LIMPEZA	56
2.5.11	SEGURANÇA DE MATERIAL	56
2.5.12	SINALIZAÇÃO.....	57
3	DESENVOLVIMENTO.....	58
3.1	METODOLOGIA	58
3.2	DIMENSIONAMENTO DA ROSCA	59
3.2.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	59
3.2.2	ANÁLISE DE RENDIMENTO E FLUXOS NA EXTRUSORA	62
3.2.3	RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO DA ROSCA E RENDIMENTO	66
3.3	DIMENSIONAMENTO DO BARRIL	68
3.4	AQUECEDORES	69
3.5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO	70
3.5.1	MOTOR E REDUTOR.....	70
3.5.2	ROLAMENTOS.....	72
3.6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	74
4	RESULTADOS.....	75
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ROSCA.....	75
4.2	COMPONENTES DO SISTEMA DE ACIONAMENTO.....	76
4.2.1	SELEÇÃO DO MOTOR E REDUTOR	76
4.2.2	SELEÇÃO DE ACOPLAMENTO.....	79
4.2.3	SELEÇÃO DE ROLAMENTOS	80
4.2.4	ANÁLISE DOS ESFORÇOS TRANSMITIDOS À ROSCA.....	81
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO BARRIL E FUNIL	83
4.3.1	REVESTIMENTO TÉRMICO DO BARRIL.....	86
4.3.2	FIXAÇÃO DO BARRIL E ANÁLISE DE ESFORÇOS	89
4.4	CABEÇOTE E BICO DE EXTRUSÃO.....	91
4.4.1	ANÁLISE TÉRMICA DA MATRIZ E CAMISA ALETADA	91
4.5	CONTROLE E COMPONENTES ELETRÔNICOS	94
4.5.1	CONTROLE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO	94
4.5.2	RESISTÊNCIAS E TERMOPARES.....	95
4.5.3	CONTROLE DE PRESSÃO	96
4.6	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO FLUXO POLIMÉRICO	96
4.7	LISTA DE MATERIAIS	100

5 CONCLUSÕES	101
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÊNDICES.....	109
I.1 DIMENSIONAMENTO DO PARAFUSO	109
I.2 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR	111
I.3 DIMENSIONAMENTO DO ROLAMENTO	112
I.4 DESENHOS TÉCNICOS E DE FABRICAÇÃO	113

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagramas esquemáticos conceituais modelagem por deposição fundida (FDM) de termoplásticos.	3
1.2	Composição do lixo na América Latina e Caribe.	4
1.3	O conceito básico de economia circular.	5
1.4	Participação da receita do mercado, em 2021, de plásticos de impressão 3D na América Latina, por tipo.	6
1.5	Preços médios, em reais, de filamentos no Brasil no ano de 2017.	7
2.1	Reação de polimerização do etileno em polietileno.	10
2.2	Representação gráfica de propriedades de polímeros variando de forma assintótica com o aumento da sua massa molar.	11
2.3	Compostos químicos que formam o ABS, (a) Acrilonitrila, (b) 1,3 – Butadieno (c) Estireno.	12
2.4	Perfis de velocidade: (a) fluxo de cisalhamento e (b) fluxo de alongamento.	14
2.5	Efeito do cisalhamento na viscosidade de materiais poliméricos: platô newtoniano baixo (I), região da lei de potência (II) e platô newtoniano superior (III).	14
2.6	Gráfico esquemático de lei de potência mostrando $\log \tau$ versus $(\log d\gamma/dt)$ para diferentes tipos de materiais fluidos.	15
2.7	Variação do volume específico durante um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento de um polímero semicristalino.	19
2.8	Variação do volume específico com o aumento da temperatura mostrando as faixas de temperatura em que ocorrem as transições T_g e T_m	20
2.9	Aspecto visual de amostras PE, PEOX1 e PEOX2, (a) antes e (b) após 60 e (c) 180 dias de exposição ao envelhecimento natural.	22
2.10	Curvas de DSC e TGA do aquecimento do PLA puro. (a) Temperatura de Transição Vítre, (b) Temperatura de Fusão, (c) Degradação, (d) Cristalização.	23
2.11	Rotas de síntese do poliácido láctico.	25
2.12	Variação de propriedades em função do número de extrusões: (a) taxa de fluxo de fusão e (b) resistência ao impacto.	29
2.13	Análise termogravimétrica do poliácido láctico.	30
2.14	Esquema básico do processo de extrusão.	33
2.15	Componentes principais de uma extrusora convencional: (1) funil de alimentação; (2) motor de acionamento do parafuso; (3) barril da extrusora; (4) aquecedores do barril; (5) sistema de resfriamento do barril; (6) matriz da extrusora; e (7) bomba de água.	35
2.16	Componentes de uma Extrusora de Parafuso Único	35
2.17	Configuração do Cilindro, Parafuso e Sistema de Aquecimento/Resfriamento	36
2.18	Ilustração da geometria de um parafuso.	37

2.19	Análise de volume de controle de uma extrusora.	42
2.20	Elementos que compõe uma resistência coleira de mica.	42
2.21	Exemplos de resfriamento (a) por fluido e (b) a ar.	43
2.22	Seção de garganta de alimentação da extrusora alimentada por inundação.	44
2.23	Vista frontal de sistema barril-parafuso-funil com três configurações de gargantas de alimentação	45
2.24	Sistema de transmissão: (a) acionamento direto por redução com engrenagens e (b) acionamento indireto com uso de polias.	46
2.25	Montagem de conjuntos de rolamentos	47
2.26	Sistema de retenção e vedação ao final da extrusora: (a) vista em corte do conjunto e (b) placa de quebra.	47
2.27	Conjunto de retenção de impurezas: (a) disposição de pacotes de telas e (b) pacotes de tela propriamente ditos.	48
2.28	Conjunto de aquecedor e termopar	49
2.29	Configurações de sensores de temperatura do polímeros: (A) sensor embutido; (B) sensor reto saliente; (C) sensor fixo a montante; (D) sensor ajustável radialmente a montante; e (E) ponte com sensor de múltiplas sondas.	50
2.30	Transdutor de pressão: (a) esquemático (b) transdutor propriamente dito.	50
2.31	Recomendações de proteções fixas em máquina extrusora. (1) área da unidade de extrusão; (2) área das resistências de aquecimento; (3) área da alimentação de material	52
2.32	Texto e localização de sinalização de segurança.	57
3.1	Características geométricas da rosca extrusora	60
3.2	Perfil de velocidade do polímero fundido na seção de medição do parafuso.	63
3.3	Balço de energia para uma operação de extrusão.	63
3.4	Rendimento para diferentes configurações de extrusora.	67
3.5	Diagrama esquemático da seção transversal de um vaso de pressão cilíndrico sujeito a uma pressão interna ΔP	68
3.6	Temperaturas ao longo do barril para a extrusão do PLA	70
3.7	Esforços transmitidos ao rolamento.	72
3.8	Vista lateral dos anéis interno e esferas de rolamentos de contato angular arranjados em tandem.	73
4.1	Dimensões em milímetros das zonas térmicas.	76
4.2	Varição de potência e torque para uma faixa de velocidade.	77
4.3	Motorreductor com motor de 4cv 117rpm Magma Weg Cestari Trifásico N0.	78
4.4	Motorreductor com acoplamento do tipo Cruzeta Dupla	79
4.5	Montagem do Sistema de Acionamento e Rosca.	81
4.6	Gradiente de temperatura ao longo da rosca.	81
4.7	Simulação das condições críticas da Rosca: (a) entupimento da matriz (b) travamento do parafuso	82

4.8	Vista explodida das partes do barril.	84
4.9	Vista explodida da montagem do barril do rolamento.	85
4.10	Vista explodida da montagem do barril do funil.	85
4.11	Barril do Funil revestido com Papel de Fibra Cerâmica	86
4.12	Malha utilizada no estudo da eficiência do isolamento térmico	87
4.13	Simulação Térmica de uma seção de barril: (a) sem revestimento (b) com revestimento de papel de fibra cerâmica.	88
4.14	Resultado da temperatura medida no termopar e na parte mais interna do funil não revestido e revestido.	88
4.15	Simulação de esforços no barril com conectores: (a) esforços e pontos de fixação (b) malha gerada.	89
4.16	Simulação de esforços no Barril: (a) tensões de von Mises e (b) deslocamento. . .	90
4.17	Validação dos parafusos M8 e M10.	90
4.18	Vista isométrica renderizada da montagem da parte frontal do barril da matriz com cabeçote e placa de quebra.	91
4.19	Seção transversal de modelo simplificado de barril-matriz para fins de simulação montado a uma camisa de alumínio aletada.	92
4.20	Resultado da simulação térmica da variação de temperatura ao longo do barril, matriz e PLA para as situações com aletas e sem aletas.	93
4.21	Pontos em que a temperatura do fundido foi monitorada para fins de comparação. . .	93
4.22	Disposição de resistências coleira de mica e termopares distribuídos ao longo do barril e cabeçote conectados a uma caixa montada com controladores PID e botões de controle e emergência.	96
4.23	Seção transversal do conjunto parafuso-barril com fluxo de partículas representando a variação de temperatura do PLA.	98
4.24	Vista isométrica do escoamento de PLA em simulação para determinar a variação de pressão do processo	99
4.25	Vista isométrica renderizada da extrusora montada sobre uma bancada.	100

LISTA DE TABELAS

2.1	Viscosidade típica de alguns materiais.	13
2.2	Taxas de cisalhamento típicas para processos selecionados.	15
2.3	Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polí- meros comerciais.	17
2.4	Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polí- meros comerciais.	21
2.5	Fenômenos decorrentes da análise simultânea das curvas DSC e TGA.	24
2.6	Tabela com propriedades e características do PLA.	26
2.7	Tabela com propriedades e características das opções PLA da 3DFila.	27
2.8	Propriedades de espécimes impressos em 3D de PLA virgem e reciclado.	31
2.9	Materiais para o parafuso. Dados: Harper [1].	39
2.10	Materiais para o barril. Dados: Harper [1].	40
2.11	Revestimento bimetalúco do barril.	41
2.12	Propriedades da banda do aquecedor	43
2.13	Normas relacionadas ao contexto de aplicação de uma extrusora.	51
4.1	Dimensões da rosca extrusora.	75
4.2	Dados técnicos do motor W22 IR3 Premium.	78
4.3	Características técnicas do Acoplamento de Cruzeta Duplo.	79
4.4	Dimensões prévias do Barril.	83
4.5	Características da malha e dados de entrada para simulação da efetividade do re- vestimento térmico.	87
4.6	Temperatura do polímero em diferentes pontos na extrusão em modelo com aletas e o sem aletas.	94
4.7	Temperatura do polímero em diferentes pontos na extrusão em modelo com aletas e o sem aletas.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C	Comprimento
D	Diâmetro
e	Espessura do Filete
E	Energia
h	Profundidade do Filete
H	Profundidade do Canal
H_p	Potência fornecida pelo Motor
k	Índice de Consistência
n	Índice de Lei de Potência
N	Velocidade
P	Potência
t	Passo
T	Torque
W	Largura do Canal

Sobrescritos

- Variação ao longo do Tempo

Subscritos Principais

b	Barril
c	Retirado pelo Sistema de Resfriamento
f	Último Canal
h	Fornecido pelos Aquecedores
i	Primeiro Canal
L	Perdido para o Ambiente
s	Parafuso

Símbolos Gregos

δ	Folga entre Rosca e Barril
Δ	Variação
η	Viscosidade
μ	Viscosidade Aparente
ρ	Densidade
σ	Tensão
Φ	Ângulo de Hélice

Siglas Principais

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AISI	American Iron and Steel Institute
<i>CR</i>	Taxa de Compressão
<i>FS</i>	Fator de Segurança
ISO	International Organization for Standardization
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PLA	Poliácido Láctico
PVC	Policloreto de Vinila

1 INTRODUÇÃO

Resumo

O objetivo desse capítulo é introduzir o cenário de processamentos de polímeros desde aspectos históricos a econômicos do avanço dessas tecnologias. Além disso, será apresentada a justificativa do trabalho e a estrutura que compreende o relatório deste projeto de graduação.

1.1 PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS

Segundo Canevarolo e Sebastião [2], o primeiro contato do ser humano com materiais resinosos e graxas extraídas ou refinadas ocorreu ainda na Antiguidade, quando os egípcios e romanos os usavam para carimbar e colar documentos, além de vedar vasilhames.

No contexto brasileiro, segundo o mesmo autor, foi no século XVI, com o advento dos descobrimentos, que os espanhóis e portugueses tiveram o primeiro contato com o produto extraído de uma árvore natural das Américas, *Havea Brasiliensis*, produto da coagulação e secagem do látex. Este extrato apresentava características de elevada flexibilidade e elasticidade não comuns até então. Ao ser levado à Europa, foi nomeado de borracha devido a sua capacidade de apagar marcas de lápis. Porém, sua utilização foi bastante restrita até a descoberta da vulcanização em 1839 por Charles Goodyear.

Contudo, os polímeros sintéticos só foram surgir em 1909, quando L. H. Baekeland introduziu o fenol-formaldeído quase quatro décadas após J.W. Hyatt ter desenvolvido um polímero semissintético, o nitrato de celulose. Tanto Hyatt quanto Baekeland inventaram seus polímeros por tentativa e erro. O desenvolvimento de novos materiais poliméricos prosseguiu em um ritmo ainda mais rápido após a Primeira Guerra Mundial.

Hoje, numerosos polímeros e fibras são produzidos a partir de polímeros sintéticos: recipientes de polipropileno, materiais de revestimento de policloreto de vinila (PVC), filme de embalagem de polietileno, vidros orgânicos de polimetacrilato de metila, meias de fibra de náilon, entre muitos outros que fazem parte do cotidiano. De acordo com Chanda e Roy [3], o principal motivo pelo qual os materiais plásticos são populares é que eles podem oferecer vantagens como transparência, autolubrificação, leveza, flexibilidade, economia na fabricação e decoração.

Assim, visando essa versatilidade, ainda em 1962, McKelvey [4] definiu o processamento de polímeros como operações realizadas em materiais ou sistemas poliméricos para aumentar sua utilidade. Esses tipos de operações produzem fluxo, mudança química e/ou uma mudança permanente nas propriedades físicas. Embora operações de conformação sempre envolvam fluxo, os processos termoplásticos, como extrusão, moldagem por injeção de termoplásticos, termofor-mação e rotomoldagem, produzem mudanças físicas no polímero, enquanto a mudança química

ocorre na fundição de monômeros líquidos.

De acordo com os autores Chanda e Roy [3], os polímeros encontraram, portanto, muitas aplicações de engenharia, como unidades sob tensão, componentes de baixo atrito, unidades termo e quimicamente resistentes, peças elétricas, aplicações de alta transmissão de luz, habitação, peças de construção de edifícios e muitas outras.

Embora seja verdade que, nessas aplicações os polímeros, têm sido usados adequadamente de acordo com as nossas necessidades, ainda há espaço para o desenvolvimento, popularização e aplicação de novos polímeros naturais e sintéticos e novas formas de processá-los. Um exemplo que se tem hoje, são os processos de manufatura aditiva, que, segundo relatório da *Markets and Markets* [5], o seu mercado global, avaliado em U\$ 12,6 bilhões em 2021, deve crescer para U\$ 34,8 bilhões em 2026, a uma taxa de crescimento anual composta de mais de 22% durante o período de previsão 2018-2023.

1.2 MANUFATURA ADITIVA

Conforme aponta Callister [6], a *impressão tridimensional* ou *3D*, é um processo de *manufatura aditiva* (MA) que revolucionou a indústria de fabricação de materiais ao longo dos últimos anos. O termo "aditivo" indica que o objeto é criado pela adição de sucessivas camadas de matéria-prima, a partir de dados de CAD (*computer-aided design*, ou projeto auxiliado por computador).

A *modelagem por fusão e deposição*, ou FDM (do inglês *fused deposition modeling*), foi uma das primeiras técnicas de MA desenvolvida para materiais poliméricos termoplásticos. Segundo Callister [6], com essa técnica, um filamento do polímero é alimentado ao bocal ou bico da impressora. Lá, ele é aquecido até acima da sua temperatura de transição vítrea, até a temperatura de processamento. Então, o polímero semifundido é extrudado sobre a mesa de impressão, por meio de comandos numéricos que determinam os locais que o material deve ser distribuído. Dessa forma, camadas adjacentes do polímero se aderem umas às outras, gradualmente endurecendo ao serem resfriadas, dando forma ao objeto.

Essa descrição se aplica não só às impressoras comercializadas atualmente, mas segue o mesmo princípio da ideia pioneira divulgada em 9 de junho de 1922 pelo empresário S. Scott Crump. O autor objetivava com sua patente US-5121329A disponibilizar um processo de fabricação de objetos tridimensionais que economizasse tempo e dinheiro. É descrito que o equipamento, representado pela Figura 1.1, é controlado por meio de comandos numéricos que posicionam o cabeçote de aplicação de material no local informado depositando camadas que dão forma ao objetivo tridimensional, seguindo um desenho CAD.

A impressão 3D possibilita, então, a fabricação de produtos com geometrias complexas, com baixos obstáculos financeiros, visto que o processo dispensa o uso de moldes ou processos adicionais, como torno, fresa e retífica. Também é possível eliminar eventuais etapas de montagem a

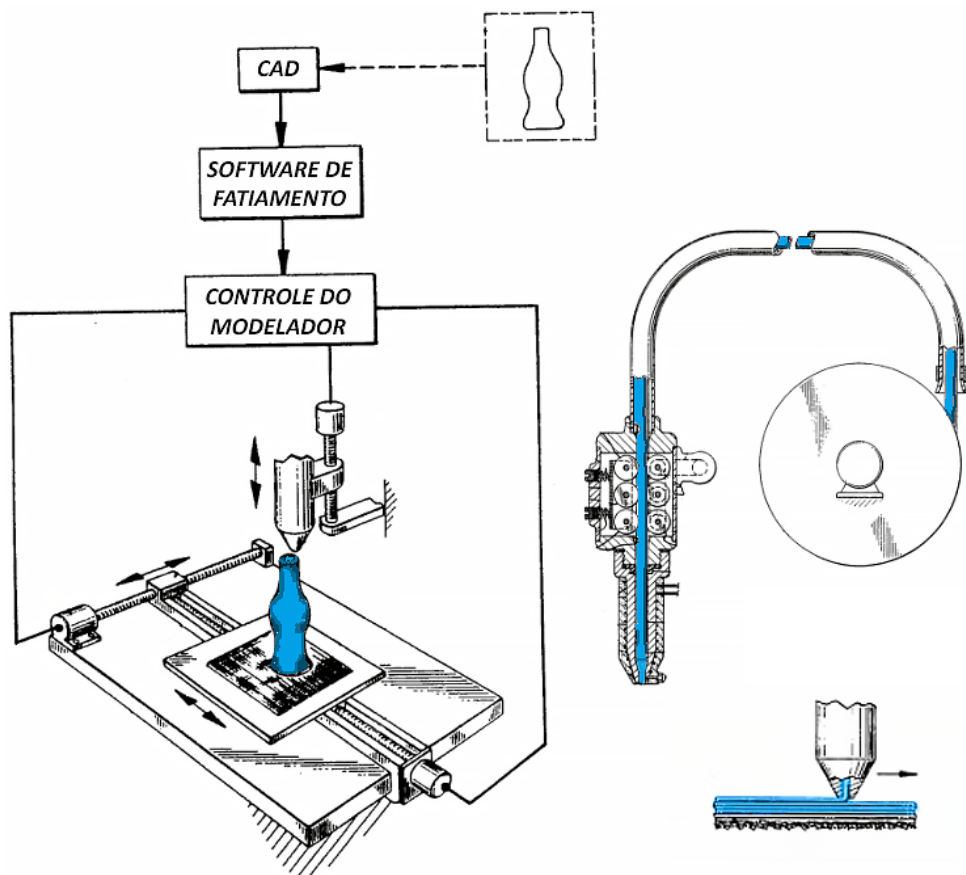


Figura 1.1: Diagramas esquemáticos conceituais modelagem por deposição fundida (FDM) de termoplásticos.

Fonte: Adaptado de Crump [7].

partir da fabricação do conjunto de objetos já montados, impactando significativamente sobre os custos marginais de produção.

Um exemplo da relevância e potencial, pode ser observado em ações que ocorreram no ano de 2020. Conforme apontam Noronha et al. [8], durante a pandemia da COVID-19, os sistemas globais de saúde foram colocados sob pressão crítica devido à grave escassez de leitos hospitalares e equipamentos médicos. Pacientes com COVID-19, doença causada pelo coronavírus da síndrome respiratória aguda grave, correm risco de síndrome do desconforto respiratório agudo (SDRA) e uma fração desses pacientes necessita de suporte respiratório de alto nível para sobreviver.

Conforme aponta relatório da *Markets and Markets* [5], devido a essa escassez de equipamentos, a demanda por impressão 3D aumentou drasticamente. Equipamentos de impressão 3D estão sendo cada vez mais usados para fabricar dispositivos médicos, equipamentos de proteção individual (EPI), dispositivos de teste e até mesmo residências de emergência para isolar pessoas que sofrem da doença. Os membros da comunidade de impressão 3D colaboraram de perto com empresas e hospitais para garantir abordagens de fabricação adequadas e uso clínico apropriado.

Com isso, percebe-se que os materiais poliméricos têm encontrado aplicação em muitas áreas da vida diária e da indústria. Porém, junto com seu uso prolongado, surgiu o problema dos resí-

duos plásticos, pois, após serem retirados de uso, eles se tornam rejeitos persistentes e prejudiciais ao meio ambiente. Em contrapartida, há uma classe de polímeros chamada termoplástico, que, devido a sua capacidade de se fundirem com aplicação de temperatura, podem ser reciclados.

De acordo com Mikula et al. [9], a questão da reciclagem de polímeros se tornou uma das principais questões de proteção ambiental e gerenciamento de resíduos. Assim, essa possibilidade de reaproveitamento de materiais poliméricos é um aspecto de valorização e proporciona o aproveitamento efetivo dos resíduos para a obtenção de produtos consumíveis.

1.3 RELEVÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE POLÍMEROS

Segundo Silveira e Bazzo [10], após a II Guerra Mundial, a imagem da ciência e tecnologia sofreu diversas modificações e alavancou a revolução industrial, pois neste período houve um grande movimento econômico no mercado mundial que favoreceu a geração de oportunidades para obtenção de lucros. Em decorrência do avanço tecnológico tornou-se necessário começar a desenvolver técnicas que favorecessem os ecossistemas, minimizando ao máximo os seus impactos na natureza.

Um dos campos que mudam mais rapidamente hoje é o dos materiais poliméricos. À medida que novos polímeros são sintetizados, novos usos são encontrados e processos e produtos existentes são modificados e aprimorados para necessidades ecológicas, melhor economia e melhores valores. Este uso crescente e intenso, infelizmente, também reflete na quantidade de matéria descartada. A Figura 1.2 mostra graficamente como é relevante a presença do lixo plástico comparado a outros materiais. Os dados, de 2020, são da revista Atlas do Plástico [11] que ressalta a importância da coleta e busca de soluções para descartes ambientalmente responsáveis e reaproveitamento de resíduos.

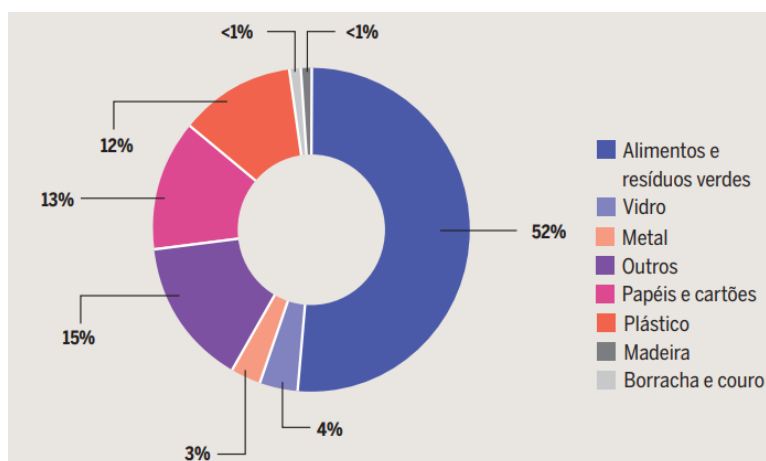


Figura 1.2: Composição do lixo na América Latina e Caribe.

Fonte: Atlas do Plástico. [11]

Os polímeros deixados espalhados após o uso não desaparecem de vista e resíduos como copos

descartáveis, frascos de detergente e filmes descartados, são mais que um incômodo visual. Isso ocorre porque os polímeros não são naturalmente biodegradáveis. No entanto, segundo Chanda e Roy [3], é possível tirar certo proveito dessa característica. Isso é confirmado pelo fato de que a reciclagem de materiais plásticos é agora um campo importante na indústria de polímeros, não apenas uma atividade nascida sob pressão ambiental. Resíduos de uma indústria podem servir de matéria-prima tanto para outra indústria ou como para a própria, assim como se pode desenvolver produtos partindo de uma ideia prévia de reaproveitamento que vise manter os materiais no ciclo produtivo, conceitos base para a economia circular.

Os objetivos da economia circular foram estabelecidos para o Plano de Ação da Economia Circular e Estratégia Industrial em 2 de dezembro de 2015 [12]. O plano apresenta cinco campos prioritários que requerem ação específica: plásticos, resíduos de demolição e construção, matérias-primas críticas, resíduos de alimentos, bioprodutos e biomassa. Este plano considera metas-chave específicas, incluindo a reciclagem de resíduos municipais no nível de 65% até 2030, a reciclagem de resíduos de embalagens no nível de 75% até 2030 e a redução da deposição em aterro para um máximo de 10% até 2030. A Economia Circular é projetada pra ser um sistema restaurador e regenerativo, benéfico para a sociedade e a economia, permitindo a redução dos recursos naturais e a minimização do desperdício e da poluição ambiental, bem como a recuperação de materiais e energia, conforme exemplificado na Figura 1.3.

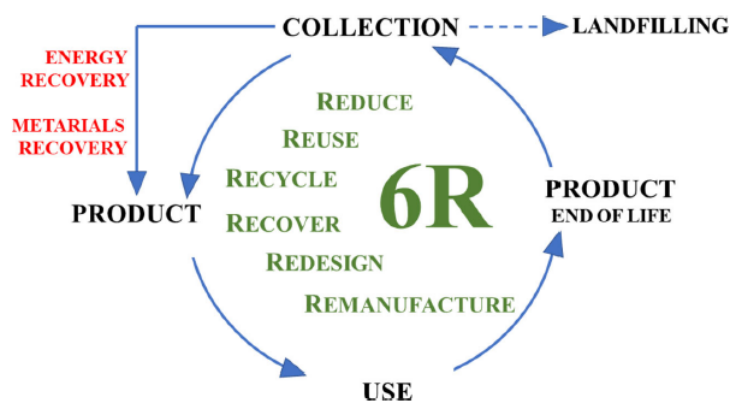


Figura 1.3: O conceito básico de economia circular.

Fonte: Mikula et al. [9].

A reciclagem é reconhecida como a opção preferida de gestão de resíduos para reaproveitamento dos materiais para a fabricação de novos produtos, como destacam os autores Mwanza e Mbohwa [13]. Essa prática diminui a geração de resíduos e permitem a recuperação de materiais pelo maior tempo possível.

1.4 CONTEXTO DE MERCADO

De maneira geral, a impressão 3D apresenta como princípios fundamentais a versatilidade de manufatura, a capacidade de customização, a possibilidade de fabricar formas complexas e baixos custos inerentes a processos produtivos de montagem, conforme Kleer, Piller e Weller [14].

Segundo relatório com dados de 2021 da Consainsights [15], o mercado de impressão 3D no Brasil deverá crescer a um ritmo vigoroso devido aos avanços na tecnologia de impressão e variedade e qualidade dos materiais de impressão. A fácil disponibilidade de impressoras 3D baratas atrai produtores, de amadores a pequenas empresas, enquanto o baixo preço de produtos impressos e a alta customização atraem os consumidores finais.

Entre os materiais mais frequentemente utilizados no processo de impressão 3D do tipo FDM estão filamentos de poliacido láctico (PLA) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS). De acordo com Fried [16], o PLA é um material biodegradável proveniente do ácido láctico, processado da dextrose vinda de milho ou arroz, enquanto o ABS é derivado do petróleo a partir da copolimerização da acrilonitrila, butadieno e o estireno. Como o ABS é amplamente usado em produtos de consumo por moldagem de injeção e componentes internos de automóveis, sua matéria-virgem costuma ser bem mais barata que a do PLA, o que influencia também no preço final do filamento.

Ainda em relação a estes dois, há uma questão a se pontuar: enquanto os relatórios de 2021 da já citada *Markets and Markets* [5] apontam para uma liderança do segmento do ABS no mercado global, esta não é a realidade para o mercado latino-americano. A Figura 1.4 apresenta os dados da análise de mercado da América Latina feita pela Consainsights [15] por tipo de polímero. Vale ressaltar que estes dados incluem não só filamentos (utilizados exclusivamente em impressoras FDM), mas também resinas líquidas, que incluem fotopolímeros e algumas poliamidas (ambas utilizadas em processos de impressão 3D dos tipos SLA (*Estereolitografia*), DLP (*Processamento Digital de Luz*) e LCD (*LEDS que projetam luz UV*), usadas nas áreas médica e odontológica.

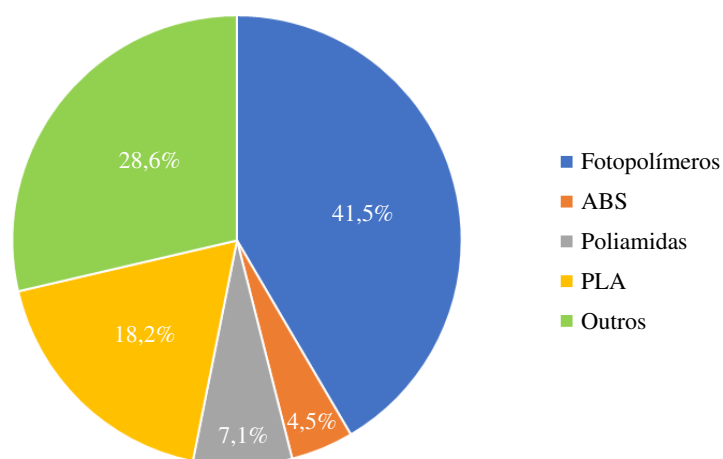


Figura 1.4: Participação da receita do mercado, em 2021, de plásticos de impressão 3D na América Latina, por tipo.

Fonte: Dados de Consainsights [15].

Percebe-se que o valor movimentado pelo PLA a quase quatro vezes maior que o de ABS nos países latino-americanos, mesmo que o ABS tenha um preço relativamente inferior. Provavelmente, isto se deve ao fato que o PLA é mais fácil de imprimir, não exigindo uma mão de obra tão qualificada para trabalhar com este material. A dificuldade do ABS está tanto no seu ponto fusão mais elevada, que exige impressoras com mesa aquecida, quanto na maior contração do material, que exige máquinas enclausuradas para evitar o empenamento da peça durante o resfriamento.

Em relação aos valores praticados pelo mercado de filamento no Brasil, os autores Souza e Hupper [17] fizeram um levantamento dos preços médios de diversos fornecedores e que são apresentados na Figura 1.5.

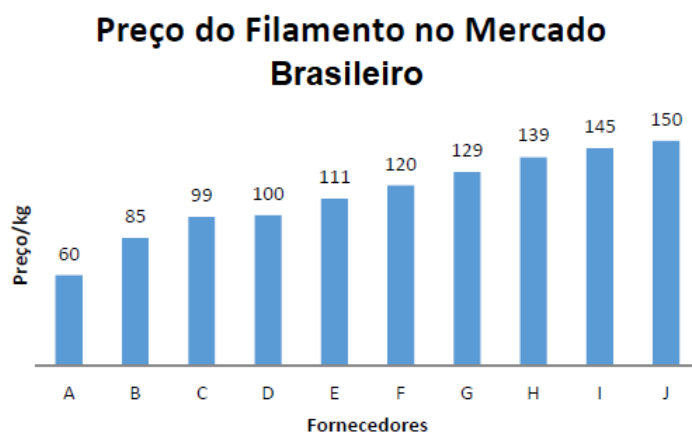


Figura 1.5: Preços médios, em reais, de filamentos no Brasil no ano de 2017.

Fonte: Souza e Hupper [17].

Comparando o preço médio de R\$ 113,80 resultante do apresentado na Figura 1.5 com o preço médio da material virgem (grãos de PLA e ABS) comercializada nacionalmente pela 3DLab®[18] (cerca de R\$ 56,25), há uma diferença de aproximadamente 100% entre o produto final (filamento) e a matéria que lhe deu origem.

Além disso, segundo Kleer, Piller e Weller [14], algumas empresas comercializam filamentos mais baratos, valendo-se de polímeros reciclados. Conforme os autores, estes costumam ser comercializados por um valor de 50%, em média, do preço de um mesmo tipo filamento fabricado matéria-prima virgem.

Segundo publicação da 3DFila®[19], o Brasil não detém tecnologia da fabricação primária de filamentos de PLA (poliácido láctico), PETG (Politereftalato de Etileno Glicol) e outros. O país, apesar de ser conhecido pela capacidade e qualidade fabricação de petróleo, importa praticamente todo polímero de engenharia. Enquanto isso, países como Estados Unidos, Japão e Tailândia estão entre os poucos países com grande base de fabricação desses materiais, trabalhando quase sempre em sua capacidade máxima. À vista disso, a escassez no mercado é uma possibilidade.

Conforme relatam Kleer, Piller e Weller [14], devido a relevância econômica da impressão 3D, expectativas de oportunidades que esta técnica de manufatura aditiva pode proporcionar e o

alto valor que representa o filamento para impressão 3D quando comparado ao da matéria virgem, pode ser interessante economicamente a fabricação de filamento próprio, que reduziria os custos, além da máquina extrusora proporcionar a possibilidade de reciclagem de filamentos e estudos de novas combinações poliméricas.

1.5 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consiste em apresentar uma abordagem teórica e construtiva de uma máquina extrusora para produção de filamentos de poliácido láctico (PLA), com ênfase na análise do material a ser extrudado e nos aspectos fabris da máquina, como geometria, materiais de fabricação e tratamentos térmicos e superficiais.

1.5.1 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral, que é projetar uma extrusora para produção de filamento PLA destinados à impressão 3D, tem-se como objetivos específicos:

- Estudar o comportamento do polímero PLA, desde a composição química até o comportamento térmico e mecânico durante o processamento. Em relação ao comportamento mecânico, será estudado os aspectos reológicos do material, tendo por objetivo atender os requisitos de qualidade do filamento, com base no exposto na literatura e funcionamento do mesmo em uma impressora 3D.
- Identificar, com base na literatura, relações usuais dimensionais e de forma de cada componente e aplicá-las ao projeto, validando-as por meio de simulações quando necessárias.
- Estabelecer, durante a fase de projeto, uma configuração de parâmetros e dimensões para a fabricação de um protótipo da extrusora, valendo-se da análise e comparação do modelo proposto com modelos físicos reais, a partir da fundamentação teórica e dos requisitos de projeto.

1.5.2 Justificativa

Como apresentado na Seção 1.3, o crescente aumento da quantidade de lixo plástico exige soluções que aumentem a gestão destes resíduos, e a reciclagem de filamentos é uma opção que atende a este propósito.

A escolha de projetar uma máquina objetivando o processamento de poliácido láctico é atender uma necessidade regional, pois, como explicitado na Seção 1.4, no mercado brasileiro, imerso no cenário latino-americano, há uma predominância irrefutável do PLA ante o ABS.

Além do mais, como a predominância global, em especial estadunidense, é do consumo de

outros polímeros, a maioria da literatura (posteriormente apresentada neste relatório de projeto) que especifica a concepção de extrusoras não traz informações relacionadas ao desenvolvimento de roscas para extrusão de PLA. Com isto, há uma necessidade que justifica a compilação de referências relacionando o projeto destas máquinas e este polímero tão utilizado na impressão 3D brasileira.

Ademais, as publicações mais complexas, como livros, que tratam extrusoras são, em sua grande maioria, publicadas em idiomas estrangeiros, o que limita o acesso de muitos, visto que o bilinguismo ainda não é uma realidade absoluta no Brasil.

Por fim, apesar de haverem propostas encontradas comercialmente de extrusoras baixo custo (geralmente do tipo *desktop*), descritas em suma maioria como projetadas para o trabalho com diferentes polímeros, é mais provável que estas levaram em consideração a importância apenas da variação de temperatura para o processamento, e não a importância que há na geometria da rosca e escolha de materiais para o trabalho com polímeros diferentes. Como será apresentado mais adiante, o projeto da rosca deve ser feito priorizando um tipo específico de material para maximizar a qualidade do processamento deste. E, neste ponto, faltam extrusoras projetadas de menor custo projetadas para o trabalho com PLA.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 Introduce o assunto a ser abordado por meio de uma contextualização histórica, tecnologia e econômica, além de trazer motivação do autor e apresentação dos objetivos, metas e estruturação do trabalho.

Capítulo 2 Realiza uma ampla revisão teórica de Ciência dos Materiais e Mecânica dos Fluidos para situar o leitor sobre aspectos importantes de características mecânicas, térmicas e reológicas de polímeros que são necessários para o correto processamento destes. Dentre os assuntos abordados estão síntese e processamento de polímeros, comportamento térmico e efeitos viscoelásticos no processo de extrusão, degradação térmica de polímeros e aspectos construtivos e de segurança no projeto de extrusoras.

Capítulo 3 Apresenta e explica a metodologia utilizada no projeto e, a partir do conhecimento desenvolvido nos capítulos anteriores, expõe e detalha as etapas para o dimensionamento dos subsistemas da extrusora.

Capítulo 4 Demonstra os resultados obtidos neste Projeto de Graduação, apresentando uma estimativa de rendimento da máquina, que pode ser utilizado como ponto de partida para concepções similares. Também expõe as principais dimensões das peças, assim como melhorias para algumas partes, e indica elementos comerciais para o projeto.

Capítulo 5 Apresenta as conclusões, além de um sugestões para continuação deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Resumo

O objetivo desse capítulo é familiarizar o leitor com alguns conceitos básicos de Ciência dos Materiais, Processos de Fabricação e Mecânica dos Fluidos. Com esse conhecimento adquirido, o entendimento do Desenvolvimento do trabalho será facilitado.

2.1 INTRODUÇÃO A POLÍMEROS

O termo polímero é proveniente do grego *poli* (muitos) e *meros* (iguais). Paoli [20] define os polímeros com macromoléculas formadas a partir da repetição de várias unidades químicas iguais, os *meros* ou "unidades repetitivas". De acordo com o autor, os polímeros podem apresentar massas molares da ordem de centenas de milhares de unidades de massa atômica.

Do ponto de vista da nomenclatura, um polímero é nomeado usando o nome do monômero utilizado na sua síntese e não o nome químico da unidade que se repete. Exemplificando, no caso do poli(etileno), sabe-se este é sintetizado a partir do monômero etileno ($H_2C=CH_2$), enquanto a unidade repetida na cadeia polimérica é $[CH_2-CH_2]_n$, sem a representação das ligações duplas, conforme indica a Figura 2.1.

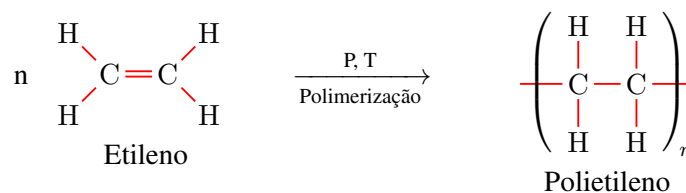


Figura 2.1: Reação de polimerização do etileno em polietileno.

Fonte: Autor

Assim, os polímeros são compostos de muitos átomos conectados entre si para formar longas cadeias, conhecidas como a estrutura do polímero. De acordo com Giles, Wagner e Mount [21], os átomos mais comuns na estrutura são carbono (C), oxigênio (O), nitrogênio (N) ou enxofre (S), combinados em uma configuração única para cada polímero. Outras possibilidades de ligação à longa estrutura do polímero são normalmente alguma combinação de hidrogênio (H), carbono, oxigênio, cloro (Cl), flúor (F) e ou bromo (Br), diferenciando um polímero do outro.

Ainda segundo o mesmo autor, cada polímero tem um arranjo espacial único de átomos combinados em um padrão regular e repetitivo com propriedades físicas e reológicas específicas, resultando em características de processamento distintas e desempenhos variados durante aplicações. Não há como haver dois tipos de polímero com exatamente as mesmas características de processamento na extrusão ou o mesmo perfil de desempenho de propriedade em relação ao

impacto, resistência à tração e flexão, módulo de tração e flexão, cor, resistência ao calor, transparência, propriedades elétricas e assim por diante.

Os autores Canevarolo e Sebastião [2] sustentam que muitas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula, ou seja, da massa molar. Como comumente uma larga faixa de valores de massa molar abrangem os polímeros, espera-se muitas variações em suas propriedades. As alterações de tamanho da molécula, mesmo que pequenas, provocam grandes mudanças nas propriedades físicas. Estas alterações tendem a ser menores com o aumento do tamanho da molécula, conforme indica a Figura 2.2. Isso é benéficamente usado, fabricando-se uma variedade de polímeros (a partir de arranjos e combinações diferentes), para atender necessidades particulares de determinada aplicação ou processo.

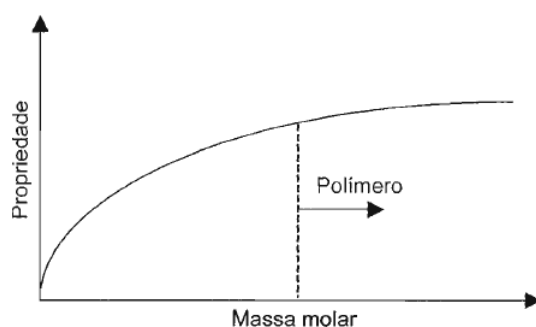


Figura 2.2: Representação gráfica de propriedades de polímeros variando de forma assintótica com o aumento da sua massa molar.

Fonte: Canevarolo e Sebastião [2].

Vale ressaltar, como aponta Canevarolo e Sebastião [2], que não são todos os compostos de baixa massa molar que podem gerar polímeros. Para síntese, é necessário que os monômeros formem uma cadeia polimérica ao ligarem-se entre si. Para tal, cada monômero deve ser se combinar com pelo menos outros dois monômeros que a reação de polimerização ocorra. Esse número de pontos reativos, ou seja, de ligações possíveis por molécula, é chamado de funcionalidade. Logo, para ser possível a polimerização, monômero deve ter pelo menos a funcionalidade 2. Essa bifuncionalidade pode ser conseguida diante da presença de grupos funcionais reativos e de duplas ligações reativas.

2.1.1 Classificações

O desenvolvimento científico propiciou o desenvolvimento de um grande número de polímeros para atender às mais variadas áreas de aplicações. No entanto, muitos deles são variações de moléculas já conhecidas ou são desenvolvidas a partir dessas. Segundo Paoli [20], os polímeros podem ser classificados quanto à sua síntese, em homopolímeros e copolímeros.

Homopolímeros são originários de uma única unidade monomérica, enquanto copolímeros possuem duas ou mais unidades repetitivas diferentes, isto é, são provenientes de dois ou mais co-monômeros. Os homopolímeros apresentam cadeias lineares ou ramificadas. Retornando ao

exemplo do polietileno, este pode tanto ser de baixa densidade, apresentando muitas ramificações, como linear de baixa densidade, com menos ramificações ou de alta densidade, que é quase todo linear. Podem ser usados métodos espectroscópicos para determinar o teor de ramificações com precisão. A presença de ramificações implicam que há átomos de carbono terciário na cadeia polimérica principal, isto é, átomos de carbono que ligados a outros três átomos de carbono. Vale destacar que a energia de ligação química C-H em átomos de carbono terciário é menor do que em secundários.

Os copolímeros são aqueles formados por dois ou mais co-mônômeros e podem estar organizados em blocos, alternados, de forma aleatória, por enxertia ou em “*core-shell*”. Um exemplo, representado na Figura 2.3, é o polímero ABS, que é constituído por 3 monômeros: Acrilonitrila (do inglês, *Acrylonitrile*), 1,3 – Butadieno (do inglês, *1,3-Butadiene*) e Estireno (do inglês, *Styrene*).

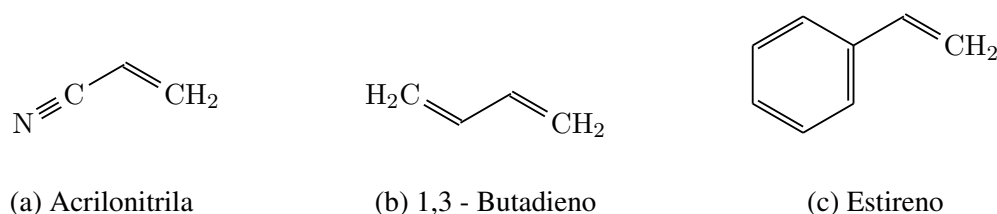


Figura 2.3: Compostos químicos que formam o ABS, (a) Acrilonitrila, (b) 1,3 – Butadieno (c) Estireno.

Fonte: Autor

Além disso, dentre as diferentes divisões de tipos de polímeros adotadas por Canevarolo e Sebastião [2] estão classificações quanto ao comportamento mecânico e quanto ao método de preparo. Esta última é relacionada à síntese polimérica e se divide em:

- **Polímeros de Adição.** Não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular durante a formação destes polímeros. Sendo assim, pode-se assumir que há conversão total, ou seja, o peso do polímero formado é igual à soma dos monômeros. Estes polímeros comumente apresentam cadeia carbônica. Exemplos: PE, PP, PVC, PMMA, etc.
- **Polímeros de Condensação.** Formados da reação de dois grupos funcionais reativos, e, por isso, há a eliminação de moléculas de baixo peso molecular, como água, amônio, HCl, etc.

Quanto ao comportamento mecânico, segundo a referência [2], os polímeros podem ser divididos em:

- **Plásticos:** Materiais poliméricos sólidos na temperatura de utilização (temperatura ambiente ou próximo dela). Podem ser subdivididos em:
 - *Termoplásticos:* Podem ser amolecidos quando submetidos a um aumento substancial de temperatura e pressão, permitindo que fluem, e solidificam quando o calor é removido. Podem ser processados por extrusoras, injetoras e outros equipamentos de processamento de fusão repetidas vezes.

- *Termorrígidos*: Também chamados de termofixos, são plásticos que são aquecidos apenas para acelerar a reação química de cura, formando ligações cruzadas em cadeias, onde uma nova espécie química é transformada em um sólido. Após resfriado, subsequentes aumentos de temperatura e pressão não têm mais influência no amolecimento e fluxo do polímero, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não-recicláveis.
- **Elastômeros**: Na temperatura ambiente, estes polímeros podem se deformar pelo menos duas vezes o seu comprimento inicial, além de retomarem ao comprimento original após retirados os esforços. Para tal, os elastômeros usualmente apresentam cadeias flexíveis amarradas entre si, com uma baixa densidade de ligação cruzada.
- **Fibras**: Termoplásticos orientados, com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra. As cadeias e os cristais são orientados forçadamente durante a fiação, de tal forma que aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, possibilitando o uso destes na forma de fios finos.

2.1.2 Viscosidade e Efeitos Viscoelásticos

O autor Callister [6] define viscosidade como sendo uma medida da resistência de determinado material ao escoamento em função de forças de cisalhamento.

Conforme mostrado na Tabela 2.1, a viscosidade do polímero fundido é relativamente alta quando comparada à da água. Assim, os fundidos de polímero geralmente apresentam fluxo laminar, ou seja, o fundido se move em camadas.

Tabela 2.1: Viscosidade típica de alguns materiais.

Material	Viscosidade [Pa·s]
Ar	10^{-5}
Água	10^{-3}
Látex de Polímero	10^{-2}
Azeite	10^{-1}
Glicerina	1
Polímero Fundido	$10^2 - 10^6$
Piche	10^9
Plásticos	10^{12}
Vidro	10^{21}

Dados: Harper [1].

Segundo fluxo laminar, as camadas normalmente fluem em velocidades diferentes; por exemplo, o fundido no centro de um canal (Figura 2.4a) flui mais rápido do que o fundido próximo às paredes do canal. Se a geometria do canal de fusão se expande (Figura 2.4b) ou se contrai, a velocidade da fusão diminui ou aumenta, respectivamente. À medida que as camadas se movem umas em relação às outras, elas produzem cisalhamento, enquanto uma mudança na velocidade

de todas as camadas induz alongamento ou extensão.

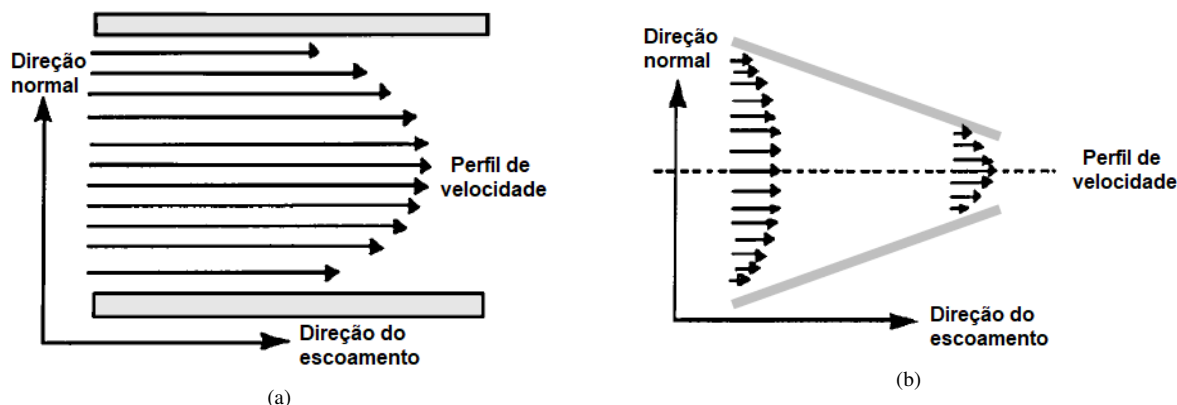


Figura 2.4: Perfis de velocidade: (a) fluxo de cisalhamento e (b) fluxo de alongamento.

Fonte: Adaptado de Harper [1].

Em fluidos newtonianos, como água, álcoois e outros solventes, oligômeros e polímeros de baixo peso molecular, como óleos hidráulicos e minerais, a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento. No entanto, a maioria dos fundidos de polímero são classificados como pseudoplásticos, isto é, sua viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Conforme mostrado na Figura 2.5, a diminuição da viscosidade dos fluidos pseudoplásticos não ocorre imediatamente. Em baixas taxas de cisalhamento, as moléculas de polímero fluem como espirais aleatórias e a viscosidade do polímero fundido não é afetada pelo aumento da taxa de cisalhamento. A viscosidade constante desse platô newtoniano inferior é chamada de viscosidade com taxa de cisalhamento zero (0).

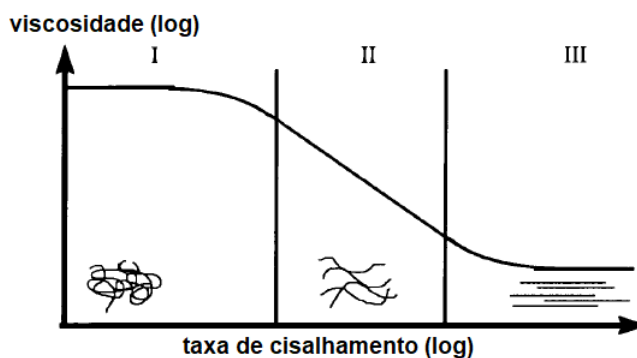


Figura 2.5: Efeito do cisalhamento na viscosidade de materiais poliméricos: platô newtoniano baixo (I), região da lei de potência (II) e platô newtoniano superior (III).

Fonte: Adaptado de Harper [1].

À medida que a taxa de cisalhamento continua a aumentar, as cadeias de polímero começam a se alinhar na direção do fluxo. Uma vez que menos esforço é necessário para mover o polímero fundido, a viscosidade diminui. Taxas de cisalhamento mais altas alinham ainda mais as cadeias de polímero e a diminuição da viscosidade eventualmente se torna proporcional ao aumento na taxa de cisalhamento. Nesta região de lei de potência, a viscosidade e a taxa de cisalhamento

estão relacionadas por:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.1)$$

onde k é o índice de consistência e n é o índice da lei de potência. O índice da lei de potência é um indicador da sensibilidade de um material ao cisalhamento (taxa) ou o grau de comportamento não newtoniano. De acordo com Callister [6], para fluidos Newtonianos $n = 1$ e para fluidos pseudoplásticos $n < 1$, com valores menores indicando maior sensibilidade ao cisalhamento, conforme observado visualmente na Figura 2.6. Em taxas de cisalhamento muito altas, as cadeias de polímero são, em teoria, totalmente alinhadas na direção do fluxo. Assim, a viscosidade não pode diminuir mais e é constante no platô newtoniano superior.

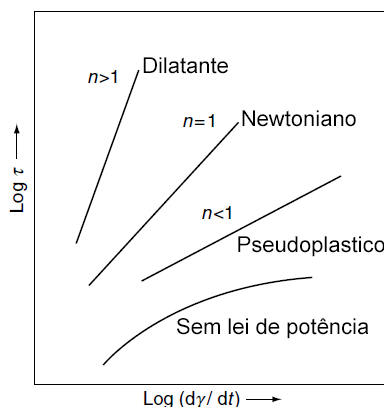


Figura 2.6: Gráfico esquemático de lei de potência mostrando $\log \tau$ versus $(\log d\gamma/dt)$ para diferentes tipos de materiais fluidos.

Fonte: Adaptado de Chanda e Roy [3].

A Tabela 2.2 mostra que a taxa de cisalhamento varia consideravelmente com o método de processamento. Portanto, o grau de alinhamento, afinamento por cisalhamento e relaxamento do material variam consideravelmente com o processo. A compressão e a moldagem rotacional, características da extrusão, geralmente induzem muito pouco alinhamento das cadeias de polímero e, portanto, produzem baixos níveis de orientação e tensão retida. Em contraste, as cadeias de polímero são altamente orientadas durante a moldagem por injeção, e tais peças exibem altos níveis de tensão residual. As taxas de cisalhamento ou "de corte" para o processamento por extrusão são normalmente delimitadas entre valores de 100 até 1000 s^{-1} .

Tabela 2.2: Taxas de cisalhamento típicas para processos selecionados.

Processo	Taxa de Cisalhamento [s^{-1}]
Moldagem por Compressão	1 – 10
Calandragem	10 – 100
Extrusão	100 – 1.000
Moldagem por injeção	1.000 – 100.00

Dados: Harper [1].

A viscosidade também é afetada pela temperatura e pressão. O aumento da temperatura au-

menta a mobilidade das moléculas de polímero e, portanto, reduz a viscosidade. Uma expressão para a dependência da viscosidade com a temperatura é dada por uma equação de Arrhenius:

$$\eta = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.2)$$

onde A é uma constante do material, E_a é a energia de ativação (que varia com o polímero e a taxa de cisalhamento), R é uma constante e T é a temperatura absoluta. Como a energia de ativação varia com a temperatura, a Equação 2.2 é usada apenas para intervalos curtos de temperatura, normalmente apenas no polímero fundido. A equação William's-Landel-Ferry, para determinação da viscosidade de corte zero, é dada por:

$$\eta_r = D_1 \exp\left[-\frac{A_1(T - T_r)}{A_2 + (T - T_r)}\right] \quad (2.3)$$

onde η_r é a viscosidade em uma temperatura de referência T_r e D_1 , A_1 e A_2 são constantes de material e são usadas para faixas de temperatura mais amplas. O autor Harper [1] afirma que, mesmo que a pressão aumente a viscosidade, os efeitos são relativamente insignificantes quando as pressões de processamento são inferiores a 35 MPa. Para isso, em pressões mais altas, equações como a do modelo viscoso de viscosidade Cross-WLF descrevem a temperatura, taxa de corte e dependência de pressão da viscosidade.

$$\eta = \frac{\eta_r}{1 + \left(\frac{\eta_r \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2.4)$$

onde η_r é a viscosidade em uma referência em Pa.s, geralmente sendo esta a viscosidade de cisalhamento zero, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento em 1/s, τ^* é a tensão crítica na transição para a diluição do corte em Pa e n é o índice de lei de potência.

O tipo de polímero, o peso molecular e os aditivos influenciam a viscosidade. A viscosidade de taxa de cisalhamento zero aumenta com o peso molecular (\bar{M}_w) conforme:

$$\eta_0 = K \bar{M}_w^a \quad (2.5)$$

onde K é uma constante empírica e a é 1 quando o peso molecular é menor que o peso molecular crítico (M_c) e cerca de 3, 4 acima do valor crítico. Como as resinas termoplásticas normalmente têm pesos moleculares superiores ao peso molecular crítico, cadeias de polímero mais longas diminuem a capacidade de processamento de um material.

Harper [1] documenta que, para cadeias extremamente longas, como as presentes em fundidos de chapas de acrílico, o processamento de fusão convencional não é possível devido à viscosidade excessivamente alta. No entanto, para polímeros de baixo peso molecular, o início do estreitamento de cisalhamento ocorre em taxas de cisalhamento mais altas. Isso produz o platô newtoniano inferior estendido frequentemente observado com alguns tipos de policarbonato, poli(tereftalato de butileno) e outros materiais.

Em geral, polímeros com cadeias flexíveis, como polipropileno e poliamida-6,6, fluem facilmente, enquanto aqueles com cadeias rígidas apresentam maior viscosidade. A mistura de dois polímeros pode alterar significativamente a viscosidade da mistura.

De acordo com Mikula et al. [9], os aditivos também alteram a viscosidade do fundido. Os lubrificantes normalmente diminuem a viscosidade e os enchimentos e as fibras aumentam a viscosidade. No entanto, o efeito do corante varia com a cor e os dispersantes, enquanto o efeito dos modificadores de impacto varia com o sistema de base e o modificador de impacto.

2.1.3 Processamento de Termoplásticos

De um modo geral, Paoli [20] classifica o processamento de termoplásticos separando-os em: rotomoldagem, injeção, injeção seguida de sopro, extrusão, extrusão e sopro, calandragem, moldagem por compressão e termoformagem. Estas são formas de processamento aplicadas tanto a termoplásticos, como a elastômeros termoplásticos.

Embora as operações de conformação sempre envolvam fluxo, os processos termoplásticos, como extrusão, moldagem por injeção de termoplásticos, termoformagem e moldagem rotacional, produzem mudanças físicas no polímero, enquanto a mudança química ocorre na fundição de monômeros líquidos, de acordo com Harper [1].

Durante o processamento, os termoplásticos estarão sujeitos a temperatura, pressão e cisalhamento. Em cada processo, esses fatores agem e têm impactos diferentes. A Tabela 2.3 exemplifica o tempo e o grau de aplicação de cada um destes dependendo do tipo de processamento empregado e como estes influenciam o processo de degradação.

Tabela 2.3: Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais.

Processamento	Tempo	Pressão	Aquecimento	Cisalhamento	Presença de O ₂
Termoformagem	++	+	++	--	++
Moldagem por Compressão	++	++	++	--	++
Calandragem	+	--	+	--	++
Extrusão	--	+	++	++	-
Injeção	--	+	++	++	-
Rotomoldagem	++	--	++	--	++

Dados: Paoli [20].

Paoli [20] define o efeito do tempo como “tempo de residência”, que é o tempo para transportar a massa polimérica desde zona de alimentação até a saída na matriz. A presença de oxigênio está relacionado à possibilidade deste gás para causar reações de oxidação. Porém, a presença de gases nos processos de extrusão e injeção podem sim causar problemas, como a formação de bolhas no produto final.

2.1.4 Defeito Pele de Cação

O defeito conhecido como pele de cação (ou tubarão), segundo Manrich [22], é caracterizado pela falta de adesão da massa fundida com a parede da matriz e do barril. O processamento de polímeros exige o correto escorregamento do fluxo polimérico sobre as paredes internas da máquina. A presença de uma camada de polímero aderida impede que isto ocorra. Por isso, se por qualquer motivo, a parede estiver com uma rugosidade elevada, ou uma rugosidade não constante, ocorrerá o defeito pele de cação resultando num produto final com superfície não desejada. Se as paredes da matriz forem lisas, com rugosidade baixa, a massa fundida irá fluir constantemente e o produto final terá boa qualidade. Para avaliar se está havendo ou não esse fenômeno, deve-se atentar para a mudança do perfil de velocidades na saída da matriz.

2.2 COMPORTAMENTO TÉRMICO EM POLÍMEROS

A mobilidade da cadeia polimérica reflete nas características físicas do material, que pode apresentar aspectos de um polímero duro e frágil, borrachoso e tenaz ou um fluido viscoso. Segundo Canevarolo e Sebastião [2], a mobilidade é função da agitação dos átomos nas moléculas, o que é diretamente proporcional à temperatura. O polímero processado em temperaturas altas pode apresentar propriedades de um fluido e, quando resfriado, apresentar características de um material flexível ou rígida. Para entendimento de tal variabilidade de comportamento, é necessário pontuar quatro fenômenos cruciais em relação ao processamento dos materiais poliméricos e ao trabalho com eles, que são a cristalização, a fusão, a transição vítrea e a degradação.

2.2.1 Cristalização

A cristalização de um polímero fundido ocorre por processos de nucleação e crescimento. Segundo Callister [6], no resfriamento através da temperatura de fusão, formam-se núcleos nos pontos onde pequenas regiões das moléculas embaraçadas e aleatórias tornam-se ordenadas espacialmente de forma regular. Quando acima da temperatura de fusão, esses núcleos se tornam instáveis por causa das vibrações dos átomos, que tendem a romper os arranjos ordenados de moléculas. Depois da nucleação e durante a fase de crescimento dos cristais, os núcleos aumentam seguindo a contínua ordenação e o alinhamento de segmentos novos de cadeias moleculares.

Segundo Canevarolo e Sebastião [2], a cristalização ocorre de duas formas: isotérmica, quando a temperatura é rapidamente decaída até um valor, e, depois, estabiliza e se mantém constante até a ocorrência total da cristalização; ou de forma dinâmica, que é quando a temperatura decai continuamente, a uma taxa constante ou não, sendo que a cristalização acontece em uma faixa de temperatura. De qualquer forma, a cristalização acontece apenas no resfriamento, em temperaturas entre as temperaturas de transição vítrea e de fusão.

Uma vez que a cristalização ocorre em uma faixa de temperatura, é usual definir um único

ponto, chamado de **temperatura de cristalização** (T_c), para resumir o que acontece ao redor dele. O ponto de inflexão na Figura 2.7 define a temperatura de cristalização.

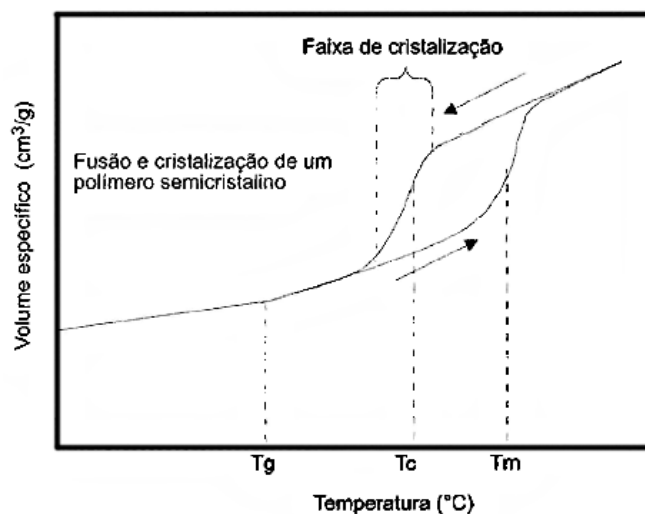


Figura 2.7: Variação do volume específico durante um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento de um polímero semicristalino.

Fonte: Adaptado de Canevarolo e Sebastião [2].

2.2.2 Temperatura de Transição Vítrea

A transição vítrea é um dos mais importantes efeitos térmicos, tanto que é muito utilizada para caracterizar polímeros e outros materiais semicristalinos ou amorfos. Segundo Callister [6], a transição vítrea é a propriedade do material em que há a transição do estado vítreo para um estado “maleável”, sem que haja uma mudança na estrutura. A parcela amorfa do material, onde há o desordenamento das cadeias moleculares, é a responsável por esse efeito da **temperatura de transição vítrea** (T_g). Quando abaixo da T_g , não há energia interna suficiente para deslocar uma cadeia em relação a outra. Logo, quanto maior a região cristalina do material, menor será a área amorfa e, conseqüentemente, menos visível será os efeitos da transição vítrea.

Canevarolo e Sebastião [2] classifica a T_g como uma transição termodinâmica de segunda ordem, ou seja, seu efeito afeta variáveis termodinâmicas secundárias. Sendo assim, algumas dessas propriedades que mudam com a T_g podem ser usadas para determiná-la.

Ainda segundo o mesmo autor, durante um resfriamento, um material passa de um líquido super-resfriado ou até mesmo “borrachoso” para um estado sólido ao passar pela temperatura de transição vítrea. Esse efeito térmico ocorre no aquecimento também. No estado líquido, ocorre os rearranjos cooperativos, que é quando as moléculas movem-se em relação às outras. No estado vítreo, quase não há nenhuma mobilidade entre esses arranjos.

2.2.3 Temperatura de Fusão

Callister [6] define a fusão de um cristal polimérico como a transformação de um material sólido, dotado de uma estrutura de cadeias moleculares ordenadas e alinhadas, em um líquido viscoso, cuja estrutura é altamente aleatória. Esse fenômeno ocorre na **temperatura de fusão** (T_f) durante o aquecimento. Segundo Canevarolo e Sebastião [2], neste ponto, a energia do sistema ultrapassa o necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, e o material passa de um estado borrachoso para um estado viscoso, também chamado de fundido, pois há a quebra da estrutura regular de empacotamento. Esta transição ocorre apenas na fase cristalina e, por isso, só se aplica para polímeros semicristalinos, como é observado na Figura 2.8. É uma mudança termodinâmica de primeira ordem, afetando variáveis como volume específico, entalpia, entre outras.

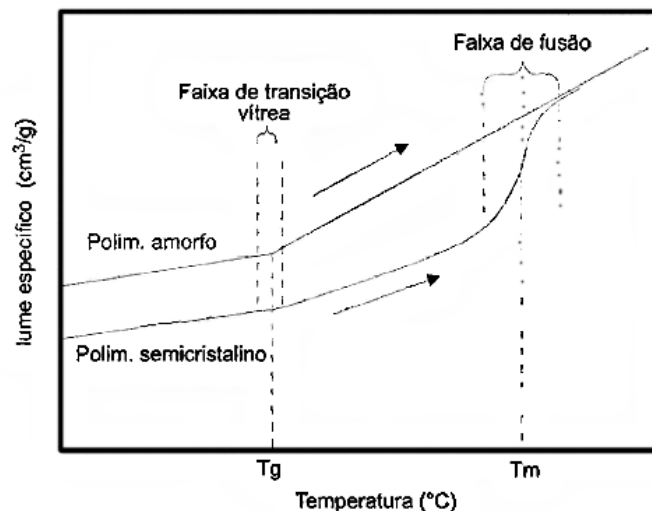


Figura 2.8: Variação do volume específico com o aumento da temperatura mostrando as faixas de temperatura em que ocorrem as transições T_g e T_m .

Fonte: Adaptado de Canevarolo e Sebastião [2].

Analisando a Figura 2.8, começando de temperaturas mais baixas e aumentando-as constantemente, percebe-se um gradativo aumento da mobilidade, o que reflete em uma expansão térmica linear. Ultrapassando a T_g , o aumento da mobilidade das cadeias continua, mantendo a expansão térmica linear, porém com uma taxa maior, o que é perceptível pela inclinação da curva. O ponto de inflexão, que corresponde ao T_g , é encontrado ao extrapolar os dois segmentos lineares. Caso este seja um polímero semicristalino, se a temperatura continuar a aumentar a partir deste ponto, o nível energético será elevado o suficiente para fundir os cristais, resultando em um pequeno incremento localizado e instantâneo de volume. Visto que cristais apresentam diferentes tamanhos, não há um ponto específico e sim uma faixa de temperatura para que todos cristais fundam. Nessa faixa de temperatura, há uma mudança termodinâmica de primeira ordem que corresponde ao rápido aumento do volume específico. O polímero é chamado de fundido após a fusão de todos os cristais. Nesse nível alto de temperatura em que se encontra, um crescimento linear da temperatura irá gradativamente aumentar a mobilidade das cadeias.

2.2.4 Temperatura de Degradação

Canevarolo e Sebastião [2] define **degradação** como qualquer fenômeno que resulte em uma mudança química na cadeia polimérica, normalmente apresentando redução da massa molar e queda nas propriedades físico-mecânicas. Se trata então de uma modificação química destrutiva com a quebra de ligações covalentes. Segundo o mesmo autor, ela pode ocorrer por oxidação, hidrólise, cisão de cadeia, entre outros.

A **degradação térmica**, conforme Callister [6], corresponde à cisão de cadeias moleculares em temperaturas elevadas, podendo haver como consequência, reações químicas nas quais são produzidos gases. Essas reações ficam evidenciadas por uma perda de peso do material. A estabilidade térmica de um polímero é nome utilizado para a medida de sua resistência a esta decomposição. A estabilidade térmica está principalmente relacionada com a magnitude das energias de ligação entre os diferentes constituintes atômicos. Sendo assim, maiores energias de ligação implicam em materiais mais termicamente estáveis. As energias de ligação das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais estão listadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Energias de ligação para algumas das ligações químicas mais frequentes em polímeros comerciais.

Material	Energia de ligação [$kJ mol^{-1}$]
C — H primário	432
C — H secundário	410
C — H terciário	390
C — H aromático	460
C — F	486
C — Cl	340
C — C	348
C = C	612
C ≡ C	838
C ≡ N	893
C — O	419
O — CO	461
C = O aldeído	742
C = O cetona	746
C = O éster	750
C = O amida	750
O — O	138
O — H	465

Dados: Paoli [20].

Assim, conforme exemplificado por Canevarolo e Sebastião [2], caso a cadeia principal de um polímero apresente alguma ligação química cuja energia de ligação seja menor que a de ligação covalente simples $C - C$ (348 kJ/mol), esta pode se instabilizar e ser atacada por uma molécula de baixa massa molar, como o oxigênio e água. Esse ataque resulta na quebra da cadeia principal

e, então, divisão neste ponto. Estes ataques são distribuídos de forma aleatória ao considerarmos a cadeia como um todo.

As interações inter e intra-moleculares também afetam a temperatura de início de decomposição térmica em polímeros. De acordo com Paoli [20], isto está relacionado à condutividade térmica, a maneira que o calor é transportado pelo polímero. Um transporte de calor mais eficiente irá favorecer a degradação térmica, enquanto o inverso causará uma degradação apenas superficial. Também é necessário considerar as temperaturas de transição de fase de primeira e segunda ordens, visto que a mobilidade das macromoléculas em determinada temperatura afeta a estabilidade térmica naquele ponto. O grau de cristalinidade e a forma como a fase cristalina se localiza no material polimérico depois de processado também afeta a mobilidade das macromoléculas.

Paoli [20] explica que, como os polímeros são geralmente bons isolantes térmicos, isto é, apresentam baixa condutividade térmica, o tempo de exposição a uma determinada temperatura e a velocidade de aquecimento também influencia a sua estabilidade térmica.

Assim, por exemplo, o polietileno, formado basicamente por ligações covalente $C - C$ e $C - H$, apresenta uma faixa de temperatura de decomposição de $375^{\circ}C$ a $436^{\circ}C$. Sendo assim, a exposição de filmes de polietileno a $50^{\circ}C$ em períodos da ordem de minutos não causará nenhuma reação química de degradação, porém se expostos a essa temperatura durante dias, se observará um amarelecimento típico de processos de termo-oxidação, como observado na Figura 2.9. Essa coloração é devido à introdução de grupos funcionais como carbonilas e hidroperóxidos, que promovem mudanças nas propriedades físicas e ópticas dos polímeros, de acordo com Klein [23].

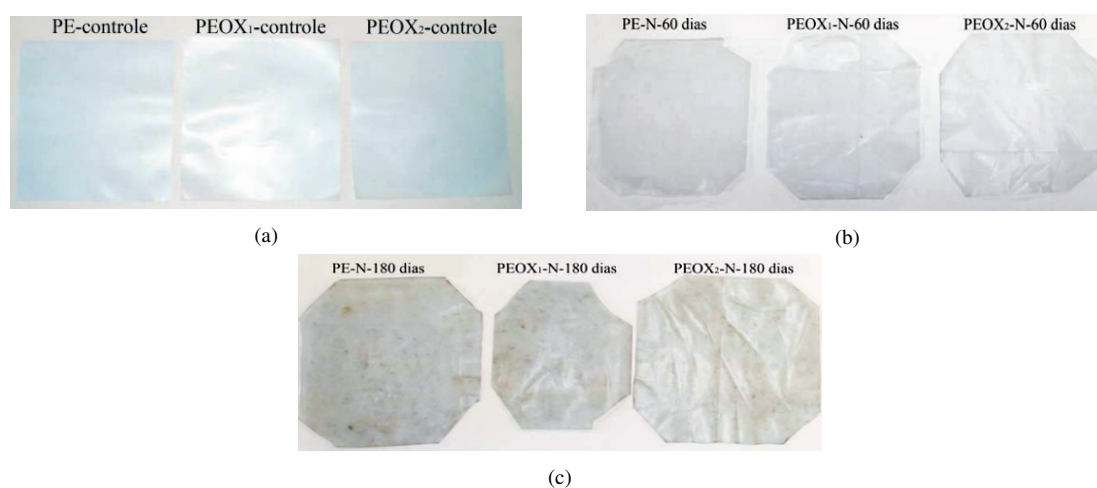


Figura 2.9: Aspecto visual de amostras PE, PEOX1 e PEOX2, (a) antes e (b) após 60 e (c) 180 dias de exposição ao envelhecimento natural.

Fonte: Adaptado de Klein [23].

Diante do exposto, se o polímero estiver no estado fundido, o tempo de residência será uma variável importante para determinar se haverá ou não degradação ao longo do processamento.

O envelhecimento, isto é, o grau de entrelaçamento das cadeias polímeros, é mais um fator que influencia a dissipação de energia térmica, como aponta Paoli [20]. Assim, um polímero de baixo grau de cristalinidade apresentará um grau maior de envelhecimento decorrente do aumento da massa molar ou do aumento do número de ramificações na cadeia. Isso se deve, pois um maior envelhecimento implicará em uma restrição maior aos movimentos macromoleculares e em uma menor dissipação da energia térmica, sendo maior a probabilidade de quebra de ligações químicas.

Segundo Canevarolo e Sebastião [2], se, além da temperatura, também houver cisalhamento, a degradação térmica será do tipo termomecânica, resultando na mesma cisão de cadeia, mas de forma mais intensa, devido ao esforço cisalhante aos quais as cadeias estarão sujeitas.

2.2.5 Métodos de acompanhamento por processos térmicos.

Segundo Callister [6], as temperaturas de fusão e de transição vítrea definem, respectivamente, os limites de temperatura superior e inferior para numerosas aplicações, especialmente para os polímeros semicristalinos. Além disso, os valores de T_g e de T_m também afetam os procedimentos de fabricação e de processamento de polímeros e compósitos de matriz polimérica, por isso é tão necessário determiná-los. Para isso, pode ser usados análises térmicas.

De acordo com Paoli [20], os principais métodos térmicos usados em estudos de polímeros são a termogravimetria (TGA) e a calorimetria diferencial exploratória (DSC). É possível também utilizar analisadores termogravimétricos simultâneos (STA) que já possuem recursos de DSC (calorimetria diferencial de varredura) e TGA (análise termogravimétrica) em um único instrumento. A Figura 2.10 apresenta as curvas sobrepostas de DSC e TGA do poliácido lático puro (PLA), e será fonte de análise nesta Seção.

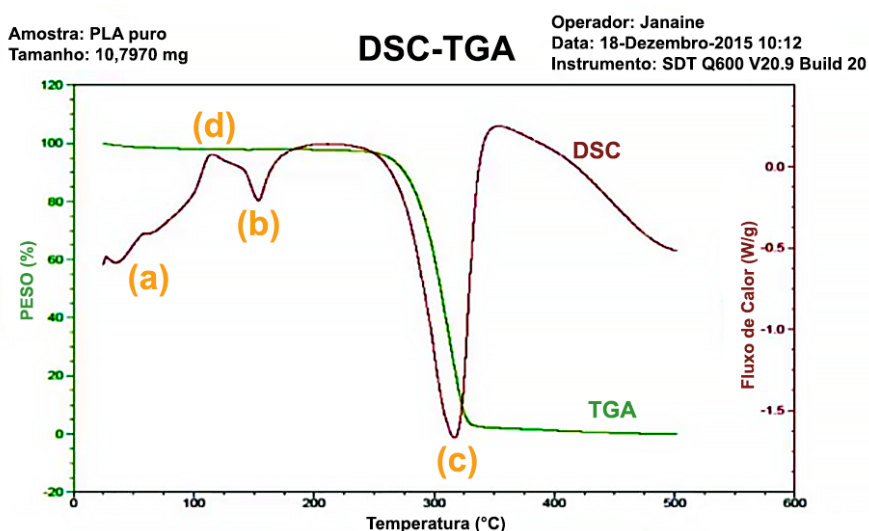


Figura 2.10: Curvas de DSC e TGA do aquecimento do PLA puro. (a) Temperatura de Transição Vítrea, (b) Temperatura de Fusão, (c) Degradação, (d) Cristalização.

Fonte: Adaptado de Santana et al. [24].

A **análise termogravimétrica** é uma técnica na qual a massa da amostra é monitorada em relação ao tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra é controlada. Segundo Paoli [20], a primeira derivada da curva de perda de massa em relação ao tempo em função da temperatura ($dm/dt = f(T)$) informa a respeito do número de processos de perda de massa e da temperatura em que eles ocorrem com velocidade máxima, T_{max} . Assim, esta curva irá indicar com maior clareza a ocorrência de diversos processos de perda de massa. No caso da Figura 2.10, só é possível observar um processo, visto que há apenas uma reação química principal produzindo produtos voláteis durante a degradação do PLA.

Ademais, a curva TGA também fornece outras informações além das já mencionadas, como: velocidade de perda de massa, porcentagem de massa perdida em cada um dos processos e massa de resíduos não voláteis.

Segundo Canevarolo e Sebastião [2], a **técnica de calorimetria exploratória diferencial** (DSC) é um importante meio para a obter a T_g . Isso se deve, pois a T_g é caracterizada pela mudança de C_p (Calor específico) na curva DSC. Em outras técnicas, tais como: DMA (Análise Dinâmico-Mecânica) ou TMA (Análise Termomecânica), a T_g pode ser encontrada a partir de outras propriedades físicas, como: Coeficiente de Expansão Térmica (CTE) e Módulo de Elasticidade.

As curvas de DSC e TGA podem ser usadas em conjunto para explicar qual fenômeno térmico está ocorrendo em uma amostra. Portanto, uma decomposição térmica aparecerá como uma perda de massa e um pico endotérmico, como os pontos (a), (b), (c) e (d) da Figura 2.10. A oxidação é vista como um ganho de massa e um aumento de energia. A Tabela 2.5 exemplifica alguns casos:

Tabela 2.5: Fenômenos decorrentes da análise simultânea das curvas DSC e TGA.

Fenômeno	TGA	DSC
Decomposição térmica		
Decomposição oxidativa		
Oxidação		
Desidratação		
Sublimação/Evaporação		
Fusão		
Cristalização		
Transição Vítre		

Baseado em: Paoli [20] e Canevarolo e Sebastião [2].

Assim, analisando a Figura 2.10, o PLA puro exibe, em (a) temperatura de transição vítrea,

T_g , de aproximadamente 50°C , um pico de cristalização exotérmica antes da fusão em torno de 125°C e um pico de fusão endotérmica, T_m perto de 160°C . A perda acentuada de massa acompanhada de um pico endotérmico caracteriza a faixa de degradação do PLA, em torno dos 320°C . Vale destacar que esses valores são bem próximos aos posteriormente apresentados nas Tabelas 2.6 e 2.7.

2.3 POLIÁCIDO LÁCTICO

O poliácido láctico (PLA) ou ácido poliláctico, é um polímero constituído por moléculas de ácido láctico, ácido orgânico obtido a partir de recursos renováveis, de origem biológica. Os autores Brito et al. [25] descrevem que o ácido láctico que é usado na síntese do PLA apresenta como origem fontes naturais renováveis contendo amido ou açúcar, como milho, trigo, cana-de-açúcar, beterraba ou batata.

De acordo com Chanda e Roy [3], o poliéster alifático linear PLA é quimicamente sintetizado por polimerização de condensação do ácido livre ou polimerização catalítica por abertura de anel do lactídeo (dilactona do ácido láctico), apresentados na Figura 2.11a.

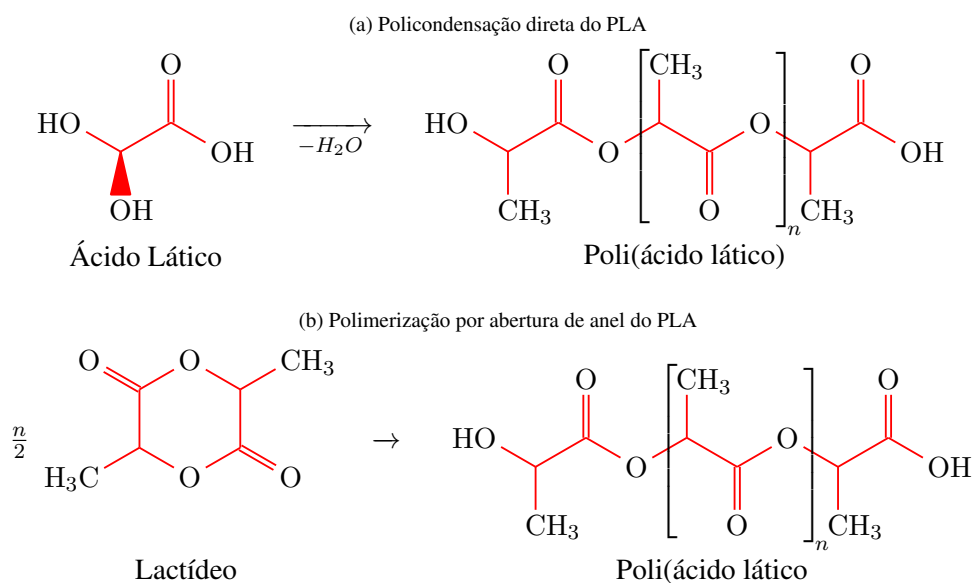


Figura 2.11: Rotas de síntese do poliácido láctico.

Fonte: Autor.

Segundo Lasprilla [26], a técnica de policondensação direta (Figura 2.11a) apesar de ser mais simples, resulta em um polímero de baixa massa molecular, ao passo que o método de abertura do anel implica em um polímero de alto peso molecular, apresentando como empecilho o alto custo de produção visto que o alto valor do produto. Canevarolo e Sebastião [2] explica que a polimerização em etapas, ou policondensação, consiste na condensação sucessiva de grupos funcionais reativos existentes nos materiais iniciais, aumentando o tamanho das moléculas até estas atingirem o tamanho de uma cadeia polimérica.

A polimerização por abertura de anel (Figura 2.11b), segundo Canevarolo e Sebastião [2], parte-se de um monômero na forma de um anel e, através da abertura deste anel, tem-se a geração de uma bifuncionalidade que formará uma cadeia polimérica ao se reagir consigo mesma muitas vezes. Evidentemente, neste tipo de polimerização, não há a formação de subprodutos durante a reação.

Em relação às aplicações, o PLA é usado principalmente para implantes médicos e distribuição de medicamentos, além de utilizações mais amplas em embalagens e bens de consumo também, além de ser utilizado para formação de blendas e compósitos e a copolimerização com outros polímeros, expandindo os campos de atuação do material. Segundo Chanda e Roy [3], uma característica atrativa desse material é o custo relativamente baixo do monômero, ácido láctico, que pode ser derivado de biomassa (fermentação), carvão, petróleo ou gás natural.

2.3.1 Propriedades do PLA

De acordo com Lasprilla [26] poliácido láctico é um dos polímeros biodegradáveis mais promissores devido à suas propriedades químicas, processabilidade termoplástica e, inclusive, suas propriedades biológicas, como biocompatibilidade e biodegradabilidade.

Algumas características do PLA, apontadas pelo autor Garlotta [27] são: é incolor, brilhante, rígido, propriedades semelhantes ao poliestireno. O PLA pode ter uma degradação no ambiente variando de 6 meses a 2 anos. Suas propriedades de tração podem variar muito, dependendo se é recozido ou orientado, e de seu grau de cristalinidade.

O poliácido láctico quando comparado com outros polímeros biodegradáveis apresenta propriedades mecânicas e térmicas próximas às de polímeros com importantes aplicações, como o politereftalato de etileno (PET) e o poliestireno (PS). Os autores Oliveira e Borges [28] destacam que, mesmo possuindo diversas vantagens para aplicação em embalagens, como o fácil processamento, boa transparência, ser ambientalmente benigno e ser economicamente competitivo, o PLA possui desvantagens como o baixo desempenho mecânico e a sensibilidade à degradação térmica.

Tabela 2.6: Tabela com propriedades e características do PLA.

Propriedade	PLA
Tipo de polimerização	Policondensação
Tipo de Cadeia	Linear
Densidade [g/cm^3]	1,24
Cristalinidade [%]	até 40
Tm [$^{\circ}C$]	130 – 180
Tg [$^{\circ}C$]	50 – 80
Índice de fluidez a 190 $^{\circ}C$ [$g/10min$]	10

Dados: Cramer et al. [29].

Como filamento de impressão 3D, conforme artigo da empresa 3DFila@[19], o PLA é um

dos materiais mais utilizados na impressão 3D por fusão. Esse termoplástico tem características únicas, como elevada dureza e brilho, além de ser o material de maior facilidade de impressão.

Ainda segundo a publicação, este é considerado como um dos materiais mais populares devido a sua facilidade de utilização. Por ser considerado como um dos materiais mais fáceis para se utilizar na impressão 3D e garantir bons resultados desde as primeiras tentativas, fazem desde o melhor material para se começar no ramo. Aspectos como possibilidade de não precisar utilizar mesa aquecida e a baixa contração do material quando resfriado são alguns dos benefícios de se escolher o PLA.

Algumas propriedades da ficha técnicas dos dois tipos de filamento de PLA comercializados pela empresa 3DFila®[19], são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Tabela com propriedades e características das opções PLA da 3DFila.

Propriedade	PLA Basic	PLA EasyFill
Densidade	1,24 [g/cm^3]	1,25 [g/cm^3]
Temperatura de Fusão	190 [$^{\circ}C$]	185 [$^{\circ}C$]
Resistência a Flexão	130 [MPa]	115 [MPa]
Módulo de Elasticidade	4350 [MPa]	3830 [MPa]
Temperatura de Transição Vítea	60 [$^{\circ}C$]	58 [$^{\circ}C$]
Dados de Ensaio de Tração - ASTM D 638		
Alongamento	3,7 [%]	5,45 [%]
Módulo de Elasticidade	1848,5 [MPa]	1697,8 [MPa]
Tensão de Escoamento	24,8 [MPa]	22,6 [MPa]
Tensão de Ruptura	46 [MPa]	42 [MPa]
Dados de Ensaio de Dureza - ASTM D 2240		
Dureza Shore	85 [Shore D]	80 [Shore D]
Dados de Ensaio HTD - ISSO 75		
Temperatura HDT	56,20 [$^{\circ}C$]	56,20 [$^{\circ}C$]

Dados: 3DFila [19].

Conforme a referência bibliográfica [19], este é um polímero de fácil utilização e não emite odor ou gás forte durante o processo de impressão sendo um grande diferencial perante aos demais termoplásticos. O filamento PLA tem um odor adocicado, como o açúcar. Seu processo de impressão 3D resulta em bom dimensional da peça e também apresenta ótimo resultado em peças de maior volume.

2.3.2 Degradação do PLA

Segundo Chanda e Roy [3], as ligações éster no polímero são sensíveis à hidrólise enzimática e química. O PLA é hidrolisado por muitas enzimas, incluindo pronase, proteinase K, bromalín, ficin, esterase e tripsina. A taxa de degradação do PLA também varia com a variação do pH. A quantidade de ácido láctico liberado durante o curso da degradação do PLA é muito pequena, mas

aumenta rapidamente à medida que o PLA é quebrado em oligômeros de baixo peso molecular.

Os principais componentes do filamento comercial são termoplásticos. Durante a impressão 3D, uma mudança de fase ocorre no material do filamento como resultado de seu aquecimento (acima do ponto de fusão), fusão no bocal e solidificação após extrusão. Os autores Mikula et al. [9] relatam que, sob a influência da temperatura elevada, a degradação de polímeros também pode ocorrer, causando defeitos que são termicamente instáveis e podem levar a mudanças estruturais devido à despolimerização ou cisão aleatória. Sob a influência da temperatura elevada, a degradação termomecânica também pode incluir quebras de cadeia, reduzindo o peso molecular e a viscosidade. Mesmo ao usar impressões, pode ocorrer degradação do polímero (fatores fotoquímicos, térmicos e hidrolíticos). Isso afeta as propriedades e a estrutura do material.

Vanin et al. [30] relata que nas cadeias instáveis, a hidrólise química é o principal mecanismo de degradação polimérica. Segundo Jahno [31], para os polímeros semicristalinos, são duas as etapas da degradação hidrolítica, sendo que, na primeira, a água entra atingindo as cadeias de fase amorfa, o que implica em cadeias menores, e então em fragmentos solúveis. Esta etapa resulta na redução na massa molar da fase amorfa sem que tenha redução das propriedades físicas, a princípio. Na etapa posterior, ocorre um ataque enzimático dos fragmentos gerados e implica na perda de massa polimérica.

Segundo Oliveira e Borges [28], a biodegradação é obtida através da quebra de ligações hidroliticamente instáveis presentes em polímeros biodegradáveis, onde os grupos funcionais mais comuns entre os polímeros biodegradáveis são ésteres, ortoésteres, amidas e anidridos. O comportamento de biodegradação do PLA é uma característica típica de um poliéster e é o motivo para o alto interesse em seu uso principalmente em aplicações médicas e na indústria.

Os autores ainda afirmam que o PLA tem uma meia-vida relativamente longa, se comparado a outros polímeros biodegradáveis, visto os efeitos estéricos onde o grupo alquil impede a hidrólise, isto é, o ataque pela água. Em contrapartida, a degradação após o descarte no meio ambiente é complexa, pois o PLA é amplamente resistente a ataques por microrganismos em condições de solo ou esgoto. Para isso ocorrer, o polímero deve antes ser hidrolisado a temperaturas maiores que $60^{\circ}C$ a fim de diminuir o peso molecular antes que a biodegradação tenha início. Uma vez que o peso molecular atinja cerca de 10 kDa , os microrganismos presentes no solo começam a digerir o material e produzir dióxido de carbono e água. Pode-se acelerar a taxa de hidrólise na presença de ácidos ou bases e depende do conteúdo de umidade e temperatura.

Conforme então citado, o filamento PLA necessita de processos de compostagem, ou em usinas de compostagem. Sendo assim, pode-se concluir que o filamento PLA tem o potencial de ser biodegradado. Para que a correta degradação do material, é necessário, segundo Mikula et al. [9] que o descarte do PLA seja feito seguindo normas e que este seja depositado em usinas de compostagem, devido as condições adequadas de temperatura, luz, umidade, e quantidade correta de micro-organismos.

A avaliação da estabilidade térmica dos polímeros é crucial. Por meio da análise termogravimétrica (TGA), as mudanças na massa de uma amostra aquecida a uma taxa constante são

monitoradas. Esta técnica permite determinar a temperatura de degradação inicial e determinar a estabilidade térmica das frações de componentes voláteis do polímero testado, conforme comentado por Paoli, [20].

2.3.3 Impacto nas propriedades

A tensão de cisalhamento presente, a variação de temperatura e o contato com o oxigênio que ocorrem durante a extrusão degradam os polímeros. De acordo com Anderson [32], o processo ocorre não apenas em polímeros sensíveis a esses fatores, como o PLA, mas também em polímeros relativamente resistentes, como o caso do PE (polietileno). Zenkiewicz, Richert et al. [33] afirma que mudanças nas propriedades são geradas por não só por fatores como temperatura, mas também pela quantidade de extrusão de um material.

Conforme apresentado na Seção 1.4, o ácido polilático (PLA) e o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) são os materiais de filamento mais populares entre os termoplásticos atualmente disponíveis para impressão 3D. E estes podem ser reaproveitados ao passarem por novos ciclos de processamento.

Pillin et al. [34] identificou uma diminuição do comprimento da cadeia de PLA com o número de ciclos de injeção. Cadeias de polímero mais curtas podem se reorganizar efetivamente em cristais mais ordenados. Isso corresponde a um aumento significativo da taxa de fluxo de fusão, conforme já apresentado na Seção 2.1.2. Além disso, resistência à tração e a deformação na ruptura são levemente diminuídas em comparação com a tensão na ruptura. Algumas dessas variações de propriedades em função do número de extrusões está presente na Figura 2.12. De acordo com Pillin et al. [34], a diminuição da tensão na ruptura é atribuída a uma menor coesão, enquanto a diminuição da tensão na ruptura está associada à diminuição do comprimento da cadeia e ao aumento do grau de cristalinidade. Por outro lado, o teor de novos compostos de carbonila após a reciclagem é marginal.

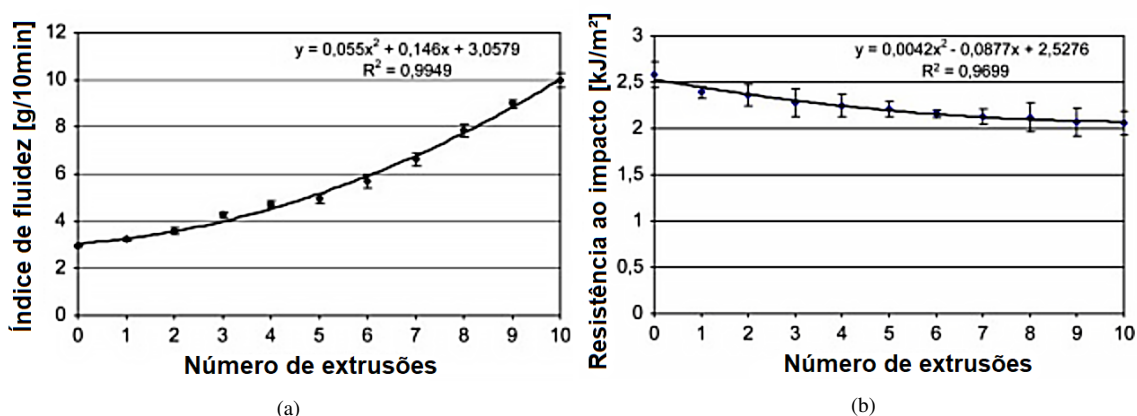


Figura 2.12: Variação de propriedades em função do número de extrusões: (a) taxa de fluxo de fusão e (b) resistência ao impacto.

Fonte: Adaptado de Zenkiewicz, Richert et al. [33].

O aquecimento do PLA diminui a temperatura de cristalização a frio e diminui o ponto de fusão. A maioria dos autores citados por Mikula et al. [9] relatou uma diminuição marginal no peso molecular submetido a uma etapa de reprocessamento. A degradação aumenta até 30% após 3 ciclos e 60% após 7 ciclos, conforme estudo apresentado por Pillin et al. [34]. A análise termogravimétrica apresentada na Figura 2.13 confirma a perda de peso sucessiva junto com os ciclos de extrusão. Começa por volta de 320°C e a maior parte do peso evapora após 600°C .

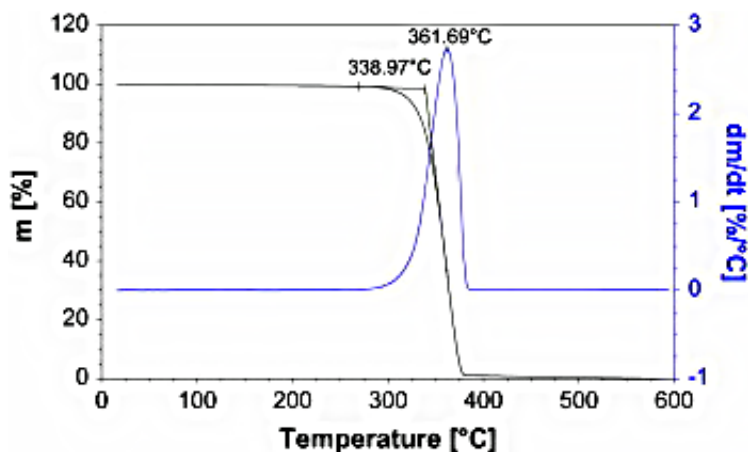


Figura 2.13: Análise termogravimétrica do poliácido lático.

Fonte: Zenkiewicz, Richert et al. [33].

Além disso, os autores Zenkiewicz, Richert et al. [33] identificaram aumento na transmissão de vapor d'água em até 40% e oxigênio em até 20% com o número de ciclos de extrusão. Ambos os agentes ativadores são considerados precursores de reações de radicais livres. Outras suposições de degradação podem resultar da hidrólise e transesterificação com catalisadores residuais. A redução da viscosidade intrínseca durante a degradação hidrolítica é menor sem a etapa de lavagem do material. Em contrapartida, a diminuição significativa da viscosidade observada no caso dos resíduos de PLA lavados, resulta da influência da alta temperatura e da tensão de cisalhamento durante o reprocessamento do polímero. A degradação durante o envelhecimento acelerado também pode contribuir para este processo. Uma adição de estabilizadores oxidativos (quinona) e estabilizadores catalisadores residuais (tropolona) a um puro.

Os dados obtidos identificaram claramente que a reciclagem reduz a resistência mecânica do PLA. Para superar este problema, os autores Zhao et al. [35] propõem revestir o filamento de polímero reciclado com uma polidopamina (PDA). Segundo apresentado pelos autores, a solução aquosa adesiva de PDA é adsorvida na superfície hidrofóbica, desenvolvendo força coesiva por meio da autopolimerização. O polímero revestido com PDA é termoestável até 200°C . Possui maior resistência à tração e deformação na ruptura, e sua superfície exibe maior adesão do que o PLA não revestido.

Anderson [32] propôs a reciclagem direta do filamento de PLA utilizado por meio de sua trituração e reextrusão como filamento de impressão 3D. Em seu estudo, após dois ciclos de extrusão e um processo de impressão 3D, o material reteve diâmetro e acabamento superficial

semelhantes ao original, enquanto suas propriedades mecânicas exibiram ligeiras deteriorações. A Tabela 2.8 apresenta algumas das propriedades e conforme variaram após os ensaios realizados pelo autor.

Tabela 2.8: Propriedades de espécimes impressos em 3D de PLA virgem e reciclado.

Propriedade	PLA virgem	PLA reciclado
Dados de Ensaio de Tração - ASTM D638-14		
Nº Espécimes	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
Dados de Ensaio de Cisalhamento - ASTM D 732-10		
Nº Espécimes	31	31
Resistência ao escoamento em cisalhamento	33,00 [MPa]	35,25 [MPa]
Desvio Padrão	0,80	2,49
Dados de Ensaio de Dureza - ASTM D 2240		
Nº Espécimes	32	32
Dureza Shore	84,8 [Shore D]	82,8 [Shore D]
Desvio Padrão	0,841	2,400

Dados: Anderson [32].

A redução inesperada na viscosidade identificada por Zhao et al. [35], atribuída à cisão da cadeia durante a reciclagem, é a principal desvantagem que dificulta a sujeição do filamento de PLA utilizado a impressão 3D adicional. O rearranjo identificado em estrutura lamelar indica randomização das cadeias de polímero como consequência do peso molecular reduzido. De acordo com Mikula et al. [9], o incremento da cristalinidade e o número e tamanho médio dos grãos no filamento de PLA reciclado duas vezes não resultam da extrusão repetida, mas sim da impressão 3D. Segundo mesmo autor, o processo térmico causa encurtamento das cadeias de polímeros, que são capazes de cristalizar mais facilmente com uma população maior de cristais. Zhao et al. [35] aponta a adição de PLA virgem ao filamento de PLA reciclado e triturado como benéfico, uma vez que os resultados apresentaram uma melhora significativamente nas viscosidades da mistura, bem como aumentou as propriedades mecânicas e térmicas. Tal remediação contribui fortemente para a reciclagem em circuito fechado do filamento de PLA, que pode ser feita em uma máquina de bancada em casa, como apresenta Mikula et al. [9].

Sanchez, Boudaoud e Hoppe [36] apresentaram uma análise abrangente da degradação do filamento de PLA em cinco ciclos de reprocessamento. Os dados obtidos mostraram uma redução considerável na resistência à tração e na resistência à ruptura, e na deformação nominal à ruptura. O resultado identificado da decomposição do material está relacionado à diminuição da cristalinidade, viscosidade e composição molecular. É reivindicado que o mecanismo de degradação envolve o seguinte: (1) formação de oligômeros (hidroxila e carboxila); (2) esterificação;

(3) transesterificação intermolecular, incluindo troca de unidades de éster entre cadeias diferentes; (4) termo-oxidação; e (5) processo de micro-composição. Além disso, o próprio processo de impressão também tem efeito sobre a degradação do filamento. Ciclos irregulares de resfriamento e aquecimento resultam em acúmulo de tensão na parte construída e, conseqüentemente, afetam a resistência de união fibra a fibra, conforme Tymrak et al. (2014), citados por Mikula et al. [9].

2.3.4 Aditivos para Polímeros

Para resolver o problema da poluição ambiental e encontrar a alternativa de encolhimento das fontes de polímero pós-petróleo, muitos trabalhos têm sido realizados para a obtenção de uma nova geração de materiais de impressão 3D. O uso de vários tipos de aditivos com aumento do peso molecular e melhoria das propriedades mecânicas do polímero reciclado tem sido amplamente estudado, conforme apontam Mikula et al. [9]. No estudo apresentado pelos autores, estes avaliaram o efeito da lignina aditiva na morfologia, parâmetro mecânicos e térmicos do PLA reciclado.

Para o uso desse aditivo, o PLA deve ser moído e misturado com lignina e extrudado a 180 a 190°C. De acordo com Gkartzou et al. (2017), citados por Mikula et al. [9], a adição de biopolímero melhora as propriedades de fusão e diminui a resistência à tração (18%) e diminui o valor do módulo de Young em cerca de 6% em comparação com amostras feitas de PLA puro.

Fibras de carbono também são utilizadas para fortalecer o material. Em dados obtidos pelos autores Tian et al. [37], o material reciclado apresentou resistência à flexão 25% maior em comparação com o original. A taxa de recuperação do material foi igual a 100% RFC (reforçado com fibra de carbono) e 71% PLA, respectivamente.

A degradação constante das propriedades físicas de polímeros reutilizados indica pesquisas sobre novos tipos de reforços. Com base nisso, no estudo de Zhao et al. [35], foi usada dopamina, que é facilmente adsorvida na maioria das superfícies. Esta propriedade também permite o revestimento de polímeros. O PLA moído foi colocado em uma solução aquosa de dopamina com agitação por quatro horas e, em seguida, seco e extrudado. Verificou-se que a distribuição da massa do PLA com a dopamina inicia já a 200°C, quando para o PLA puro esse valor ultrapassa 320°C. O revestimento do material também aumentou a resistência à tração em cerca de 20%.

Os estabilizadores oxidantes são usados para melhorar as propriedades do material reciclado. A hidroquinona e a tropolona podem desempenhar esse papel. Na pesquisa de Pillin et al. [34], descobriu-se que a hidroquinona é um estabilizador muito melhor, que captura os radicais livres e, portanto, mantém o comprimento da cadeia de PLA durante o processamento térmico. Observações semelhantes foram encontradas para as propriedades mecânicas do material.

O biocarbono também é usado para reforçar outros materiais, incluindo a origem natural do PLA. Verificou-se que os aditivos, em combinação com os aditivos de origem natural, melhoram a rigidez das amostras (8%), conforme apresentaram Notta-Cuvier et al. (2014), citados por Mikula et al. [9].

2.4 EXTRUSÃO

A extrusão de materiais poliméricos para produzir produtos acabados para aplicações industriais ou de consumo é um processo integrado, com a extrusora compreendendo um componente de toda a linha. Em algumas aplicações, as linhas de produção são muito longas com inúmeras operações, exigindo que os operadores se comuniquem e trabalhem juntos para produzir um produto acabado aceitável. De acordo com Giles, Wagner e Mount [21], se o perfil de temperatura da extrusora for definido incorretamente, os ingredientes do produto não estão adequadamente formulados, o resfriamento no funil de alimentação da extrusora não está funcionando corretamente, a temperatura de fusão no final da extrusora está incorreta, a temperatura do banho de resfriamento não está ajustada corretamente, o extrator no final da linha está operando na velocidade errada, ou qualquer outra condição de operação incorreta ou combinação de condições, o produto pode não atender às especificações do cliente.

Segundo Harper [1], a extrusão é uma operação de conversão de polímero na qual um material termoplástico sólido é derretido ou amolecido, forçado através de um orifício (matriz) com a seção transversal desejada e resfriado. O processo é usado para a composição de polímeros e para a produção de tubos, canos, folhas, filmes, revestimento de fios e perfis. Todas as linhas de extrusão incluem uma bomba de derretimento chamada extrusora, mas outro equipamento é específico para o processo em particular.

Cada etapa do processo agrega valor; conseqüentemente, o produto atinge seu valor máximo ao final da linha. Uma configuração inadequada no início do processo pode fazer com que o produto seja inaceitável no final da linha depois que um valor significativamente maior tiver sido adicionado. As velocidades das diferentes etapas do processo devem ser combinadas para garantir a conformidade do produto. No fluxograma da Figura 2.14 é mostrado um processo de extrusão geral, proposto por Harper [1].

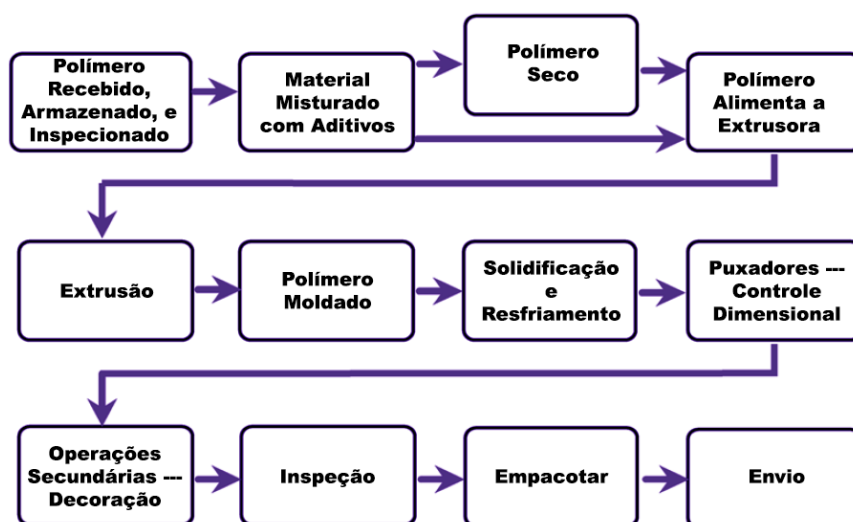


Figura 2.14: Esquema básico do processo de extrusão.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Conforme observado pela Figura 2.14, o material polimérico é recebido, inspecionado e armazenado. Antes da extrusão, o polímero pode ser misturado com aditivos, como estabilizadores para calor, estabilidade oxidativa e estabilidade UV, pigmentos de cor ou concentrados, retardadores de chama, enchimentos, lubrificantes, reforços, entre outros, para produzir o perfil de propriedade de produto desejado. Alguns polímeros devem ser secos antes da extrusão para eliminar a degradação do polímero devido à umidade. Outras resinas, que normalmente não requerem secagem, podem ter que ser secas se forem armazenadas em um depósito frio e levadas para um ambiente quente, causando condensação de umidade na superfície dos grânulos, flocos ou pó. Uma vez que o polímero ou mistura é devidamente seco e os ingredientes misturados, a formulação é alimentada para a extrusora, onde é fundida, misturada e entregue à matriz para dar forma ao extrudado. Após sair da matriz, o produto é resfriado e solidificado na forma desejada e retirado da extrusora em velocidade constante para obter a seção transversal apropriada. As operações secundárias, isto é, tratamento de chama, impressão, corte, recozimento, adaptações visuais, etc., podem ser feitas em linha após a extração. Finalmente, o produto é inspecionado, embalado e despachado.

Com o objetivo de se atingir um processo de qualidade, que atenda as exigências do produto, Harper [1] propõe cinco objetivos distintos a serem alcançados que resultará em um material de qualidade, se feito corretamente:

- Temperatura correta de processamento do polímero
- Temperatura de processamento uniforme / constante
- Correta pressão de fusão na matriz
- Pressão de fusão uniforme / constante na matriz
- Produto homogêneo e bem misturado

Assim, a extrusora é um equipamento com a função de plastificar uma combinação de polímeros e de aditivos e de entregar um fluxo constante de material com propriedades homogêneas de composição, viscosidade, temperatura e pressão à matriz. Caso a extrusora não entregue a uniforme necessária à matriz, pode resultar em variações nas dimensões do produto devido o desenvolvimento de fluxo desigual. A Figura 2.15 ilustra os principais componentes de uma extrusora convencional.

Uma extrusora de parafuso único (Figura 2.15) consiste em um parafuso (não visível na imagem) inserido em um barril ou cilindro de metal. Uma extremidade do barril é conectada à garganta de alimentação enquanto a outra extremidade é aberta. Um funil está localizado acima da garganta de alimentação e o barril é cercado por elementos de aquecimento e resfriamento. O parafuso em si é acoplado por meio de rolamentos axiais e caixa de engrenagens, ou redutor, a um motor de acionamento que gira o parafuso no barril. Uma matriz é conectada à extremidade “aberta” da extrusora com uma placa de quebra e pacote de tela (telas de retenção interna) formando uma vedação entre a extrusora e a matriz.

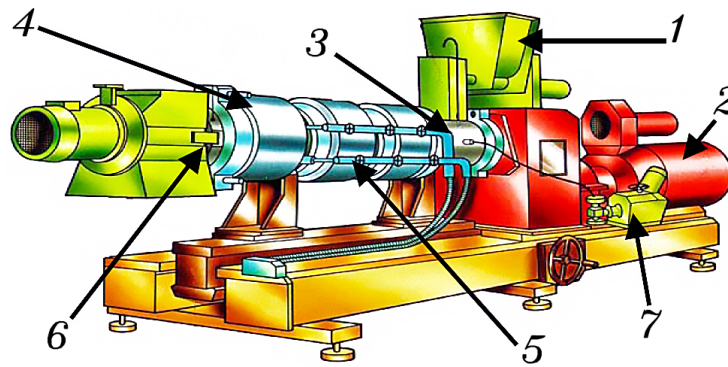


Figura 2.15: Componentes principais de uma extrusora convencional: (1) funil de alimentação; (2) motor de acionamento do parafuso; (3) barril da extrusora; (4) aquecedores do barril; (5) sistema de resfriamento do barril; (6) matriz da extrusora; e (7) bomba de água.

Fonte: Adaptado de Vignol [38].

Pode-se dividir a extrusora, também, em sistemas dependendo da função. Giles, Wagner e Mount [21] separam a máquina em cinco sistemas, cujos componentes são mostrados na Figura 2.16:

- Sistema de plastificação
- Sistema de alimentação
- Sistema de acionamento
- Montagem do cabeçote e matriz
- Sistema de controle

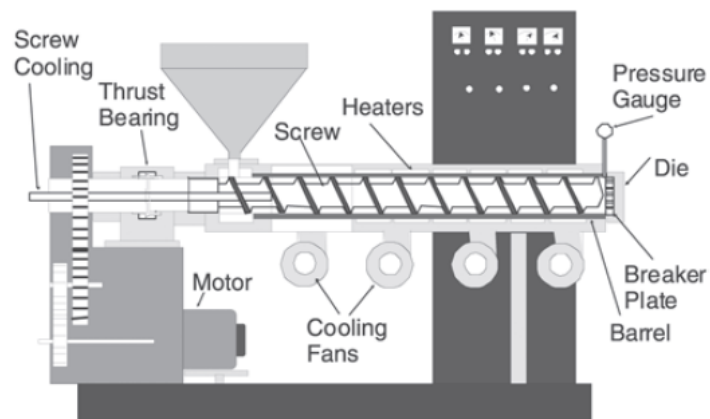


Figura 2.16: Componentes de uma Extrusora de Parafuso Único

Fonte: Giles, Wagner e Mount [21].

O sistema de acionamento compreende o motor, a caixa de engrenagens, a engrenagem principal e o conjunto de mancais. O sistema de alimentação é composto pelo funil de alimentação, a

garganta de alimentação e a seção de alimentação do parafuso. Os sistemas de parafuso, barril e aquecimento são onde a resina sólida é transportada para frente, derretida, misturada e bombeada para a matriz. O extrudado é transportado e moldado no adaptador e na matriz, respectivamente. Finalmente, o sistema de controle controla as entradas elétricas da extrusora e monitora o feedback da mesma. O sistema de controle não apenas executa e monitora a extrusora, mas também pode controlar todo o processo de extrusão com circuitos de feedback que alteram automaticamente as configurações do alimentador, velocidades do extrator, velocidades do parafuso, etc., para manter a qualidade do produto.

2.4.1 Sistema de Plastificação

De acordo com Giles, Wagner e Mount[21], o sistema de plastificação possui a função de plastificar e homogeneizar o material mantendo um fluxo permanente de material a uma temperatura constante no molde.

Durante a extrusão, as partículas de resina alimentam o funil, atravessam a garganta de alimentação da extrusora e são transportadas pelo parafuso ao longo do barril ou cilindro. A resina cai sobre o parafuso rotativo e é empacotada na primeira seção ou zona de alimentação do parafuso. As partículas empacotadas são derretidas à medida que passam pela seção intermediária (zona de transição ou compressão) da rosca, e o fundido é misturado na seção final ou zona de medição. A pressão gerada na extrusora força o polímero fundido através da matriz. A Figura 2.17 detalha esses componentes.

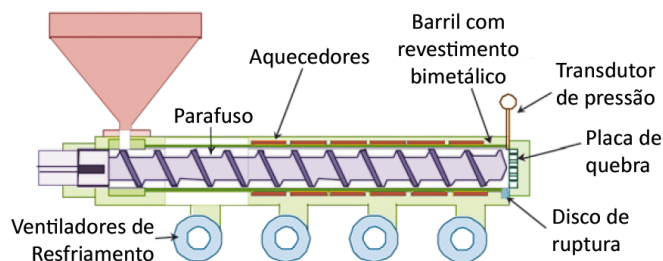


Figura 2.17: Configuração do Cilindro, Parafuso e Sistema de Aquecimento/Resfriamento

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Os aquecedores estão localizados ao longo do barril, com termopares em cada zona para controlar os aquecedores e a temperatura do barril. Os aquecedores cobrem o máximo possível de área de superfície do barril, minimizando os pontos quentes e frios ao longo do comprimento do barril. Em uma mesma zona de temperatura de extrusora, pode haver mais de um aquecedor de banda com um termopar controlando-os. Dessa forma, mesmo que a faixa do aquecedor mais próxima do termopar esteja queimada; as outras duas faixas de resistência devem fornecer toda a energia externa necessária, criando a possibilidade de que a área fique mais quente perto das duas faixas do aquecedor que estão funcionando. No caso de o aquecedor mais distante do termopar queimar, a área do barril sob o aquecedor queimado deve ser mais fria do que as áreas

onde os aquecedores estão funcionando corretamente perto do termopar de controle. Assim, os aquecedores de banda queimados devem ser substituídos o mais rápido possível para garantir a entrada de calor uniforme. Termopares colocados na parede do barril penetram o mais próximo possível do revestimento do barril. O resfriamento por água ou ar em cada zona é usado para controlar a temperatura do barril. No cabeçote da extrusora, antes da placa de quebra, há um transdutor de pressão para medir a pressão do cabeçote e um disco de ruptura para segurança, caso haja um aumento repentino de pressão. Os barris podem ser revestidos com um revestimento bimetálico para aumentar a vida útil.

Os parafusos da extrusora se encaixam no cilindro e são suportados pelo mancal de escora. A haste do parafuso se estende a fim de se encaixa no mancal de escora, enquanto o comprimento do parafuso com filetes está em contato com o polímero. Os parafusos da extrusora são especificados por seu diâmetro externo (D) e a razão L/D , que é dado por

$$L/D = \frac{\text{Comprimento rosqueado do parafuso}}{\text{Diâmetro externo do parafuso}} \quad (2.6)$$

O rendimento ou a saída está diretamente relacionado à razão L/D . Duas extrusoras com o mesmo diâmetro, mas razões L/D diferentes, têm diferentes capacidades de produção. Extrusoras mais longas (L/D mais alta) têm maior capacidade de fusão e mistura, permitindo que a extrusora funcione em taxas mais altas.

Segundo Giles, Wagner e Mount[21], razões L/D curtas têm as vantagens de serem: mais compactas; requerem menor custo inicial e para peças de reposição; menor o tempo de residência do polímero na extrusora durante o processamento de materiais sensíveis à temperatura; requerem menor potência e, conseqüentemente, motor de tamanho menor.

Enquanto isso, segundo mesmo autor, as razões L/D maiores resultam em: maior rendimento/saída; maior capacidade de mixagem/mistura; pode bombear com pressão de matriz mais alta; maior capacidade de fusão com menos aquecimento por cisalhamento; maior aquecimento condutivo do barril. Algumas razões típicas são 18:1, 20:1, 24:1, 30:1, 36:1 e 40:1.

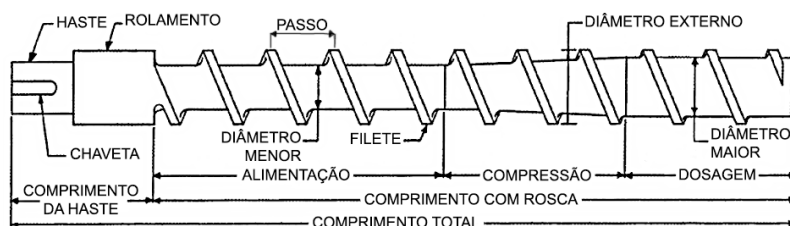


Figura 2.18: Ilustração da geometria de um parafuso.

Fonte: Adaptado de Harper [1].

A seção do parafuso, representado na Figura 2.18 é dividida em três zonas: alimentação, compressão (transição) e dosagem. Segundo Harper [1], a zona de alimentação tem uma profundidade de canal constante, assim como a zona de dosagem. No entanto, a profundidade do canal diminui

gradualmente na zona de transição. Uma vez que o polímero fundido requer menos volume do que as partículas sólidas, a profundidade do canal da zona de dosagem é menor do que a profundidade da alimentação. A compressão do polímero é quantificada pela taxa de compressão (CR):

$$CR = \frac{H_{primeiro\ canal}}{H_{ultimo\ canal}} \quad (2.7)$$

onde H é a profundidade do canal, que é a diferença entre o diâmetro externo e os diâmetros (D) maior e menor. Baixas taxas de compressão não compactam totalmente as partículas sólidas e, portanto, o fundido conterà bolhas de ar. Em contraste, as taxas de alta compressão entregam muito polímero à zona de medição e, com as poliolefinas, produzem problemas de fusão na zona de transição. Assim, os parafusos típicos têm taxas de compressão de 1,5:1 a 4,5:1, segundo Harper [1].

A taxa de compressão do parafuso é crítica no processamento de diferentes materiais poliméricos. Embora seja desejável ter um parafuso de uso geral que processe todos os materiais com eficiência em altas taxas, na prática isso não ocorre porque diferentes polímeros têm diferentes propriedades viscoelásticas. Conforme os autores Giles, Wagner e Mount[21] apontam, alguns polímeros funcionam melhor em parafusos com uma taxa de compressão de 2,5:1, enquanto outros materiais são processados melhor em parafusos com uma taxa de compressão de 3,5:1 ou 4:1. As taxas normais de compressão do parafuso são de aproximadamente 1,5:1. Por esse motivo, é importante ser capaz de medir a taxa de compressão do parafuso e saber qual parafuso funciona melhor com diferentes polímeros.

O passo (t) é a distância axial do centro de um filete ao centro do próximo filete, enquanto o avanço é a distância axial que o parafuso se move em uma rotação completa. Como a maioria das extrusoras usam parafusos de dosagem com rosca quadrada, tanto o passo quanto o avanço são iguais ao diâmetro e o ângulo da hélice é de $17,7^\circ$. O ângulo da hélice (Φ) também pode ser calculado como:

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{t}{\pi D} \right) \quad (2.8)$$

Conforme os autores Giles, Wagner e Mount[21] trazem, largura do filete é normalmente $0,1D$. Isso torna o filete forte o suficiente para evitar lascas ou quebrar, enquanto ainda deixa espaço suficiente no canal para processar o polímero. A maioria dos projetos de parafuso tem filetes paralelos. Os parafusos geralmente têm entre $20D$ e $30D$ de comprimento, com quatro a oito filetes na seção de alimentação, seis a dez filetes na seção de medição e os filetes restantes na seção de transição. A profundidade do canal de alimentação varia de $0,10D$ a $0,30D$

A folga entre o parafuso e a parede do barril varia conforme o projeto, normalmente sendo próxima de $0,08$ para extrusoras menores e $0,13\text{mm}$ para extrusoras maiores.

Os parafusos são feitos de aço-ferramenta de boa qualidade ou aço inoxidável. Eles são então tratados, revestidos ou banhados para reduzir o coeficiente de atrito entre o parafuso e o polímero, melhorar a resistência química, melhorar a resistência à abrasão e reduzir o desgaste. Em áreas

de alto desgaste, ligas especiais são soldadas ao aço base do parafuso. Os materiais dos parafusos são apresentados na Tabela 2.9

Tabela 2.9: Materiais para o parafuso. Dados: Harper [1].

Condição	Exemplo	Materiais para parafuso			
		Liga de aço ^a	Aço nitretado ^b	Cromado ^c	Ligas Especiais ^d
Normal	Termoplásticos sem cargas ou retardantes de chamas	Satisfatório	Bom	Bom	Excelente
Uso acima do normal	Resinas contendo até 30% de vidro, minério ou cargas abrasivas	Pobre	Satisfatório	Satisfatório	Bom
Uso severo	Resinas contendo mais de 30% de vidro, minério ou cargas abrasivas	Insatisfatório	Pobre	Pobre	Satisfatório
Corrosão severa	Termoplásticos com certos retardantes de chamas e todos os fluoropolímeros	Insatisfatório	Pobre	Pobre	Satisfatório

^aEndurecido por chama ou indução.

^bAISI 4140 ou aços nitretados como o Nitr alloy 135M.

^cEmbora o cromo possa ser atacado por certos ácidos, especialmente HCl, um revestimento de 0,005 mm forma superfície resistente a corrosão e ao uso.

^dInclui aços ferramentas (D-2, H-13, A-11, CPM9V), várias ligas de níquel que são excelentes para resistência à corrosão, mas pobres para desgaste, aços inoxidáveis na série 400 e superfície soldada por plasma spray.

Segundo Giles, Wagner e Mount[21], as especificações exigidas ao projetar um novo parafuso incluem o seguinte: polímero a ser processado, elementos de mistura, requisitos de rendimento, diâmetro do parafuso, razão L / D, geometria do rasgo de chaveta, taxa de compressão, profundidade de filete na alimentação ou zona de dosagem, número de filetes na zona de alimentação, número de filetes na zona de transição, número de filetes na zona de dosagem e ângulo de hélice.

O barril é um cilindro de metal que envolve o parafuso. Uma extremidade é presa à garganta de alimentação e a extremidade oposta conecta-se diretamente ao adaptador da matriz. O parafuso transporta o material para a frente, contribuindo para o aquecimento e fusão, homogeneizando e misturando o fundido e levando o fundido para a matriz. O barril e os aquecedores ajudam a aquecer e derreter o polímero, controlando a temperatura nas diferentes zonas, evitando que o material superaqueça e se degrade.

Segundo Harper [1], uma vez que os barris da extrusora devem suportar pressões de até 70 MPa, eles geralmente são feitos de aços-ferramenta padrão, com aços-ferramenta especiais necessários para polímeros corrosivos, conforme observado na Tabela 2.10. Esta, ainda inclui algumas recomendações do autor para materiais específicos.

Tabela 2.10: Materiais para o barril. Dados: Harper [1].

Condição	Resina sendo processada	Materiais de revestimento		
		Liga de aço ^a	Aço nitretado ^b	Cromado ^c
Suave	Acetatos, polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, PET	Bom	Excelente	Não requer
Média	ABS, poliacetais, acrílicos, poliamida, PVC, policarbonatos e poliésteres	Satisfatório ^d	Excelente	Não requer
Severa	Resinas contendo até 30% de vidro, minério ou cargas abrasivas	Pobre	Bom	Excelente
Crítica	Resinas contendo acima de 30% de vidro, minério ou cargas abrasivas	Não recomendado	Satisfatório	Bom

^a AISI 4130-4140 nitretado a uma profundidade de 0,18 a 0,38 mm.

^b Inclui aço de ferramenta D-2 e bimetálicos fundidos centrifugamente (como o Xaloy 101).

^c Inclui aço ferramenta A-11 (CPM10V), Inconel 718 e bimetálicos.

^d ABS e policarbonato requerem um aço ferramenta padrão ou revestimento bimetálico padrão.

A folga entre o cilindro e os filetes do parafuso é normalmente de 0,08 a 0,13 mm. Para reduzir o desgaste do barril, estes são nitretados ou revestimentos bimetálicos são inseridos no barril. A nitretação é o endurecimento da superfície do barril. Harper [1] afirma que este processo produz inicialmente dureza mais alta ($R_c \sim 70$), mas perde essa vantagem à medida que o cano se desgasta. A nitretação também fornece baixa abrasão e uma resistência à corrosão apenas moderada. Em contraste, um revestimento bimetálico é uma bucha de 1,5 mm de espessura que se encaixa no cilindro. Conforme mostrado na Tabela 2.10, os materiais do revestimento dependem do polímero e de seus aditivos. Os materiais de ferro/boro são usados como revestimentos de uso geral, enquanto os revestimentos de níquel/cobalto aumentam a resistência química às custas das propriedades de desgaste. Ferro/carboneto de boro é usado para altos níveis de resistência à abrasão e vanádio/aço de liga de alto carbono oferece a mais alta resistência à abrasão. Os revestimentos bimetálicos são preferidos para extrusoras de parafuso único, mas a nitretação é preferida para extrusoras de parafuso duplo (devido ao custo das buchas bimetálicas).

Além disso, de acordo com Giles, Wagner e Mount[21], os barris são fabricados em aço carbono sólido ou outro material. Estes podem ser revestidos com um revestimento bimetálico para aumentar a vida útil. A nitretação com cerca de 0,3 mm de profundidade endurece a superfície interna do barril. No entanto, a nitretação não é particularmente eficaz ao executar cargas abrasivas como vidro, cargas minerais ou outros reforços de fibra. Barris de aço inoxidável com interior temperado são uma opção para pequenas extrusoras. No entanto, o endurecimento do aço inoxidável diminui a resistência à corrosão e o aço inoxidável não é um meio de transferência de calor particularmente bom. Uma segunda abordagem para melhorar a resistência à corrosão ou abrasão no barril é usar um revestimento bimetálico. O revestimento é mais espesso (1,5–3 mm)

do que a nitretação, proporcionando melhor resistência ao desgaste. A Tabela 2.11 mostra alguns revestimentos e suas propriedades de desgaste.

Tabela 2.11: Revestimento bimetalítico do barril.

Elemento Base	Outros Elementos	Dureza Rockwell	Comentário
Fe	Ni, Si, B, Cr	50-65	Excelente resistência ao desgaste, Sem proteção à corrosão.
Ni/Co	Cr, Si, B, Fe	45-60	Boa resistência ao desgaste, Melhor para proteção à corrosão.
Ni/Cr	W, B, Fe, Si	60-65	Melhor resistência ao desgaste, Bom para materiais com cargas abrasivas, Resistência muito boa à corrosão.

Dados: Giles, Wagner e Mount[21].

A terceira abordagem para melhorar a resistência à abrasão ou corrosão é um forro de barril, que é um tubo de parede fina de aço inoxidável, liga à base de níquel ou aço carbono endurecido, inserido no barril. A transferência de calor pode sofrer um pouco se houver um espaço de ar entre o diâmetro externo da camisa e o diâmetro interno do cilindro. A superfície interna do barril deve ser mais dura do que o parafuso para evitar o desgaste do barril. Os parafusos tendem a se desgastar mais rápido do que o barril porque a razão da área da superfície do cilindro para a área da superfície do parafuso é de cerca de 10:1, o que significa que os filetes do parafuso entram em contato com apenas 10% da parede do cilindro durante cada revolução.

Harper [1] afirma que os barris da extrusora normalmente têm proporções de comprimento para diâmetro (L / D) de 24:1 a 36:1, mas podem ser maiores. Uma vez que a fusão ocorre em uma zona de transição mais longa, barris mais longos fornecem maior produção. No entanto, os parafusos mais longos requerem sistemas de acionamento maiores e produzem maior deflexão do parafuso.

O alinhamento adequado do barril, garganta de alimentação e mancais permite que o parafuso deslize facilmente para dentro e para fora quando a extrusora estiver fria. Este, segundo Giles, Wagner e Mount [21], deve garantir que seja possível a remoção do parafuso sem o aquecimento do barril.

Em relação ao sistema de aquecimento, é interessante observar que, na análise termodinâmica discreta realizada pelos autores Souza e Hupper [17] e apresentada na Figura 2.19, há duas fontes de energia entrando no volume de controle. A primeira é decorrente do sistema de aquecimento e conduzida até o material plástico, enquanto a outra provem da potência mecânica fornecida pelo motor, a qual gera calor por atrito com as fronteiras e o material. Barris, matrizes e adaptadores de matriz são aquecidos para trazê-los às temperaturas operacionais e para manter as temperaturas definidas durante a operação. O aquecimento deve ser gradativo, visto que as diferentes zonas (detalhadas no início da Seção) desempenham diferentes funções visto o estado energético do material transportado.

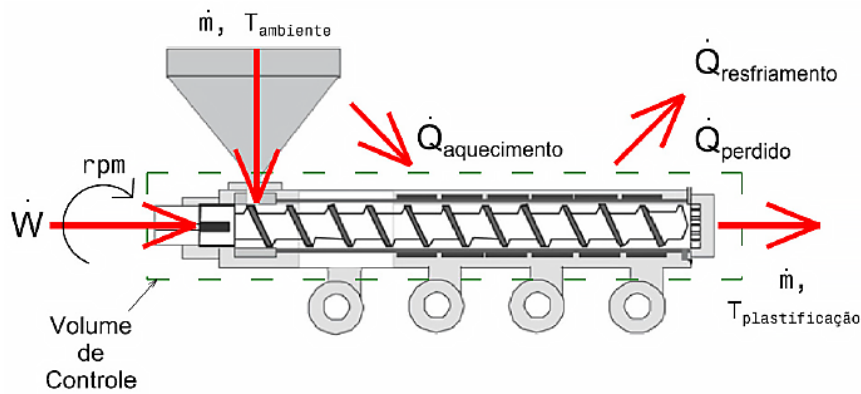


Figura 2.19: Análise de volume de controle de uma extrusora.

Fonte: Souza e Hupper [17].

O subsistema de aquecimento é composto por resistências elétricas que fornecem a energia restante para a plastificação do material e estão distribuídas em volta do cilindro, conforme observado na Figura 2.17. Os aquecedores devem cobrir a área máxima do barril e ser firmemente presos ao redor do mesmo para evitar variações de temperatura, fornecendo, assim, um aquecimento uniforme. As extrusoras grandes normalmente têm aquecedores embutidos e as extrusoras menores usam fitas. A Figura 2.20 ilustra uma resistência elétrica coleira.

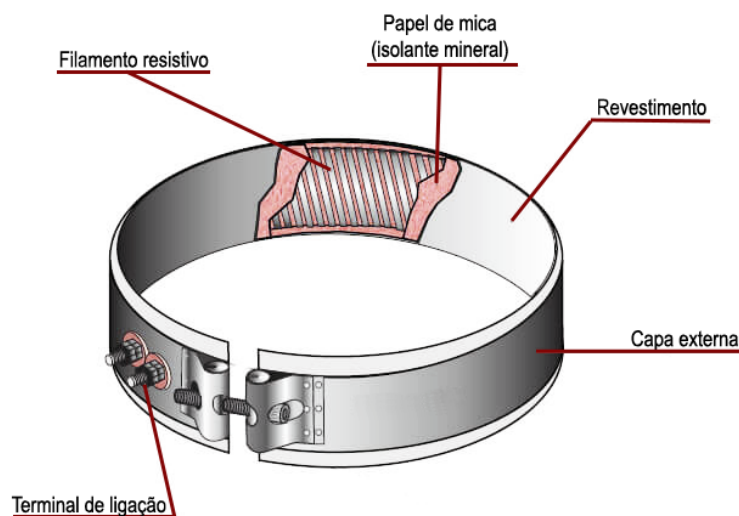


Figura 2.20: Elementos que compõem uma resistência coleira de mica.

Fonte: Adaptado de Resisten [39].

Segundo Souza e Hupper [17], normalmente tem-se uma fita metálica, composta principalmente por níquel e cromo, como elemento resistivo responsável pelo efeito Joule. A folha de mica tem a função de isolar a fita resistiva do restante da carcaça, evitando curtos-circuitos. O revestimento tem o intuito de encapsular o elemento resistivo e o isolante de mica. O sistema de fixação traciona o revestimento, comprimindo-o sobre o barril. Por fim, nos terminais há uma diferença de potencial, que resulta em corrente elétrica, responsável por aquecer a estrutura.

Além da já mencionada coleira de mica, a Tabela 2.20 lista quatro tipos de resistências usadas no processamento de polímeros, apontadas por Harper [1].

Tabela 2.12: Propriedades da banda do aquecedor

Tipo de resistência	T_{\max} , °C	Densidade de potência, kW/m ²
Mica:		
Convencional	480	85
Alta performance	760	155
Alumínio:		
319 ou 356	370	310
443	425	310
Cerâmica	~ 750	35
Bronze	870	310

Dados: Giles, Wagner e Mount[21].

As coleiras de mica, embora forneçam aquecimento e resfriamento rápidos, eles perdem intensidade com o tempo, queimam com frequência e devem entrar em contato com a superfície de metal para melhor desempenho. Com coleiras de alumínio fundido, os elementos de aquecimento de nicromo são fundidos em blocos de alumínio. Como essas coleiras fornecem um aquecimento mais uniforme, são mais confiáveis e proporcionam uma vida útil mais longa do que as coleiras de mica, elas são comumente usadas para barris de extrusora. As de cerâmica e bronze fundido são análogas de alta temperatura das coleiras de mica e de alumínio fundido, respectivamente.

Para manter as temperaturas constantes, os barris geralmente devem ser resfriados por ventiladores (sopradores) ou água. Os sistemas de resfriamento são mostrados na Fig. 3.13 para ar e água. Os espaçadores nervurados ao redor do barril no sistema resfriado a ar fornecem área de superfície adicional para remoção de calor e maior eficiência de resfriamento. Os sistemas resfriados a ar possuem uma válvula amortecedora acima do ventilador para ajustar o fluxo de ar, proporcionando ajuste que máxime a eficiência no processamento de diferentes polímeros.



Figura 2.21: Exemplos de resfriamento (a) por fluido e (b) a ar.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Embora os ventiladores removam o calor lentamente, eles são baratos e, portanto, os mais comumente usados. A água é um meio de resfriamento melhor com melhores características de transferência de calor do que o ar e fornece melhor controle. Ademais, água tem a vantagem de não forçar o ar quente de volta para o ambiente, aquecendo a área de extrusão. Embora o resfriamento a água seja duas vezes mais eficiente que o resfriamento a ar forçado, segundo Harper [1], ele depende da área de superfície da tubulação e da velocidade da água. O resfriamento direto com água tende a resfriar muito rapidamente, portanto, a água é normalmente modulada (pulsada) ativando solenoides em resposta às saídas temporizadas do controlador de temperatura. Se configurado corretamente, fornece melhor controle da temperatura do cilindro.

Há também a possibilidade de os parafusos serem tubulares (vazados internamente) para passagem de um fluido de aquecimento ou resfriamento durante o processamento para adicionar calor adicional ao polímero ou remover o excesso de calor de cisalhamento, respectivamente. O fluido de transferência de calor é bombeado para dentro ou removido do parafuso através de uma união rotativa na haste do parafuso. O resfriamento pode ser usado, por exemplo, na zona de alimentação para evitar o aquecimento do material, o que pode fazer com que o polímero grude na raiz do parafuso na seção de alimentação. A remoção de calor da extrusora por meio do resfriamento do parafuso não é uma operação eficiente em termos de energia.

2.4.2 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação, segundo Souza e Hupper [17], tem a função de manter o fornecimento contínuo para a unidade plastificadora, como um reservatório de material sobre o barril. Dentre os sistemas de alimentação que dependem da gravidade o mais comum é o de alimentação por inundação. O sistema conta com um funil posicionado diretamente sobre a garganta de alimentação da extrusora com o tamanho da abertura do funil correspondente à abertura da garganta de alimentação. A Figura 2.22 mostra uma extrusora alimentada por inundação típica e os canais de resfriamento na área da garganta de alimentação.

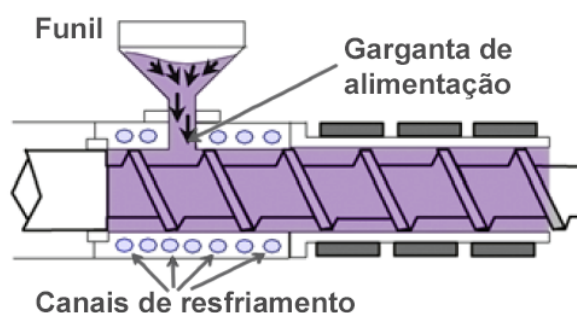


Figura 2.22: Seção de garganta de alimentação da extrusora alimentada por inundação.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Todas as brechas entre o funil e a garganta de alimentação são eliminadas para evitar o acú-

mulo de polímero ou aditivo que pode causar contaminação cruzada ou formação de ponte. A garganta de alimentação se encaixa sobre primeiros filetes do parafuso e geralmente é separada do cilindro da extrusora. Segundo Giles, Wagner e Mount [21], ela é isolada do cilindro e resfriada com água para evitar a formação de pontes e derretimento prematuro das partículas de resina.

O objetivo do resfriamento com água é evitar que o material polimérico amoleça, se tornando pegajosos e grudando na garganta de alimentação, formando pontes de material que bloqueia o fluxo de material. Uma boa barreira isolante é instalada entre o barril e a seção de alimentação para minimizar a transferência de calor do barril.

A geometria da garganta de alimentação e do funil permite que o material flua livremente para a extrusora com o mínimo de restrição. O projeto padrão da garganta de alimentação para polímeros em pellets ou em pó é mostrado na Figura 2.23, geometria A. As configurações B e C na Figura 2.23 são mais apropriadas para extrusoras alimentados por material fundido. Isso ocorre, pois, de acordo com Harper [1], os grânulos alimentados na configuração B podem ficar presos entre o barril e o parafuso.

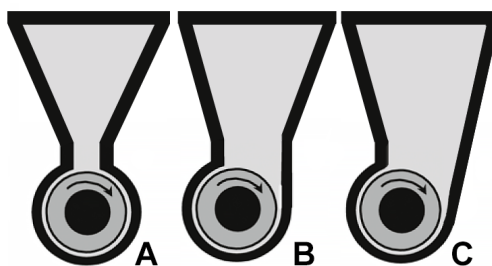


Figura 2.23: Vista frontal de sistema barril-parafuso-funil com três configurações de gargantas de alimentação

Fonte: Autoria própria

2.4.3 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento é responsável por girar o parafuso a uma velocidade constante em uma ampla faixa de velocidades (normalmente de 50 a 150 rpm segundo Giles, Wagner e Mount [21]), ao mesmo tempo que fornece torque suficiente para processar o polímero que está sendo usado. As variações da velocidade do parafuso são diretamente proporcionais às variações de produção, o que pode causar alterações nas dimensões do produto.

O tipo de acionamento mais comum em extrusoras grandes, consoante o autor Harper [1], é um motor corrente contínua (CC) conectado a redutores de velocidade que convertem o torque do motor em torque do parafuso. Para gerar o torque máximo, os motores CC funcionam em rpm máximas (1750 rpm). Duas opções de motores são motores CC padrão e motores CC sem escovas. Enquanto isso, em extrusoras menores, é normal encontrar motores corrente alternada (CA). Os motores CA não precisam funcionar em rpm máximas para obter o torque máximo, e os novos inversores CA de vetor de fluxo podem alcançar controle de torque e velocidade superior

aos motores CC sem escovas e mais economicamente.

O motor de alta velocidade é acoplado ao parafuso de baixa velocidade por meio de um sistema de redução. As taxas de redução típicas são 15:1 ou 20:1, de acordo com os estudos de Giles, Wagner e Mount [21]. Os autores ainda afirma que, embora as engrenagens helicoidais sejam mais comuns, parafusos de rosca sem fim são usados em máquinas mais antigas ou muito pequenas. Um sistema de lubrificação forçada permite que o óleo resfrie os rolamentos e as engrenagens; este óleo é resfriado a água por um trocador de calor em máquinas de alta carga. Para extrusoras de pequeno e médio porte, o acoplamento de transmissão é uma correia. Isso facilita mudanças na relação velocidade-torque que podem ser estimadas a partir de:

$$P = NT \tag{2.9}$$

onde P é a potência, T é o torque e N é a velocidade do parafuso. Assim, mudar para engrenagens maiores aumenta o torque, mas reduz a velocidade do parafuso. No entanto, para aumentar a potência disponível, o motor de acionamento e a caixa de engrenagens devem ser substituídos. Para acionamentos grandes ($P > 225kW$), o motor de acionamento é acoplado diretamente ao parafuso, conforme apontam alguns autores.

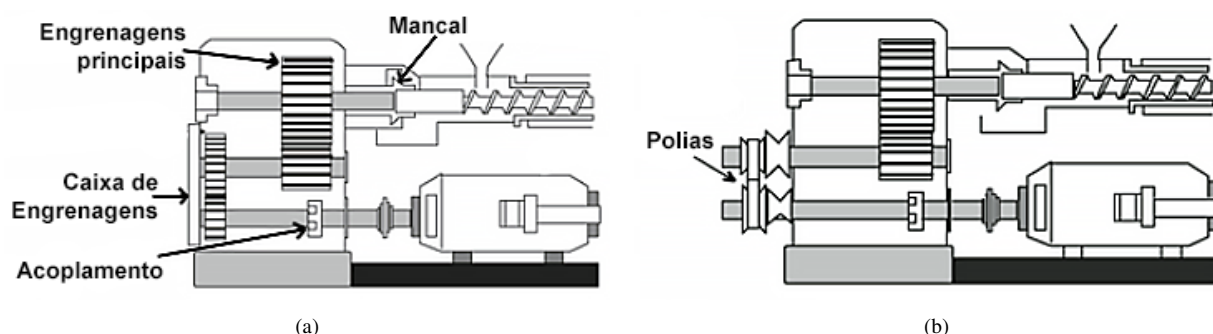


Figura 2.24: Sistema de transmissão: (a) acionamento direto por redução com engrenagens e (b) acionamento indireto com uso de polias.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Um sistema de acionamento direto, mostrado na Figura 2.24a, usa uma caixa de engrenagens para converter a rotação do motor na rotação desejada do parafuso. Uma extrusora de acionamento indireto, operada com polias, é mostrada na Figura 2.24b. Enquanto a Figura 2.24b mostra a localização de apenas duas polias, uma extrusora de acionamento indireto normalmente tem de três a cinco polias e correias. As correias são enviadas em conjuntos combinados e devem ser trocadas simultaneamente. O deslizamento da correia pode resultar em variações de rendimento causadas por flutuações na velocidade do parafuso.

O rolamento axial está localizado entre o eixo do parafuso e o eixo de saída da transmissão. Conforme o parafuso da extrusora gira, ele tenta se "torcer para fora" da parte traseira da extrusora, analogia dos Giles, Wagner e Mount [21]. Combinando isso com a pressão do cabeçote de roscar, o parafuso está gerando altas forças no mancal de escora. A Figura 2.25 mostra o conjunto do mancais. Para cada ação há uma reação igual e oposta; em uma extrusora, a carga no mancal

de escora é diretamente proporcional à pressão do cabeçote e ao diâmetro do parafuso. A força no mancal de escora é obtida multiplicando-se a área da seção transversal do parafuso pela pressão do cabeçote da extrusora.

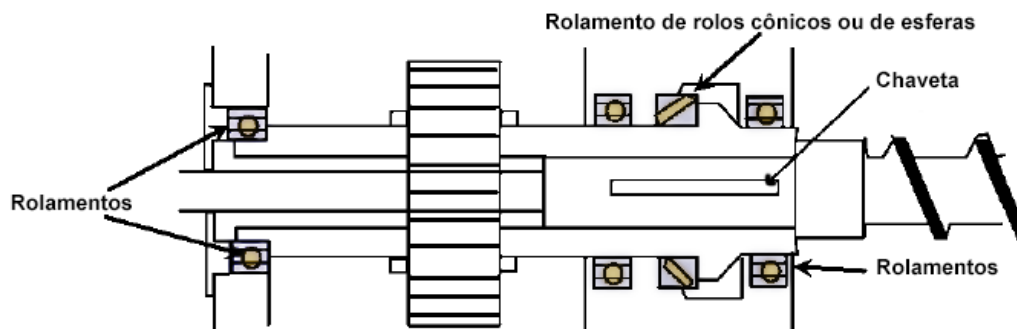


Figura 2.25: Montagem de conjuntos de rolamentos

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

2.4.4 Montagem do cabeçote e matriz

A montagem do cabeçote e matriz é o sistema de elementos fixados na saída do canhão. O conjunto do cabeçote da extrusora inclui placa de quebra, adaptador para conectar o conjunto de matriz à extrusora e a matriz propriamente dita. A placa de quebra, mostrada na Figura 2.26b, é um disco redondo contendo orifícios que é colocado entre a extrusora e o adaptador, conforme a disposição apresentada na Figura 2.26a. A placa de quebra atua como uma vedação entre o cilindro da extrusora e o adaptador da matriz, evitando assim o vazamento do fundido. Esta também suporta o pacote de telas, desenvolve a pressão que restringe o fluxo e converte o movimento rotacional do fundido em movimento axial, de acordo com o exposto pelos autores Giles, Wagner e Mount [21].

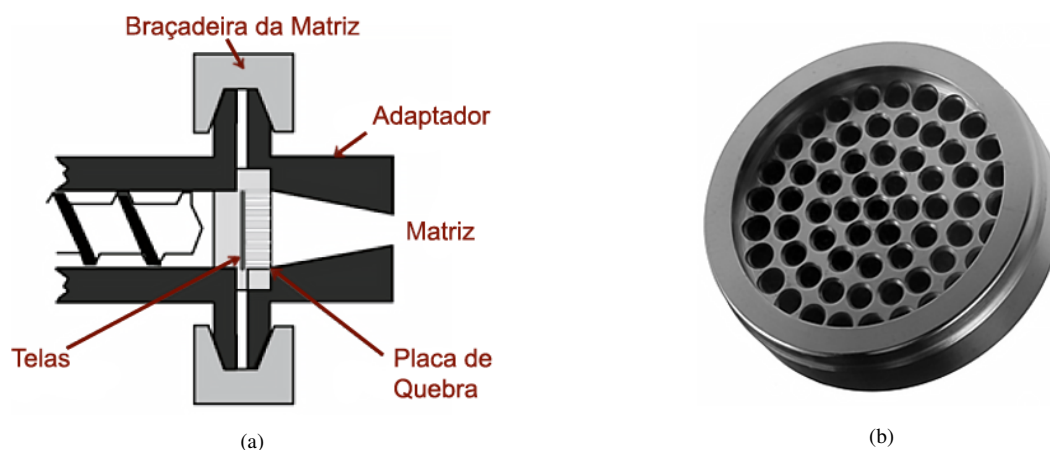


Figura 2.26: Sistema de retenção e vedação ao final da extrusora: (a) vista em corte do conjunto e (b) placa de quebra.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

As telas de retenção, Figura 2.27b, filtram os contaminantes e outras partículas do polímero fundido, gerando pressão e minimizando a oscilação (pulsação do fundido). Em um pacote de telas, normalmente são usadas cinco ou mais telas; as telas são classificadas pelo número de orifícios por milímetro. Conforme mostrado na Figura 2.27a, as telas tornam-se mais finas à medida que se aproximam da placa de quebra. Uma tela grosseira próxima à placa de quebra suporta as telas mais finas e evita que a pressão de fusão as force através da placa de quebra. Embora a seleção dos tamanhos das telas dependa do material e do processo de extrusão, aumentar o número de telas ou o tamanho da malha aumenta a pressão desenvolvida durante a extrusão.



Figura 2.27: Conjunto de retenção de impurezas: (a) disposição de pacotes de telas e (b) pacotes de tela propriamente ditos.

Fonte: Adaptado de Harper [1].

Segundo Harper [1], como os pacotes de telas ficam bloqueados por contaminantes, eles devem ser trocados periodicamente. Isso requer separar a extrusora e o adaptador da matriz, remover a placa de quebra, inserir uma nova placa com telas novas e, em seguida, reconectar a extrusora e o adaptador da matriz. Além do mais, os autores Giles, Wagner e Mount [21] ressaltam que, se a formulação contiver cargas ou reforços, todas as telas devem ser removidas.

2.4.5 Sistema de controle

Em comparação com outros processos com polímeros, uma extrusora tem muito poucas variáveis de controle independentes que podem ser alteradas por um operador para alterar o processo. Assumindo que o parafuso correto esteja na extrusora, a matriz adequada esteja instalada, o pacote de tela esteja limpo e o equipamento esteja funcionando corretamente (pleno funcionamento das resistências e sistema de resfriamento), as únicas variáveis da extrusora que podem ser alteradas são os pontos de ajuste de temperatura e a velocidade de rotação do parafuso. Para o controle dessas variáveis, é possível valer-se do monitoramento tanto das temperaturas e a pressão no cabeçote.

Cada zona de temperatura da extrusora tem pelo menos um aquecedor, mas o normal é que haja vários aquecedores controlados por termopar. Segundo Giles, Wagner e Mount [21], a ca-

vidade do termopar no barril deve ter pelo menos 30 *mm* de profundidade e deve ser instalada longe das resistências. Nunca se deve colocar o termopar entre o aquecedor e a parede do barril; o termopar responderá à temperatura do aquecedor e não à temperatura do barril. A Figura 2.28 mostra a localização do termopar em relação às resistências.

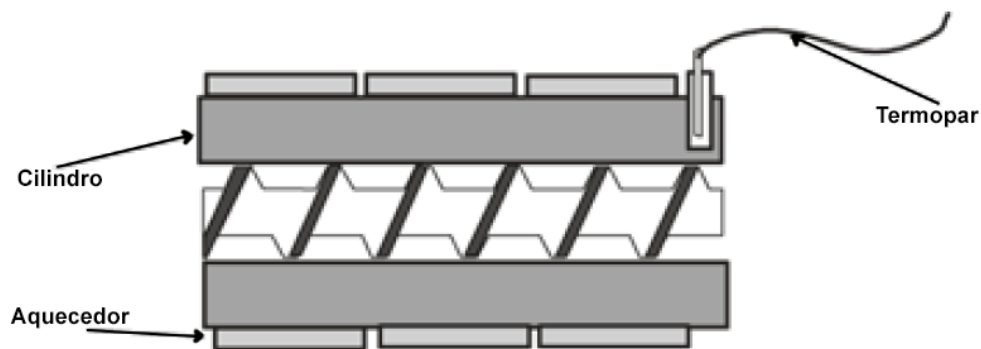


Figura 2.28: Conjunto de aquecedor e termopar

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

Cada zona de temperatura da extrusora deve conter uma leitura do amperímetro do aquecedor. Pode ser no painel de controle ou em um sistema de controle acionado por computador. Ainda segundo o mesmo autor, com todos os aquecedores funcionando corretamente, os amperes consumidos em uma zona específica quando os aquecedores estão com 100% da potência é um valor fixo. Sendo assim, supondo que uma zona tenha mais de um aquecedor e a leitura do amperímetro seja inferior ao normal, pelo menos um aquecedor está queimado ou não está funcionando corretamente.

Também é possível o controle da temperatura polímero fundido, visando a reprodutibilidade do processo de extrusão. Para tal, termopares devem se projetar no fluxo do material fundido para obter leituras precisas. Segundo Harper [1], a medição da temperatura de derretimento dentro do barril da extrusora não é prática porque o parafuso giratório cortaria uma sonda de derretimento presa no fluxo do material fundido. Por isso, a medição normalmente ocorre em um adaptador, tubo de transição ou matriz. Na Figura 2.29 é possível ver algumas possibilidades de configurações para esses sensores.

O termopar embutido, A, não interrompe o fluxo de polímero no canal; no entanto, a temperatura tende a se assemelhar mais à temperatura do metal do que à temperatura de polímero. É mais provável que a temperatura medida seja do metal, e não do polímero fundido. Os termopares B e C na Figura 2.29 são sensores retos que projetam-se na corrente. Esses são termopares simples e resistentes que fornecem uma boa temperatura do material no canal. O erro de medição é proveniente do aquecimento por cisalhamento causado pelo fluxo do polímero ao redor do termopar e pela condução ao longo da sonda. O termopar D é radialmente ajustável na corrente do fluxo polimérico. Este termopar ajustável fornece uma maneira de medir a uniformidade do material fundido através do canal. Por fim, as pontes com sensores, E, na Figura 2.29, permitem a medição simultânea em diferentes locais na corrente de fusão, fornecendo um perfil de temperatura do

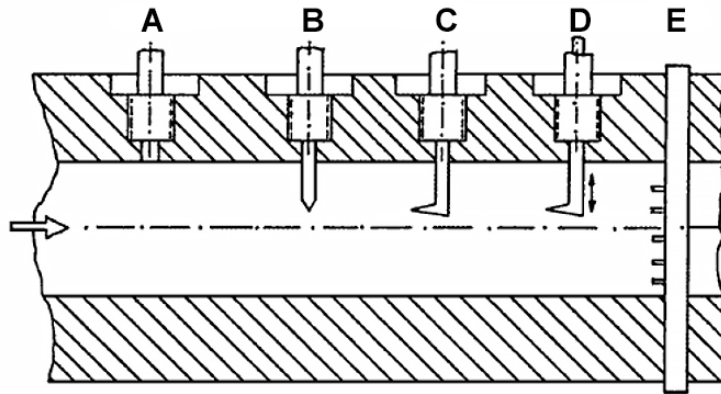


Figura 2.29: Configurações de sensores de temperatura do polímeros: (A) sensor embutido; (B) sensor reto saliente; (C) sensor fixo a montante; (D) sensor ajustável radialmente a montante; e (E) ponte com sensor de múltiplas sondas.

Fonte: Adaptado de Harper [1].

canal instantâneo.

A pressão do cabeçote é medida no final da extrusora. Um transdutor de pressão é normalmente montado logo antes da placa de quebra, enquanto outros podem ser colocados no adaptador da matriz ou na própria matriz. A pressão é monitorada para fins de segurança, qualidade do produto, monitoramento o pacote de telas, monitoramento de processo e solução de problemas. As flutuações de pressão da matriz correspondem às flutuações de saída e mudanças dimensionais.

Segundo Giles, Wagner e Mount [21], um transdutor de pressão funciona com os mesmos princípios de uma ponte de Wheatstone. A pressão no material fundido faz com que o diafragma do transdutor dobre. A tensão ou deformação induzida no diafragma é transferida para um resistor. Conforme a pressão aumenta ou diminui, a resistência muda, resultando em diferentes leituras de pressão. A Figura 3.42 mostra uma seção transversal do transdutor de pressão do fluido.

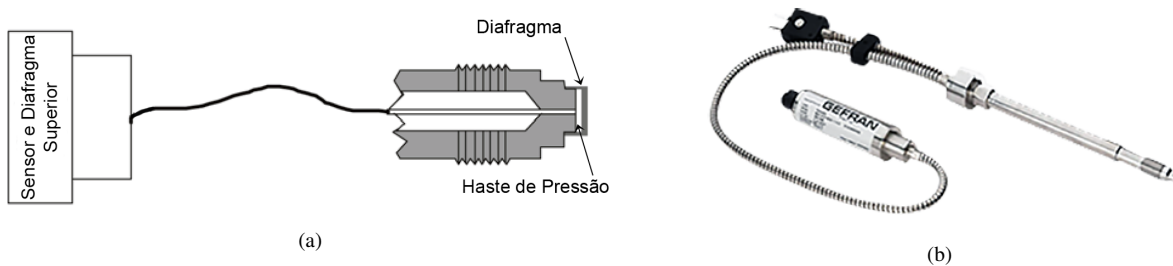


Figura 2.30: Transdutor de pressão: (a) esquemático (b) transdutor propriamente dito.

Fonte: Adaptado de Giles, Wagner e Mount [21].

2.5 SEGURANÇA NO PROCESSO DE EXTRUSÃO

É responsabilidade de cada colaborador trabalhar com segurança e auxiliar os demais colaboradores a operarem com segurança, empenhando-se para eliminar todos os atos inseguros que ocasionem acidentes graves. De acordo com Giles, Wagner e Mount [21], de todos os acidentes, cerca de 96% são causados por erro humano, descuido ou a descrença que o pior cenário possa ocorrer. Consequentemente, a segurança pessoal somada à segurança daqueles que os rodeiam é responsabilidade de cada funcionário. Entre os conceitos básicos estabelecidos pela NR-12 [40], destaca-se:

Norma NR-12

"O homem não está apto, por si só, em seu meio de trabalho, a se proteger sem dispositivos de segurança. Nas máquinas e nas construções mecânicas devem se integrar, portanto, os dispositivos de segurança. Falhas técnicas ou de organização, bem como procedimentos incorretos, são, como a prática mostra, as principais causas de acidentes. Máquinas ou dispositivos mecânicos, que não são dotados de dispositivos forçados de segurança, cedo ou tarde levam a acidentes."

É importante perceber os riscos associados a cada trabalho e não tomar atalhos que possam colocar você ou seus associados no caminho de um perigo potencial e acidentes graves.

Não há uma norma que estabeleça especificamente os dispositivos de segurança aplicados em máquinas extrusoras de polímero. Nesse sentido, o intuito dessa Seção é, a partir das normas listadas na Tabela 2.13 e de referências bibliográficas, ressaltar alguns cuidados que devem ser tomados visando uma drástica redução no risco de acidentes para o usuário deste equipamento.

Tabela 2.13: Normas relacionadas ao contexto de aplicação de uma extrusora.

Norma	Título
ABNT NBR 5410 [41]	Instalações elétricas de baixa tensão
ABNT NBR 13536 [42]	Máquinas injetoras para polímero e elastômeros - Requisitos técnicos de segurança para o projeto, construção e utilização
ANSI Z35.1 [43]	Specifications for accident preventions signs
ISO 3864 [44]	Safety colours and safety signs
DIN EN 294 [45]	Safety of machinery: Safety distances to prevent danger zones being reached
DIN EN 349 [46]	Safety of machinery: Minimum gaps to avoid crushing of the human body
DIN EN 418 [47]	Safety of machinery: Emergency stop equipment - functional aspects - principles for design

Fonte: Autor.

2.5.1 Riscos associados a uma extrusora

Segundo Giles, Wagner e Mount [21], os três maiores riscos potenciais de segurança associados às extrusoras são queimaduras, choque elétrico e quedas. Além de riscos associados a ruídos gerados pelas partes dinâmicas da máquina e fumos provenientes da queima de materiais processados.

2.5.2 Queimaduras

Sem o equipamento de proteção adequado, as queimaduras podem ser comuns entre os funcionários que trabalham ao redor das extrusoras. Tocar em uma matriz quente ou manusear extrudado sem luvas normalmente causa queimaduras. Mangas compridas com luvas térmicas devidamente aprovadas devem ser usadas ao trabalhar ao redor da matriz, trocá-la, apertar os parafusos da matriz ou outras funções executadas na matriz. Se o isolamento for colocado ao redor da matriz, certifique-se de que esteja em boas condições e devidamente instalado.

Devido às características viscosas do extrudado quente da extrusora, ele consegue aderir à pele. Como os materiais poliméricos são ótimos isolantes, após aderirem à pele eles esfriam muito lentamente, continuando a queimar a pele afetada.

Para evitar queimaduras decorrentes do contato não intencional com partes aquecidas da máquina, devem ser previstas coberturas fixas ou isolamento térmico para as partes em que a temperatura de trabalho ultrapasse 80°C . Em complemento, uma etiqueta deve ser fixada, indicando a alta temperatura. Cobertura fixa é aquela firmemente presa à máquina extrusora e que só pode ser removida com o auxílio de ferramentas. Nenhum sistema de supervisão é necessário. A Figura 2.31 foi adaptada da NBR 13536 [42], uma vez que essa norma prevê as proteções fixas para uma máquina injetora.

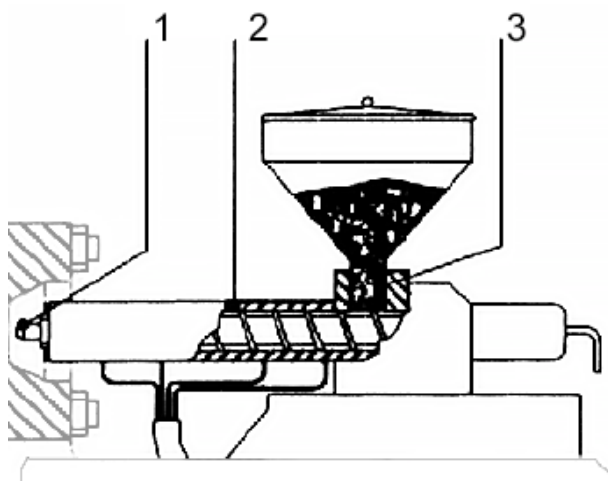


Figura 2.31: Recomendações de proteções fixas em máquina extrusora. (1) área da unidade de extrusão; (2) área das resistências de aquecimento; (3) área da alimentação de material

Fonte: Adaptado da Norma NBR 13536 [42].

A DIN EN 294 [45] prevê distâncias de segurança para evitar que zonas de perigo sejam alcançadas, e deve ser aplicado ao local de trabalho. Além disso, Giles, Wagner e Mount [21] citam alguns comportamentos que devem ser seguidos:

- Nunca o aperador deve ficar na frente de uma matriz quando uma extrusora de parafuso simples estiver inicializando. O ar na extrusora e possivelmente o gás de produtos degradados (se a extrusora estiver à temperatura de extrusão com o material no cilindro por algum tempo) são forçados para fora da extrusora na inicialização. Se algum polímero for deixado no cilindro, o ar preso pode ser comprimido, soprando o polímero quente para fora do molde. Ficar na frente da extrusora cria uma condição insegura em que o polímero fundido pode ser expelido da matriz, pousar e queimar o operador.
- A área mais perigosa ao redor de uma extrusora é o parafuso exposto girando na garganta de alimentação. Nunca coloque suas mãos ou dedos na garganta de alimentação. Se o parafuso estiver girando, há uma força incrível que pode remover rapidamente um dedo. Se a garganta de alimentação estiver quente, você também pode se queimar.
- O momento mais perigoso durante a operação da extrusora é a inicialização. Uma extrusora é um vaso de pressão. O material está sendo alimentado em uma extremidade com um mecanismo de transporte positivo (parafuso) operando em alta potência. Se a extremidade do molde da extrusora estiver bloqueada com polímero sólido ou contaminantes, uma pressão incrível pode aumentar muito rapidamente e explodir o molde. Sempre inicie a rosca da extrusora lentamente e monitore a pressão da matriz de perto até que o polímero flua continuamente. Uma vez que o fluxo da matriz é estabelecido, a velocidade da rosca pode ser aumentada com segurança. Como mencionado anteriormente, nunca fique na frente de uma extrusora durante a inicialização, caso o polímero derretido seja soprado para fora da matriz sob alta pressão.

2.5.3 Choques Elétricos

Requisitos gerais para equipamento elétrico são prescritos pela NBR 5410 [41] devem ser observados. Por exemplo, o dimensionamento das bitolas dos fios deve seguir as recomendações para instalações elétricas de baixa tensão.

Existe o potencial de choque elétrico quando funcionários mal treinados removem as tampas da extrusora, expondo fios desencapados e conexões elétricas. Os aquecedores da extrusora são normalmente de 120 ou 220 volts e podem causar choques elétricos graves. Deve ser verificado os fios das faixas do aquecedor na matriz e adaptadores para garantir que não haja fios desgastados, desencapados ou expostos que possam causar choque elétrico. Em alguns processos de extrusão, os banhos de resfriamento de água ficam muito próximos da matriz, o que pode criar risco elétrico adicional. A menos que devidamente treinados, os operadores nunca devem remover os protetores, expondo terminais elétricos em aquecedores ou armários elétricos abertos, para resolver problemas elétricos.

2.5.4 Quedas

Segundo Giles, Wagner e Mount [21], o terceiro maior risco potencial de segurança em torno das extrusoras são as quedas. Pellets derramados no chão são escorregadios e precisam ser limpos imediatamente. Na inicialização, a extrusora normalmente gera algum refugo, que pode cair no chão ao redor da matriz. Isso cria riscos de tropeços que devem ser removidos imediatamente. Ocasionalmente, surgem problemas de processamento na inicialização, levando a muito material no piso ao redor da extrusora. Nessas situações, a extrusora deve ser desligada, a área limpa e a extrusora reiniciada. Alguns processos de extrusão usam água para resfriamento. Derramamentos de água no chão devem ser removidos com um aspirador úmido / seco ou com um rodo para um dreno. Pisos molhados são muito escorregadios e podem causar quedas.

Assim, resíduos da inicialização caídos no chão representam perigo de tropeço. Isso deve ser recolhido e eliminado assim que a linha estiver funcionando. Se os problemas de inicialização persistirem e impedirem a limpeza, o equipamento deve ser desligado, a área limpa e a linha reiniciada.

2.5.5 Ruído

O ruído acima de 80 dB exige que a proteção auditiva seja usada por todas as pessoas na área. Se o nível de ruído estiver abaixo de 80 dB, os funcionários ainda podem querer usar proteção auditiva para evitar a perda auditiva de longo prazo, conforme aponta Giles, Wagner e Mount [21].

2.5.6 Parada Emergência

A EN 418 (47) define a para de emergência como um interruptor ou circuito de controle à prova de falhas que, quando desenergizado, interromperá a operação do equipamento associado e desligará todos os perigos potenciais fora do gabinete de alimentação principal.

O acionamento de um botão de emergência ou o desligamento da máquina pela chave geral deve automaticamente bloquear e iniciar a descarga de qualquer acumulador de energia conectado a movimentos de risco. No caso de acumuladores de energia que servem a mais de uma máquina, apenas seu bloqueio deve ser necessário.

Segundo a norma, as paradas de emergência estão disponíveis em muitos formatos e tamanhos com base em sua funcionalidade e aplicação. Os padrões IEC e NEMA ditam alguns dos requisitos para paradas de emergência. Além disso, muitos mercados e setores têm suas próprias especificações aceitas pelo setor, que podem exigir o cumprimento de requisitos mais específicos. Por exemplo, a indústria de fabricação de semicondutores exige que os botões de parada de emergência tenham o formato de um “cogumelo”.

2.5.7 Equipamento de Proteção Pessoal

O equipamento de proteção individual existe para tornar o trabalho mais seguro. A NBR 13536 [42] recomenda que, quando houver troca de material plástico ou remoção de material solidificado no molde ou bico e na purga do cilindro plastificador, as pessoas devem usar protetores faciais, luvas e roupas protetoras contra queimaduras. Alguns outros equipamentos proteção individual (EPI) de segurança recomendados por Giles, Wagner e Mount [21] são:

- Óculos de segurança com ou sem proteção lateral
- Sapatos de segurança
- Proteção de orelha
- Luvas com isolamento térmico para aplicações quentes
- Mangas compridas
- Capacetes
- Proteção para o rosto
- Óculos
- Cinta dorsal

A necessidade de alguns desses é justificada, uma vez que o polímero pode grudar nas luvas, onde retém o calor por um longo tempo, e pode queimar operador através das luvas se o tipo adequado de luva não for usado. Além disso, ao remover a matriz e / ou parafuso de uma extrusora (eles normalmente estão quentes), por isso a recomendação de luvas resistentes e mangas térmicas de proteção para evitar queimaduras. Além disso, as matrizes podem ser pesadas; portanto, uma cinta dorsal ou outro equipamento para levantar e segurar a matriz pode prevenir lesões nas costas.

2.5.8 Procedimento de bloqueio, etiqueta e liberação

Giles, Wagner e Mount [21] recomenda que qualquer pessoa que esteja trabalhando no equipamento deve ter uma fechadura pessoal com a única chave. Antes de fazer manutenção ou outro trabalho no equipamento, deve-se desligar a chave liga / desliga e bloquear a chave com a fechadura pessoal. Os funcionários que trabalham na linha devem colocar seu próprio cadeado. Depois de travar e marcar o equipamento antes de fazer qualquer trabalho, cada trabalhador tenta ligar o equipamento para verificar se ele está desligado e não pode ser ligado. Uma vez que a manutenção ou outro trabalho é concluído, cada trabalhador remove seu próprio bloqueio individual antes que o equipamento possa ser reiniciado. Este procedimento evita que alguém se machuque ao trabalhar no equipamento quando outra pessoa inadvertidamente iniciar o equipamento.

2.5.9 Treinamento Adequado

A NBR 13536 [42] indica que o empregador deve garantir o treinamento e instrução dos operários em relação aos métodos e dispositivos de segurança da máquina. Antes de permitir que um novo operador inicia o trabalho ou qualquer operação prevista, este deve ter passado por um treinamento adequado. Além disso, o empregador deve assegurar-se haja a supervisão adequada para que os procedimentos de operação e segurança sejam seguidos.

Não se deve operar o equipamento sem o treinamento adequado e a compreensão dos riscos potenciais de segurança associados à operação. O treinamento deve incluir procedimentos de inicialização e desligamento, compreensão dos sinais de cuidado ou advertência nas máquinas e tempo de operação do equipamento com um operador experiente.

2.5.10 Inspeção e limpeza

Giles, Wagner e Mount [21] aponta que, antes de cada turno, deve-se avaliar a área de operação e a planta em geral, procurando por condições inseguras, por exemplo, riscos de tropeçar, fios expostos, água no chão, etc.

Uma boa limpeza está diretamente relacionada à segurança. Uma área desordenada e suja causará acidentes e refletirá na atitude do trabalhador em relação ao trabalho. Uma área de armazenamento adequada para todas as ferramentas e equipamentos torna o trabalho mais fácil e a planta um lugar melhor para trabalhar.

2.5.11 Segurança de Material

O operador deve entender o material que será trabalhado a partir de uma revisão das Folhas de Dados de Segurança de Materiais (MSDSs). Condições operacionais inadequadas ou purga com materiais errados podem ter consequências graves. O superaquecimento do cloreto de polivinila (PVC), por exemplo, gera ácido clorídrico (HCl), que ataca os pulmões e enferruja os equipamentos da fábrica. Nunca misture acetal com náilon, PVC, polímeros fluorados ou ionômero em uma extrusora, pois eles reagirão e liberarão formaldeído.

O PVC tem estabilidade térmica limitada e não deve ser deixado na extrusora quente. O PVC se degrada em uma reação autocatalítica, gerando HCl. O material de purga adequado deve estar disponível para remover o PVC do cilindro se a extrusora for ficar inativa por um longo período. Os operadores que têm flexibilidade para alterar os perfis de temperatura da extrusora precisam entender os limites superiores de processamento ao extrudar PVC ou outros polímeros sensíveis à temperatura.

Além disso, cada extrusora deve ser equipada com uma coifa na matriz ou porta de ventilação para remover qualquer fumaça gerada.

2.5.12 Sinalização

As placas de sinalização devem obedecer à ISO 3864 [44] e a ANSI-35 [43], quanto ao teor, cor, formato e dimensões. Adaptado da NBR 13536 [42], a Figura 2.32 indica quais placas de sinalização devem, pelo menos, ser fixadas à máquina injetora, contendo o texto definido na imagem. A Figura 2.32 também sugere a sua localização.



Figura 2.32: Texto e localização de sinalização de segurança.

Fonte: Adaptado da Norma NBR 13536 [42].

3 DESENVOLVIMENTO

Resumo

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento das etapas que compõem o projeto e dimensionar os componentes dos subsistemas, especificando os métodos utilizados para o equacionamento dos mesmos. A partir do desenvolvido aqui, serão extraídas as dimensões finais das peças.

3.1 METODOLOGIA

Em um sentido amplo, engenharia pode ser descrita como uma mistura criteriosa de ciência e de arte em que os recursos naturais, incluindo as fontes de energia, são transformados em produtos, estruturas ou máquinas úteis que beneficiam a humanidade. Concomitante com essa ideia, o autor Rauwendaal [48] apresenta o projeto de roscas para extrusoras de rosca única como sendo considerado mais uma arte do que uma ciência.

Collins, Busby e Staab [49] definem projeto mecânico como um processo iterativo de tomada de decisão que tem como objetivo a criação e a otimização de um novo ou aprimorado sistema de engenharia ou equipamento para atender a uma necessidade ou um desejo humano, com o compromisso da conservação das fontes de recursos e do impacto ambiental.

Partindo dessas reflexões, o desenvolvimento do projeto foi estruturado baseado em duas metodologias, sendo uma voltada para o processo de construção da máquina extrusora e a outra faz uso de uma metodologia correlacional, conceito apresentado por Sampieri, Collado e Lucio [50], para comparar o projeto a ser elaborado com a fundamentação teórica e avaliar as relações entre as variáveis para determinar o grau de relevância de cada uma para o projeto e, conseqüentemente, para o processo de tomada de decisão. Para isso, é necessário adquirir o conhecimento desde os aspectos do material que será processado até os aspectos construtivos da máquina, que foram apresentados na revisão bibliográfica em uma estrutura fragmentando o sistema completo para promover uma compressão da composição de seus subsistemas.

A pesquisa correlacional objetiva interpretar qual é o grau de relação entre variáveis de um problema. No caso da extrusora pode, por exemplo, questionar se há relação entre a velocidade e a vazão mássica. Esta etapa de levantamento de variáveis junto de uma hierarquização dos requisitos de projeto, ajuda a determinar aquele que é mais influente para servir de ponto partida para concepção a concepção da máquina. No caso, o rendimento esperado foi escolhido como variável principal, mas há casos onde há a limitação de espaço ou custo máximo do projeto são mais relevantes na tomada de decisões.

O desenvolvimento dos componentes mecânicos seguiu as etapas propostas por Giles, Wagner e Mount [21]. Seguindo uma abordagem *bottom-up*, os subsistemas são desenvolvidos com

objetivo de dar forma a um sistema final maior. Cada componente da extrusora tem uma função, características técnicas, as quais são específicas e podem ter influência uma sobre as outras. Nessa abordagem de baixo para cima os elementos básicos são inicialmente descritos em detalhes e, aos poucos, dão forma ao projeto. Faz parte da etapa de desenvolvimento, a aplicação de simulações para validação de peças e conjuntos. A análise numérica idealiza e concebe métodos para aprovar as soluções de problemas expressados matematicamente de forma eficiente, ao encontrar soluções aproximadas para problemas complexos, apresentando resultados antes da fabricação do produto.

3.2 DIMENSIONAMENTO DA ROSCA

A rosca é um dos componentes centrais da extrusora, pelo fato de realizar múltiplas funções, desde o transporte do material até a plastificação do mesmo. Por isso, o projeto desta deve ser de tal maneira que sua geometria promova máxima eficiência, vazão constante, plastificação e homogeneização adequada, visando a durabilidade da máquina e evitando danos ao polímero. Para tal, como afirma o autor Rauwendaal [48], os projetos de rosca podem e devem ser baseados em resultados da análise teórica da interação do projeto com o desempenho da extrusora.

3.2.1 Características Geométricas

As especificações exigidas ao comprar ou projetar um novo parafuso incluem, normalmente o polímero a ser processado, requisitos de rendimento (saída da extrusora), diâmetro do parafuso, razão L/D , taxa de compressão, profundidade do filete na zona de alimentação ou zona de medição, número de filetes ou razão de comprimento de cada zona, ângulo de hélice e folga entre o parafuso e o barril. A Figura 3.1 apresenta as seguintes características geométricas:

- D_b é o diâmetro do barril
- D_s é o diâmetro externo da rosca, constante ao longo de todo o parafuso
- D_i é o diâmetro interno do parafuso, que varia conforme a seção
- δ é a folga entre a rosca e o barril
- W é a largura do canal
- h é a profundidade do filete
- Φ é o ângulo de hélice
- t é o passo da rosca
- e é a espessura do filete

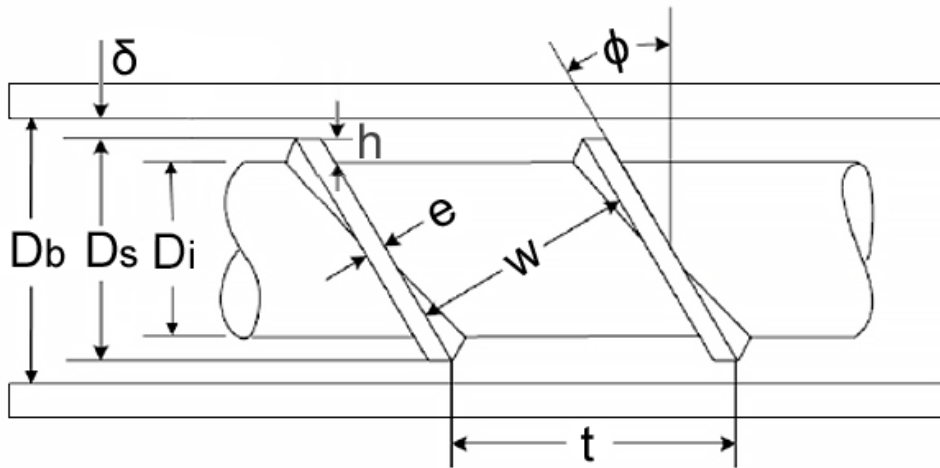


Figura 3.1: Características geométricas da rosca extrusora

Fonte: Autor.

Para o projeto do parafuso, foi determinado que este será caracterizado por uma rosca quadrada. Este tipo de rosca nem sempre é muito eficiente, dependendo da situação, mas ainda é a mais utilizada na indústria, segundo Giles, Wagner e Mount [21]. Como citado anteriormente, a espessura dos filetes, e , é normalmente igual a $0,1D_s$, uma vez que isso garante que estes sejam resistentes o suficientes contra lascas ou eventuais fraturas, enquanto ainda permite espaço suficiente no canal para processar o polímero.

Como definido na Seção 2.4.1, o passo t é a distância axial de um ponto do filete ao mesmo ponto do filete adjacente, uma vez que estes são paralelos, sendo definido pela Equação 2.8. Para uma rosca quadrada, o passo é igual ao diâmetro do parafuso, D_s . O subscrito "s" refere-se à palavra inglesa *screw* (parafuso). Resolvendo a Equação 2.8 para esta relação de igualdade, encontra-se:

$$\Phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{t}{\pi D} \right) \implies \Phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{D_s}{\pi D_s} \right) \implies \Phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{1}{\pi} \right) \implies$$

$$\boxed{\Phi = 17,66^\circ} \quad (3.1)$$

Visto anteriormente na Seção 2.4.1, a profundidade ou altura dos filetes, h , varia dependendo da zona do parafuso. A razão entre a altura da profundidade do primeiro canal, h_i , e do último, h_f , é chamada de razão de compressão e que foi definida pela Equação 2.7. Esta taxa é crítica no processamento e difere entre materiais poliméricos. Giles, Wagner e Mount [21] afirmam que os poliésteres podem ser processados com uma rosca de taxa de compressão de 2,5:1. Mais especificante para o PLA, os autores Sin e Tuen [51] indicam que a taxa de compressão para este polímero está entre 2,5:1 e 3:1. A partir do apresentado, foi definido para adotado para o projeto uma razão de 2,5:1.

Contudo, ainda é necessário definir a dimensão da altura de um dos canais. Como visto na Seção sobre o Sistema de Plastificação, a profundidade do canal de alimentação varia de $0,10D_s$ a $0,30D_s$. Como trabalhos que analisam e simulam sistemas de extrusão, como os já citados trabalhos de Vignol [38] e Rauwendaal [48], concluíram que hipóteses como a de considerar que o parafuso da extrusora permanece estacionário enquanto que o barril gira em uma velocidade v_s é válida para relações entre a profundidade do canal e o diâmetro do parafuso de $h \leq 0,2D_s$ e prevendo a facilidade que isso resultaria na análise do processo, visto que recairiam em condições de fluxo entre placas paralelas e entre cilindros concêntricos, foi determinado que $h_i = 0,2D_s$.

A largura do canal, W , é a distância através do canal do parafuso em uma direção perpendicular ao filete. A partir da Figura 3.1, é fácil perceber a relação geométrica entre o passo, t , e a soma das distância da largura do canal, W , e espessura do filete, e . Essa relação é dada pela Equação 3.2.

$$W + e = t \cdot \cos(\Phi) \implies W = t \cdot \cos(\Phi) - e \quad (3.2)$$

Apesar de ter sido apresentado alguns valores para a folga entre o parafuso e o barril, δ , na Seção 2.4.1, é interessante buscar alguma forma de determiná-lo considerando um múltiplo do diâmetro da broca ao invés de valores fixos, visto que seu valor impactará o posterior cálculo do fluxo de vazamento. Rauwendaal [48] indica que a folga seja calculada como 0,001 vezes o diâmetro do parafuso, D_s , além de propor a presença de um chanfro de $0,25 \text{ mm}$. Enquanto isso, a proposta de Giles, Wagner e Mount [21] é apresentada pela Equação 3.3. Este será o cálculo adotado neste projeto, visto que resulta em um valor maior, uma vez que diâmetros pequenos de rosca serão analisadas e folgas menores exigem graus de tolerância mais rígidos.

$$\delta = 0,0015 \cdot D_s \quad (3.3)$$

Ao longo do capítulo 2 de Fundamentação Teórica, foi apresentado um importante conceito que é a razão L/D , assim como as vantagens e desvantagens de se ter razões curtas ou longas. Segundo Giles, Wagner e Mount [21], a maioria das extrusoras vendidas são basicamente definidas em relação ao diâmetro do parafuso e a relação do comprimento, L , e o diâmetro D . Uma vez que a razão L/D descreve o comprimento da rosca em relação ao diâmetro, o rendimento da extrusora está diretamente relacionado a ela. Ainda conforme os mesmos autores, os poliésteres podem ser processados em extrusoras com razões L/D de 24:1 a 30:1. Similar a estes valores, os fabricantes Futerro® [52] e Goodfellow® [53] especificam o maquinário empregado para fabricação de filamentos de PLA se trata de extrusoras convencionais com relações L/D de 24:1 a 32:1 e barris lisos. Ao comparar com as referências e como, para o projeto, as vantagens de uma razão menor são mais interessantes (menor custo inicial e uma máquina mais compacta), além do maior rendimento não ser necessário a princípio, optou-se pela razão L/D de 24:1.

Outra coisa a ser definida são as razões de comprimento de cada zona. Cada região do parafuso possui diferentes comprimentos, que podem variar para cada aplicação. De acordo com Jaroschek

[54], 20 a 40% do comprimento do parafuso corresponde a região de alimentação, enquanto 20 a 30% é destinado à região de compressão, e 40 a 60% seria o tamanho da região de plastificação. Giles, Wagner e Mount [21], apontam a região de alimentação como responsável por 20 a 25% do comprimento total, a zona de compressão corresponde de 32% a 38% e a zona de dosagem corresponde entre 40 e 45%. Com base nesses dados, e priorizando uma região de plastificação maior dentro os limites dos autores e visto que o projeto contará com uma razão L/D menor, as zonas de alimentação, compressão e plastificação (dosagem), correspondem a, respectivamente, 25, 30 e 45% do comprimento do parafuso.

Por fim, é necessário determinar o diâmetro externo do parafuso, D_s , que, como visto na Seção 2.4.1, varia de 25 a 200 mm. Como o rendimento e o diâmetro estão diretamente relacionados e, para a maioria dos cenários industriais, a definição da saída da extrusora é o ponto de partida do projeto do maquinário, na Seção 3.2.2, o dimensionamento do diâmetro da rosca, e consequentemente de todos os outros parâmetros que dependem deste, será feito baseado numa análise do rendimento da extrusora em função dos diâmetros e velocidades de operação.

3.2.2 Análise de Rendimento e Fluxos na Extrusora

Recapitulando, as zonas que compreenderem a extrusora são a zona de alimentação (ou de transporte de sólidos), onde as partículas de polímero são compactadas e transportadas para a frente; a zona de fusão (ou de compressão), onde o polímero começa a fundir principalmente sob ação do cisalhamento na parede do cilindro; e a zona de dosagem (ou de medição), onde o polímero é transportado pelo fluxo de arrasto causado pela ação rotativa do parafuso.

Giles, Wagner e Mount [21] define o fluxo de arrasto como o fluxo entre duas superfícies causado pelo movimento de uma superfície em relação à outra, onde fluido é literalmente arrastado pela parede móvel. Para superfícies planas paralelas, o perfil de velocidade é linear, variando de zero na parede estacionária à velocidade da superfície móvel.

Na zona de dosagem de uma extrusora, o polímero geralmente está fundido. O parafuso rotativo empurra o material ao longo das paredes do cilindro estacionário, criando o então fluxo de arrasto, Q_D (do original *Drag Flow*). Este fluxo de arrasto fornece a ação de transporte para a frente da extrusora e, na ausência de uma matriz, é efetivamente o único fluxo presente. Segundo Harper [1], a presença da matriz restringe a descarga do fluxo e produz um grande gradiente de pressão ao longo da extrusora. Uma vez que a pressão é maior imediatamente antes da matriz, esta pressão no cabeçote (do inglês, *head pressure*) cria dois outros fluxos, fluxo de pressão, Q_P , e fluxo de vazamento, Q_L . Os subscritos “P” e “L” referem-se as palavras inglesas *pressure* (pressão) e *leakage* (vazamento), respectivamente.

No fluxo de pressão, a pressão devido a matriz força o fundido a girar nos canais da rosca da extrusora. O fluxo de vazamento ocorre quando a pressão é suficiente para forçar o polímero fundido de volta aos filetes da rosca. Uma vez que ambos se opõem ao movimento de avanço do fundido, a pressão e o fluxo de vazamento são frequentemente agrupados como refluxo. Na fi-

gura, onde assume-se a hipótese de que o parafuso da extrusora permanece estacionário enquanto que o barril gira, apresentado anteriormente na Seção 3.2.1, pode-se observa como a soma dos gradientes de velocidade para os diferentes fluxos na seção de medição.

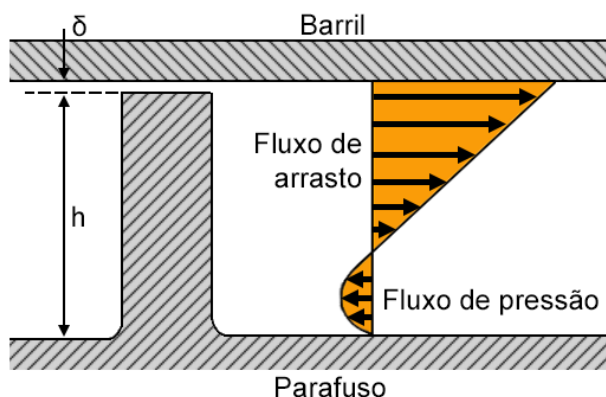


Figura 3.2: Perfil de velocidade do polímero fundido na seção de medição do parafuso.

Fonte: Autor.

Conforme ilustrado na Figura 3.2, durante a operação normal da extrusora, o fluxo de arrasto transporta o polímero ao longo das paredes do cilindro, enquanto o fluxo de pressão força o material próximo ao parafuso de volta para o funil. Harper [1] afirma que o fluxo de pressão auxilia na mistura, pois o fluxo reverso aumenta a ação em espiral no canal. O material próximo à parede do cilindro viaja a uma velocidade v_s máxima em direção, enquanto o material a dois terços da profundidade do canal tem vetor de velocidade nulo.

A Figura 3.3, releitura da Figura 2.19, apresenta o balanço de energia para uma operação de extrusão de polímero. A primeira lei da termodinâmica, ou seja, a conservação de energia, deve ser satisfeita. A energia necessária para a operação de extrusão do polímero é fornecida pelo motor e pelos aquecedores.

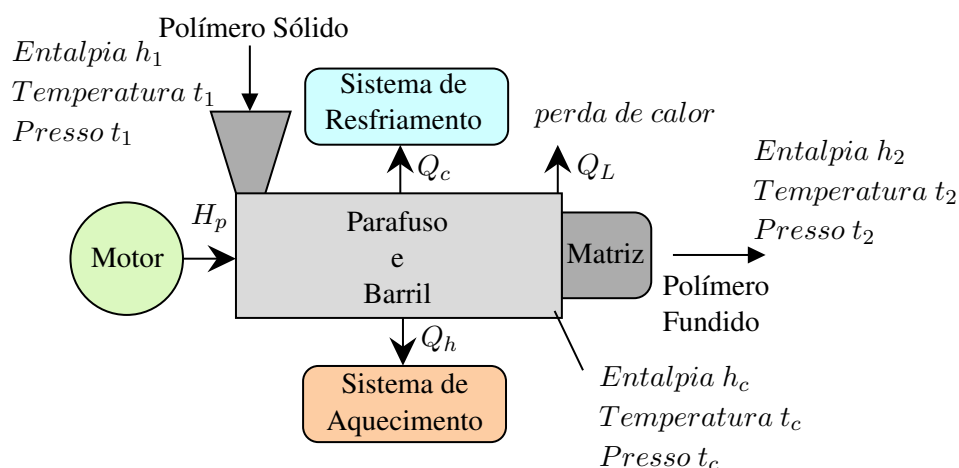


Figura 3.3: Balanço de energia para uma operação de extrusão.

Fonte: Autor.

De acordo com Giles, Wagner e Mount [21], uma porção muito pequena, geralmente insignificante, da energia do motor é perdida através da corrente de transmissão como calor de atrito no acoplamento e na caixa de engrenagens. A maior parte da energia mecânica do motor, H_p , consumida para girar a rosca é convertida em calor por cisalhamento do polímero fundido. Uma grande quantidade de calor é gerada no fundido por dissipação viscosa à medida que o fundido é cisalhado pela rotação da rosca.

A energia térmica fornecida pelos aquecedores, Q_h , conduz ao polímero através do cilindro. Quando o fundido supera a temperatura de ajuste do aquecedor do barril, o sistema de resfriamento retira o calor, Q_c , do material. Uma quantidade substancial de calor Q_L é perdida para o ambiente através do cilindro e do eixo do parafuso. O equilíbrio das energias mecânicas e térmicas totais é igual ao aumento do conteúdo de calor do polímero desde a temperatura de alimentação até a temperatura de fusão.

Como, segundo Giles, Wagner e Mount [21], aproximadamente 80 a 90% do calor necessário para derreter o polímero é gerado por cisalhamento pela rotação do parafuso, estimativa que pode ser feita para calcular a capacidade da extrusora é supor que a maior parte da energia necessária para derreter o termoplástico provém do trabalho mecânico, enquanto os aquecedores de barril servem principalmente para isolar o material.

Uma modelagem matemática simples de extrusão, proposta por Harper [1], assume que: (1) a extrusora está em estado estacionário, (2) o polímero fundido é um fluido newtoniano, (3) a extrusora é isotérmica (a uma temperatura constante) e (4) a zona de medição torna o única contribuição para a produção. Como o objetivo é ter uma aproximação da capacidade da extrusora, essas hipóteses são válidas para simplificação dos cálculos. Assim, a saída líquida Q , da extrusora pode ser expressa como a soma dos três fluxos visto nesta Seção:

$$Q = Q_D - Q_P - Q_L \quad (3.4)$$

O fluxo de arrasto, em mm^3/s , é proporcional a uma constante do parafuso A e à velocidade do parafuso, expressa como:

$$Q_D = A \cdot N = \frac{\pi^2 D_s^2 h_f \text{sen}(\Phi) \text{cos}(\Phi)}{2} N \quad (3.5)$$

onde D_s é o diâmetro do parafuso em mm , h_f é a profundidade do canal na zona de dosagem, Φ é o ângulo de hélice, e N é a velocidade do parafuso em revoluções por segundo, rps .

O fluxo de pressão, em mm^3/s , está relacionado a uma constante B da geometria do parafuso, a pressão do ΔP e a viscosidade aparente do fundido na zona de dosagem. Assim, temos:

$$Q_P = \frac{B \cdot \Delta P}{\mu} = \frac{\pi D h^3 \text{sen}^2(\Phi) \Delta P}{12 L_d \mu} \quad (3.6)$$

onde L_d é o comprimento da zona de dosagem em mm , μ é a viscosidade aparente em $Pa.s$, e

ΔP é a pressão dada em Pa .

O fluxo de vazamento, em mm^3/s , é função de uma constante C , da pressão gerada pela matriz ΔP e da viscosidade aparente na folga de filete μ . Isso é expresso por:

$$Q_L = \frac{C \cdot \Delta P}{\mu} = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg}(\Phi) \Delta P}{12 e L_d \mu} \quad (3.7)$$

onde δ é a folga entre a rosca e o barril em milímetros, e e é a espessura do filete em milímetros.

Percebe-se que quando o fluxo de arrasto domina, a saída da extrusora aumenta linearmente com a velocidade da rosca, e roscas maiores e canais mais profundos carregam mais fundido. No entanto, a pressão gerada pela matriz também aumenta com a velocidade do parafuso. Embora isso aumente o fluxo de pressão, o efeito real depende muito da viscosidade do fundido. Com fundidos de alta viscosidade, o fluxo de pressão pode ser mínimo e ter pouco efeito na saída da extrusora. Em contraste, os fundidos de baixa viscosidade produzem menos pressão no cabeçote, mas maior fluxo de pressão.

O fluxo de vazamento varia com a folga entre a rosca e o barril. Ele também cresce quando se tem polímeros de baixa viscosidade e altas pressões ao fim da extrusora. À medida que a folga aumenta, o fluxo de vazamento aumenta, reduzindo assim a produção. Conseqüentemente, a diminuição na produção da extrusora ao longo do tempo é usada para monitorar o desgaste da rosca e do cilindro, como afirma Harper [1].

Os autores Giles, Wagner e Mount [21] também propuseram um modelo matemático, considerando apenas o fluxo de arrasto e o fluxo de pressão, apresentados pelo sistema de Equações 3.8. Trata-se de equações que consideram um modelo de lei de potência simples usado para descrever a viscosidade do fundido

$$\begin{cases} Q = Q_d - Q_p \\ Q_d = \frac{WH[\pi DN \cos(\Phi)]}{2} \cdot \frac{(4+n)}{5} \\ Q_p = \frac{WH^3 \operatorname{sen}(\Phi) \Delta P}{12\mu L_d} \cdot \frac{3}{(1+2n)} \end{cases} \quad (3.8)$$

onde W é a largura do canal em mm e as frações $(4+n)/5$ e $3/(1+2n)$ são fatores de correção, onde n é o índice de lei de potência, o que, segundo os autores, produz uma boa aproximação do rendimento. Para um fluido newtoniano, $n = 1$; portanto, quanto mais próximo n estiver de 1, mais perto o polímero fundido está de se comportar como um fluido newtoniano. Polímeros como o policarbonato com índice de lei de potência de 0,7 exibem comportamento newtoniano em baixas taxas de cisalhamento e comportamento não newtoniano em altas taxas de cisalhamento. Em estudos de Marec et al., variando a temperatura de 160° a 210°, o índice de lei de potência do PLA calculado pelos autores variou de aproximada 0,6 a 0,9.

As Equações 3.5, 3.6 e 3.7 e o sistema de Equações 3.8 obviamente não são exatos, uma vez que o calor de fusão do material e outros efeitos térmicos são ignorados, mas apresentam resultados próximos e suficientes para uma estimativa da capacidade de uma extrusora, conforme defendem os autores Chanda e Roy [3], Harper [1] e Giles, Wagner e Mount [21]. Além disso,

a produção máxima possível na seção final da matriz dificilmente é atingível, principalmente devido:

- ao coeficiente de atrito do polímero com a parede do cilindro;
- à geometria da raiz do parafuso, que nem sempre é ideal;
- ao gradiente de pressão na extrusora;
- à densidade e a viscosidade aparentes que variam.

3.2.3 Relação entre Diâmetro da Rosca e Rendimento

Como visto na Seção 3.2.2, o cálculo do rendimento da extrusora, isto é, a produção da máquina está diretamente relacionada ao diâmetro do parafuso. Sendo assim, valendo-se das relações geométricas estabelecidas na Seção 3.2.1 e da análise de rendimento baseado nos fluxos da extrusora, apresentado na Seção 3.2.2, é possível construir um gráfico que analisa a saída da extrusora para diferentes diâmetros e velocidades.

Para esta etapa, será utilizado o software GNU/Octave, versão 5.20, cuja sintaxe desenvolvida para computação matemática apresenta ferramentas de visualização e plotagem 2D e 3D integradas.

A priori, algumas considerações e aproximações devem ser feitas. Como é de maior interesse encontrar a vazão em termos de quilogramas por hora, ao invés de volume por segundo (proposto pelas Equações 3.5, 3.6 e 3.7 e o sistema de Equações 3.8), a densidade do material, ρ é necessária. Da média dos valores encontrados nas Tabelas 2.6 e 2.7, encontra-se que a densidade média do PLA é de $\rho = 1,24g/cm^3$.

Outro dado necessário é a viscosidade aparente na zona de medição. Conforme o PLA é extrudado, sua viscosidade diminui devido à degradação da cadeia do polímero. Em estudo apresentado por Peinado et al. [56] em 2015, percebe-se que há uma diminuição perceptível da viscosidade do PLA natural em temperaturas mais altas ($190^\circ C$); em torno dessa temperatura, a uma taxa de cisalhamento de em $320s^{-1}$, a viscosidade diminui de $1009,62$ para $292,90Pa.s$. No mesmo ano, Ferreira et al. [57] apresentaram, por meio de gráficos, a variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Para cerca de $300s^{-1}$, o resultado obtido é da ordem de $350Pa.s$ a $180^\circ C$. Para simulação, será considerado uma viscosidade na de $310Pa.s$.

Em relação a faixa de velocidades que será analisada, apesar de ter sido citado a faixa geral de 50 a 150 *rpm* na Seção 2.4.3, buscou-se dados mais específicos para a extrusão de PLA. Entre os dados encontrados dos fabricantes de filamento Futerro® [52] e Goodfellow® [53], a faixa de velocidades que ambos utilizam na extrusão de filamentos de PLA é de 20 a 100 *rpm*, que será a faixa utilizada na simulação. Utilizar padrões de fabricantes conhecidos é interessante, uma vez que a velocidade de rosca mais alta pode gerar tanto calor de cisalhamento que a temperatura do material fundido pode não ser controlada. A velocidade da rosca também determina o tempo de

residência na extrusora e a porcentagem de preenchimento da rosca. Se aditivos forem adicionados a jusante, rotações mais altas aumentam o atrito da fibra, possivelmente resultando em um perfil de propriedade mais baixo.

Por fim, deve-se terminar a faixa de diâmetro que será analisada. Por mais que autores apontem uma ampla variedade de diâmetros para extrusoras, de 25 a 200 mm, como tratado na Seção 3.2.1, não será especificado todas essas possibilidades. Isso pois, uma vez que na mesma Seção foi determinada a razão L/D como sendo 24 : 1, uma extrusora com parafuso de 200 mm teria cerca de 5 m de comprimento. Como o intuito é um projeto em menor escala, apenas para uso laboratorial ou para pequena produção, só será incluído na análise comprimentos que não excedam 1 m, isto é, a faixa analisada será de 25 a 42 mm.

Inicialmente, comparou-se as Equações 3.5, 3.6 e 3.7, propostas por Harper [1] e o sistema de Equações 3.8, elaborado por Giles, Wagner e Mount [21]. As primeiras consideram a presença do fluxo de vazamento, enquanto as últimas apresentam uma correção com base no índice de lei de potência. Em comparação, o sistema das primeiras equações apresentou como resultado, saída líquidas 16,8% maiores em média, com uma desvio padrão de 0,2 em porcentagem, ou seja, uma dispersão pequena de resultados. Logo, na Figura 3.4 é resultado do sistema Equações 3.8, visto que os resultados são menores, então as hipóteses serão mais conservadoras, e as demais equações apresentadas e desenvolvidas nesse capítulo.

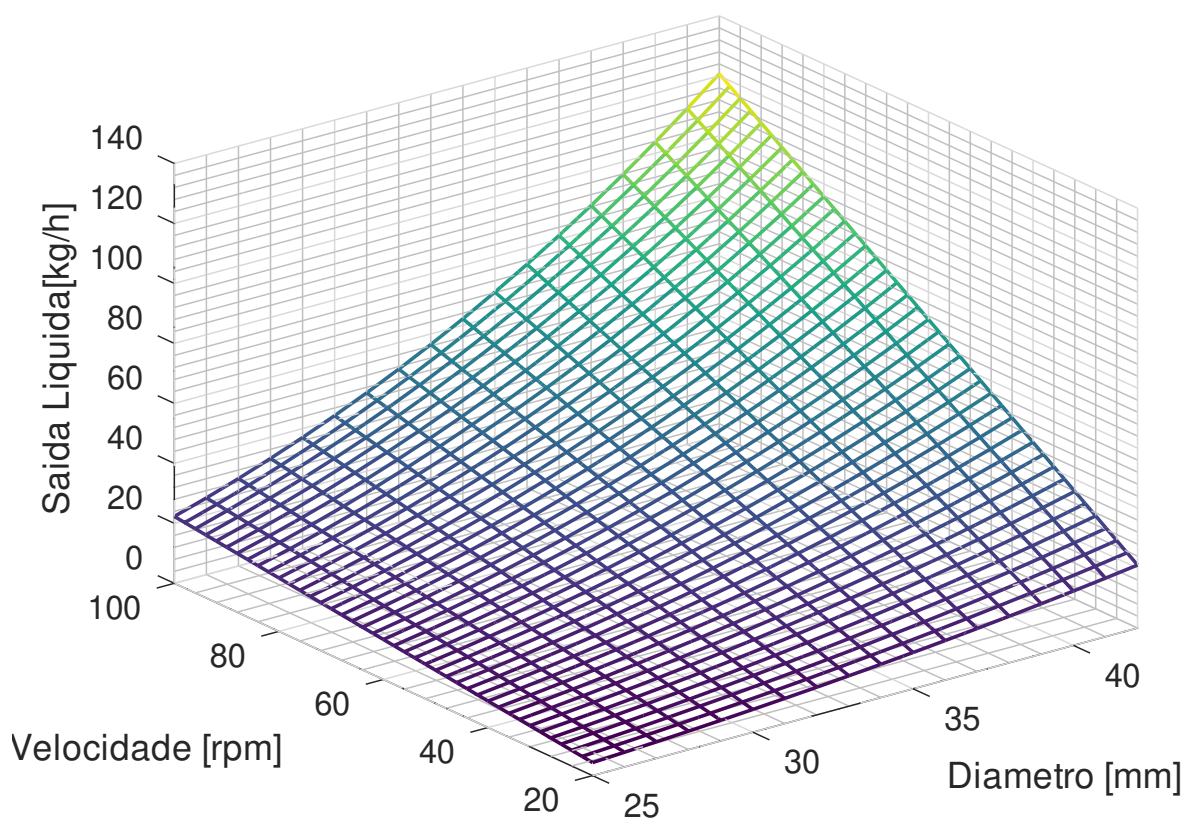


Figura 3.4: Rendimento para diferentes configurações de extrusora.

Fonte: Autor.

A partir do gráfico desenvolvido, é possível de se ter uma estimativa da saída esperada para diferentes diâmetros de extrusora. Como a velocidade é uma das poucas variáveis que são possíveis de serem alteradas com a extrusora funcionando, esta também varia dentro do intervalo estabelecido, visto que impacta diretamente no rendimento da máquina. É possível ver então, que para um diâmetro de 25 mm , o rendimento varia de $4,5\text{ kg/h}$ para uma velocidade de 20 rpm até $21,1\text{ kg/h}$ para a velocidade máxima de 100 rpm . Enquanto isso, uma extrusora com um parafuso de diâmetro de 42 mm , é teoricamente capaz de produzir de $22,3$ a $120,7\text{ kg/h}$ de filamento.

3.3 DIMENSIONAMENTO DO BARRIL

A especificação do diâmetro interno do barril, D_b , já foi demonstrado geometricamente a partir da Figura 3.1, onde percebe-se que:

$$D_b = D_s + 2 \cdot \delta \quad (3.9)$$

onde D_s é o diâmetro do parafuso e δ é a folga entre o parafuso e o barril, determinada pela Equação 3.3.

Em relação ao diâmetro externo do barril, D_e , alguns autores como Assumpção [58] e Martinez [59], sugerem que este seja equivalente a duas vezes o diâmetro da rosca. Porém, esta relação pode resultar um superdimensionamento do parafuso, principalmente para diâmetros maiores de parafuso. Por isso, o barril será analisado como um vaso de pressão, como exemplificado na Figura 3.5.

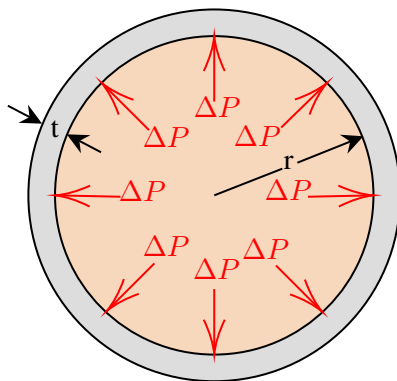


Figura 3.5: Diagrama esquemático da seção transversal de um vaso de pressão cilíndrico sujeito a uma pressão interna ΔP .

Fonte: Autor.

Segundo Giles, Wagner e Mount [21], a extrusora é um vaso de pressão. Inclusive, os autores citam que o momento mais perigoso durante a operação é a inicialização, visto que se a extremidade do molde estiver bloqueada com polímero sólido ou contaminantes, a pressão pode aumentar rapidamente e explodir o molde. Por isso deve-se iniciar a extrusora lentamente até se

ter um fluxo contínuo de filamento. De acordo com esta mesma fonte, nesta situação de extremidade bloqueada, é possível que se exceda 137,9 MPa (20.000 psi) de pressão interna.

Para um vaso de pressão cilíndrico, segundo Callister [6], a tensão circunferencial (ou de aro), σ_a , sobre a parede é função da pressão ΔP no vaso, do raio r , e da espessura da parede t , resultando na equação:

$$\sigma_a = \frac{\Delta P \cdot r}{t} \quad (3.10)$$

E, isolando a espessura t , podemos determinar a espessura mínima de parede necessária ao barril, t_{min} , para suportar uma pressão crítica $\Delta P_c = 137,9 \text{ MPa}$ para dado diâmetro interno $D_b = 2 \cdot r$ e tensão de escoamento do material $\sigma_a = \sigma_y$, multiplicado por um fator de segurança do projeto, FS isto é:

$$t_{min} = \frac{\Delta P_c \cdot D_b}{2\sigma_y} \cdot FS \quad (3.11)$$

Dessa forma, o diâmetro externo mínimo, D_{emin} , é dado geometricamente por:

$$D_{emin} = D_b + 2 \cdot t_{min} \quad (3.12)$$

Demais características do barril, como possíveis ressaltos e relevos, comprimento, furos, e outras características geométricas serão determinadas ao longo do projeto, visto que a seleção e o dimensionamento da matriz, aquecedores, sistema de resfriamento e funil necessitam ser especificados previamente, visto que estes são montados no barril ou ao redor dele.

3.4 AQUECEDORES

Antes de determinar a potência necessária para levar o polímero no estado sólido até o estado líquido, é preciso determinar a diferença de temperatura entre o polímero ao entrar na zona de alimentação e o polímero no estado fundido.

Como visto na Seção 2.4.1, os aquecedores elétricos são normalmente colocados ao longo do barril da extrusora em zonas a diferentes temperaturas. Segundo Martinez [59], na maioria dos casos, cada zona é controlada independentemente, de tal maneira que um perfil de temperatura (crescente, decrescente, ou uma combinação destes) seja mantido ao longo do barril.

Em trabalhos como os de Hartig et al. [60] e Rech et al. [61], o perfil encontrado como ótimo para o PLA é uma combinação que inicia com uma variação crescente de temperatura (Zona de alimentação à Zona 3), seguido por um decréscimo de temperatura (Zona 3 à Zona 4). A temperatura é então mantida entre as Zonas 4 e Zona do Bico. O perfil adotado será, então, o apresentado na Figura 3.6, baseado nas referências citadas e os dados de fabricantes já apresentados na Tabela 2.7.

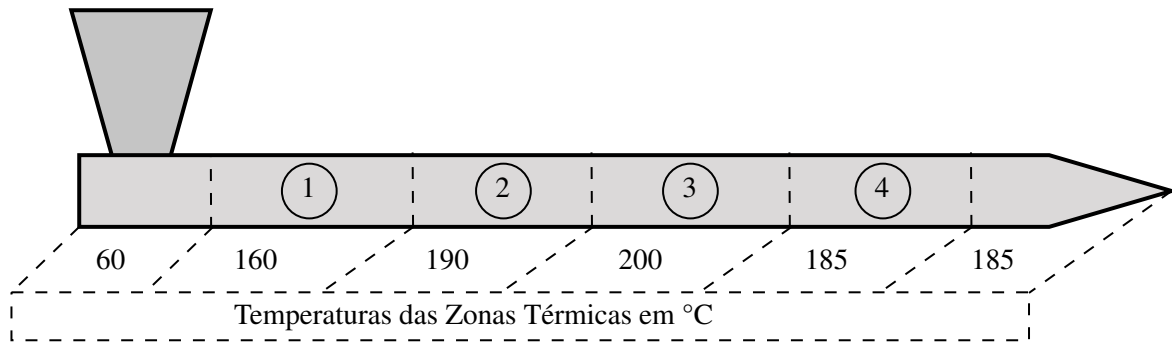


Figura 3.6: Temperaturas ao longo do barril para a extrusão do PLA

Fonte: Autor.

O perfil de temperatura crescente inicial é necessário, pois, de acordo com Giles, Wagner e Mount [21], a baixa temperatura na Zona de Alimentação e Zona 1 evita a fusão prematura e minimiza a formação de tampões ao redor da rosca ou pontes na garganta de alimentação.

A Zona 1, conforme discutido anteriormente, é uma zona de temperatura extremamente crítica para uma boa operação e alimentação. Se esta estiver muito quente, além da fusão prematura, uma fina camada de material fundido se adere a parede do cilindro, reduzindo o coeficiente de atrito entre a parede do cilindro e o polímero, possivelmente levando a um menor rendimento. Já se a Zona 1 estiver muito fria, o polímero pode não ser suficientemente pré-aquecido ao entrar na seção de transição, lembrando que o polímero atua como um acumulador de calor.

As Zonas 2 e 3 são a seção de transição, cujo objetivo é fundir toda o material nessas zonas. Conseqüentemente, a temperatura da Zona 2 é ajustada mais alta que a Zona 1, ao passo que a Zona 3 é mais alta que a Zona 2 para auxiliar o mecanismo de fusão com calor condutivo do barril.

Ao final da Zona 3, todo o polímero é teoricamente fundido e os pontos de ajuste de temperatura estão muito próximos da temperatura de fusão desejada. Assim, deve-se buscar a manutenção da temperatura do polímero na Zona 4 e na Zona do Bico, reduzindo-se a temperatura dos aquecedores. Isso facilita o posterior resfriamento do material polimérico ao deixar o bico extrusor.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

3.5.1 Motor e Redutor

Segundo Giles, Wagner e Mount[21], a potência necessária (P_s), em *watts*, para levar o polímero do estado sólido, presente na zona de alimentação, até o estado fundido à uma determinada vazão mássica (\dot{m}), em *kg/h* é dada por:

$$P_s = \frac{\dot{m}C_p\Delta T + \dot{m}\Delta H}{3,6} \quad (3.13)$$

onde:

- 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 .

Como foram calculadas a vazão mássica na Seção 3.2.2 e a variação de temperatura na Seção anterior a esta, basta obter as propriedades do polímero C_p e ΔH . Para polímeros semi-cristalinos há pouca variação do calor específico próxima à temperatura de transição vítrea e um ponto máximo distinto no ponto de fusão. Conforme as fabricantes Xometry@[62] e SD3D@[63], o calor específico do PLA é de $1,8 kJ/kg$.

Já o calor latente, este refere-se à quantidade de calor por quantidade de massa que uma substância precisa para que haja mudança de estado, e é bastante dependente da cristalinidade do polímero. No artigo de Santis e Pantani [64], o comportamento do PLA fundido foi investigado na faixa de 25 a $200^\circ C$, onde o calor latente de fusão calculado em $93 kJ/kg$.

Como levantado na Seção 3.2.2, cerca de 80 a 90% da energia total da rotação do parafuso é empregada no aquecimento do polímero, enquanto o restante é consumido, segundo Martinez [59], na pressurização do polímero, perdas para o ambiente e nas perdas mecânicas, como as perdas no sistema de transmissão e no motor. A partir disso, o autor Frankland, citado por Martinez [59], sugere que a eficiência total de uma extrusora de parafuso único é de aproximadamente 65% . Dessa forma, a potência P_m necessária pelo motor na rosca de extrusão deve ser corrigida por esse fator a partir da potência necessária para fundição do polímero, P_s . Logo,

$$P_m = \frac{P_s}{0,65} \quad (3.14)$$

Ademais, o torque T_s atuante no parafuso, em $kgf.m$, é obtido pela Equação 3.15, a partir da potência P_s , em $watts$, e a rotação da rosca ω , em radianos por segundo.

$$T_s = \frac{P_s}{9,81.\omega} \quad (3.15)$$

Normalmente, motores elétricos que trabalham com a potência exigida nesse processo, fornecem rotações elevadas. Por isso o emprego de caixas redutoras. Estes ativos industriais são empregados com o fito de fornecer um movimento rotativa com um torque elevado, reduzindo a velocidade de rotação de um acionador. Em outras palavras, faz a adequação da velocidade para a rotação necessária a partir de um fator de redução i . Assim, no caso em questão, o torque do motor T_m , é calculado a partir da Equação 3.16:

$$T_m = \frac{T_s}{0,65.i} \quad (3.16)$$

3.5.2 Rolamentos

Rolamentos são normalmente selecionados a partir da sua capacidade de carga em relação às cargas aplicadas, além dos requisitos de vida do rolamento e de confiabilidade. Determinar a direção e a dimensão das cargas é crucial na seleção do tipo de rolamento. A Figura 3.7 apresenta os esforços ao qual um rolamento está sujeito em uma rosca extrusora.

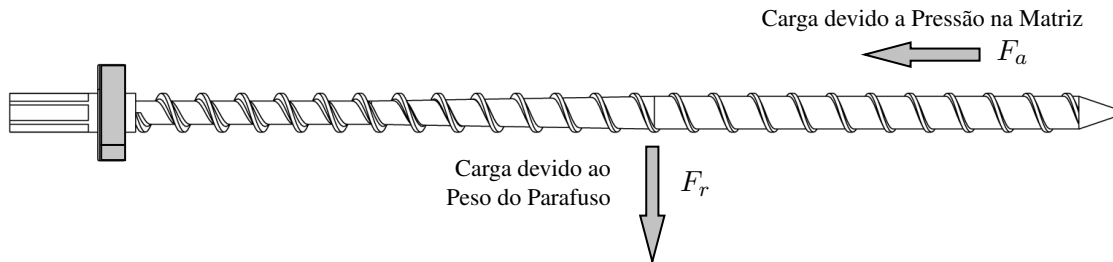


Figura 3.7: Esforços transmitidos ao rolamento.

Fonte: Autor.

Há uma carga radial F_r devido ao peso do parafuso, e uma carga axial F_a devido à pressão do fluxo de material sendo forçado contra a matriz. Logo, o rolamento está sujeito a uma combinação de cargas radial e axial. A primeira pode ser facilmente a partir da Segunda Lei de Newton caso a massa do parafuso seja conhecida. Já a carga axial, esta pode ser calculada a partir da pressão crítica do projeto. Segundo Rao e Schott, citados por Martinez [59], a pressão crítica p_{cr} pode ser estimada a partir da Equação 3.17.

$$p_{cr} = \frac{10^{-5} \cdot \pi^2 \cdot E}{64 \left(\frac{L_s}{D_s} \right)} \quad (3.17)$$

onde,

- E é o módulo de elasticidade do material, em Pa ;
- L_s é o comprimento do parafuso, em mm ;
- D_s é o diâmetro do parafuso, em mm .

Analisando então os tipos de rolamentos que suportam cargas combinadas, os rolamentos de esferas de contato angular são os que melhor se encaixam no projeto. Estes são normalmente utilizados quando existe uma elevada carga axial ($F_a \gg F_r$), cuja direção é conhecida, vista que os rolamentos de contato angular de uma carreira só admitem a carga axial em uma direção.

Se o mancal estiver em condições adequadas de uso, isto é, limpo, lubrificado e vedado apropriadamente, segundo Budynas e Nisbett [65], a fadiga do metal será a única causa de falha. A vida de fadiga de um rolamento individual é o número de revoluções do anel interno até que o primeiro sinal de fadiga do metal apareça.

Para evitar falhas por fadiga antes que a aplicação do rolamento chegue à vida útil esperada, é possível utilizar abordagens estatísticas. A vida mínima, ou vida nominal, ou vida L_{10} é a vida em fadiga que se espera que 90% de um grupo suficientemente grande de rolamentos idênticos, operando em condições iguais, possa atingir ou exceder antes que o critério de falha se desenvolva. A vida nominal básica de um rolamento de acordo com a norma ISO 281 dada por:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^a \quad (3.18)$$

onde

- C é a classificação de carga dinâmica básica, em kN , que é uma propriedade do rolamento;
- P é carga dinâmica equivalente do rolamento, em kN ;
- a é uma constante obtida experimentalmente e é igual a 3 para mancais de esfera.

A carga dinâmica equivalente do rolamento é definida, segundo a fabricante SKF [66], como uma carga hipotética, constante em magnitude e direção, atuando radialmente em rolamentos radiais e axialmente e centralmente em rolamentos axiais. Ela é calculada, para rolamentos de esferas de contato angular segundo a Equação:

$$P = 0,35.F_r + 0,57.F_a \quad (3.19)$$

Para o caso em questão, caso apenas um rolamento não seja o suficiente para suportar a carga de projeto, ou se deseja aumentar a vida do rolamento, deve-se então paréá-lo com outro rolamento em tandem. Este tipo de arranjo para rolamentos de esferas de contato angular de carreira única, apresentado na Figura 3.8, é utilizado quando a força axial F_a provém de apenas uma direção e necessita ser distribuída entre múltiplos rolamentos.

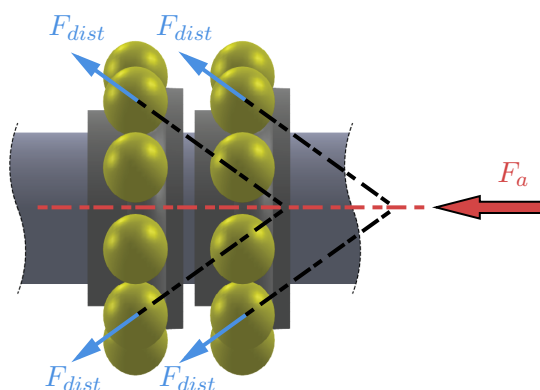


Figura 3.8: Vista lateral dos anéis interno e esferas de rolamentos de contato angular arranjados em tandem.

Fonte: Autor.

3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com o intuito de garantir a viabilidade mecânica da extrusora, a influência dos esforços gerados no processo de extrusão nos componentes que estão sujeitos a estes esforços será analisada com o recurso de Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo utilizado para tal o software comercial *SolidWorks*.

O MEF, de forma geral, subdivide o modelo CAD em pequenas partes, ou elementos, unidas entre si por nós. O conjunto de elementos unidos pelos nós constitui uma malha, que está relacionada à precisão dos resultados obtidos. Dessa forma, o software calcula a deformação em cada nó, subdividindo, assim, uma análise complexa numa série de pequenas análises o que aumenta a eficácia computacional e precisão na geração de resultados.

No capítulo seguinte serão detalhados alguns dados das malhas, como a proporção dos elementos, para se ter uma noção da uniformidade das malhas. Estas, por sua vez, são todas geradas baseadas em sua curvatura e com elementos triangulares. Por ser triangular, adequa-se mais fácil a qualquer superfície, quando comparado a um quadrático.

Em uma fase inicial da análise numérica, é preciso definir o material dos elementos analisados. Para simular o polímero, em alguns momentos este será simulado como um elemento em estado fluido, isto é, com suas características após ultrapassada a temperatura de fusão, T_m , e em outros momentos será avaliado o material em função da variação de suas propriedades, como densidade, calor específico e condutividade térmica, usando o modelo viscoso Cross-WLF para simular as condições reológicas do PLA.

Em seguida, deve-se determinar as condições de fronteira. Para isso, será explorado o máximo de recursos do SolidWorks®. Os rolamentos, serão definidos com o recurso próprio para estes, que é projetada para simular as condições de interface entre o eixo e o rolamento. Os parafusos, serão simulados com o recurso próprio destes, que considera o material de que são fabricados, torque de aperto e dimensões da rosca. E a variação de temperatura estará inclusa em todas as simulações, inclusive na de esforços, visto que faz parte do processo em si o gradiente desenvolvido.

Definidas as fixações, é necessário aplicar as cargas, como o binário transmitido pelo motor, a pressão desenvolvida na matriz, e o peso de outros componentes não inclusos na simulação. E, por fim, analisar e interpretar os resultados.

4 RESULTADOS

Resumo

O objetivo desse capítulo é apresentar os resultados obtidos a partir dos cálculos e escolhas realizadas nos capítulos anteriores. Serão apresentadas as dimensões que caracterizarão a extrusora e a escolha de materiais e respectivos tratamentos. Também são detalhados os resultados das simulações numéricas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ROSCA

A partir algoritmo utilizado, desenvolvido a partir das equações apresentadas no capítulo 3 e disponível no Anexo I.1, é possível determinar as variáveis geométricas da rosca extrusora.

Como o gráfico da Figura 3.4 mostra, uma extrusora projetada para trabalhar com PLA, com uma razão $L/D = 24$ e diâmetro de 25 mm , já é capaz de se obter, teoricamente, um rendimento de $5,4$ a $28,2\text{ kg/h}$ de filamento, a depender da velocidade. Essa faixa já é tida como muito interessante para uma produção em baixa escala ou até laboratorial, visto que filamentos para impressora 3D são comercializados em rolos que variam, normalmente, de 250 g a 1 kg de material. Por isso, esse é o diâmetro a ser utilizado para a rosca do projeto, e as respectivas medidas que caracterizam-na estão apresentadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Dimensões da rosca extrusora.

Característica	Medida
Diâmetro da Rosca (D_s)	25 mm
Razão L/D	24
Razão de Compressão (RC)	2,5
Ângulo de Hélice (Φ)	$17,7^\circ$
Comprimento de Rosca (L)	600 mm
Zona de Alimentação (L_a)	150 mm
Zona de Compressão (L_c)	180 mm
Zona de Medição (L_m)	270 mm
Passo (t)	25 mm
Espessura do Filete (e)	2,5 mm
Folga Parafuso-Barril (δ)	0,04 mm
Profundidade Alimentação (h_i)	5 mm
Profundidade Medição (h_f)	2 mm
Largura do Canal (W)	21,3 mm
Rendimento Mínimo Esperado (W)	$4,5 \pm 1,4\text{ kg/h}$
Rendimento Máximo Esperado (W)	$21,1 \pm 6,3\text{ kg/h}$

Fonte: Autor.

Em relação ao material, vai ser considerado o uso do Aço AISI 4140, isto é, um aço-liga ligado ao cromo e molibdênio com aproximadamente 40% de carbono. A adição de cromo e molibdênio melhoram a capacidade dessa liga de ser tratada termicamente (têmpera e revenido) e possibilitam maior resistência mecânica, resistência a fadiga, impacto e abrasão. A resistência à corrosão também pode ser melhorada pela adição do molibdênio.

Além disso, é sugerido que o parafuso seja submetido a nitretação gasosa com profundidade de $0,7\text{ mm}$, uma vez que é benéfico para o uso normal e acima do normal, conforme a Tabela 2.9. Este é um processo termoquímico em que o nitrogênio ou o carbono é difundido através da superfície do material, produzindo um significativo aumento nas propriedades mecânicas da superfície da peça, como a dureza, a resistência ao desgaste, a resistência à fadiga e a resistência à corrosão.

Também, é sugerido a aplicação de uma liga de carbeto de tungstênio na crista do filete da rosca para suportar a abrasão severa, uma vez que este revestimento apresenta elevada resistência ao desgaste por abrasão e por erosão até 400°C .

Por fim, a Figura 4.1 apresenta uma renderização da modelagem prévia da rosca, além de trazer o comprimento de cada zona térmica do parafuso.

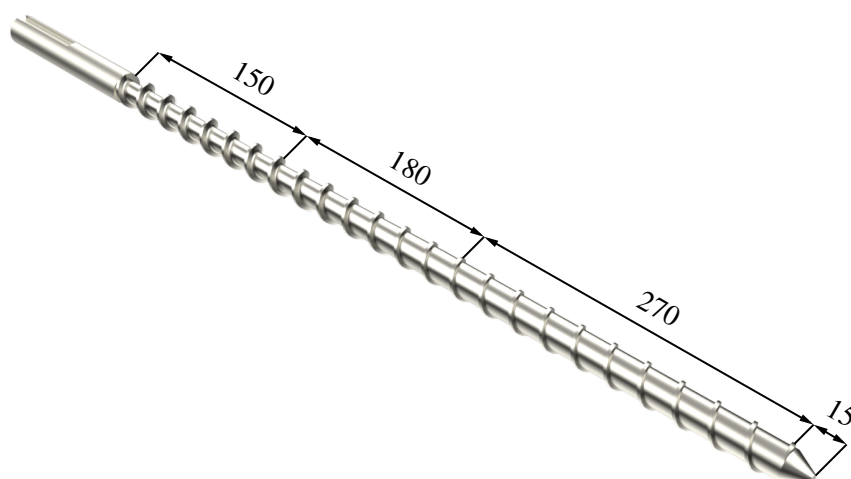


Figura 4.1: Dimensões em milímetros das zonas térmicas.

Fonte: Autor.

4.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

4.2.1 Seleção do Motor e Redutor

Como visto na Seção 3.5.1, a seleção do motor partirá do cálculo da potência e torque exigidos para funcionamento da extrusora e consequente aquecimento do polímero. Conforme as equações 3.13 e 3.15, a potência e o torque dependem do fluxo de massa que, segundo a Tabela 4.1, varia

de 4,5 a 21,1 kg/h ; e da velocidade angular. Assim, a potência máxima necessária é aquela correspondente ao fluxo máximo, enquanto o torque, no caso em questão, é máximo para a menor velocidade angular, 20 rpm . Considerando uma variação de temperatura de 60 a 185°C, temos:

$$\begin{cases} P_{sMAX} = \frac{21,1 \cdot 1,8 \cdot (185-60) + 21,1 \cdot 93}{3,6} \implies P_s = 1863,8 \text{ W} \\ T_{sMAX} = \frac{4,5 \cdot 1,8 \cdot (185-60) + 4,5 \cdot 93}{3,6} \cdot \frac{60}{9,81 \cdot (20 \cdot 2 \cdot \pi)} \implies T_{sMAX} = 19,3 \text{ kgf.m} \end{cases} \quad (4.1)$$

Diante do exposto, foi elaborada uma rotina no GNU/Octave, versão 5.20, apresentada no Anexo I.2, que resulta graficamente o comportamento do torque e potência exigidos pelo motor para a faixa de velocidade escolhida a partir das equações 3.14 e 3.16. Na Figura 4.2 é apresentado o gráfico resultante, onde a curva em laranja representa a variação de potência, em *cavalo-vapor*, enquanto a curva em azul apresenta o torque requerido, em $kgf.m$, considerando uma redução de 1 : 15.

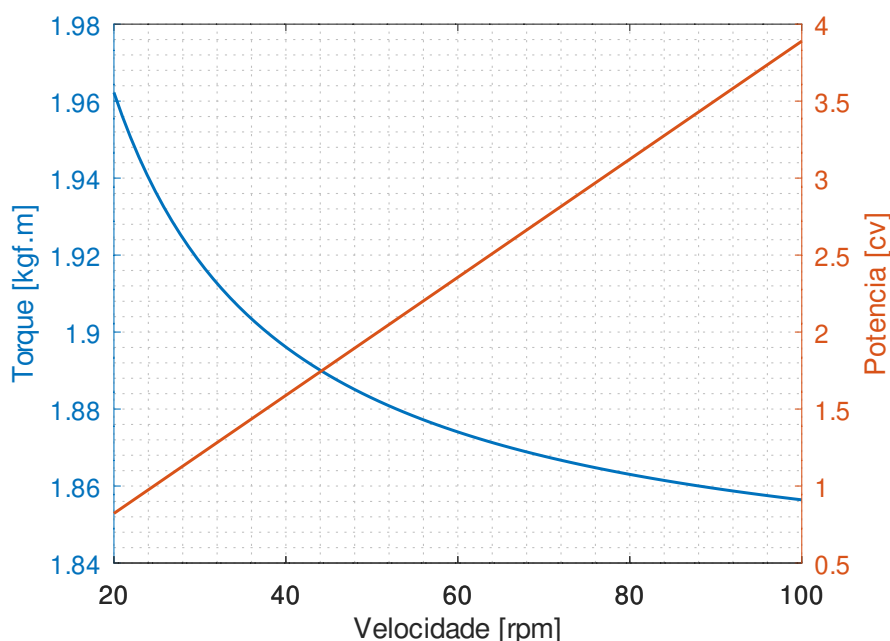


Figura 4.2: Variação de potência e torque para uma faixa de velocidade.

Fonte: Autor.

A rotina também fornece a potência e torque máximos: $P_m = 3,89 \text{ cv}$ e $T_m = 1,65 \text{ kgf.m}$ respectivamente. Estes são os parâmetros de entrada para escolha do motor, visto que este deve apresentar uma potência superior a calculada e deve suportar um torque máximo superior ao torque máximo exigido ao motor.

A seleção de motor partirá da escolha de um motor elétrico trifásico, pois possuem uma construção relativamente simples e custos reduzidos, como os referentes à manutenção, fabricação e montagem, além da fácil adaptação às cargas de diferentes tipos. Por ser trifásico, possui como vantagem o menor uso de material para entregar a mesma potência de um monofásico.

O torque máximo suportado por um motor elétrico é obtido multiplicando-se o conjugado

nominal pelo fator de serviço. A norma NBR 17094-1 [67] define o fator de serviço como sendo o fator que indica a carga que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições usuais de serviço. Assim, é possível selecionar um motor que irá fornecer o torque necessário para a extrusora.

A partir do catálogo da fabricante brasileira WEG [68], foi selecionado um motor elétrico com 4cv e com 4 polos da linha W22. As especificações do motor estão apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.2: Dados técnicos do motor W22 IR3 Premium.

Característica	Dimensão
Potência	4 cv (3) kW
Número de Polos	4
Rotação Nominal	1745 rpm
Conjugado Nominal	1,67 kgf.m
Conjugado de Partida	6,68 kgf.m
Fator de Serviço	1,25
Torque Máximo	2,09 kgf.m
Corrente	220/380/440 V

Fonte: Catálogo da fabricante WEG [68]

Para completar o conjunto motorreductor, foi escolhido uma redução de 1:15, como já mencionado. A utilização de um redutor visa fornecer o torque elevado exigido pelo parafuso, e reduzir a velocidade de saída proveniente do motor, além de contribuir para diminuição do nível de ruído e de vibração.

Na Figura 4.3 está representando o conjunto motorreductor, comercializado pela Redutores Lilo [69] com redutor modelo *Magma Weg Cestari N0*. O eixo de rotação reduzida é de 40 mm.

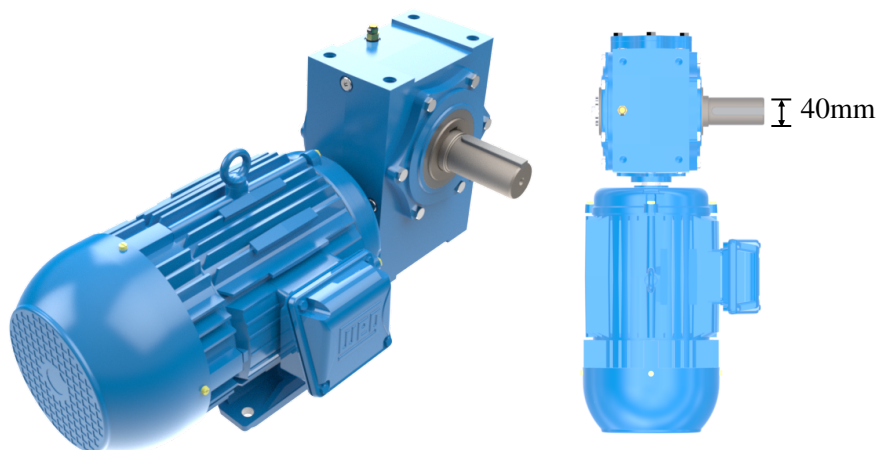


Figura 4.3: Motorreductor com motor de 4cv 117rpm Magma Weg Cestari Trifásico N0.

Fonte: Baseado nos CADs disponibilizados pelos fornecedores.

4.2.2 Seleção de Acoplamento

Tendo em vista que o motor selecionado na Figura 4.3 possui um eixo de rotação reduzida de 40 mm, e que o parafuso dimensionado, segundo a Tabela 4.1 apresenta um diâmetro externo de 25 mm, há a necessidade de uma solução de acoplamento para transmissão do torque.

Os acoplamentos flexíveis analisados são compostos por um elemento elástico (de poliuretano, nitrila ou borracha sintética) alojado entre dois cubos simétricos de ferro fundido cinzento.

Além da possibilidade de acoplar os eixos de diâmetros diferentes, o acoplamento flexível também apresenta o benefício de absorver desalinhamentos e choques mecânicos, o que será crucial para a solução geométrica e de fixação desenvolvida na Seção 4.3 para o barril. Ademais, os acoplamentos flexíveis também reduzem pequenas vibrações e ruídos.

Dentre o disponível no catálogo da Transmitech [70], os acoplamentos do tipo *cruzeta dupla* apresentaram a melhor razão custo-benefício ao comparar o torque nominal suportado em relação ao preço na data presente da pesquisa, que será apresentado à frente na Seção 4.7. A Figura 4.4 apresenta a montagem do motorreductor montado a um acoplamento elástico.

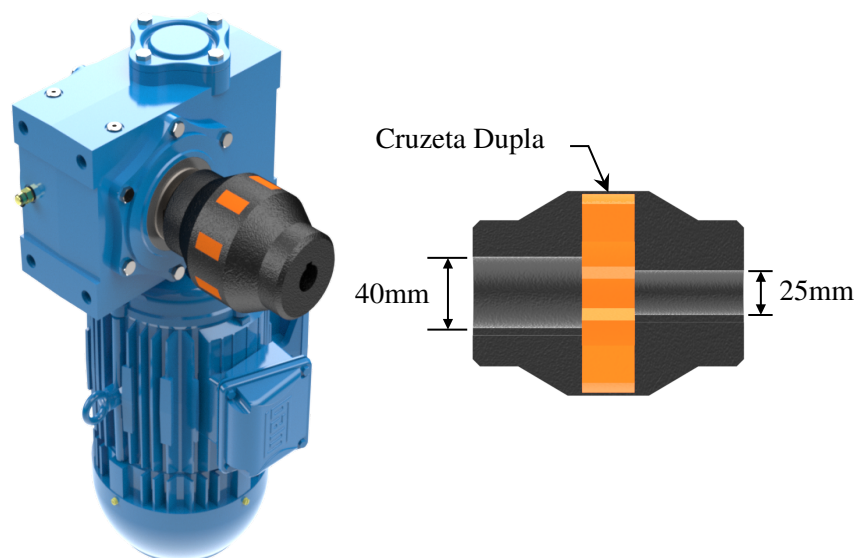


Figura 4.4: Motorreductor com acoplamento do tipo Cruzeta Dupla

Fonte: Baseado nos CADs disponibilizados pelos fornecedores.

As informações técnicas do modelo MN 06 estão dispostas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características técnicas do Acoplamento de Cruzeta Duplo.

ϕ_{\max}	Torque Nominal	Desalinhamento		
		Axial	Radial	Angular
50 mm	25,2 kgf.m	1,0 mm	0,5 mm	1,2°

Dados: Transmitech [70].

4.2.3 Seleção de Rolamentos

Para determinar a carga radial F_r da Equação 3.19, é necessário determinar a massa do parafuso. Utilizando o software *SolidWorks*, versão 2020, é possível determinar a massa a partir da geometria e das propriedades do material (AISI 4140). Assim, a massa do parafuso descrito na Tabela 4.1 é de aproximadamente 2 kg . Assim,

$$F_r = m \cdot g \implies F_r = 2 \cdot 9,8 \implies F_r = 0,017 \text{ kN} \quad (4.2)$$

Adicionalmente, para encontrar a carga axial F_a , deve-se determinar a pressão crítica p_{cr} descrita na Equação 3.17. Os parâmetros geométricos são apresentados na Tabela 4.1. Sendo assim, como o módulo de elasticidade dos aços é de, aproximadamente, 210 GPa , tem-se:

$$p_{cr} = \frac{10^{-5} \pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9}{64 \frac{600}{25}} \implies p_{cr} = 562,2 \text{ bar} \quad (4.3)$$

A magnitude da carga axial atuante sobre o parafuso é estimada a partir da pressão crítica de projeto e da seção transversal da peça:

$$F_a = p_{cr} \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \implies F_a = 562,2 \frac{\pi \cdot 25^2}{4} \implies F_a = 27,6 \text{ kN} \quad (4.4)$$

Assim, segundo a Equação 3.19, para rolamentos de esferas de contato angular segundo, a carga dinâmica equivalente P , é:

$$P = 0,35 \cdot 0,017 + 0,57 \cdot 27,6 \implies P = 15,7 \text{ kN} \quad (4.5)$$

Dessa forma, dentre os rolamentos de esferas de contato angular disponíveis no catálogo da SKF [66] para eixos de 25 mm , o modelo 7305 BECBM é o que melhor atende as especificações de projeto, possuindo uma carga dinâmica básica C de $26,5 \text{ kN}$. A vida nominal básica do rolamento L_{10} é calculada a partir da Equação 3.18, resultando em:

$$L_{10} = \left(\frac{26,5}{15,7} \right)^3 \implies L_{10} = 4,8 \text{ milhões de rotações} \quad (4.6)$$

Porém, foi julgado que tal número de revoluções não forneceria uma vida útil adequada ao rolamento e, por isso, optou-se por utilizar dois rolamentos arranjadas em tandem, o que distribui os esforços entre os rolamentos. Dessa forma, ter-se-ia:

$$L_{10} = \left(\frac{26,5}{7,9} \right)^3 \implies L_{10} = 38,2 \text{ milhões de rotações} \quad (4.7)$$

Assim, a Figura 4.5 apresenta a configuração de montagem da rosca e sistema de acionamento.

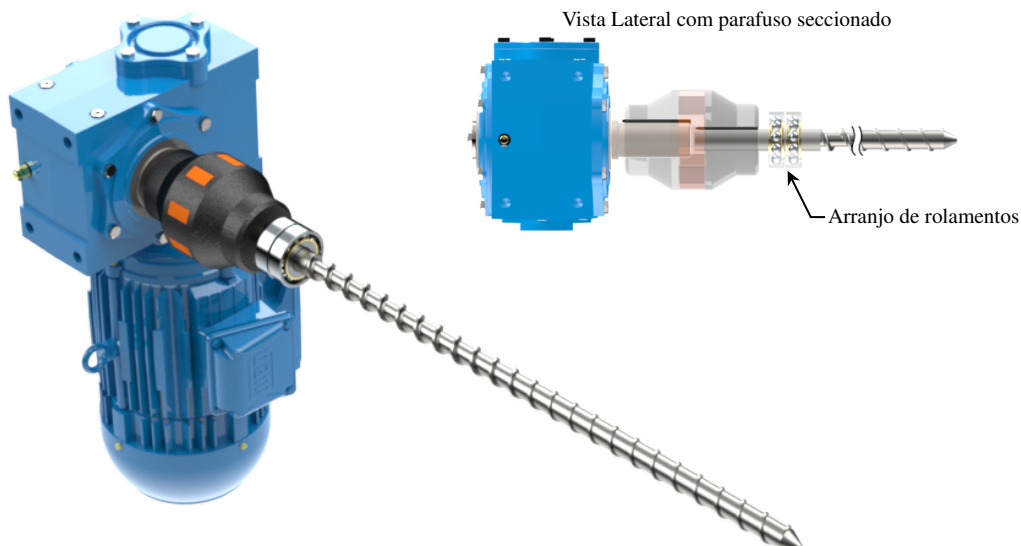


Figura 4.5: Montagem do Sistema de Acionamento e Rosca.

Fonte: Autor.

O memorial de cálculo para seleção dos rolamentos está apresentado no Apêndice I.3 por meio de uma rotina no GNU/Octave, versão 5.20.

4.2.4 Análise dos Esforços Transmitidos à Rosca

Em um processo de extrusão, os cenários mais desfavoráveis estão associados a pressões elevadas geradas pelas propriedades do polímero, pela velocidade angular da rosca ou, ainda, por um eventual bloqueio no escoamento ou do parafuso.

Para uma simulação mais realista, é ideal incluir a variação de temperatura ao longo do parafuso, visto que situações de alta pressão devido ao entupimento ocorrem em situações de funcionamento da extrusora. A Figura 4.6 apresenta o gradiente de temperatura que será importado para as simulações subseqüentes.

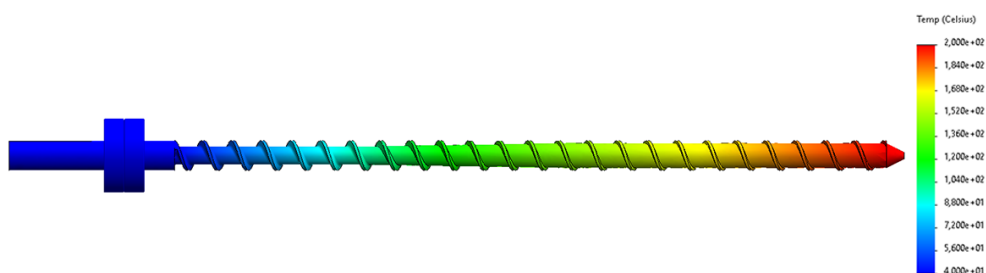


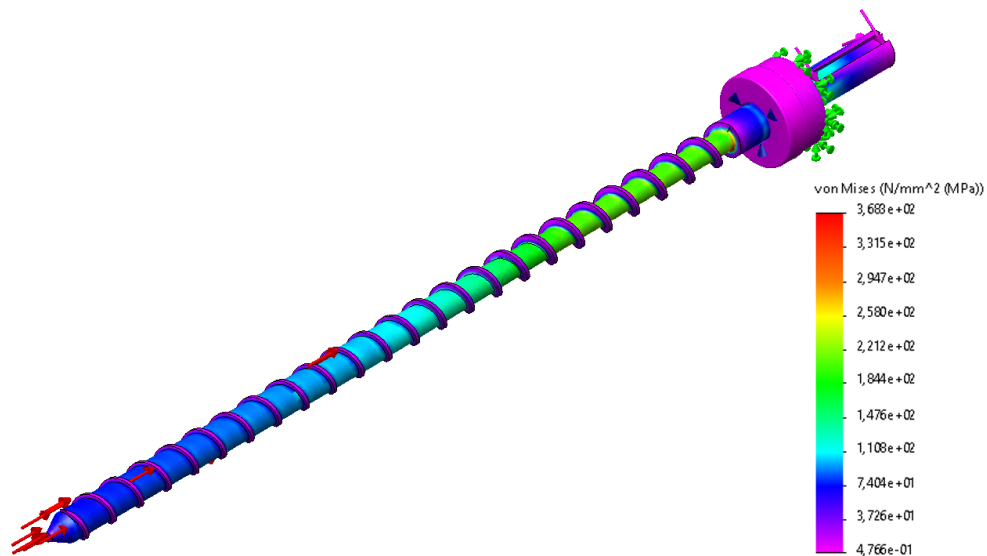
Figura 4.6: Gradiente de temperatura ao longo da rosca.

Fonte: Autor.

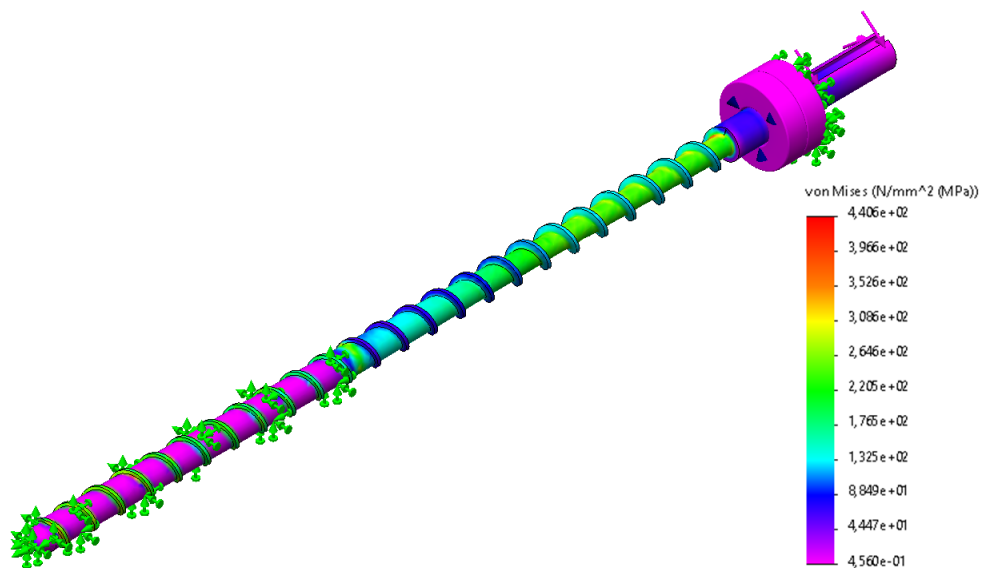
A malha utilizada nessa simulação térmica, e que foi importada para o uso na simulação estática seguinte, foi pré configurada para variar o tamanho dos elementos triangulares entre 4 e

0,1 mm. Como resultado, a porcentagem de elementos com proporção menor que 3 foi de 98,4% e a de elementos com proporção maior que 10 foi de apenas 0,03%.

Tendo estabelecido os esforços que são transmitidos à rosca, isto é, a pressão devido a matriz (que é crítica, p_{cr} , caso haja entupimento) e o torque vindo do motor, e também definido os pontos de apoio, que são os dois rolamentos, que por sua vez serão apoiados ao barril, tem-se o necessário para realizar uma simulação para determinar se a rosca dimensionada atende as condições críticas. As Figuras 4.7a e 4.7b apresentam duas situações tidas como mais críticas ao projeto: travamento do parafuso devido ao resfriamento de material e aumento crítico de pressão devido ao entupimento da matriz.



(a)



(b)

Figura 4.7: Simulação das condições críticas da Rosca: (a) entupimento da matriz (b) travamento do parafuso

Fonte: Autor.

Ao analisar o campo das tensões resultantes é perceptível que é na zona de alimentação do fuso onde estão concentradas as tensões mais elevadas. Este resultado era expectável pois os esforços resultantes do processo de extrusão são majoritariamente de torção. Logo, a zona de menor seção transversal é a mais afetada. Em relação aos valores, a condição da Figura 4.7b foi a mais crítica, resultando na tensão máxima de $440,6 \text{ MPa}$. Porém, tal valor não tem qualquer repercussão negativa na rosca, uma vez que a tensão de cedência do material a constitui, o aço AISI 4140 nitratado, é de cerca de 680 MPa garantindo-se, assim, a não ocorrência de deformação plástica e um fator de segurança de 1,55.

Vale ressaltar que este estudo não inclui todos os esforços originados no processo, como o efeito da viscosidade do material ao longo da rosca, em virtude da sua difícil quantificação. Porém, esses valores só afetaria a situação descrita na Figura 4.7a, visto o movimento rotacional do parafuso continua nesta situação. Assim, pode-se afirmar com relativa segurança que tais esforços não comprometerão a resistência mecânica, dado que o valor resultante deve ser ínfimo perto do calculado e que resultou em uma tensão 1,84 vezes inferior à tensão de cedência do material o que garante uma boa margem de segurança.

Ademais, é importante lembrar que os valores da pressão resultantes do processo podem atingir valores mais elevados aos aqui calculados, bastando para isso extrudir um material com viscosidade superior ou a uma velocidade angular superior às consideradas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BARRIL E FUNIL

A partir do desenvolvido na Seção 3.3, pode-se determinar as dimensões mínimas do barril, apresentadas são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dimensões prévias do Barril.

Característica	Medida
Diâmetro Interno (D_{b_i})	25,08 mm
Diâmetro Externo Mínimo ($D_{e_{min}}$)	41,88 mm
Espessura Mínima (t_{min})	8,36 mm

Fonte: Autor.

Em relação ao material, baseado no exposto na Tabela 2.10, o barril apresentará a mesma configuração do parafuso: aço-liga AISI 4140 nitretado a uma profundidade de $0,7 \text{ mm}$, visto que a nitretação é classificada como excelente para trabalho com poliésteres.

Com o intuito de facilitar a montagem e fabricação das peças, decidiu-se dividir o barril em três partes, que são nomeadas baseadas em sua função:

- **Barril do Rolamento (BR):** função de alojar os rolamentos e servir como ponto de sustentação do conjunto na mesa.

- **Barril do Funil (BF)**: função de fixação do funil e serve como acoplamento do Barril do Rolamento ao Barril da Matriz.
- **Barril da Matriz (BM)**: é onde as resistências estão distribuídas e, em sua extremidade, a matriz é fixada.

A Figura 4.8 apresenta a divisão do barril em uma vista explodida, destacando os principais componentes metálicos.

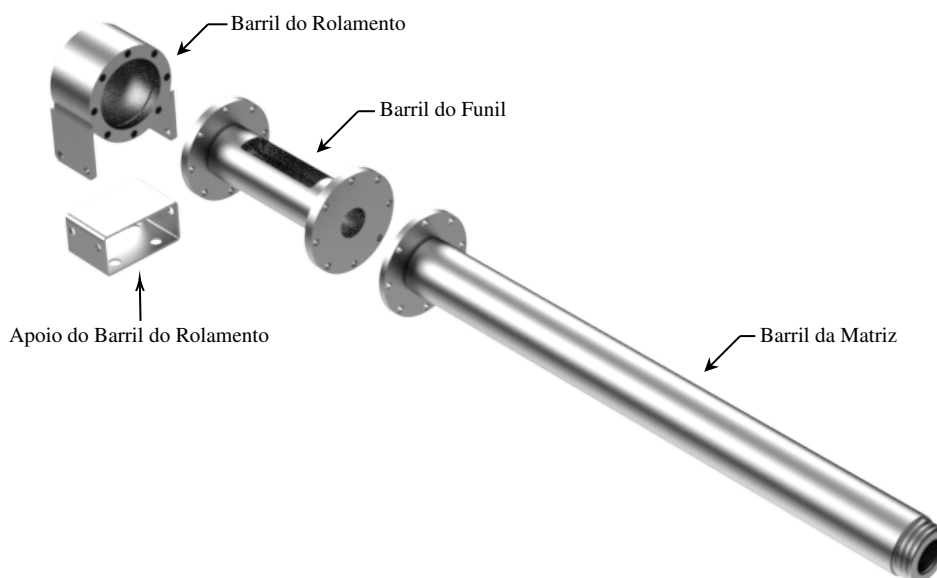


Figura 4.8: Vista explodida das partes do barril.

Fonte: Autor.

A ideia de dividir o barril é, principalmente, facilitar a desmontagem. O *BF* irá envolver parte da região de alimentação da rosca, isto é, a região em que o material ainda se encontra no estado sólido, enquanto o *BM* irá envolver o restante do parafuso, onde corre material fundido. Separando-os dessa forma, facilita a remoção do barril ao diminuir o comprimento (e, conseqüentemente o peso) deste que pode estar com movimento limitado devido aos resquícios de polímero solidificados.

Já a existência de um *BR* se justifica por sua função de mancal do conjunto de rolamentos e também por ser o ponto de apoio do barril à mesa. Como o sistema de acionamento conta com um acoplamento que distancia o parafuso do bloco do redutor, impossibilitando a fixação do barril em sua carcaça, há a necessidade da fixação radial da extrusora para evitar o balanço do acoplamento elástico. Dessa forma, o *BR* deve ser montado previamente para garantir o alinhamento deste em relação ao acoplamento/redutor e, em seguida, o parafuso é inserido, passando pelos rolamentos e sendo acoplado ao eixo do redutor. A Figura 4.9 demonstra a montagem dos rolamentos internos ao *BR*.

Ademais, dessa forma, o barril e a rosca são fixados em relação a um mesmo elemento, o *BR*, o que favorece a concentricidade que um deve ter em relação ao outro.

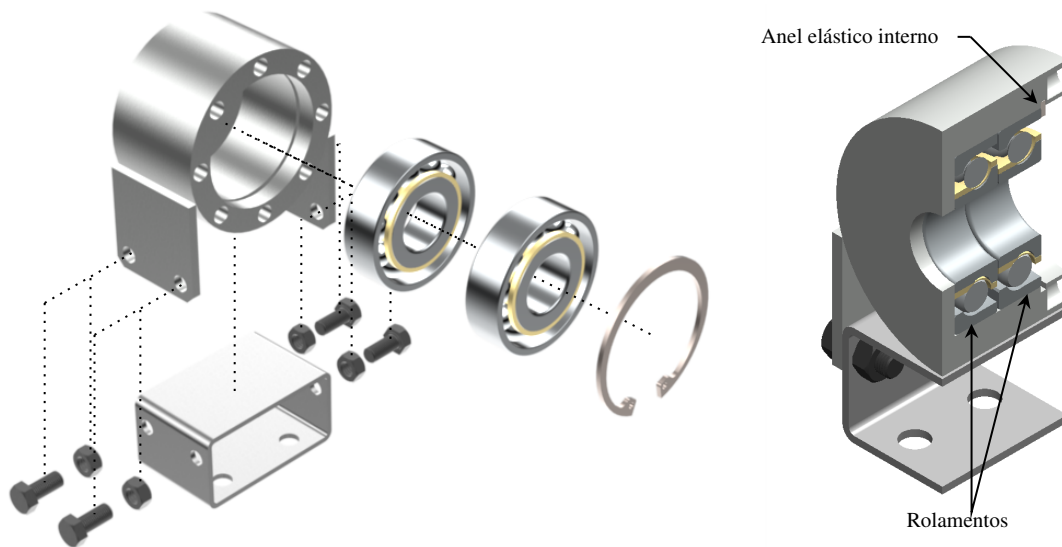


Figura 4.9: Vista explodida da montagem do barril do rolamento.

Fonte: Autor.

O *BF* possui uma abertura retangular de 25,2 por 85 *mm*, dimensão da garganta de alimentação. O funil foi projetado para ser fabricado a partir da soldagem de quatro chapas #18 (1,2 *mm*) cortadas em formato trapezoidal, o que garante um volume interno de 8,9 *L*, soldadas em uma chapa de mesma espessura curvada e a mesma abertura retangular do *BF*. Para fixação do funil ao *BF*, serão utilizadas abraçadeiras metálicas e uma chapa de apoio curvada (similar a que foi soldada ao funil), para garantir a uniformidade da área de contato com a abraçadeira. A Figura 4.10 demonstra a montagem do funil.

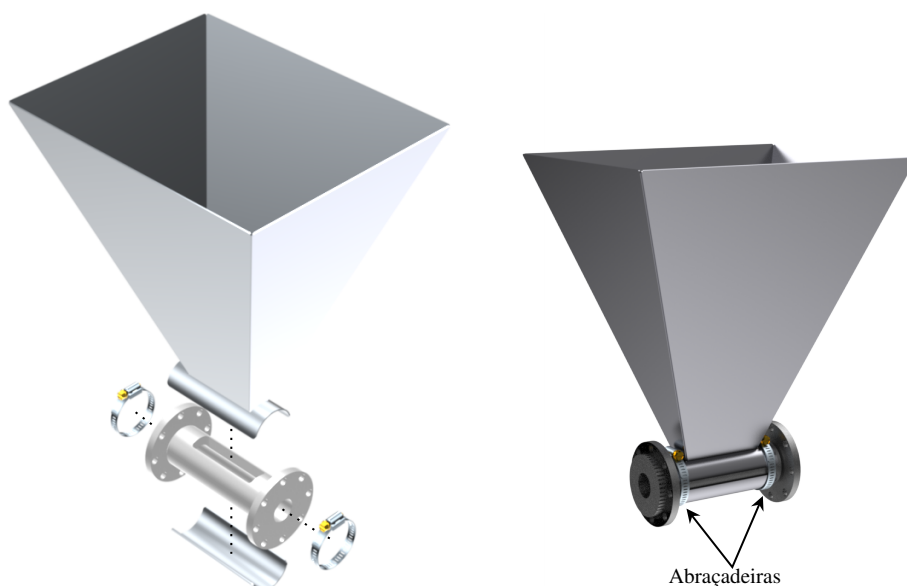


Figura 4.10: Vista explodida da montagem do barril do funil.

Fonte: Autor.

4.3.1 Revestimento Térmico do Barril

Conforme apresentado na Seção 2.4.2, é ideal haver uma barreira isolante entre o funil e o barril para evitar o derretimento prévio de material. Com esse objetivo, avaliou-se a possibilidade de utilização de uma folha de fibra cerâmica na interface entre o funil e o *BF*. A Figura 4.11 apresenta a utilização do papel de fibra cerâmica no revestimento do Barril do Funil.

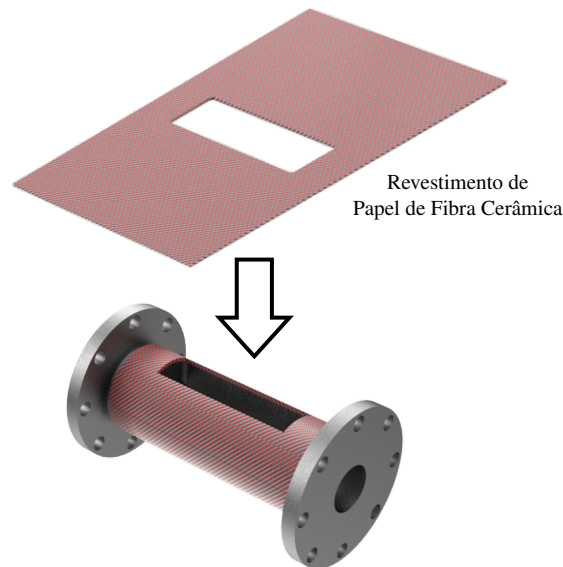


Figura 4.11: Barril do Funil revestido com Papel de Fibra Cerâmica

Fonte: Autor.

O papel cerâmico é composto a partir de fibras cerâmicas de alta pureza e pequena quantidade de ligantes orgânicos, segundo a fabricante Fibertex [71]. As principais vantagens são a baixa condutividade térmica e a facilidade de corte e enrolamento, proporcionando alta eficiência no isolamento térmico.

A folha de papel de cerâmica foi simulada com as propriedades correspondentes a uma composição química de 47,0% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 52,8% de dióxido de silício (SiO_2). Esta razão de proporção resulta em uma condutividade térmica de $0,060 W/m.K$ até $260^\circ C$.

Para determinar a eficiência dessa aplicação, foi feito um estudo comparativo a partir da simulação térmica transiente de uma montagem com o revestimento térmico e outra sem. Foi utilizado o software comercial *SolidWorks*, versão 2020. A análise térmica transiente se concentra no estado térmico do corpo em diferentes instâncias no tempo, o que é mais adequado para simular a condição real de projeto, visto que o aquecimento ao longo do barril será feito a partir da potência térmica fornecida pela resistência coleira de mica, enquanto o controle de temperatura é feito por termopares inseridos ao longo do barril.

Para simplificar a simulação, optou-se por simular apenas uma parte do Barril da Matriz, visto que a primeira resistência térmica é a que mais influência a condução de calor até o funil devido a proximidade. A Figura 4.12 apresenta a malha utilizada no estudo.

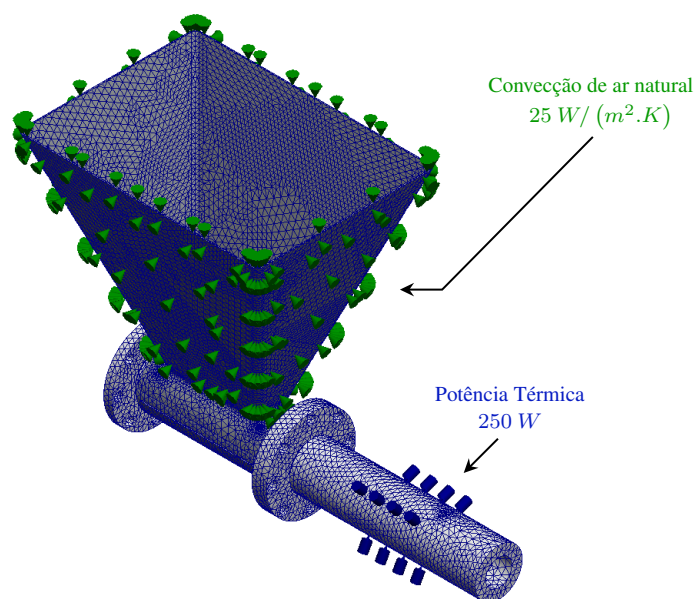


Figura 4.12: Malha utilizada no estudo da eficiência do isolamento térmico

Fonte: Autor.

A Tabela 4.5 apresenta os dados da malha e os dados de entrada para a análise térmica, que foram similares para a simulação com o revestimento de papel de fibra cerâmica e a simulação sem revestimento.

Tabela 4.5: Características da malha e dados de entrada para simulação da efetividade do revestimento térmico.

Característica	Valor
Temperatura inicial	27° C
Potência térmica	250 W
Convecção	25 W/(m ² .K)
Condutividade do revestimento	0,06 W/(m.K)
Tipo de elemento	Triangular
Tamanho máximo do elemento	5 mm
Tamanho mínimo do elemento	0,2 mm
Proporção máxima	13,904
Porcentagem de elementos com proporção < 3	63
Porcentagem de elementos com proporção > 10	0,01

Fonte: Autor.

Vale ressaltar que, como se trata de um estudo transiente e não em estado estável, a potência térmica que é fornecida pela resistência deve ser controlada. Utilizando o recurso de termopares do *SolidWorks*, um termopar foi colocado para medir a temperatura há 8 mm de profundidade e que devia desligar e religar a resistência para manter a temperatura ao redor dos 160° C expostos mostrados na Figura 3.6. Através da Figura 4.13 é possível observar o comportamento térmico nas situações sem revestimento (4.13a) e com revestimento (4.13b) no determinado momento.

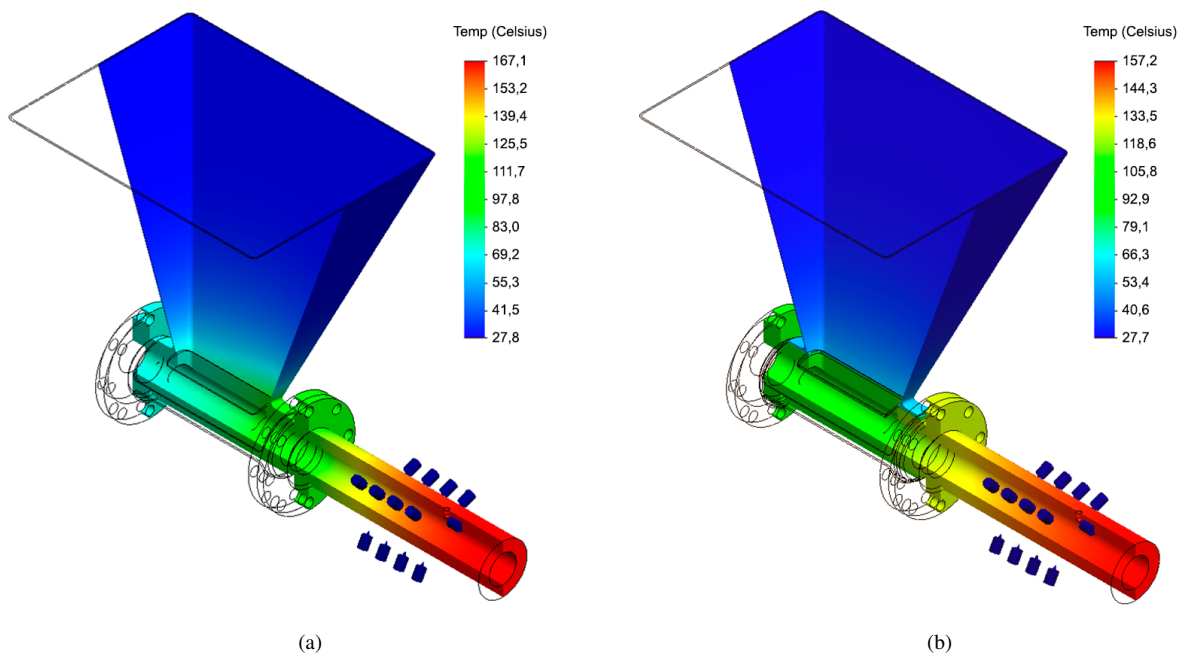


Figura 4.13: Simulação Térmica de uma seção de barril: (a) sem revestimento (b) com revestimento de papel de fibra cerâmica.

Fonte: Autor.

Apesar de ser visualmente possível ver a eficácia do isolamento do papel de fibra cerâmica na redução da transferência de calor do barril ao funil, ainda é necessário computar a temperatura máxima que o barril atinge para saber se haverá ou não derretimento do polímero, que ocorre quando este atinge a Temperatura de Transição Vítreia (T_g) que, segundo as Tabelas 2.6 e 2.7 e a Figura 2.10, inicia a partir dos $60^\circ C$.

A Figura 4.14 apresenta a evolução no tempo do aquecimento do barril medido em três regiões: no ponto de medida do termopar e em um mesmo ponto interno do funil próximo à garganta na situação revestida e não revestida.

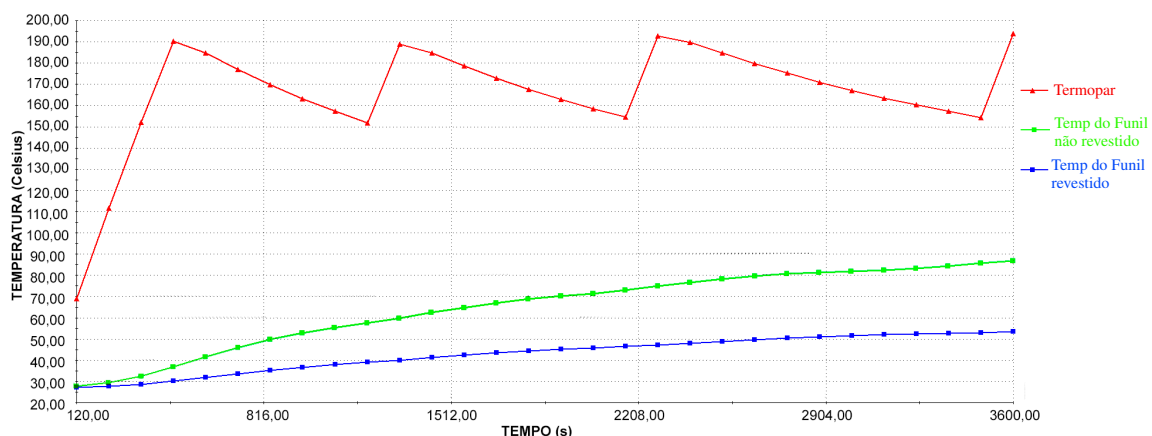


Figura 4.14: Resultado da temperatura medida no termopar e na parte mais interna do funil não revestido e revestido.

Fonte: Autor.

Conforme observado, enquanto a temperatura do funil ultrapassa os $60^{\circ}C$ em menos de 25 minutos na situação sem revestimento, a temperatura em um mesmo ponto no funil com o *BF* revestido não chega a este valor tendo decorridos 60 minutos, além de tender a uma estabilização abaixo dos $60^{\circ}C$.

4.3.2 Fixação do Barril e Análise de Esforços

Com o objetivo de padronizar as formas de fixação para as etapas de montagem, foi avaliado a possibilidade de fixação entre as partes do barril será por meio de parafusos **M8x1,25**, classe **12,9**, com torque de aperto de $42,4 N.m$. A fixação do *BR* ao Apoio do *BR*, que é realizada na etapa de alinhamento do eixo ao acoplador, é feita por meio de parafusos **M10x1,25**, classe **12,9**, com torque de aperto de $84,9 N.m$, segundo a Norma ISO 898-1 [72].

Para validação tanto da resistência das partes do barril, quanto dos parafusos, foi realizada uma simulação estática para a condição mais crítica, que é a descrita na Seção 4.2.3 para o caso de entupimento do bico resultando no aumento da pressão interna até a pressão crítica p_{cr} . A pressão na ponta do parafuso na carga dinâmica P no mancais, que é resistida pelo barril do rolamento. Ao longo do barril também há esforços devido ao peso do funil, polímero e das resistências.

A Figura 4.15 apresenta as restrições e cargas aplicadas à montagem e também a geração de malha. Foi utilizado o recurso de parafusos com porcas virtuais que aplica os torques e as condições mecânicas dos parafusos à análise. A malha gerada foi pré-definida para variar os elementos triangulares com base na curvatura com tamanhos de $4,0 mm$ a $0,1 mm$ e resultou em uma porcentagem de elementos com proporção menor que 3 de 98% e proporção máxima de 10,0.

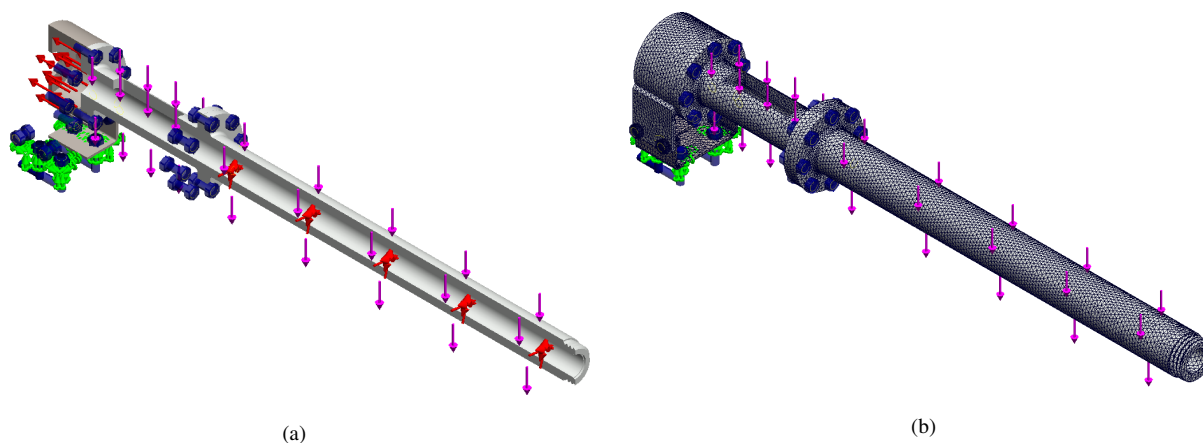


Figura 4.15: Simulação de esforços no barril com conectores: (a) esforços e pontos de fixação (b) malha gerada.

Fonte: Autor.

A partir disto, os resultados são apresentados na Figura 4.16, onde é possível observar a distribuição de Von Mises resultante, e o ponto em que esta é máxima (Figura 4.16a) e o deslocamento resultante quando na situação crítica (Figura 4.16b).

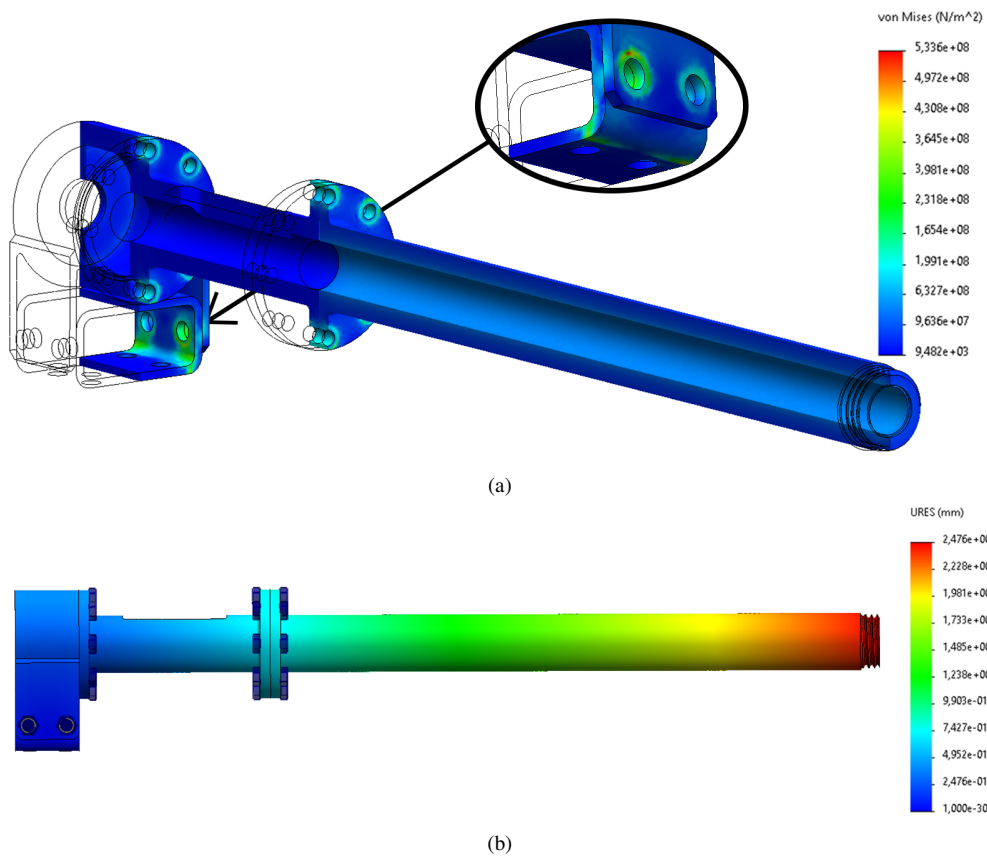


Figura 4.16: Simulação de esforços no Barril: (a) tensões de von Mises e (b) deslocamento.

Fonte: Autor.

Destes resultados, tem-se que o barril, nesta situação crítica, apresenta um fator de segurança de 1,3, visto o limite de escoamento do Aço 4140 nitretado de 680 MPa . Ademais, o deslocamento angular resultante no barril é de $0,22^\circ$.

Outro resultado obtido é o da aprovação dos parafusos. O recurso de parafusos e porcas virtuais do *SolidWorks* gera uma análise dos esforços que são transmitidos aos conectores e altera a coloração destes para um resultado visual da aprovação ou não dos elementos segundo o fator de segurança pré-estabelecido. A Figura 4.17 apresenta este resultado.

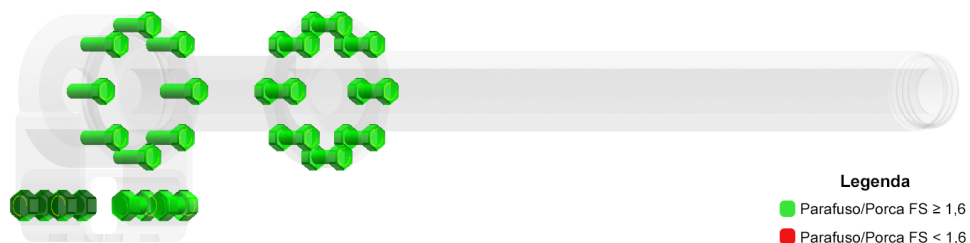


Figura 4.17: Validação dos parafusos M8 e M10.

Fonte: Autor.

4.4 CABEÇOTE E BICO DE EXTRUSÃO

O cabeçote foi projetado para conseguir armazenar uma placa de quebra que fosse encontrada comercialmente, ou de simples fabricação, e cuja montagem ao barril fosse simples para eventuais manutenções e substituição da placa de quebra ou das telas internas a esta. Além disso, como o destino da extrusora é a produção de filamentos, não há a necessidade de bicos intercambiáveis com diferentes diâmetros ou formatos, visto que o diâmetro externo da grande maioria dos filamentos comerciais são de $1,75\text{ mm}$. Sendo assim, a seção que dá forma ao filamento é usinada no próprio cabeçote

A Figura 4.18 apresenta a geometria do cabeçote e a montagem deste com a placa de quebra e o barril.



Figura 4.18: Vista isométrica renderizada da montagem da parte frontal do barril da matriz com cabeçote e placa de quebra.

Fonte: Autor.

Por haver uma conexão com o barril por meio de rosca, o ideal é que a matriz seja fabricada com o mesmo material, para evitar que o desgaste devido ao atrito entre as roscas seja unilateral.

O comprimento da matriz foi pensando para ser possível incluir uma resistência em coleira de 25 mm e ainda ter espaço para o termopar, que controlará a resistência, e o pressostato, para medição de pressão.

4.4.1 Análise Térmica da Matriz e Camisa Aletada

A função da matriz é, conforme visto na Seção 2.4.4, desenvolver a pressão que restringirá o fluxo e converte o movimento rotacional do fundido em movimento axial. Para isso, ela deve manter o polímero em estado fluido até a saída desse do bico. A rapidez que o polímero resfriará é crucial para a manutenção da seção transversal do filamento.

Para avaliar se haveria ou não necessidade, ainda na fase de projeto, de um resfriamento externo do polímero, ou alguma adaptação de projeto, optou-se por fazer uma simulação térmica considerando a parte final do barril, a matriz de extrusão, e o volume correspondente ao PLA. O intuito era, não apenas avaliar o quão suscetível o PLA era a variar a temperatura conforme a variação do metal e do resfriamento devido à convecção natural de ar, mas aproveitar para comparar o resultado com uma possível de solução de aletas ao redor do bico, proposta pelo autor Da Silva [73].

O intuito de usar aletas é aumentar a área de troca de calor, facilitando o resfriamento do bico por convecção. O objetivo é, reduzindo a temperatura do metal, diminuir a temperatura do fluido polímero a ponto de facilitar a sua posterior solidificação. A Figura 4.19 mostra a seção transversal de como se daria a montagem de uma camisa de alumínio aletada fixada ao redor do bico. Esta é a montagem que será simulada com uso do *SolidWorks*.

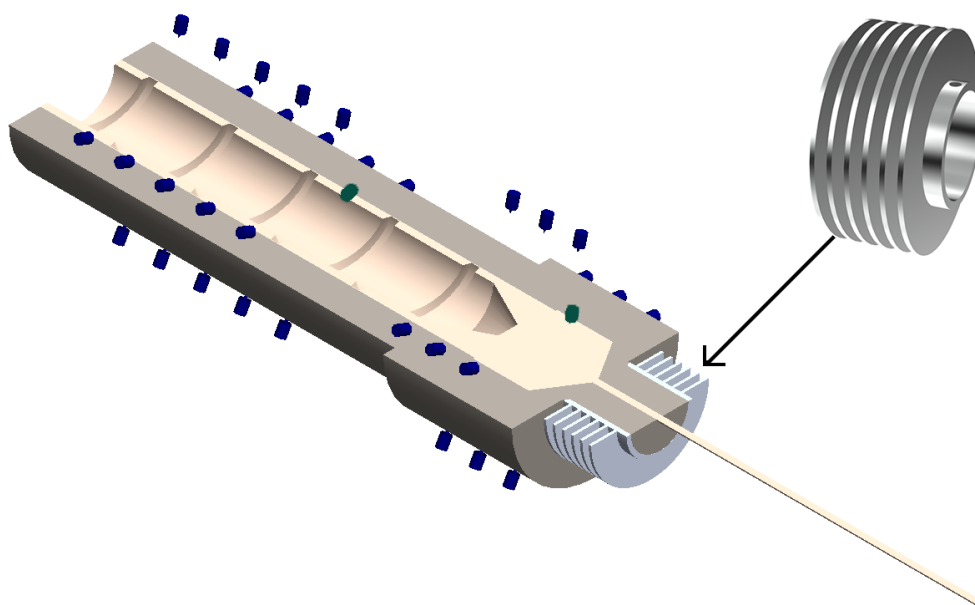


Figura 4.19: Seção transversal de modelo simplificado de barril-matriz para fins de simulação montado a uma camisa de alumínio aletada.

Fonte: Autor.

Foi gerada uma malha com base em curvatura pré-configurada com elementos variando de 2 a 0,4 mm, resultando em uma malha com uma porcentagem de 98,2% de elementos com proporção menor que 3 nos dois modelos simulados, um com aletas e o outro sem.

O estudo térmico-transiente incluiu a convecção térmica natural ao redor de toda superfície exposta, de $25 W/(m^2.K)$, e a potência térmica de 250 W da resistência de barril mais distante do funil e da resistência ao redor da matriz. Ambas individualmente controladas por termopares localizados próximos a elas, há uma profundidade de 8 e 10 mm respectivamente. O controle dos termopares foi simulado para manter a temperatura próxima aos $185^{\circ}C$ estabelecidos na Figura 3.6. O resultado do estudo pode ser observado na Figura 4.20.

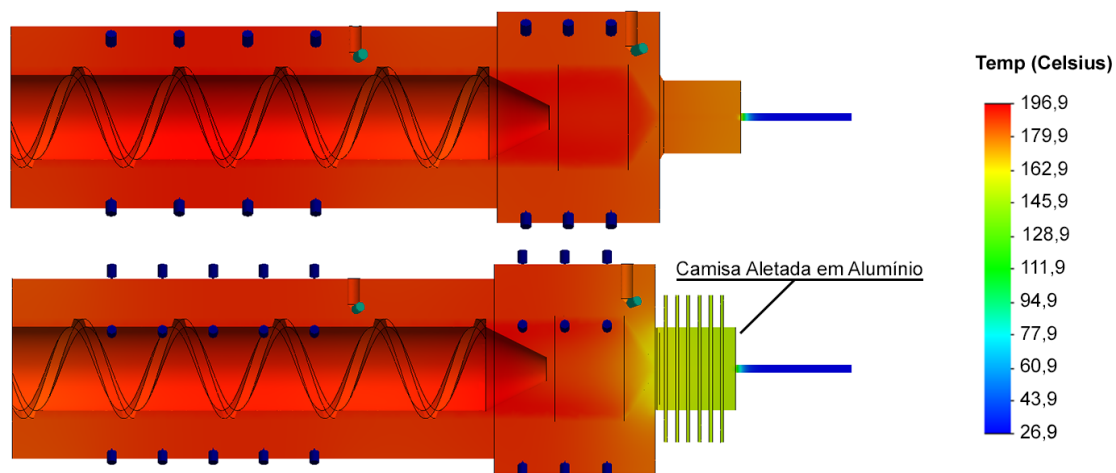


Figura 4.20: Resultado da simulação térmica da variação de temperatura ao longo do barril, matriz e PLA para as situações com aletas e sem aletas.

Fonte: Autor.

Apesar de visível a temperatura menor resultante da inserção de uma superfície aletada, é de interesse comparar os valores de um mesmo instante das duas situações em pontos próximos ao longo do bico e na saída deste. Dito isto, a Figura 4.21 apresenta os pontos que foram analisados, iniciando da redução do diâmetro de fluxo de material ainda na matriz até cerca de 13 *mm* após o material deixar o bico.

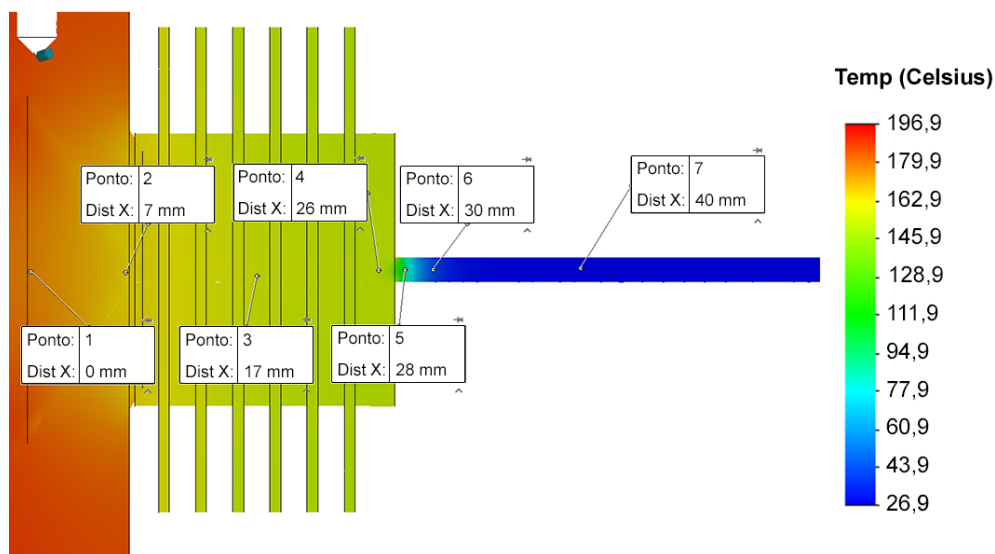


Figura 4.21: Pontos em que a temperatura do fundido foi monitorada para fins de comparação.

Fonte: Autor.

Dessa forma, a Tabela 4.6 apresenta os resultados de temperatura para os sete pontos analisados em ambos os modelos. Importante ressaltar que o estudo realizado foi uma análise térmica transiente, isto é, com variação no tempo, e o resultado apresentado na tabela é em apenas um instante de tempo, o que apresentou maiores temperaturas resultantes.

Tabela 4.6: Temperatura do polímero em diferentes pontos na extrusão em modelo com aletas e o sem aletas.

Pontos	Com Aletas	Sem Aletas
1	176°C	195°C
2	171°C	191°C
3	162°C	187°C
4	156°C	185°C
5	96°C	119°C
6	49°C	57°C
7	40°C	45°C

Fonte: Autor

Logo, a partir da Tabela 4.6, percebe-se que, mesmo a temperatura geral das medições do polímero imerso na estrutura aletada seja relativamente inferior, há pouca influência no tempo que o PLA atingiria a temperatura de cristalização. Relembrando o estudado na Seção 2.2, a cristalização acontece durante o resfriamento, em temperaturas entre as temperaturas de transição vítrea e de fusão, e é quando o material passa do estado pastoso (abaixo da temperatura de fusão) para o estado sólido (mesmo estado que apresentava antes do aquecimento acima da transição vítrea). Dessa forma, nas duas situações simuladas, o PLA já se apresentava no estado sólido no ponto 6, localizado há cerca de 3 *mm* do bico.

Dessa forma, não é possível afirmar da real eficiência da utilização das aletas no controle de qualidade do filamento extrudado. Esta utilização pode inclusive ser questionada, visto que o material atravessaria a região do bico em estado pastoso e não líquido. Ou seja, o polímero estaria em um estado mais viscoso, que diminuiria a velocidade de saída do filamento e aumentaria a pressão interna. Vale pontuar que no estudo de Da Silva [73], a simulação térmica contou apenas com a variação da temperatura do metal, e não do filamento em si.

4.5 CONTROLE E COMPONENTES ELETRÔNICOS

Esta Seção destina-se a tabelar e citar os componentes elétricos e eletrônicos selecionados ao longo do desenvolvimento do projeto. A Seção se limita a descrever os funcionamentos e não apresentará a diagramação elétrica ou projeto desta. Os produtos foram selecionados apenas com o fito de atender determinada função e não determinar a melhor solução de controle e monitoramento possível, visto que isso está além do escopo inicial deste projeto e seria melhor trabalhado por um profissional ou estudante da área de mecatrônica e programação.

4.5.1 Controle do Sistema de Acionamento

A velocidade da rosca deve poder variar entre 20 e 100 *RPM*. Para isso, pode-se valer de um inversor de frequência.

O inversor de frequência tem a função controlar a velocidade de saída de motores elétricos trifásicos, além de variar a frequência e tensão para que seja possível o controle da velocidade de giro e da potência consumida. Assim, vantagens do uso do inversor de frequência são a exploração do funcionamento do motor em condições não descritas pelo fabricante, e também proporcionar flexibilidade de velocidade com devida segurança e precisão.

Dados então as características do motor descritas na Tabela 4.2, foi então selecionado um inversor de frequência da mesma fabricante do motor, modelo **Weg CFW300 Trifásico 4CV 380V 4,8A**.

4.5.2 Resistências e Termopares

Como mencionado ao longo do texto e detalhado na Seção 3.4, o aquecimento do barril será realizado por meio de aquecedores do tipo coleira de mica. As simulações, como a apresentada na Figura 4.14 demonstraram que, com uma resistência de 250 W de 60 mm de comprimento radial, é possível atingir a temperatura almejada para a zona de alimentação em aproximadamente 5 minutos.

Coleiras com esta especificação são encontradas comercialmente, sendo descritas em função da potência térmica, diâmetro e comprimento radial. As quatro resistências ao redor do barril podem ser descritas, então, como **Resistência Coleira de Mica 45x60mm 250W 220V**.

A matriz também é dotada de uma resistência de igual potência, mas dimensões diferentes. Trata-se de uma **Resistência Coleira de Mica 50x25mm 250W 220V**.

Cada resistência deve ter seu controle individual, e, para isso, optou-se por utilizar termopares ao invés de outras opções, pois estes geralmente apresentam melhor resistência e uma gama maior de formato. Uma boa opção disponível comercialmente e utilizada em máquinas extrusoras e injetoras são Termopares tipo J.

O modelo selecionado apresenta a descrição de **Termopar tipo J, haste em aço inox 304 com 3 mm de diâmetro, comprimento 150 mm, baioneta grande rosqueável sobre a mola**.

O controle das temperaturas podem ser feitas por meio de um controlador PID (proporcional, integral e derivativo). Os componentes com esta arquitetura eliminam o erro de estado estacionário, ou seja, a diferença entre o valor esperado e o valor real obtido do sinal, e apresentam uma boa resposta dinâmica, que é o tempo para a resposta estabilizar, proporcionando um processo mais estável ao compensar rapidamente as perturbações ou alterações ocorram no sistema.

A Figura 4.22 demonstra como seria a disposição das coleiras de mica e dos termopares ao longo do barril e do cabeçote. As quatro resistências do barril estão separadas 45 mm uma da outra e a resistência do cabeçote está a 5 mm do início deste. Os termopares estão a 5 mm de cada resistência, onde há um furo de 8 mm no barril e 10 mm no cabeçote para inserção destes, que são rosqueados na superfície metálica.

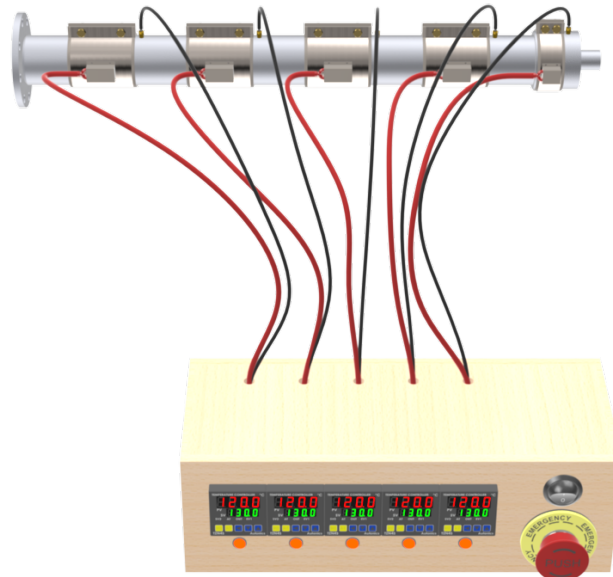


Figura 4.22: Disposição de resistências coleira de mica e termopares distribuídos ao longo do barril e cabeçote conectados a uma caixa montada com controladores PID e botões de controle e emergência.

Fonte: Autor.

4.5.3 Controle de Pressão

Conforme apresentado na Seção 2.4.5, transdutores de pressão são sensores de medição geralmente utilizados para a leitura da pressão do polímero no cabeçote da extrusora.

A leitura do transdutor é feita por meio da deformação de sua membrana, ao qual transmite esta pressão através de um capilar até seu bulbo de controle que contém uma ponte de wheatstone, sendo este local protegido da alta temperatura onde é feito a conversão do sinal de pressão em um sinal elétrico, para que um indicador de grandeza possa mensurar este sinal de forma visível e converte-lo em uma saída lógica, normalmente associada a um alarme de troca de tela e pressão alta.

Isso garante uma maior eficiência no processo, ao evitar a quebra do cabeçote da extrusora ou da placa de quebra e também garantindo que esta em boas condições, o que impacta a qualidade do produto.

A escolha do transdutor de pressão será o modelo de Transdutores de Pressão para Polímeros da DYN-X Dynisco de **3.33 mV/V e faixa de 0 a 700 bar**.

4.6 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO FLUXO POLIMÉRICO

Com o intuito de representar visualmente o comportamento do fluxo polimérico e validar alguns dos cálculos realizados ao longo do projeto, como a hipótese da pressão máxima alcançada em situação de entupimento do bico (Equação 4.3) e o comportamento térmico do polímero

devido ao aquecimento descrito nas zonas da Figura 3.6, decidiu-se utilizar o ambiente *Flow Simulations* do *SolidWorks*, versão 2020, que é uma ferramenta de simulação de fluxo paramétrica que utiliza o Método do volume finito (FVM) para calcular o desempenho do produto através de estudos hipotéticos que permitem a otimização pelo uso dos resultados.

O ambiente apresenta algumas limitações, como a impossibilidade de importar estudos de movimento. Nas simulações apresentadas, então, o fluido apresenta um movimento helicoidal ao longo do parafuso, mas não é transportado por este, que encontra-se estático. Porém, mesmo assim, ainda é possível utilizar condições de contorno como as temperaturas das superfícies que serão aquecidas, a pressão inicial do fluido (pressão atmosférica), e o suposto fluxo de massa na saída, que são retirados a partir da Tabela 3.4 e calcular a variação de pressão e de temperatura do fluido polimérico ao longo da extrusora.

E, para descrever o fluido não-newtoniano, será utilizado o modelo de viscosidade *Cross-WLF*, já apresentado na Seção 2.1.2 por meio da Equação 2.4. Os dados para a simulação reológica do modelo viscoso estão apresentados na Tabela 4.7 e foram retirados do artigo de Farah, Anderson e Langer [74].

Tabela 4.7: Temperatura do polímero em diferentes pontos na extrusão em modelo com aletas e o sem aletas.

Característica	Unidade	Valor
Físicas e Térmicas		
Densidade (estado sólido)	g/cm^3	1,252
Densidade (estado fundido)	g/cm^3	1,073
Calor específico (à $55^\circ C$)	$J/kg^\circ C$	1590
Calor específico (à $100^\circ C$)	$J/kg^\circ C$	1955
Calor específico (à $190^\circ C$)	$J/kg^\circ C$	2060
Condutividade Térmica (à $48^\circ C$)	$W/m^\circ C$	0,111
Condutividade Térmica (à $105^\circ C$)	$W/m^\circ C$	0,197
Condutividade Térmica (à $198^\circ C$)	$W/m^\circ C$	0,195
Reológicas (Cross WLF)		
n		0,25
τ	Pa	$1,00861 \cdot 10^5$
D_1	$Pa.s$	$3,31719 \cdot 10^9$
D_2	K	373
A_1		20,2
A_2	K	51,6

Fonte: Dados de Farah, Anderson e Langer [74].

Uma vez configurado o material não-newtoniano no ambiente do *SolidWorks*, inicialmente avaliou-se o comportamento da variação de temperatura do fluido. Como o ambiente *Flow Simulation* não é integrado aos outros ambientes de simulação (térmico ou de movimento), não há como importar os estudos térmicos transientes, então foram criadas as regiões de aquecimento com as temperaturas apresentadas na Figura 3.6.

A Figura 4.23 apresenta o resultado da simulação para partículas de 2 mm de diâmetro, onde é possível observar as linhas de fluxo destas partículas em movimento helicoidal ao redor da rosca. A variação de cores representa a temperatura de cada partícula individual naquele dado momento.

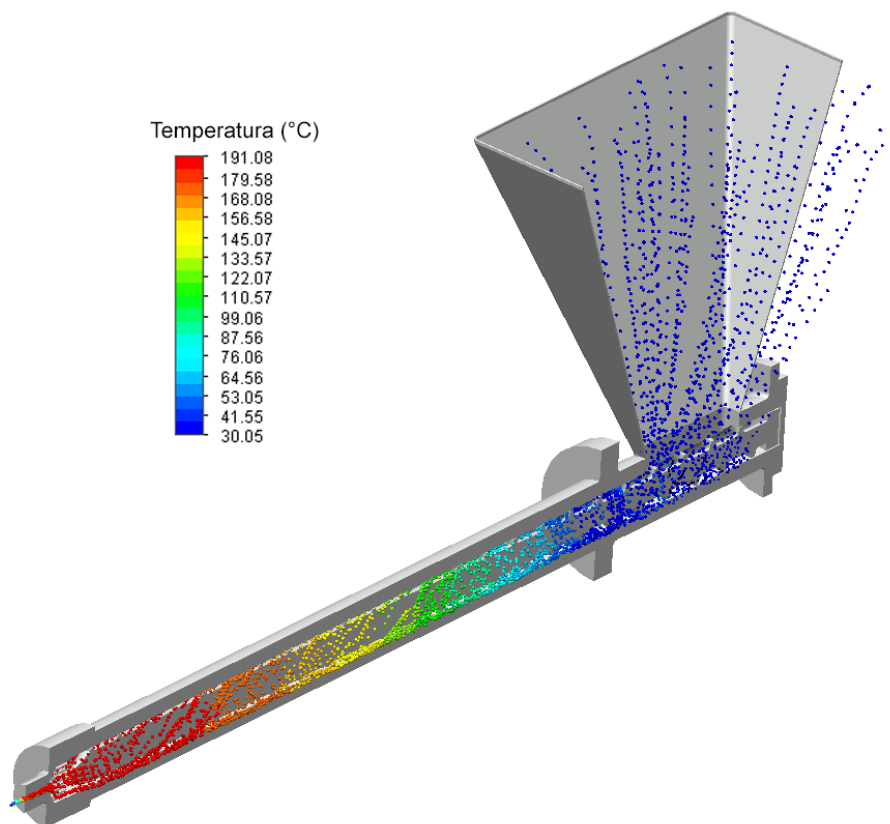


Figura 4.23: Seção transversal do conjunto parafuso-barril com fluxo de partículas representando a variação de temperatura do PLA.

Fonte: Autor.

Percebe-se que o aumento gradativo de temperatura do fluido polimérico resulta em temperaturas superiores à temperatura de fusão do PLA, cerca de 190°, mas apenas ao final da seção da rosca e, mesmo assim, não ultrapassa muito este valor, como deveria acontecer para um processamento ideal. Isso se deve ao fato de que, como mencionado, o parafuso encontra-se estático na simulação, não contribuindo com o efeito do aquecimento devido ao cisalhamento com os grãos. Este resultado tem a sua importância, por corrobora com a ideia de que a maior parte do calor necessário para derreter o polímero é gerado por cisalhamento pela rotação do parafuso e não apenas pelas resistências.

Na segunda situação simulada, há um bloqueio no bico da extrusora, o que é crítico para o desempenho da máquina, como já discutido. A Figura 4.24 apresenta este resultado, onde as condições de contorno são as mesmas da situação anterior, mas há um tampão que bloqueia o fluxo do fluido, aumentando a temperatura interna, principalmente na região da matriz.

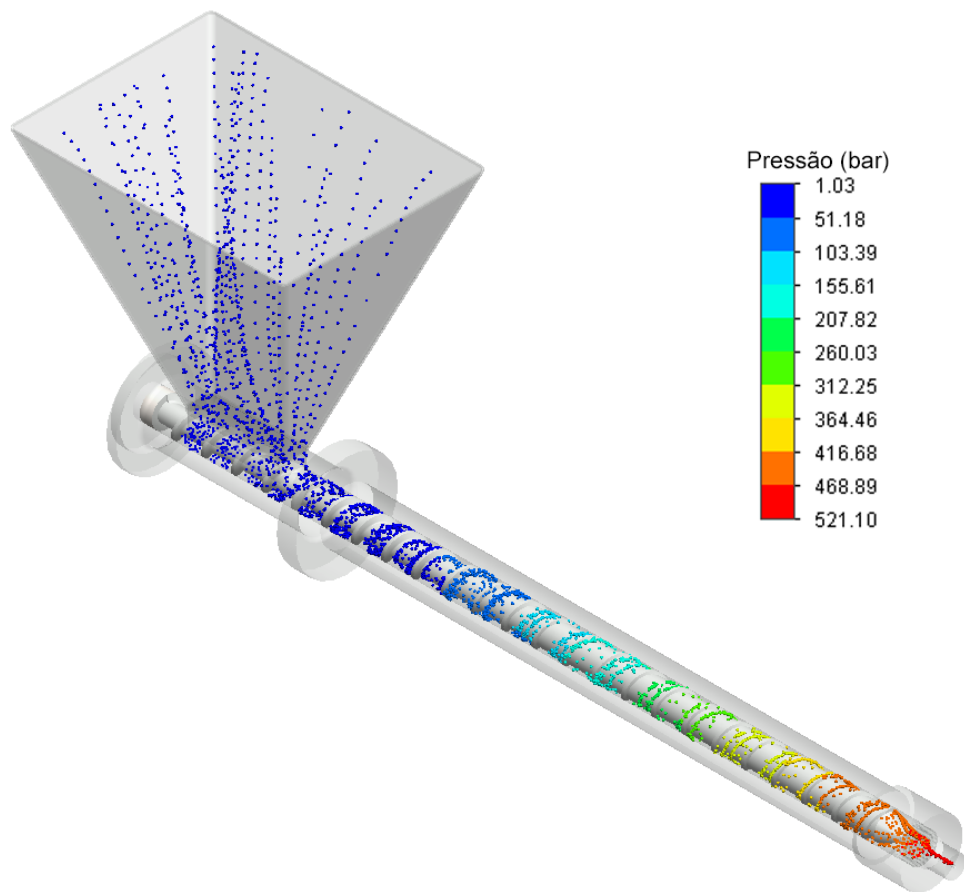


Figura 4.24: Vista isométrica do escoamento de PLA em simulação para determinar a variação de pressão do processo

Fonte: Autor.

A pressão inicial, de 1,03 *bar*, equivalente à 1 *atm*, foi um dado de entrada da simulação para simular que o material dentro do funil está exposto ao ambiente. Embora as limitações da simulação, o resultado de 521,10 *bar* na região do bico é bem próximo do calculado pela Equação 4.3.

4.7 LISTA DE MATERIAIS

Todos os dimensionados e selecionados para o projeto estão dispostos nas listas de materiais no Anexo I.4 junto aos desenhos técnicos e de fabricação.

A Figura 4.25 apresenta a montagem completa com todos os componentes em uma vista isométrica renderizada. A extrusora encontra-se montada sobre uma bancada para apoiar a caixa de elementos eletrônicos e apoiar a extrusora e o redutor. O motor está sob a mesa, fixado à parede.

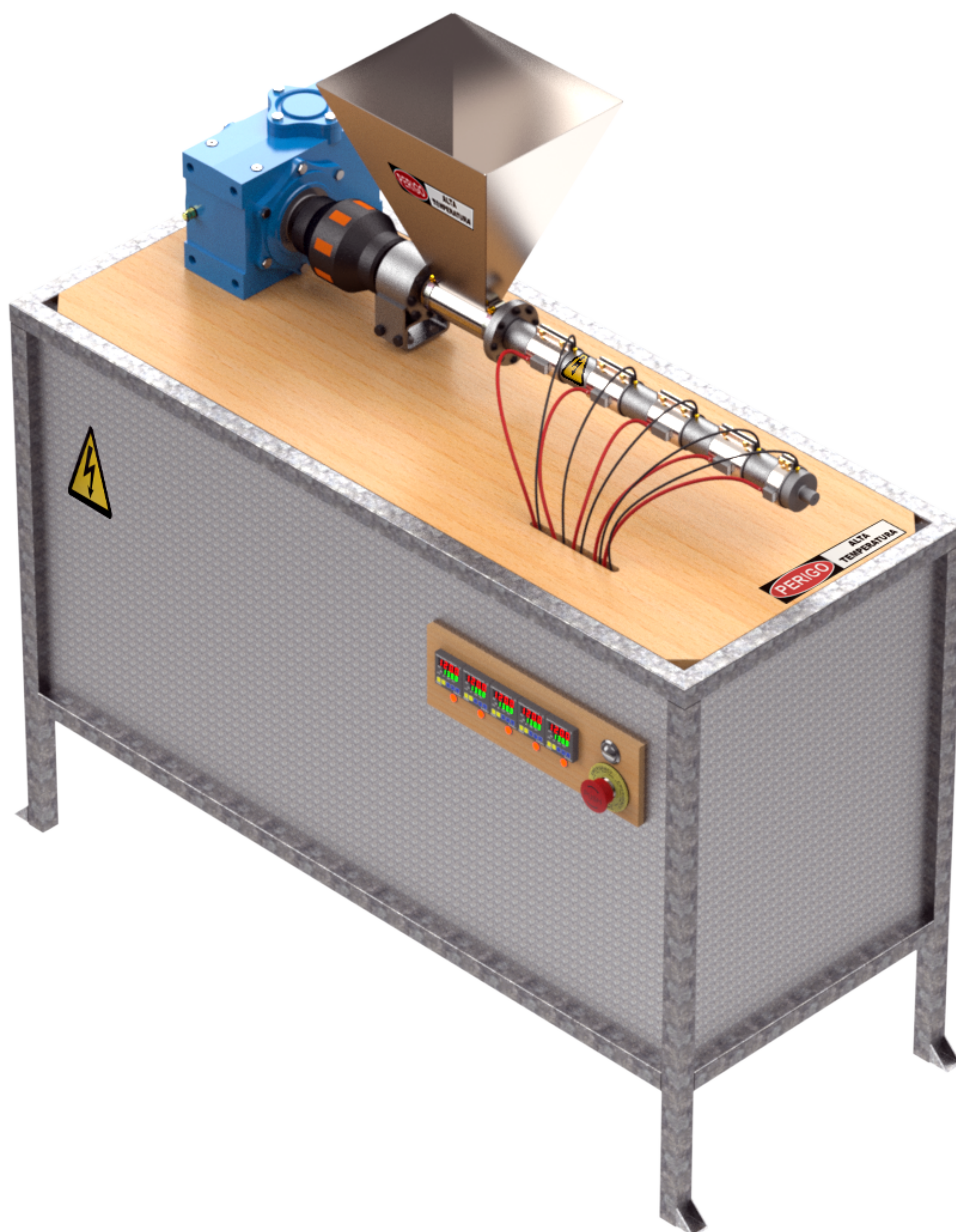


Figura 4.25: Vista isométrica renderizada da extrusora montada sobre uma bancada.

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

A impressão 3D está presente há algum tempo no mercado, atraindo o interesse não só de especialistas na área, mas muitos entusiastas por tecnologia devido às inúmeras possibilidades que propõe. Porém, é comum que haja erros de impressão que resultam em perda total ou parcial da peça, seja por limitações da máquina ou por desconhecimento técnico do operador, resultando em desperdício de material.

Dito isso, este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de uma extrusora para ser utilizada não só para fabricação própria de filamento, mas também reaproveitar resíduos de impressão 3D e, também, desenvolver novas configurações de polímero para usos específicos, o que evidencia a capacidade para uso industrial ou laboratorial do projeto, além de fomentar a economia e promover a expansão e popularização da impressão 3D.

Assim, o projeto teve como um primeiro objetivo apresentar uma extensa revisão bibliográfica, partindo do básico de introdução a polímeros até a teoria por trás da máquina extrusora, baseando-se tanto em pesquisadores nacionais quanto em referências internacionais, cujo domínio científico da aplicação dos polímeros está melhor documentado e desenvolvido. Dessa forma, visa-se facilitar o acesso de futuros estudos sobre os materiais poliméricos e máquinas extrusoras para os leitores e pesquisadores que darão continuidade a este projeto ou outros similares, permitindo-os adquirir um conhecimento específico e direcionado para entender, parafraseando o autor Rauwendaal [48], a arte por trás dessa ciência.

Na seção final da revisão bibliográfica é proposto a aplicação por analogia de uma norma voltada para o trabalho com injetoras, devido à similaridade entre as máquinas. Esta analogia é feita não só adaptando o texto com as diferenças existentes entre as máquinas e extraíndo o que é comum a ambas, como também modificando imagens da norma para exemplificar a utilização em extrusoras, como a Figura 2.32. Além do capítulo em si ser essencial a qualquer projeto por tratar de aspectos de segurança, a aplicação por analogia é uma qualidade à parte do projeto, visto que visa preencher uma ausência específica.

Em um segundo momento, este trabalho objetivou criar uma ferramenta que permitisse a implementação de dados teóricos em um gráfico de rendimento esperado em função da velocidade e diâmetro da extrusora para servir de ponto de partida para o projeto de máquinas similares, Figura 3.4. Uma vez que o código desenvolvido está divulgado em anexo, permite que outros estudiosos validem os dados ou atualizem as entradas para avaliar os rendimentos da extrusão de outros polímeros e em situações similares.

Em terceira instância, o projeto apresentou o desenvolvimento de uma extrusora pensada especificamente para a extrusão do poliácido láctico, material muito utilizado em impressões 3D no Brasil, a partir de relações usuais e expressões empíricas de dimensionamento referentes a extrusoras no geral e utilizando de dados fornecidos por fabricantes e estudos de outros autores.

Como principais contribuições, pode-se citar o projeto completo do sistema mecânico, dados de dimensionamento, capacidade de processamento, lista de materiais e desenhos técnicos e de fabricação. O estudo partiu da utilização de equações dimensionais usuais, que foram validadas posteriormente com a utilização de simulações numéricas que testaram a viabilidade mecânica dos elementos sujeitos a maiores esforços originados nas condições mais extremas do processo.

Ademais, todo o capítulo de Desenvolvimento apresentou imagens únicas que exemplificam o processo em termos de mecânica dos fluidos (Figura 3.2), termodinâmica (Figura 3.3) e mecânica dos materiais (Figura 3.8) ao representar de forma clara os fluxos do processo, as transferências de calor e variações de propriedades ou a distribuição de esforços. Este aspecto visual visa esclarecer os aspectos técnicos da máquinas de forma objetiva e fácil entendimento ao compactar o domínio do conhecimento em imagens de qualidade.

Também, a partir de simulações termodinâmicas, foram avaliadas propostas de alterações do sistema e obteve-se resultados do que esperar em relação ao resfriamento do material e qualidade do filamento. A inclusão do isolamento com papel de fibra cerâmica se mostrou promissora, enquanto a camisa aleta ao redor do bico foi classificada como possivelmente prejudicial ao processo.

Por fim, vale ressaltar que o projeto de uma extrusora, como apresentado, exige uma visão holística de diversas áreas das engenharias para possibilitar a compatibilização dos diversos componentes entre si e mitigar os riscos de falhas e erros de projeto. Como este trabalho surge no âmbito de uma Graduação em Engenharia Mecânica, o desenvolvimento da máquina teve como foco a componente mecânica, assim como áreas que derivam desta, sendo que a componente elétrica foi muito pouco abordada e encontra-se disponível para ser estudada por posteriores autores.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade a este projeto, é necessário definir os parâmetros elétricos e eletrônicos indispensáveis para o funcionamento do equipamento. Isto inclui implementação de um circuito de proteção e o sistema de controle e operação, que deve ser desenvolvido de forma a ser de fácil entendimento e seguro, para evitar possíveis complicações. Adicionalmente, é de todo o interesse procurar uma melhoria constante ao desenvolvimento deste equipamento baseado na análise do seu funcionamento e, para isso, a máquina deve ser fabricada e testada com PLA virgem e reciclado. Assim, poder-se-á estudar o comportamento da extrusora com diferentes condições de serviço e materiais, assim como combinação de materiais.

Outra sugestão está em avaliar o quanto os impactos da umidade influenciam a qualidade do filamento e, se necessário, propor, por exemplo, uma tampa para o funil a fim de evitar o contato dos grãos de polímero com a atmosfera ambiente no início do processo.

Por fim, também se sugere o desenvolvimento de uma simulação de fluxo polimérico, considerando os aspectos reológicos do poliácido láctico, para avaliar os dados teóricos de rendimento da

máquina desenvolvida. Há documentações e estudos similares do uso do modelo de viscosidade Cross-WLF, que descreve a temperatura, taxa de corte e dependência de pressão da viscosidade, para simulação do poliácido lático. Este pode ser um bom ponto de partida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HARPER, C. A. *Modern Plastics Handbook*. NeW York: McGraw-Hill, 2000.
- 2 CANEVAROLO, J.; SEBASTIÃO, V. *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. São Paulo: Artliber Editora, 2010.
- 3 CHANDA, M.; ROY, S. K. *Plastics Technology Handbook*. NeW York: CRC Press, 2006.
- 4 MCKELVEY, J. M. *Polymer Processing*. NeW York: John Wiley, 1962.
- 5 MARKETSANDMARKETS. *3D Printing Market - Global Forecast to 2026*. 2021. 309 p. Acesso em 20 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html>>.
- 6 CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução*. São Paulo: Grupo GEN, 2020.
- 7 CRUMP, S. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. Google Patents, 1992. US5121329A. Disponível em: <<http://www.google.it/patents/US5121329A>>.
- 8 NORONHA, K. V. M. S. et al. Pandemia por covid-19 no brasil: análise da demanda e da oferta de leitos hospitalares e equipamentos de ventilação assistida segundo diferentes cenários. *Cadernos de Saúde Pública - CSP*, p. 1 – 2, 2020.
- 9 MIKULA, K. et al. 3d printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 2 – 14, 2020.
- 10 SILVEIRA, R.; BAZZO, W. Ciência, tecnologia e suas relações sociais: A percepção de geradores de tecnologia e suas implicações na educação tecnológica. *Ciência & Educação*, v. 15, n. 3, p. 681 – 694, 2009.
- 11 ZAMORA, A. M. et al. Atlas do plástico. *Fundação Heinrich Böll*, 2020.
- 12 BRUSSELS. *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*. European Commission, 2015. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>>.
- 13 MWANZA, B. G.; MBOHWA, C. *Drivers to sustainable plastic solid waste recycling: a review*. 2017. 649 - 656 p.
- 14 KLEER, R.; PILLER, T.; WELLER, C. *Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited*. Alemanha: Int. J. Production Economics, 2015.
- 15 CONSAINSIGHTS. *Latin America 3D Printing Plastics Market Report*. Índia: Sample Report, 2022.
- 16 FRIED, J. R. *Polymer Science & Technology*. 203.
- 17 SOUZA, D.; HUPPER, F. *Projeto de Protótipo de Extrusora para Produção de Filamento de Impressora 3D*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
- 18 3DLAB. *Grãos de PLA Virgem*. 2013. Acesso em 28 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/home/>>.

- 19 3DFILA. *PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA*. 2020. Acesso em 28 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>>.
- 20 PAOLI, M. *Degradação e Estabilização dos Polímeros*. São Paulo: Chemkeys, 2008.
- 21 GILES, H. F.; WAGNER, J. R.; MOUNT, E. M. *Extrusion : the definitive processing guide and handbook*. New York: William Andrew, Inc, 2005.
- 22 MANRICH, S. *Processamento de Termoplásticos: Rosca Única, Extrusão & Matrizes, Injeção & Moldes*. São Paulo: Editora Artliber, 2005.
- 23 KLEIN, J. *Avaliação da Degradação do Polietileno Contendo Aditivo Pró-Degradante em Diferentes Meios de Exposição*. Caxias do Sul: Pós-Graduação Stricto Sensu, Pró-Reitoria de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento Tecnológico, 2010.
- 24 SANTANA, L.; ALVES, J.; NETTO, A.; MERLINI, C. *Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica*. Rio de Janeiro: Revista Matéria, 2018. v. 23.
- 25 BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2011.
- 26 LASPRILLA, A. *Síntese do Poli-ácido Láctico a partir do Ácido Láctico para aplicação biomédica*. [S.l.]: Faculdade Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- 27 GARLOTTA, D. *A literature review of poly(lactic acid)*. Estados Unidos: Journal of Polymers and the Enviroment, 2001. v. 9. 786-793 p.
- 28 OLIVEIRA, A. C.; BORGES, S. *Poli(ácido láctico) aplicado para embalagens de alimentos: uma revisão*. Universidade Federal de Campina Grande: Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 2020. v. 15. 1-10 p.
- 29 CRAMER, C. J. et al. *High Tg Aliphatic Polyesters by the Polimerization of Spirolactide Derivatives*. [S.l.]: Polymer Chemistry, 2010. v. 1. 870-873 p.
- 30 VANIN, M. et al. *Estudo da degradação "in vitro" de blendas de poli(beta-hidroxibutirato)(PHB) / poli(L-ácido láctico)(PLLA) na forma de filmes*. São Paulo: Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2004. v. 14. 187-193 p.
- 31 JAHNO, V. D. *Síntese e Caracterização do Poli(L-ácido láctico) para uso como biomaterial*. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, 2005.
- 32 ANDERSON, I. *Mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled polylactic acid*. Estados Unidos: 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017. v. 4. 110-115 p.
- 33 ZENKIEWICZ, M.; RICHERT, J. et al. *Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid)*. [S.l.]: Polym Test, 2009. v. 28. 412-418 p.
- 34 PILLIN, I.; MONTRELAY, N.; A., B.; GROHENS, Y. *Effect of thermomechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid)*. [S.l.]: Polym Degrad Stab, 2008. v. 93. 321-328 p.
- 35 ZHAO, P.; RAO, C.; GU, F.; SHARMIN, N.; FU, J. *Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment*. Amsterdã, Países Baixos: Journal Clean Prod, 2018. v. 197. 1046-1055 p.

- 36 SANCHEZ, F. A. C.; BOUDAUD, H.; HOPPE, S. *Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: mechanical issues*. Estados Unidos: Additive Manufacturing, 2017. v. 17. 87-105 p.
- 37 TIAN, X.; LIU, T.; WANG, Q.; DILMURAT, A.; LI, D.; ZIEGMANN, G. *Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites*. [S.l.]: J Clean Prod, 2017. v. 142. 1609-1618 p.
- 38 VIGNOL, L. *Desenvolvimento de Modelos Simplificados para o Estudo da Extrusão de Polímeros*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2005.
- 39 RESISTEN. *Elementos da Resistência Coleira de Mica*. 2021. Acesso em 14 de setembro de 2021. Disponível em: <<https://www.resisten.com.br/resistencia-coleira>>.
- 40 NR-12. *Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos*. [S.l.]: ENIT - Escola Nacional de Inspeção do Trabalho, 2010.
- 41 NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão. 2008.
- 42 NBR 13536: Máquinas injetoras para plástico e elastômeros - Requisitos técnicos de segurança para o projeto, construção e utilização. 2016.
- 43 ANSI Z35.1: Specifications for accident preventions signs. 1972.
- 44 ISO 3864: Safety colours and safety signs. 1984.
- 45 DIN EN 294/1992: Safety of machinery: Safety distances to prevent danger zones being reached. 1992.
- 46 DIN EN 349/1993: Safety of machinery: Minimum gaps to avoid crushing of the human body. 1993.
- 47 DIN EN 418/1991: Safety of machinery: Emergency stop equipment - functional aspects - principles for design. 1991.
- 48 RAUWENDAAL, C. *Conceitos Sobre Projetos de Roscas Para Extrusão*. São Paulo: Polímeros: Ciência e Tecnologia, 1991. Jan/Mar-93. 37-44 p.
- 49 COLLINS, J.; BUSBY, H.; STAAB, G. *Projetos Mecânica de Elementos de Máquinas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- 50 SAMPIERI, R.; COLLADO, C.; LUCIO, M. *Metodología de lá investigación*. México: McGraw-Hill, 2013.
- 51 SIN, L.; TUEEN, B. Injection molding and three-dimensional printing of poly(lactic acid). *Plastics Design Library*, 2019.
- 52 FUTERRO. *General Purpose Polylactic Acid*. 2021. Acesso em 22 de setembro de 2021. Disponível em: <http://www.futerro.com/documents/tds_pla_extrusion%20grade.pdf>.
- 53 GOODFELLOW. *ME346310 Polylactic acid (PLA) granule*. 2021. Acesso em 22 de setembro de 2021. Disponível em: <<https://www.goodfellow.com/datasheets/ME346310.pdf>>.
- 54 JAROSCHEK, C. *Spritzgießen für Praktiker*. Alemanha: Editora Hanser, 2013.
- 55 MAREC, P. et al. Modelling of pla melt rheology and batch mixing energy balance. *European Polymer Journal, Elsevier*, v. 60, p. 273 – 285, 2014.

- 56 PEINADO, V. et al. Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of a reinforced poly(lactic acid): Reprocessing and recycling of biobased materials. *Materials (Basel)*, v. 10, p. 7106 – 7117, 2015.
- 57 FERREIRA, W. et al. Effect of structure and viscosity of the components on some properties of starch-rich hybrid blends. *Carbohydrate Polymers*, v. 117, p. 988 – 995, 2015.
- 58 ASSUMPÇÃO, R. *Projeto Preliminar de uma Mini Injetora/Extrusora Híbrida de Baixo Custo para Processamento de Polímeros com Finalidade Acadêmica*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.
- 59 MARTINEZ, P. *Projeto de uma Extrusora para Processamento de Polímeros em Escalas Laboratorial*. Universidade de Campina Grande: Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
- 60 HARTIG, S. et al. *Process parameter determination for small recycling plants for the production of filament for FFF printing using the Taguchi method*. Switzerland: Progress in Additive Manufacturing 7, 2021. v. 7. 87–97 p.
- 61 RECH, F. et al. *Formulação e caracterização de potenciais filamentos compósitos de PLA e talos de tabaco para aplicação em manufatura aditiva*. [S.l.]: Revista Matéria, 2021. v. 26.
- 62 XOMETRY. *Data Sheet PLA*. 2013. Acesso em 21 de março de 2022. Disponível em: <<https://xometry.eu/en/materials/pla/>>.
- 63 SD3D. *Portfolio PLA*. 2013. Acesso em 21 de março de 2022. Disponível em: <<https://www.sd3d.com/portfolio/pla/>>.
- 64 SANTIS, F. D.; PANTANI, R. Melt compounding of poly (lactic acid) and talc: assessment of material behavior during processing and resulting crystallization. *Journal of Polymer Research*, v. 22, 12 2015.
- 65 BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley*. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- 66 SKF. *Svenska KullagerFabriken*. 1907. Acesso em 28 de março de 2022. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/>>.
- 67 NBR 17094-1 - Máquinas elétricas girantes - Motores de indução trifásicos. 2018.
- 68 WEG. *Motores Elétricos*. 2020. Acesso em 28 de março de 2022. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>>.
- 69 LILO. *Redutores de Velocidade*. 2008. Acesso em 28 de Março de 2022. Disponível em: <<https://www.liloredutores.com.br/>>.
- 70 TRANSMITECH. *Redutores*. 2010. Acesso em 02 de abril de 2022. Disponível em: <<https://www.transmitechredutores.com.br/home>>.
- 71 FIBERTEX. *Tecendo Tecnologia*. 1993. Acesso em 12 de maio de 2021. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/>>.
- 72 ISO 898-1 - Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. 2013.
- 73 SILVA, F. *Projeto de Extrusora de Filamento para Impressão 3D*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

74 FARAH, S.; ANDERSON, D.; LANGER, R. *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review*. New York: Advanced Drug Delivery Reviews, 2016.

I.1 DIMENSIONAMENTO DO PARAFUSO

```

clear all
close all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Variáveis
Db=(20:1:42)'; %Diâmetro do Parafuso [mm]
Nb=(20:2:100)'; %Velocidade [rpm]
%N=20;
%D=25;

for i=1:length(Nb)
    N=Nb(i);
    for j=1:length(Db)
        D=Db(j);
        %Dados
        rho=1.24; %densidade aparente [g/cm^3]
        mu=310; %viscosidade do fundido na zona de medição [Pa.s]
        RC=2.5; %Razão de Compressão
        LD=24; %Razão L/D
        DeltaP=65000; %head pressure [Pa]

        %Relações
        L=LD*D; %Largura do Parafuso [mm]
        t=D; %Passo [mm]
        e=0.1*D; %Espessura do Filete [mm]
        Lm=0.4*L; %comprimento da zona de medição [mm]
        delta=0.0025*D + 0.02; %folga entre parafuso e barril [mm]
        h_i=0.2*D; %Profundidade do Canal na Zona de alimentação [mm]
        h_f=h_i/RC; %Profundidade do Canal na Zona de dosagem [mm]
        phi= atan (t/(D*pi))/(pi/180); %Ângulo de hélice [°]
        W=t*cos(phi*pi/180)-e; %Largura do Canal [mm]

        %Vazões
        QD=pi^2*D^2*h_i*sin(phi*pi/180)*cos(phi*pi/180)*(N/60)/2; %Fluxo de arrasto 1 [mm^3/s]
        QP=pi*D*h_i^3*(sin(phi*pi/180))^2*DeltaP/(12*Lm*mu); %Fluxo de pressão 1 [mm^3/s]
        QL=pi^2*D^2*delta^3*tan(phi*pi/180)*DeltaP/(12*e*Lm*mu); %Fluxo de vazamento 1 [mm^3/s]
        Q=QD-QP-QL; %Saída Líquida 1 [mm^3/s]
        Q_kg=Q*60*60*(rho/10^6); %[kg/h]
        Q_linha(j)=Q_kg;
        QQD=(4.8/5)*pi*D*(N/60)*cos(phi*pi/180)*h_i*W/2; %Fluxo de arrasto 2 [mm^3/s]
        QQP=(3/(1+1.6))*W*h_i^3*sin(phi*pi/180)*DeltaP/(12*Lm*mu); %Fluxo de pressão 2 [mm^3/s]
        QQ=QQD-QQP; %Saída Líquida 2 [mm^3/s]
        QQ_kg=QQ*60*60*(rho/10^6); %[kg/h]
        QQ_linha(j)=QQ_kg;
    end
end

```

```

endfor
    Qcoluna=Q_linha';
    Matriz(:,i)=Qcoluna;
    QQcoluna=QQ_linha';
    QMatriz(:,i)=QQcoluna;
endfor

#####Comparacao
Elementos=size(Matriz)(1)*size(Matriz)(2);
for m=1:Elementos
    Divisao(m)=Matriz(m)/QMatriz(m);
endfor
MediaDiferenca=(sum(Divisao)/length(Divisao))-1)*100;
Desvio=(std(Divisao))*100;
Variancia=(var(Divisao))*100;

#####Gráfico#####
set (0, "defaultaxesfontname", "Helvetica")
figure
[x, y] = meshgrid(Nb, Db);
colormap("default");
mesh(y,x,QMatriz,'linewidth',1.2), shading faceted;
hidden('off')
ylabel('Velocidade [rpm'],'FontSize',11);
xlabel('Diâmetro [mm'],'FontSize',11);
zlabel('Saída Líquida[kg/h]','FontSize',11);
axis([min(Db) max(Db) min(Nb) max(Nb)]);
set(gca,'FontSize',11);
grid on;
set(gca,'MinorGridLineStyle','-');
grid minor;
set(gca,'GridLineStyle','-');

##### DIMENSIONAMENTO DO BARRIL #####
Ds=25; %Diâmetro do Parafuso
delta=0.0015*Ds; %Folga entre Parafuso e Barril [mm]
Dbi=Ds+2*delta; %Diâmetro Interno do Barril [mm]
sigmac=680; %Tensão de Escoamento do Material [MPa]
p=137.9; %Pressão [MPa]
FS=2; %Fator de Segurança
tmin=p*Dbi/(2*sigmac)*FS; %Espessura Mínima
Dbe=Dbi+2*tmin; %Diâmetro Externo do Barril

```

I.2 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR

```
clear all
close all
clc
%Variáveis
mponto=(4.45:0.2:21.1)'; %vazão mássica, kg/h
Cp=1.8; %calor específico kJ/kg.K
DeltaH=93; %calor latente kJ/kg
Ti=60; %Temperatura mínima, °C
Tf=185; %Temperatura máxima, °C
DeltaT=Tf-Ti; %Variação de temperatura K
omega_max=100; %Velocidade mínima, rpm
omega_min=20; %Velocidade máxima, rpm
i=15; %fator de redução

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for ii=1:length(mponto)
    m=mponto(ii);
    P(ii)=(m*Cp*DeltaT+m*DeltaH)/3.6;
endfor
Ps=P/0.65;
Pmax=max(Ps)/735.5 %Potência máxima em cv

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x=(omega_max-omega_min)/(length(mponto) - 1);
omegarpm=(omega_min:x:omega_max)';
omega=omegarpm*(2*pi/60);
for j=1:length(omega);
    Ts(j)=Ps(j)/omega(j);
endfor
Tm=Ts/(9.81*i); %Torque motor
Tmmax=max(Tm); %Torque máximo do motor em kgF.m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ps_cv=Ps/735.5;
set(0, "defaultaxesfontname", "Helvetica")
figure(3)
[ax,line1,line2] = plotyy(omegarpm,Tm, omegarpm,Ps_cv);
xlabel("Velocidade [rpm]", 'FontSize',12);
ylabel(ax(1), "Torque [kgf.m]", 'FontSize',12);
ylabel(ax(2), "Potencia [cv]", 'FontSize',12);
lcolor = get(gca, "ColorOrder")(1,:);
rcolor = get(gca, "ColorOrder")(2,:);
set(line1, 'LineWidth',1.4);
set(line2, 'LineWidth',1.4);
axis([min(omegarpm) max(omegarpm)]);
grid minor;
set(ax(1), "FontSize", 12)
set(ax(2), "FontSize", 12)
print -depsc potenciatorque.eps
```

I.3 DIMENSIONAMENTO DO ROLAMENTO

```
clear all
close all
clc

                                %%% Cálculo Rolamento

%% Cálculo Pressão Crítica
Ls=150+180+270; %Comprimento rosqueado [mm]
Ds=25; %Diâmetro da rosca [mm]
E=210*10^9; %Módulo de elasticidade [Pa]
m=1.7; %Massa do Parafuso [kg]
g=9.81; %Gravidade [m/s^2]
C=26.5 ;

Pcr=10^-5*pi^2*E/(64*(Ls/Ds)^2) %Pressão Crítica[bar]

%% Força Axial
Fa=Pcr*10^5*pi*((Ds/1000)/2)^2/1000 %Força Axial [kN]

%% Carga Radial
Fr=m*g/1000 %Carga Radial [kN]

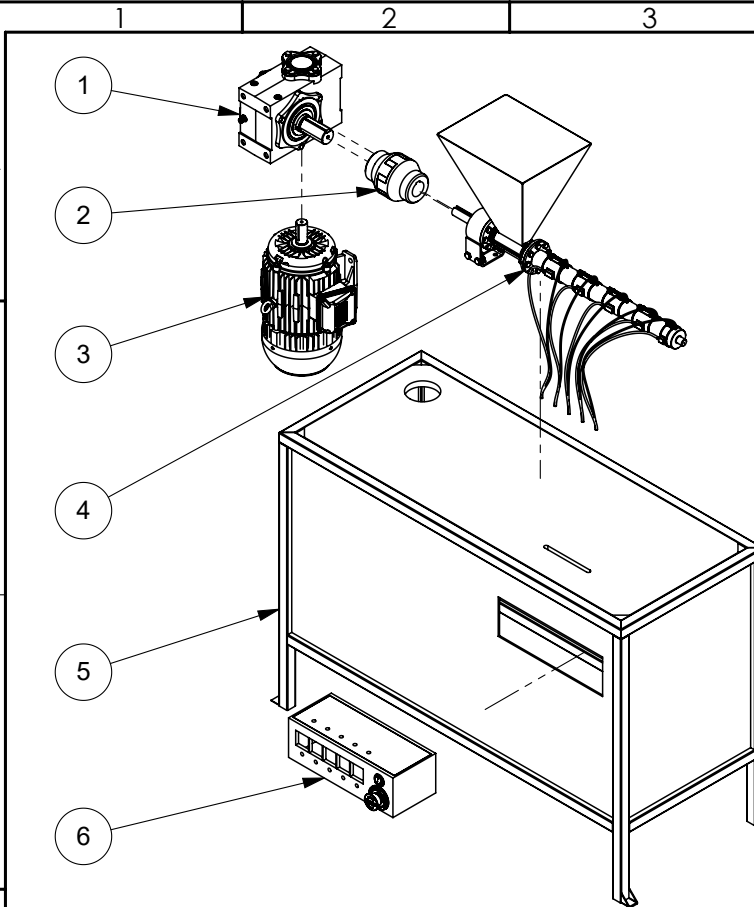

%% Razão
R=Fa/Fr

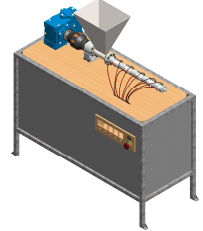
%% Carga Dinâmica
Pdin=0.35*Fr+0.57*Fa %Carga Dinâmica [kN]

% Cálculo da Vida
Vida_1=(C/Pdin)^3 %Vida individual para um rolamento
Vida_2=(C/(Pdin/2))^3 %Vida individual para dois rolamentos
```

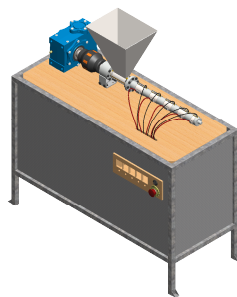
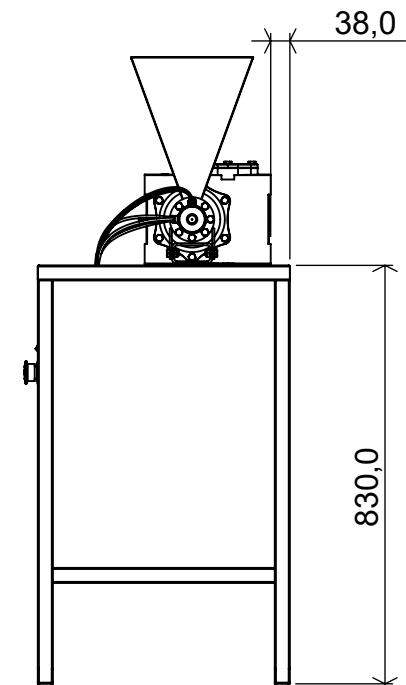
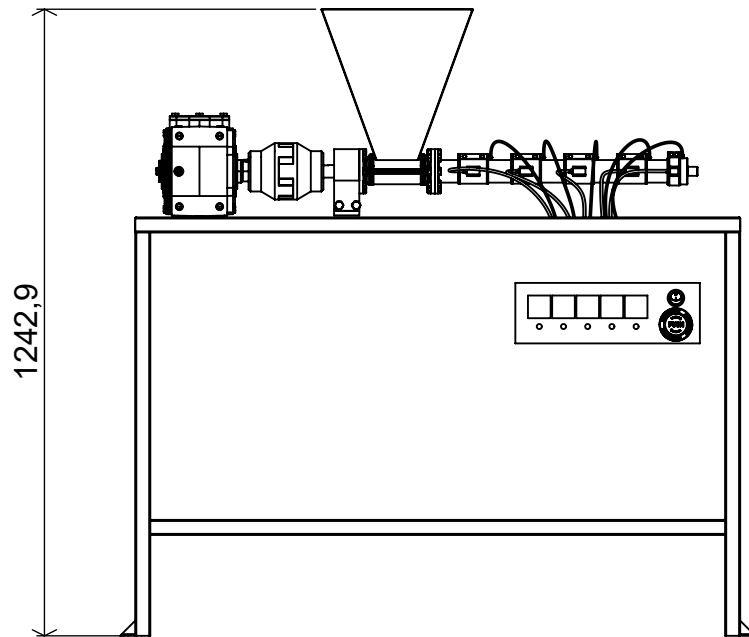
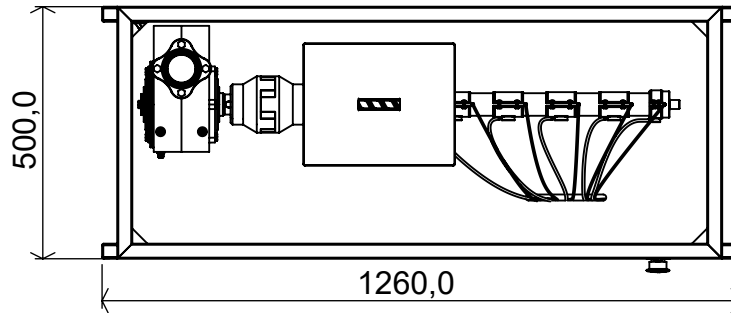
I.4 DESENHOS TÉCNICOS E DE FABRICAÇÃO

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Redutor de Velocidade 1:15 p/ Motor de 4cv	1
2	Acoplamento de Cruzeta Dupla MN06	1
3	Motor Weg de 4cv (3kw) Trifásico 220/380v	1
4	Extrusora	1
5	Bancada	1
6	Caixa Controladora	1

			Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia	
	Descrição: Extrusora para Filamento PLA		Data: 26/04/2022	
Material: Não se aplica	Tratamento Superficial: Não se aplica		Criado por: Gabriel Silva Póvoa	
Peso: 161798.7 gramas	Escala: 1:15		Formato: A4	
Folha: 1 de 25				
Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas				
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

Dimensões Máximas



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Extrusora para Filamento PLA

Data: 26/04/2022

Material: Não se aplica

Tratamento Superficial: Não se aplica

Peso: 161798.7 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 1:15

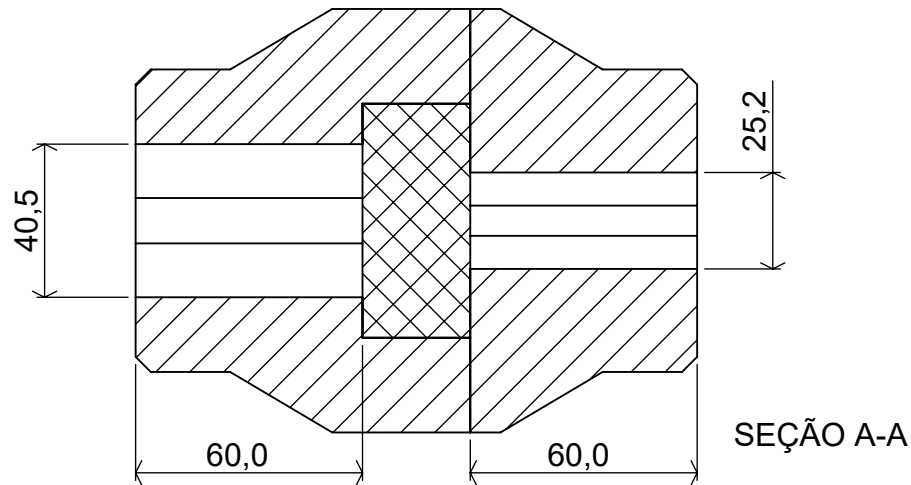
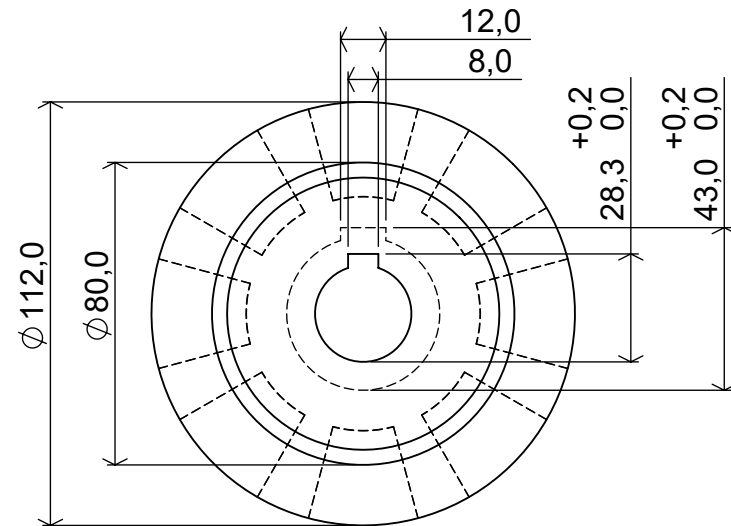
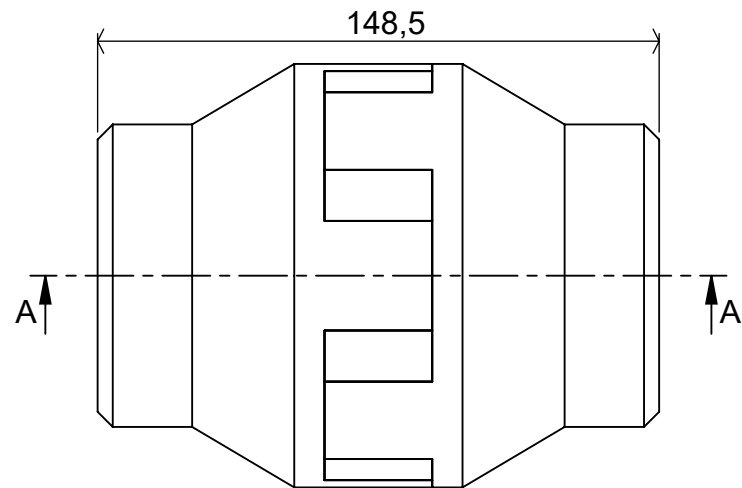
Formato: A4

Folha: 2 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Dimensões máximas e indicações para furação



SEÇÃO A-A



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Acoplamento de Cruzeta Dupla MN06

Data: 26/04/2022

Material: Não se aplica

Tratamento Superficial: Não se aplica

Peso: 6061.8 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

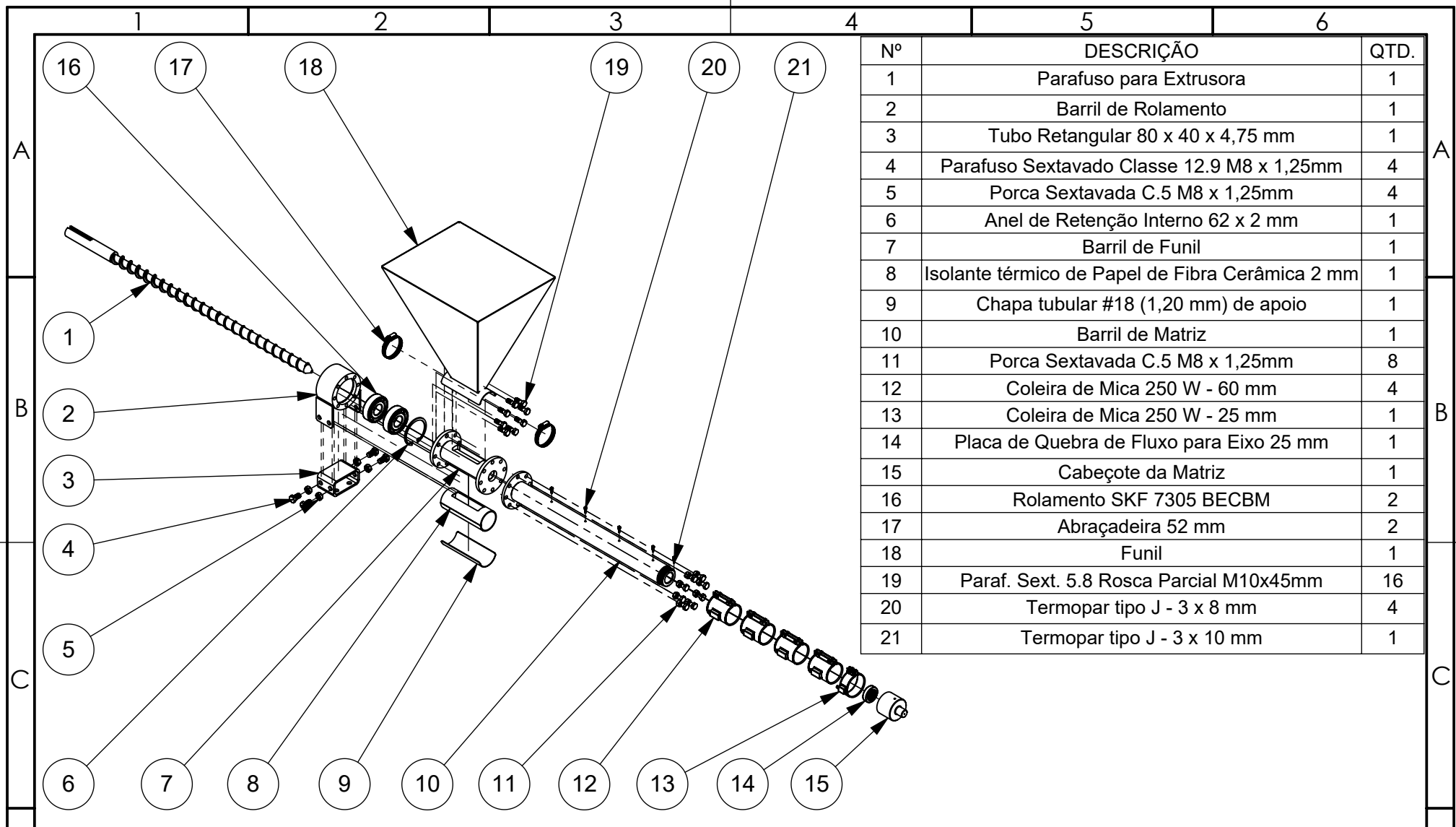
Escala: 1:2

Formato: A4

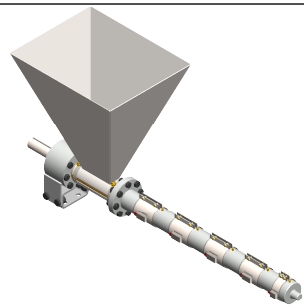
Folha: 3 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Nº	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Parafuso para Extrusora	1
2	Barril de Rolamento	1
3	Tubo Retangular 80 x 40 x 4,75 mm	1
4	Parafuso Sextavado Classe 12.9 M8 x 1,25mm	4
5	Porca Sextavada C.5 M8 x 1,25mm	4
6	Anel de Retenção Interno 62 x 2 mm	1
7	Barril de Funil	1
8	Isolante térmico de Papel de Fibra Cerâmica 2 mm	1
9	Chapa tubular #18 (1,20 mm) de apoio	1
10	Barril de Matriz	1
11	Porca Sextavada C.5 M8 x 1,25mm	8
12	Coleira de Mica 250 W - 60 mm	4
13	Coleira de Mica 250 W - 25 mm	1
14	Placa de Quebra de Fluxo para Eixo 25 mm	1
15	Cabeçote da Matriz	1
16	Rolamento SKF 7305 BECBM	2
17	Abraçadeira 52 mm	2
18	Funil	1
19	Paraf. Sext. 5.8 Rosca Parcial M10x45mm	16
20	Termopar tipo J - 3 x 8 mm	4
21	Termopar tipo J - 3 x 10 mm	1



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Extrusora

Data: 26/04/2022

Material: Não se aplica

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Tratamento Superficial: Não se aplica

Escala: 1:12

Peso: 14003.9 gramas

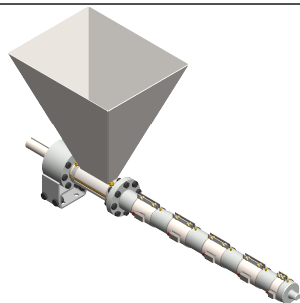
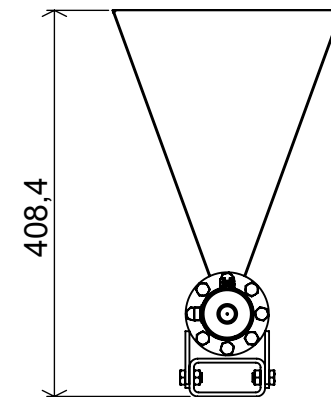
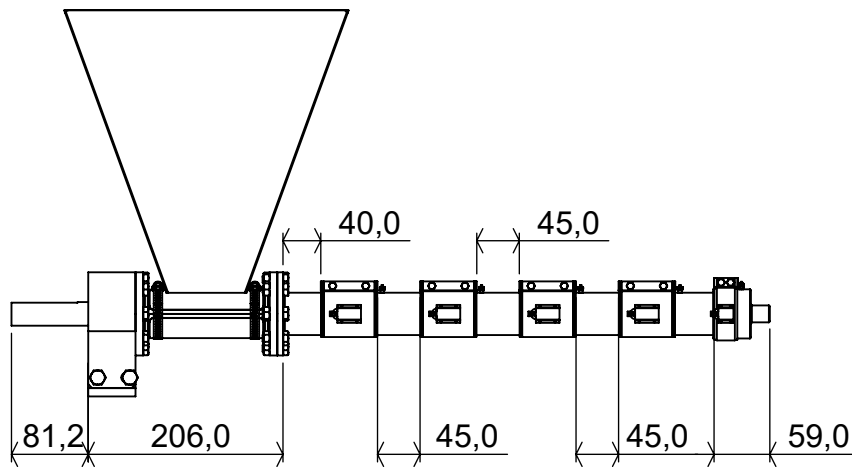
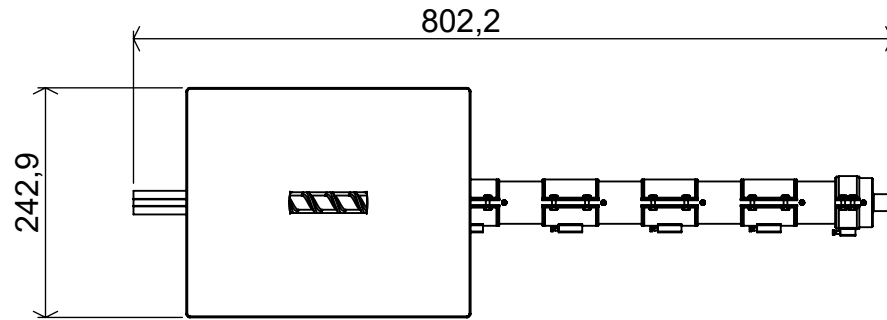
Formato: A4

Folha: 4 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Dimensões Máximas e espaçamento entre Resistências



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Extrusora

Data: 26/04/2022

Material: Não se aplica

Tratamento Superficial: Não se aplica

Peso: 14003.9 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

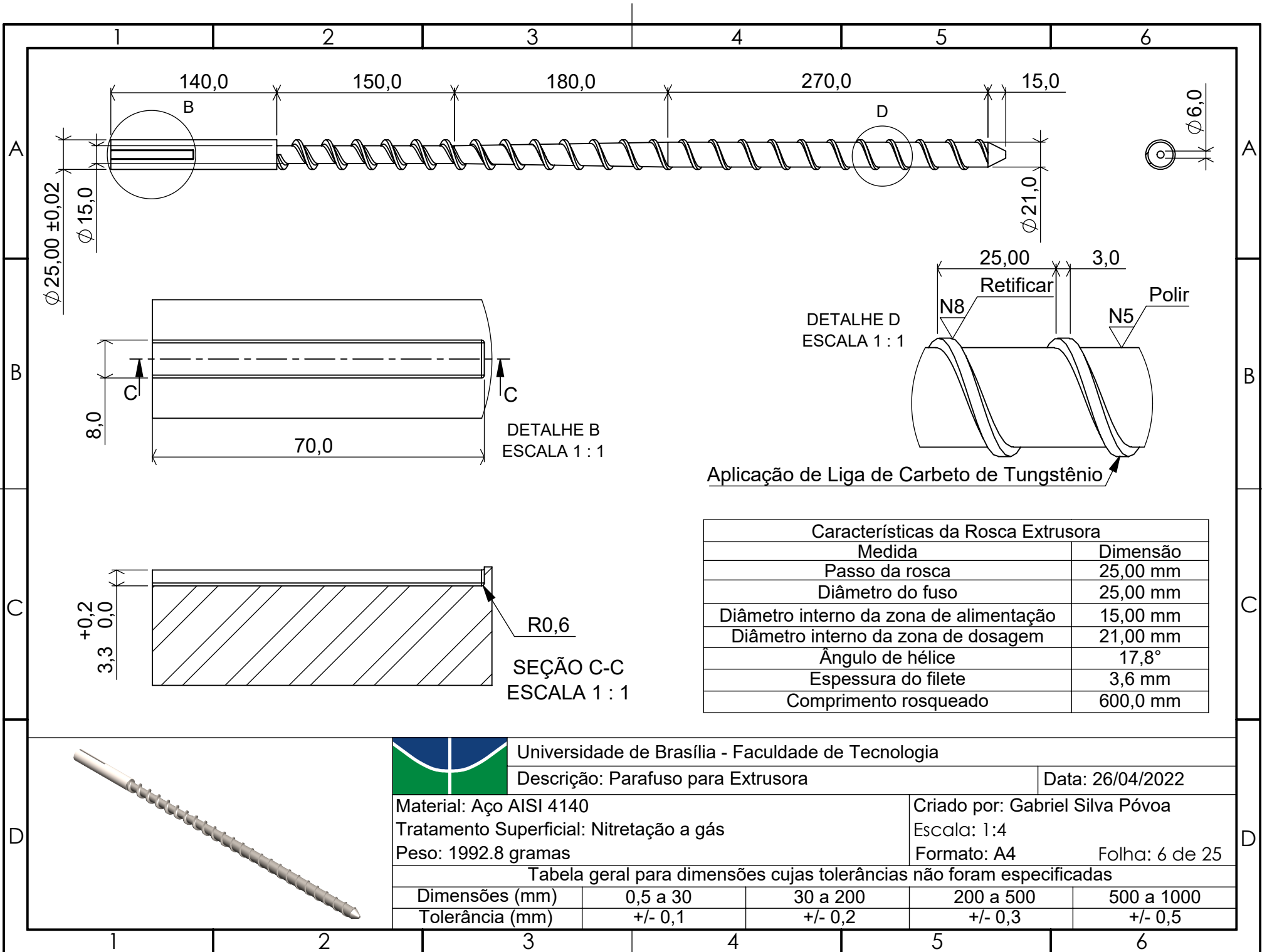
Escala: 1:8

Formato: A4

Folha: 5 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



$\phi 25,00 \pm 0,02$

$\phi 15,0$

$\phi 21,0$

$\phi 6,0$

8,0

70,0

+0,2
3,3 0,0

R0,6

SEÇÃO C-C
ESCALA 1 : 1

DETALHE D
ESCALA 1 : 1

25,00

3,0

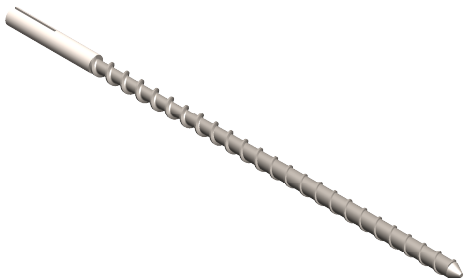
Retificar

Polir

Aplicação de Liga de Carbeto de Tungstênio

Características da Rosca Extrusora

Medida	Dimensão
Passo da rosca	25,00 mm
Diâmetro do fuso	25,00 mm
Diâmetro interno da zona de alimentação	15,00 mm
Diâmetro interno da zona de dosagem	21,00 mm
Ângulo de hélice	17,8°
Espessura do filete	3,6 mm
Comprimento rosqueado	600,0 mm



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Parafuso para Extrusora

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 1992.8 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

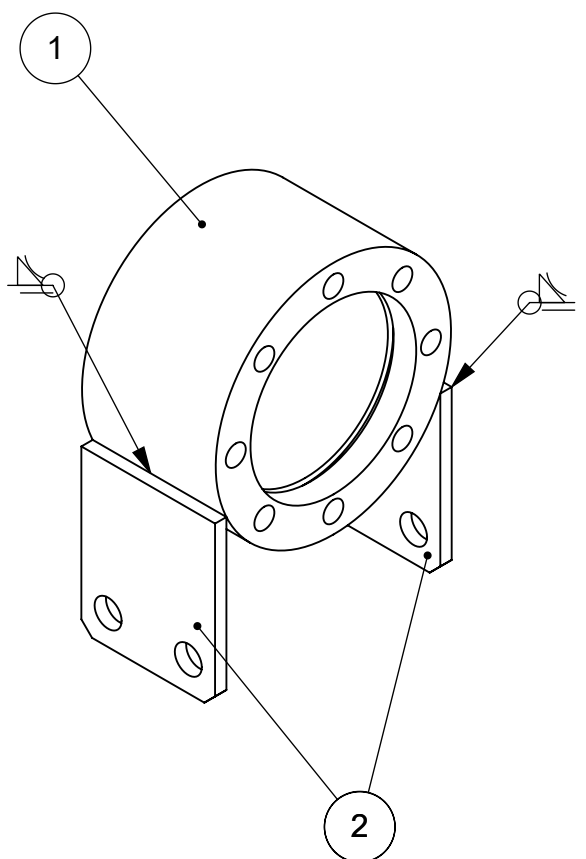
Escala: 1:4

Formato: A4

Folha: 6 de 25

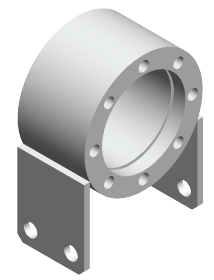
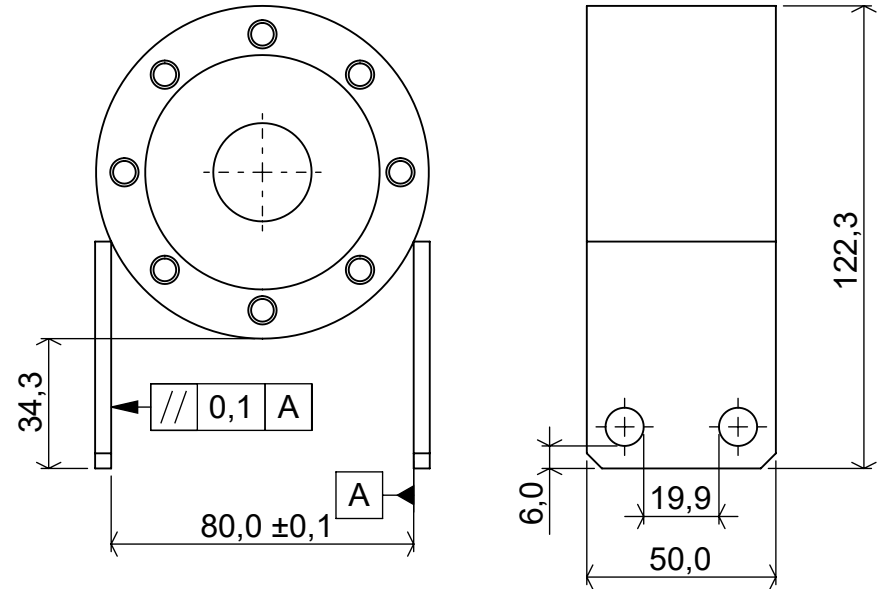
Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Tubo 85mm do Barril de Rolamento	1
2	Chapa #8 (4,25 mm) para Barril de Rolamento	2

Dimensões máximas



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Barril de Rolamento

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 1442.5 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

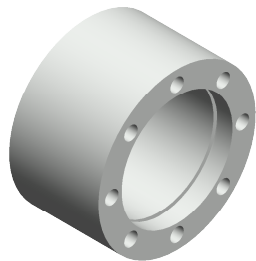
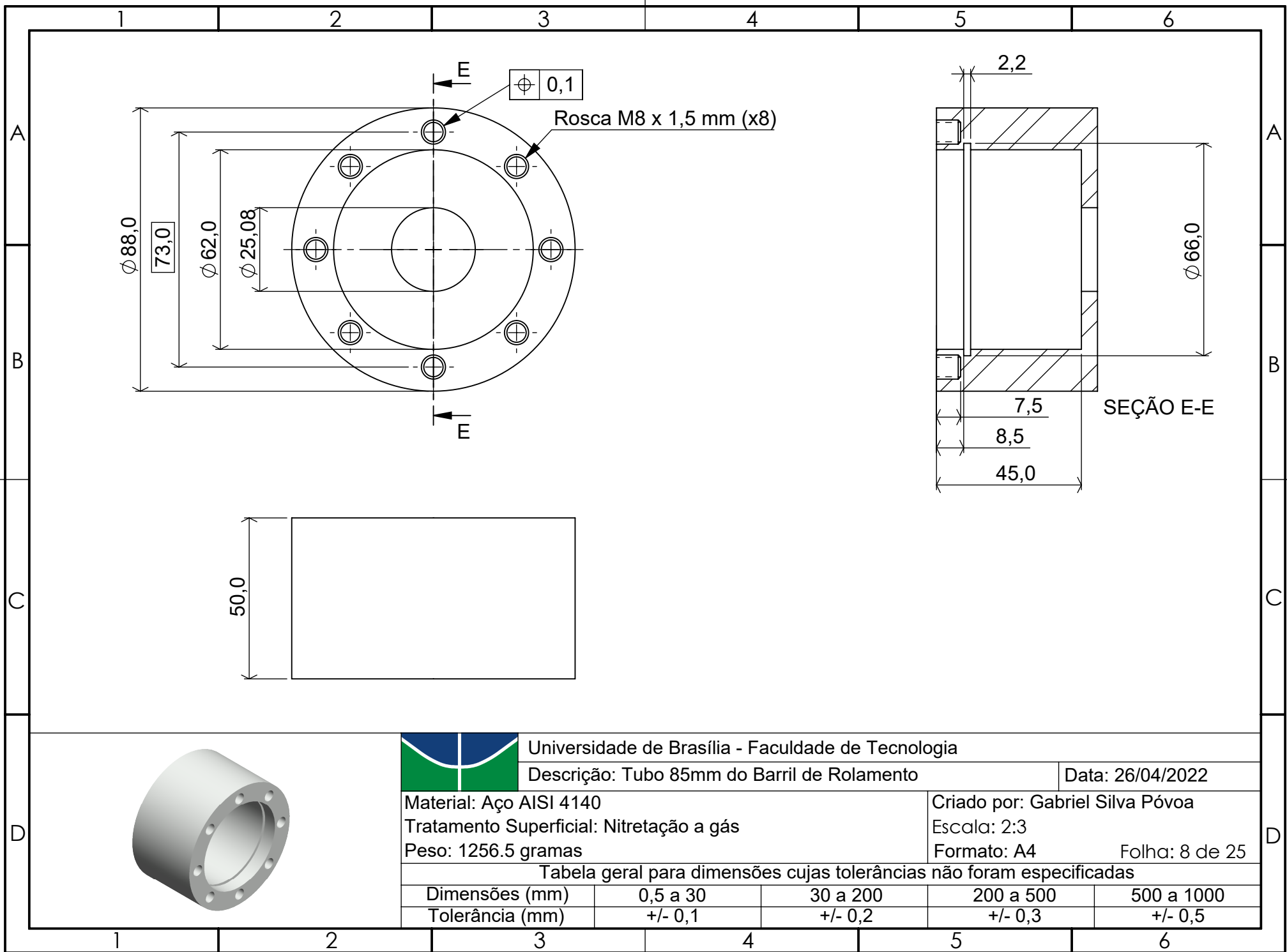
Escala: 1:2

Formato: A4

Folha: 7 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Tubo 85mm do Barril de Rolamento

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 1256.5 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

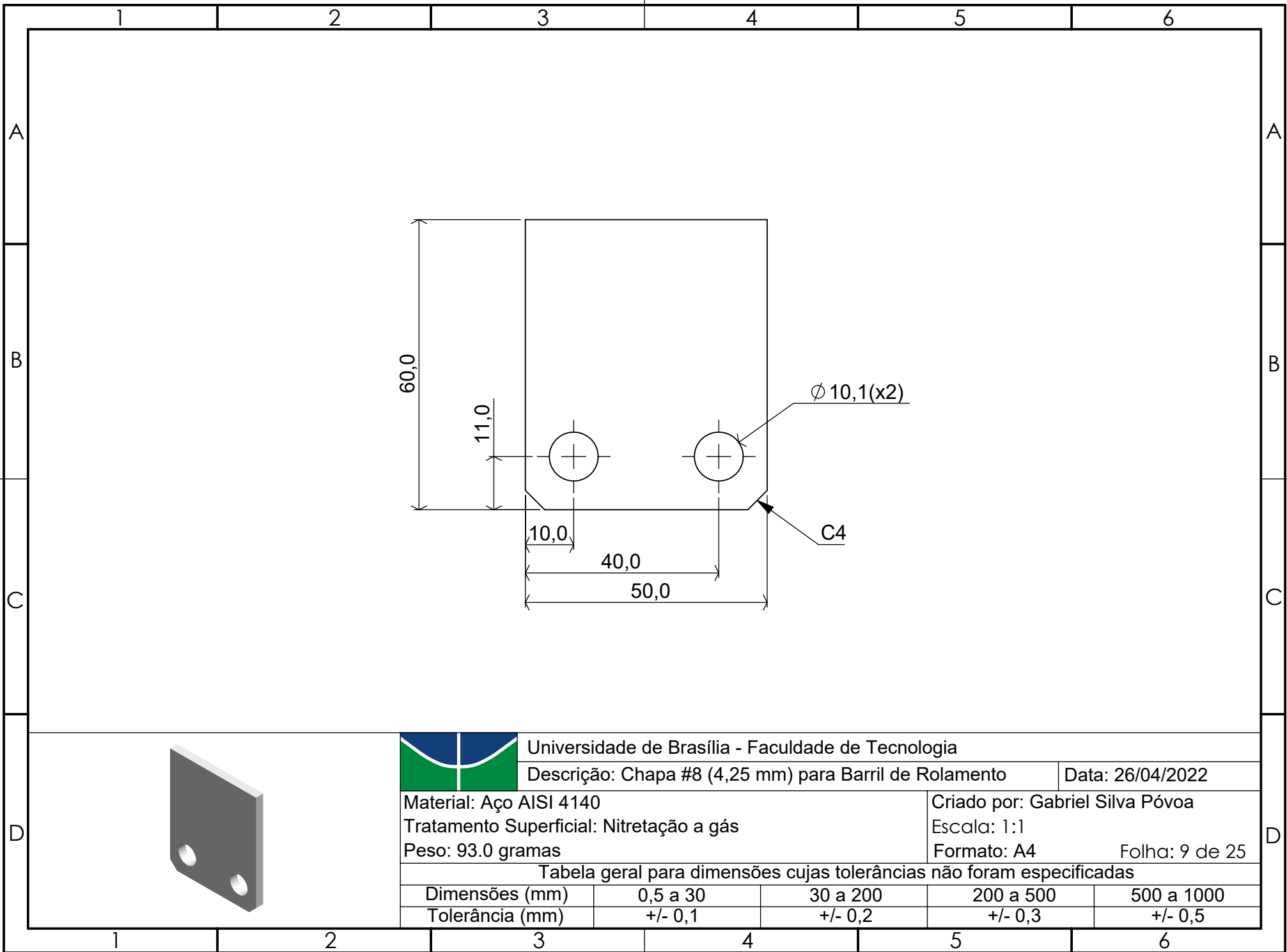
Escala: 2:3

Formato: A4

Folha: 8 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Chapa #8 (4,25 mm) para Barril de Rolamento

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 93.0 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

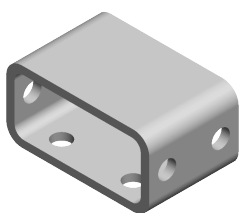
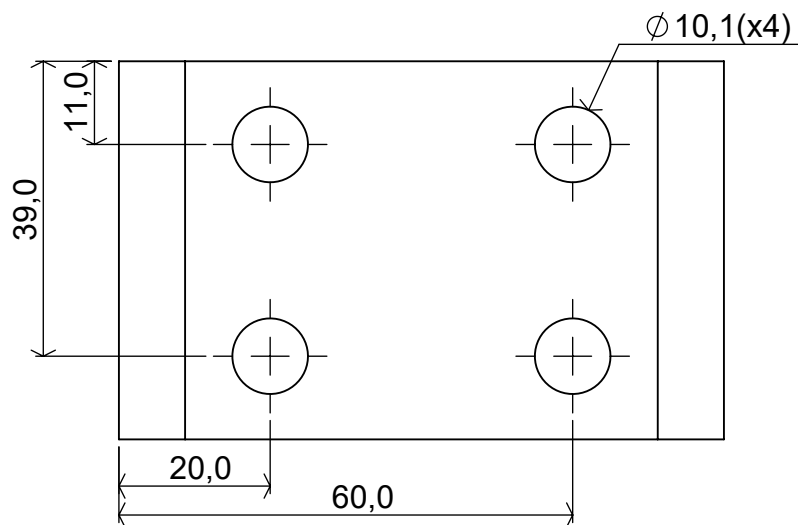
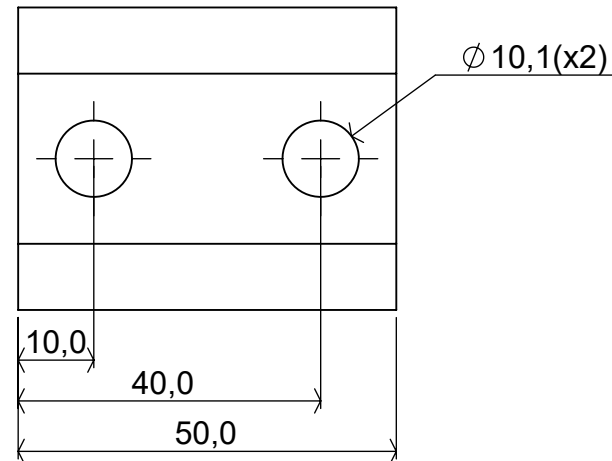
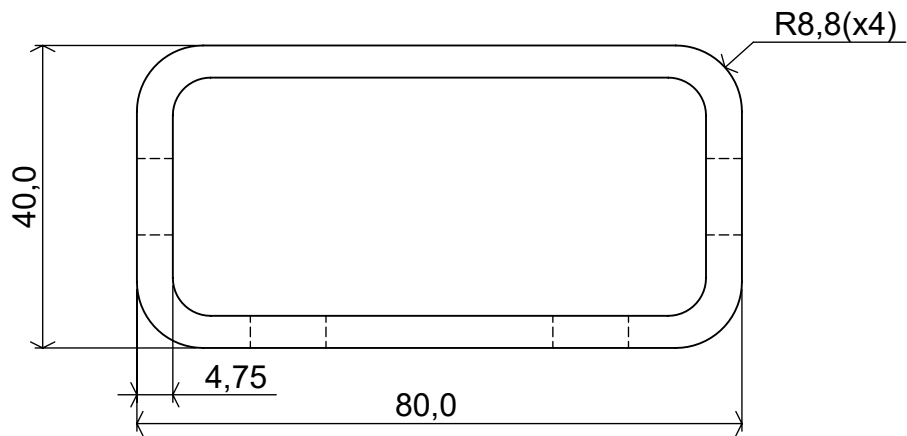
Escala: 1:1

Formato: A4

Folha: 9 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Tubo Retangular 80 x 40 x 4,75 mm

Data: 26/04/2022

Material: Metalon

Tratamento Superficial: Galvanização

Peso: 344.6 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 1:1

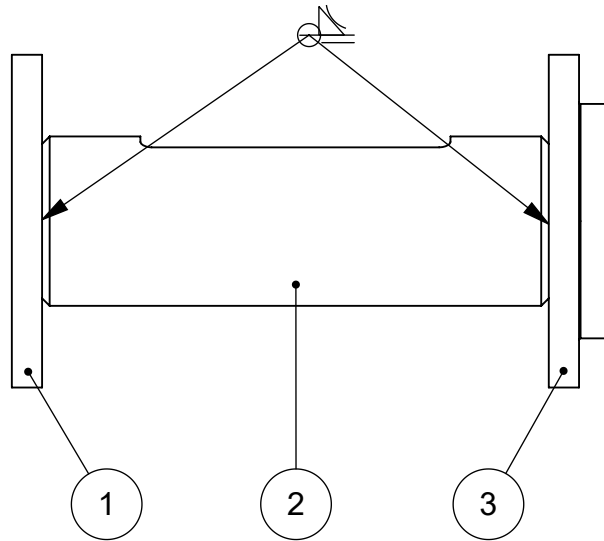
Formato: A4

Folha: 10 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

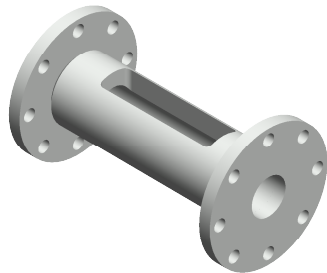
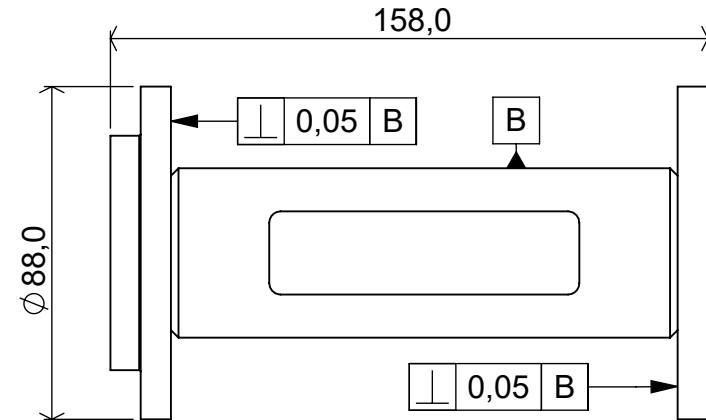
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Soldagem



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Disco de Conexão com Barril de Matriz	1
2	Tubo para Barril de Funil	1
3	Disco de Conexão com Barril de Rolamento	1

Dimensões Máximas



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Barril de Funil

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 1761.8 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

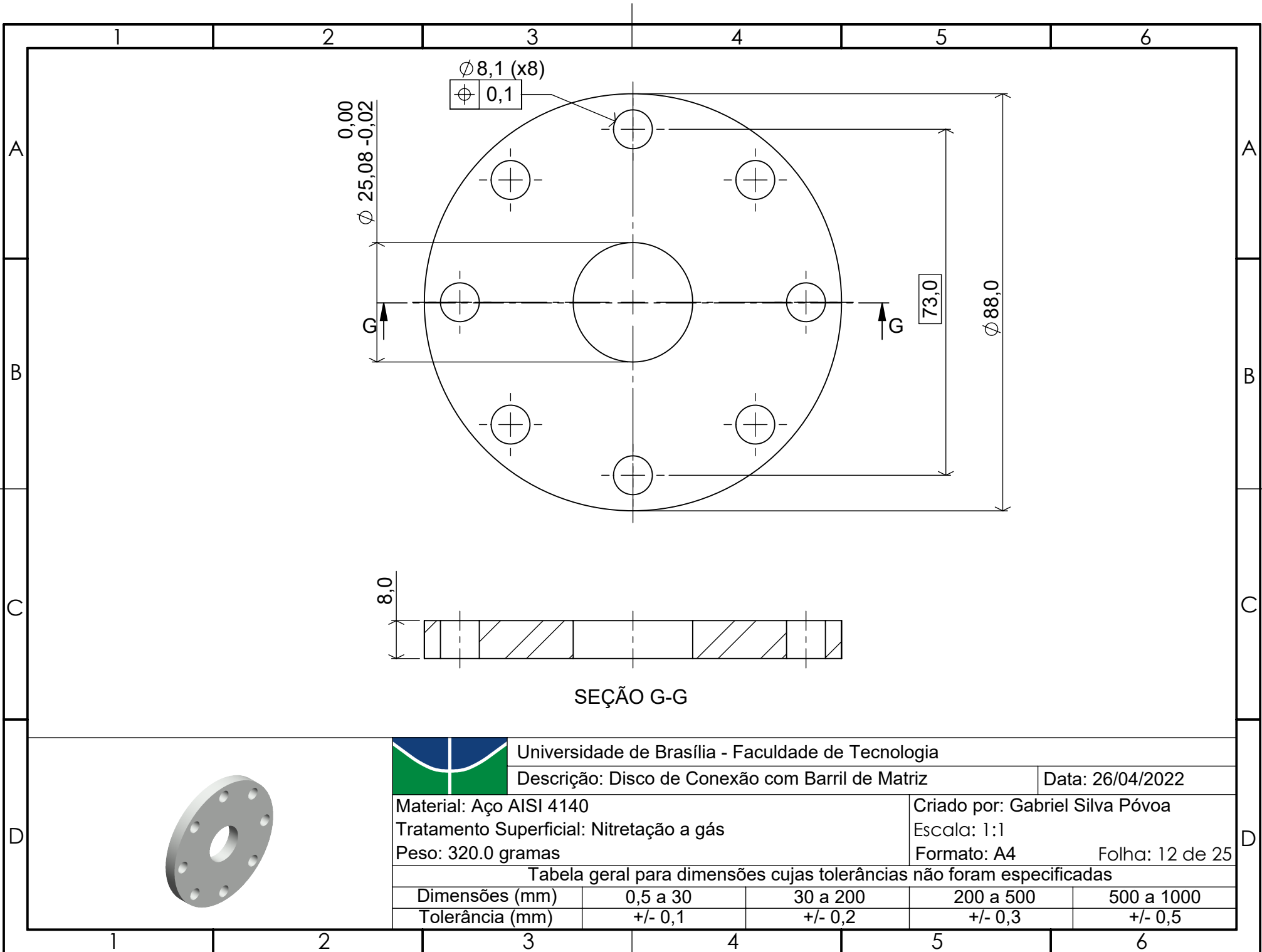
Escala: 1:2

Formato: A4

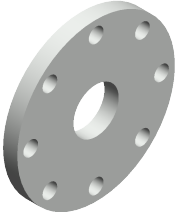
Folha: 11 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



SEÇÃO G-G



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Disco de Conexão com Barril de Matriz

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 320.0 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

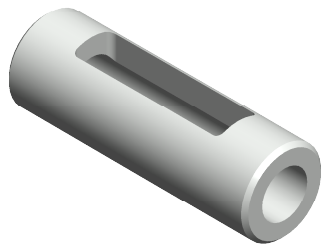
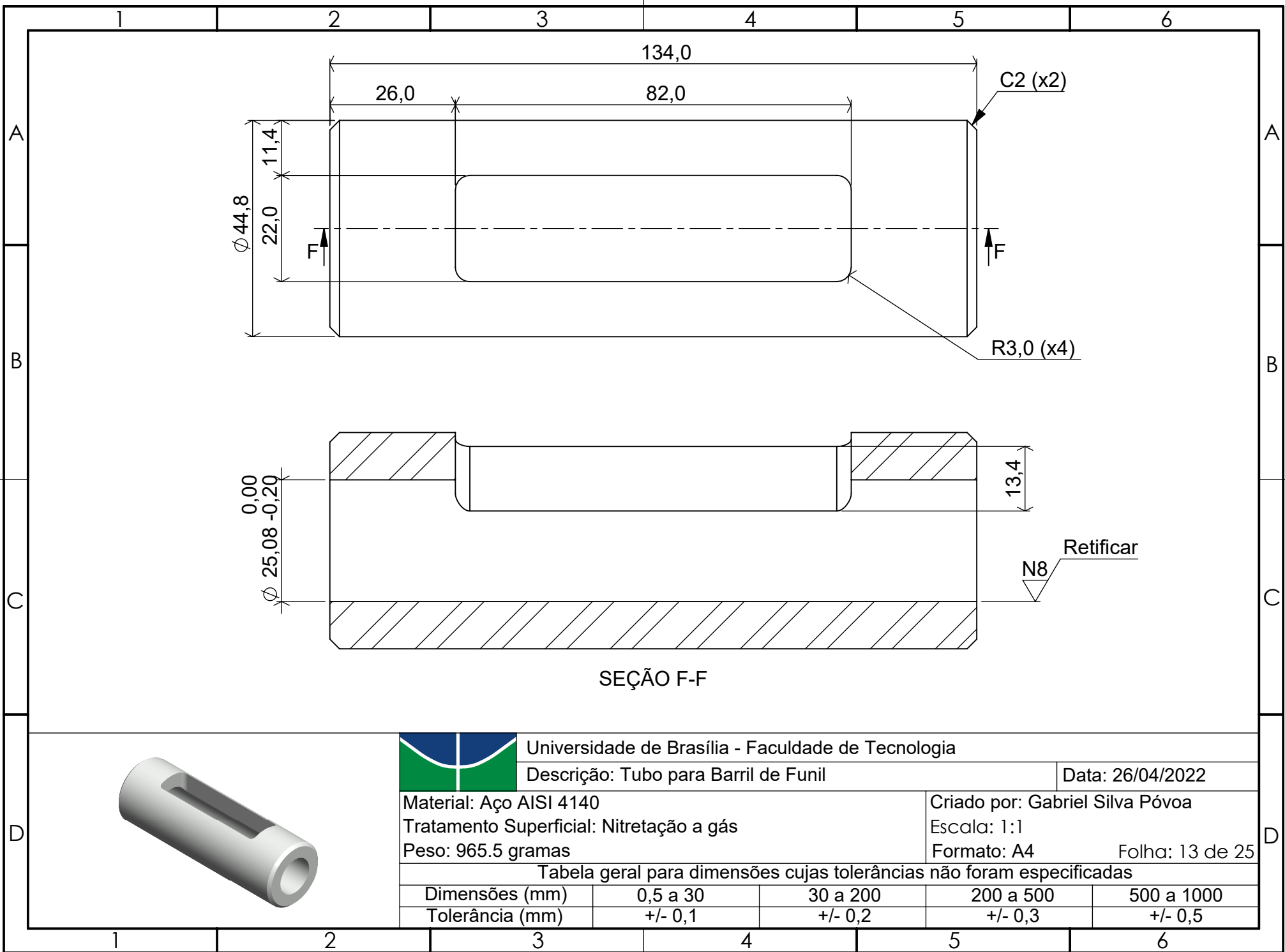
Escala: 1:1

Formato: A4

Folha: 12 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Tubo para Barril de Funil

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 965.5 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

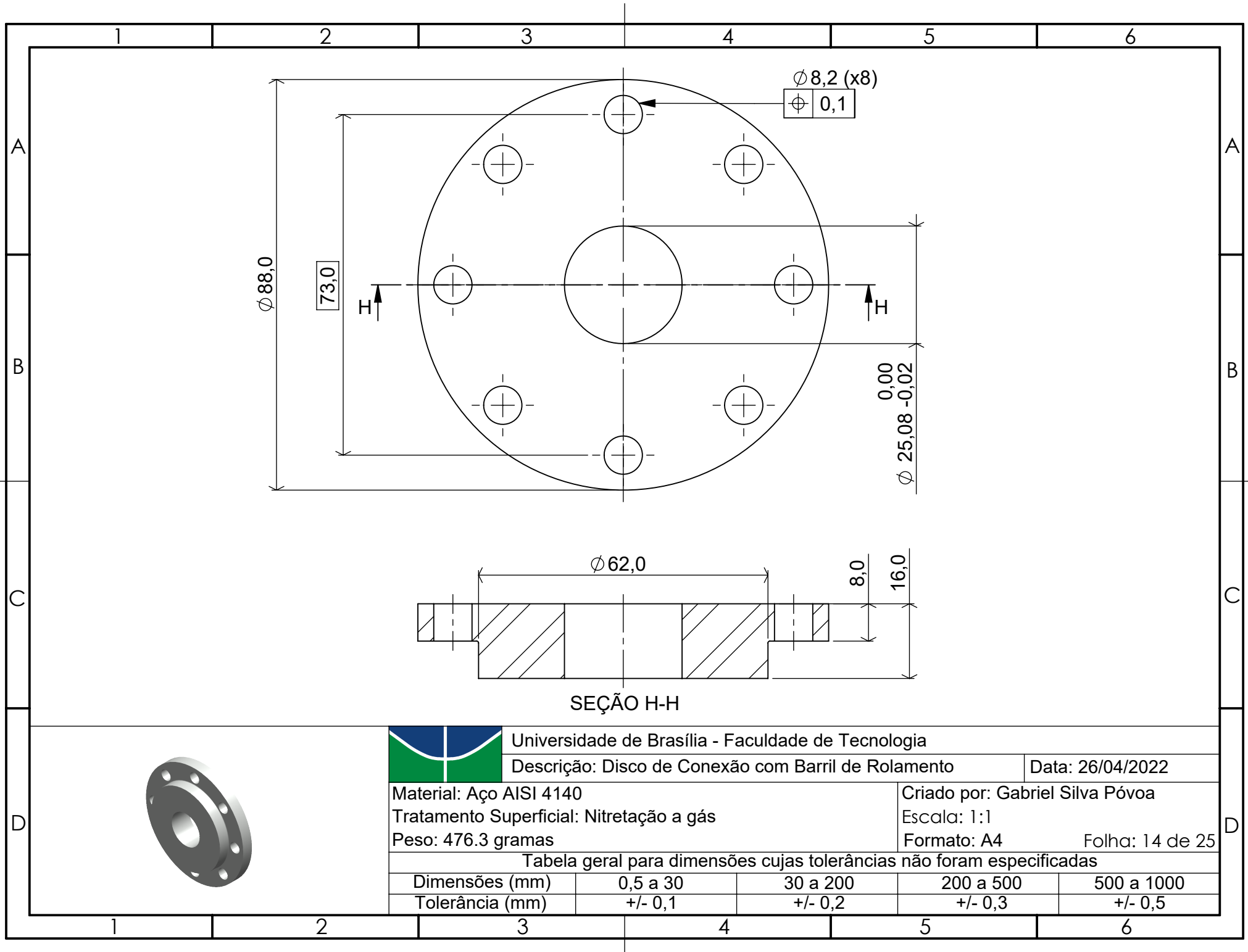
Escala: 1:1

Formato: A4

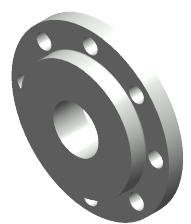
Folha: 13 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



SEÇÃO H-H



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Disco de Conexão com Barril de Rolamento

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 476.3 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 1:1

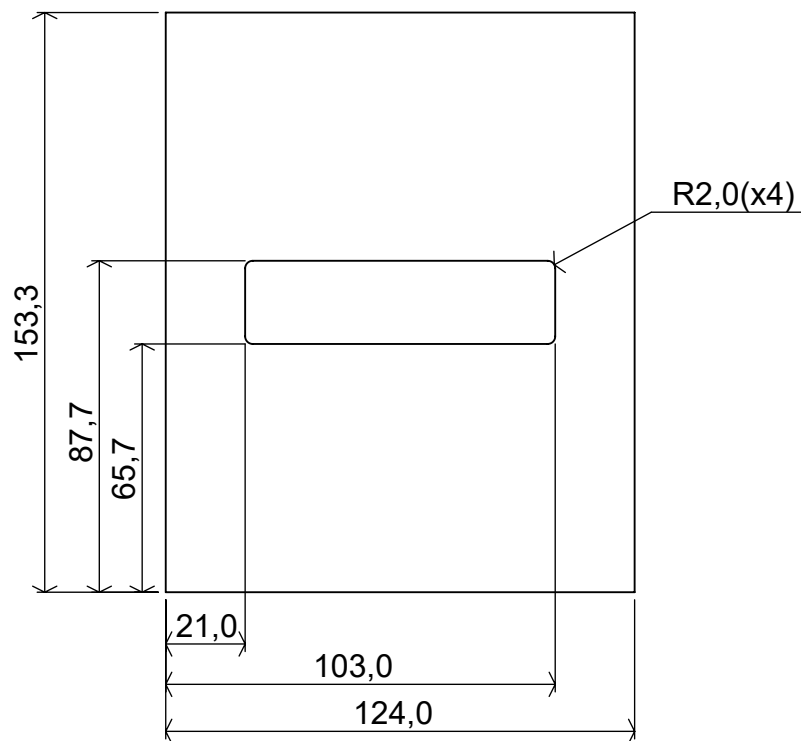
Formato: A4

Folha: 14 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

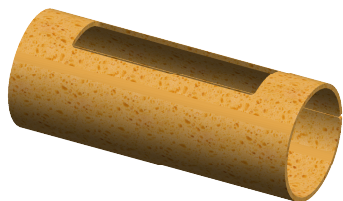
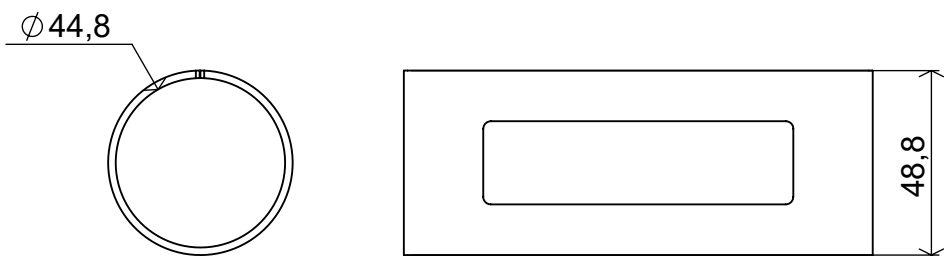
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Plano padrão



Características do Material	
Propriedade	Valor
Condutividade Térmica	0,6 W/(m.K)
Al2O3	47,0%
SiO2	52,8%

Vista da peça curvada



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Isolante térmico de Papel de Fibra Cerâmica 2 mm Data: 26/04/2022

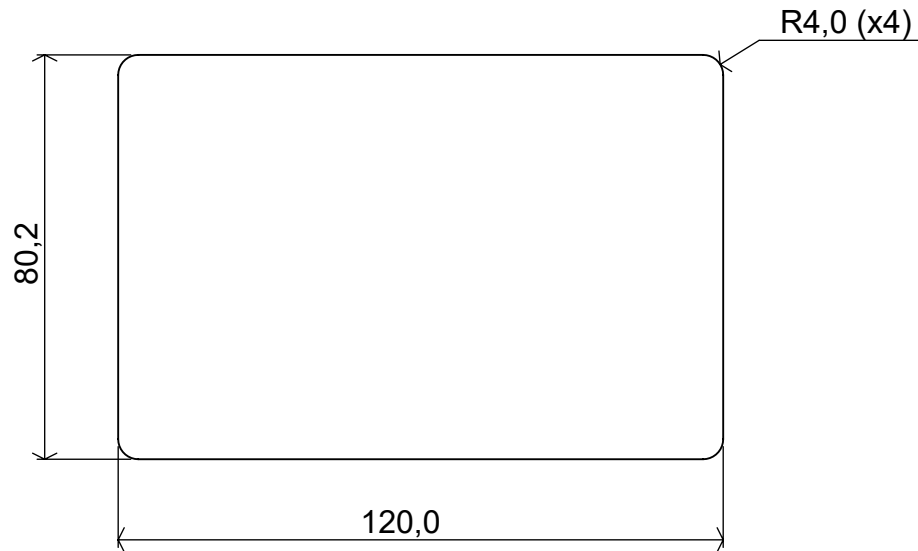
Material: Papel de Fibra Cerâmica
 Tratamento Superficial: Não se aplica
 Peso: 6.5 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa
 Escala: 1:2
 Formato: A4 Folha: 15 de 25

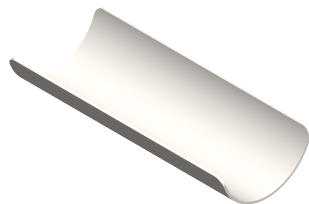
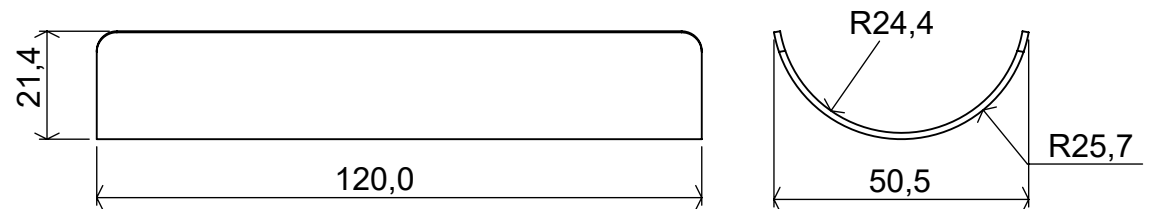
Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Plano padrão



Vista da peça curvada



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Chapa tubular #18 (1,20 mm) de apoio

Data: 26/04/2022

Material: Aço Carbono Simples

Tratamento Superficial: Galvanização

Peso: 81.6 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 2:3

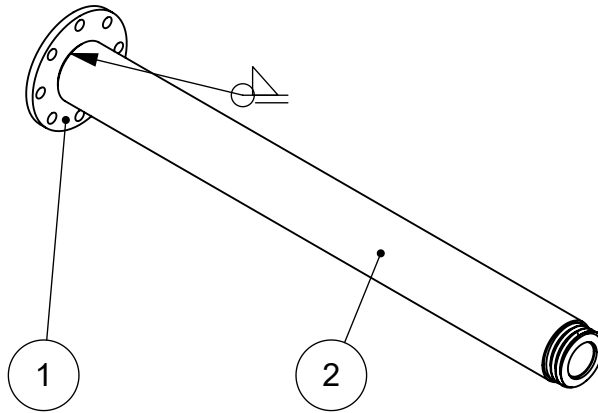
Formato: A4

Folha: 16 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

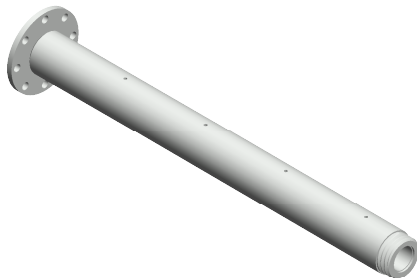
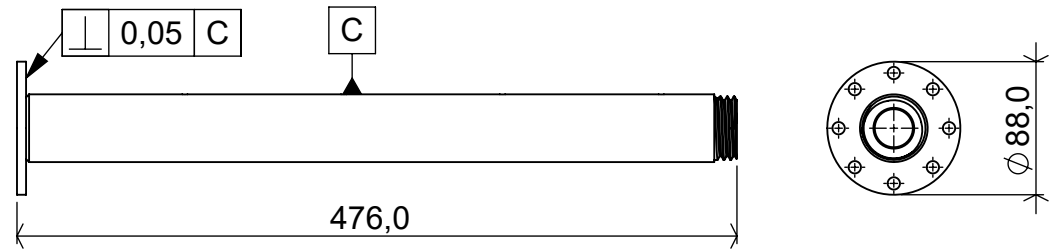
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Soldagem



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Disco do Barril de Matriz	1
2	Tubo do Barril de Matriz	1

Dimensões máximas



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Barril de Matriz

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 4119.3 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

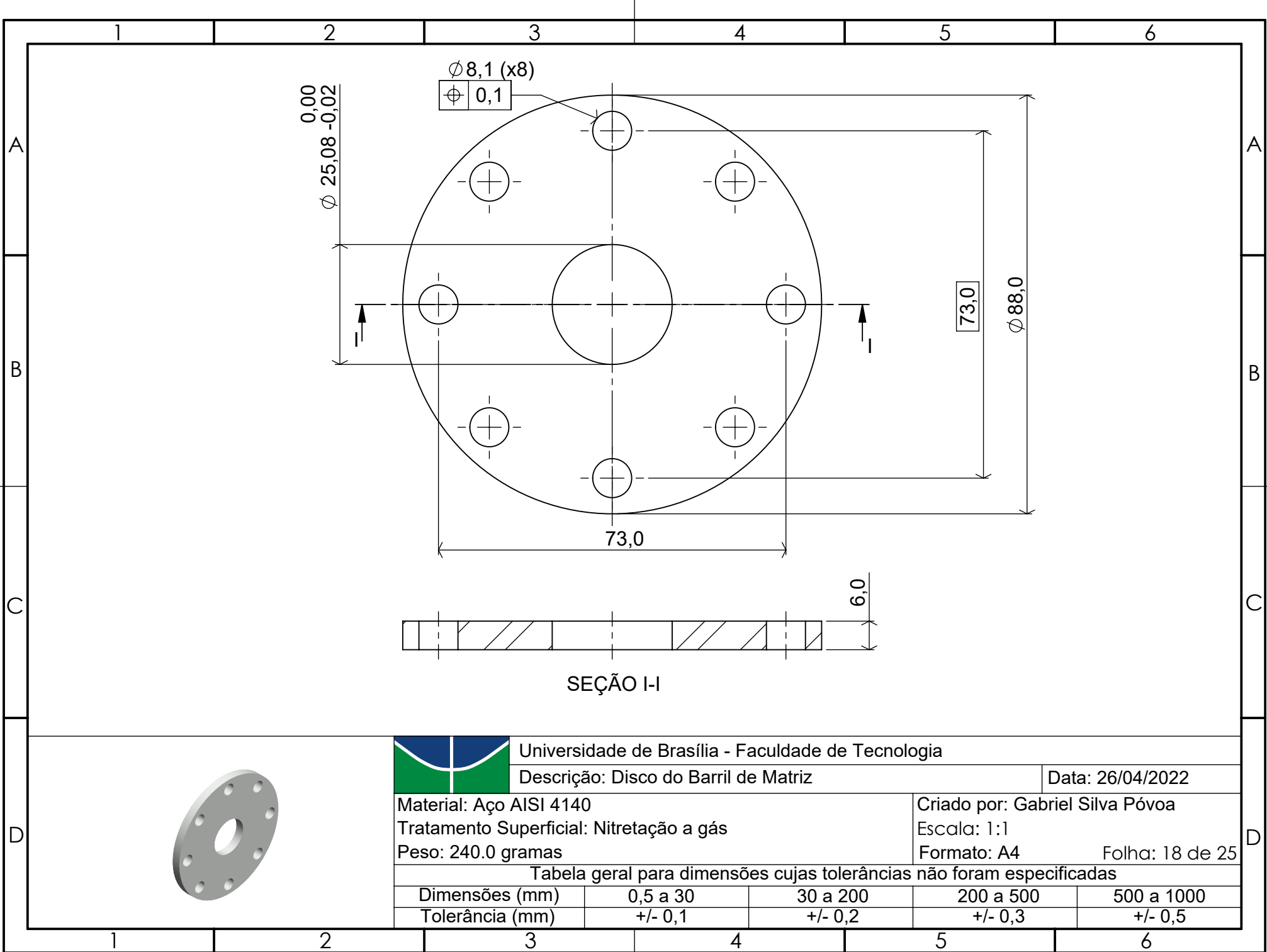
Escala: 1:5

Formato: A4

Folha: 17 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Disco do Barril de Matriz

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 240.0 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

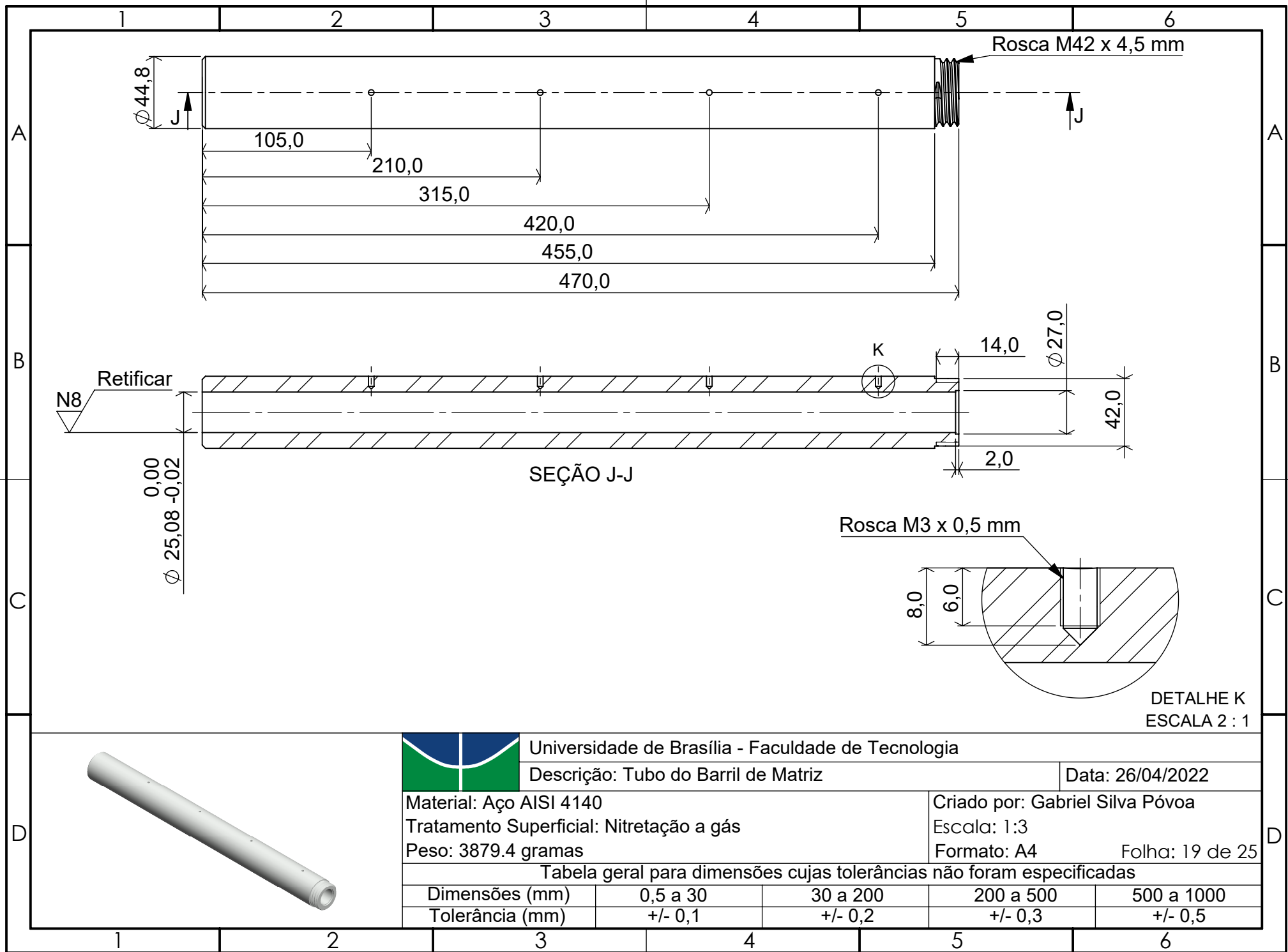
Escala: 1:1

Formato: A4

Folha: 18 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



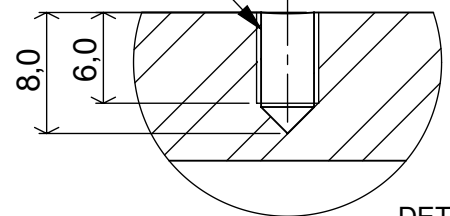
Retificar

N8

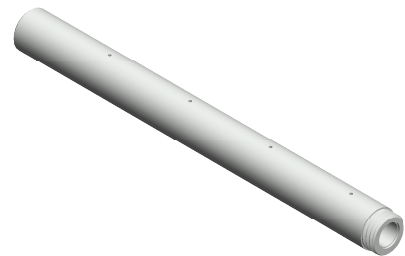
0,00
 ϕ 25,08 -0,02

SEÇÃO J-J

Rosca M3 x 0,5 mm



DETALHE K
 ESCALA 2 : 1



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Tubo do Barril de Matriz

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 3879.4 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

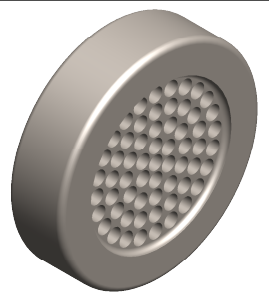
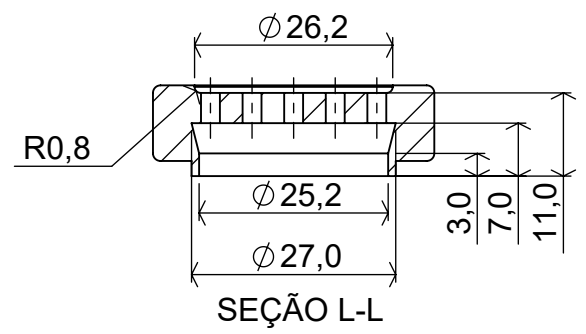
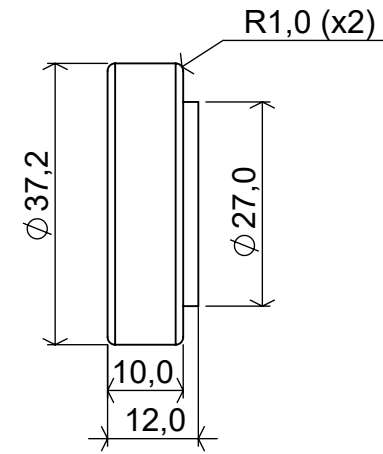
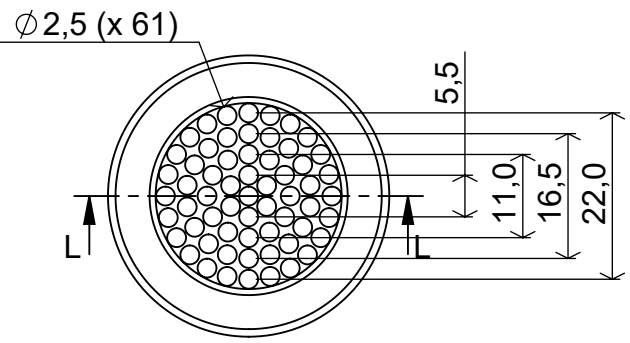
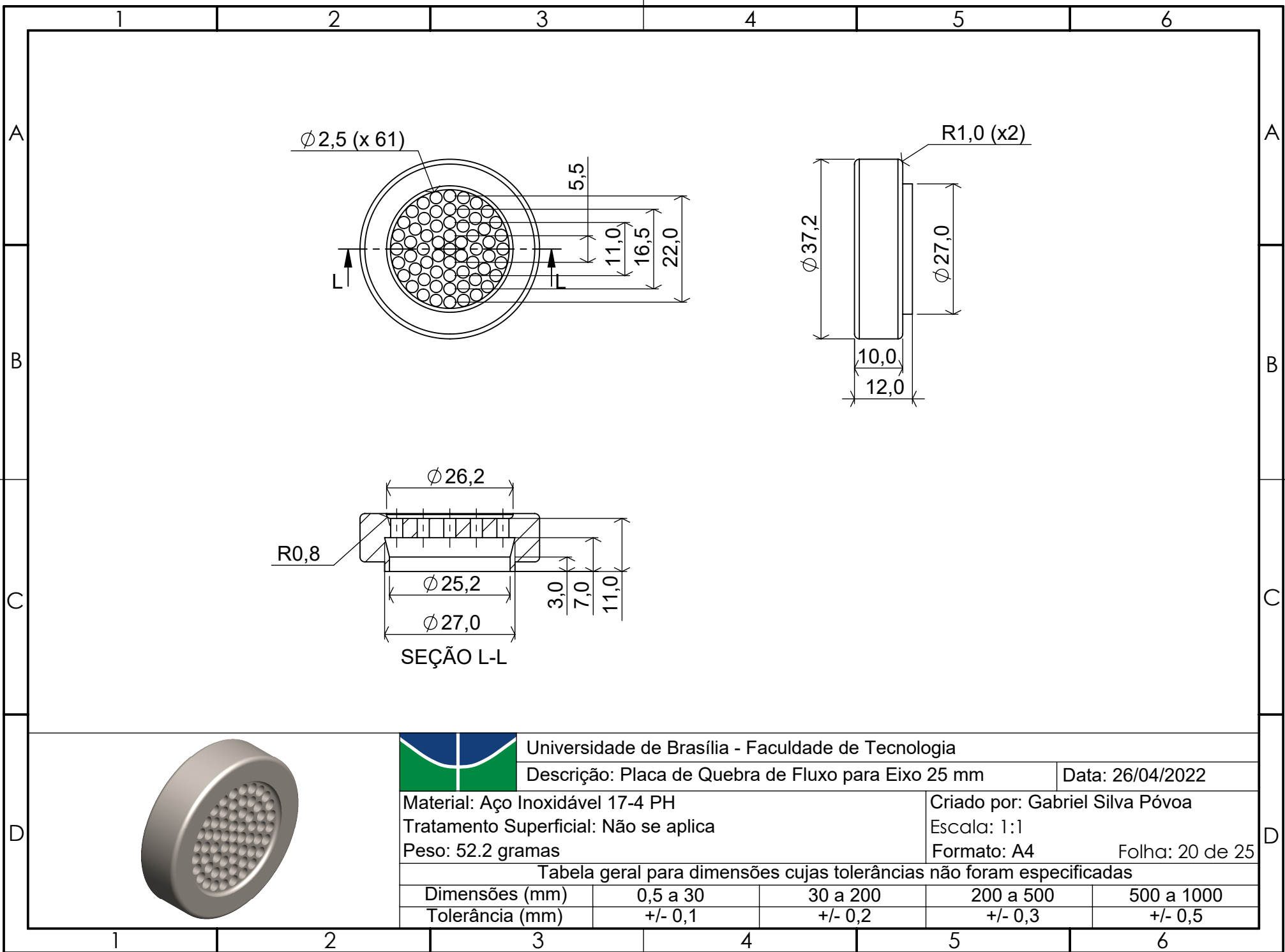
Escala: 1:3

Formato: A4

Folha: 19 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Placa de Quebra de Fluxo para Eixo 25 mm

Data: 26/04/2022

Material: Aço Inoxidável 17-4 PH

Tratamento Superficial: Não se aplica

Peso: 52.2 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

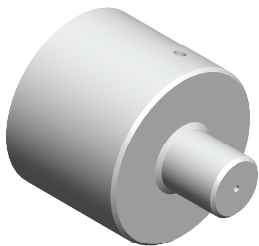
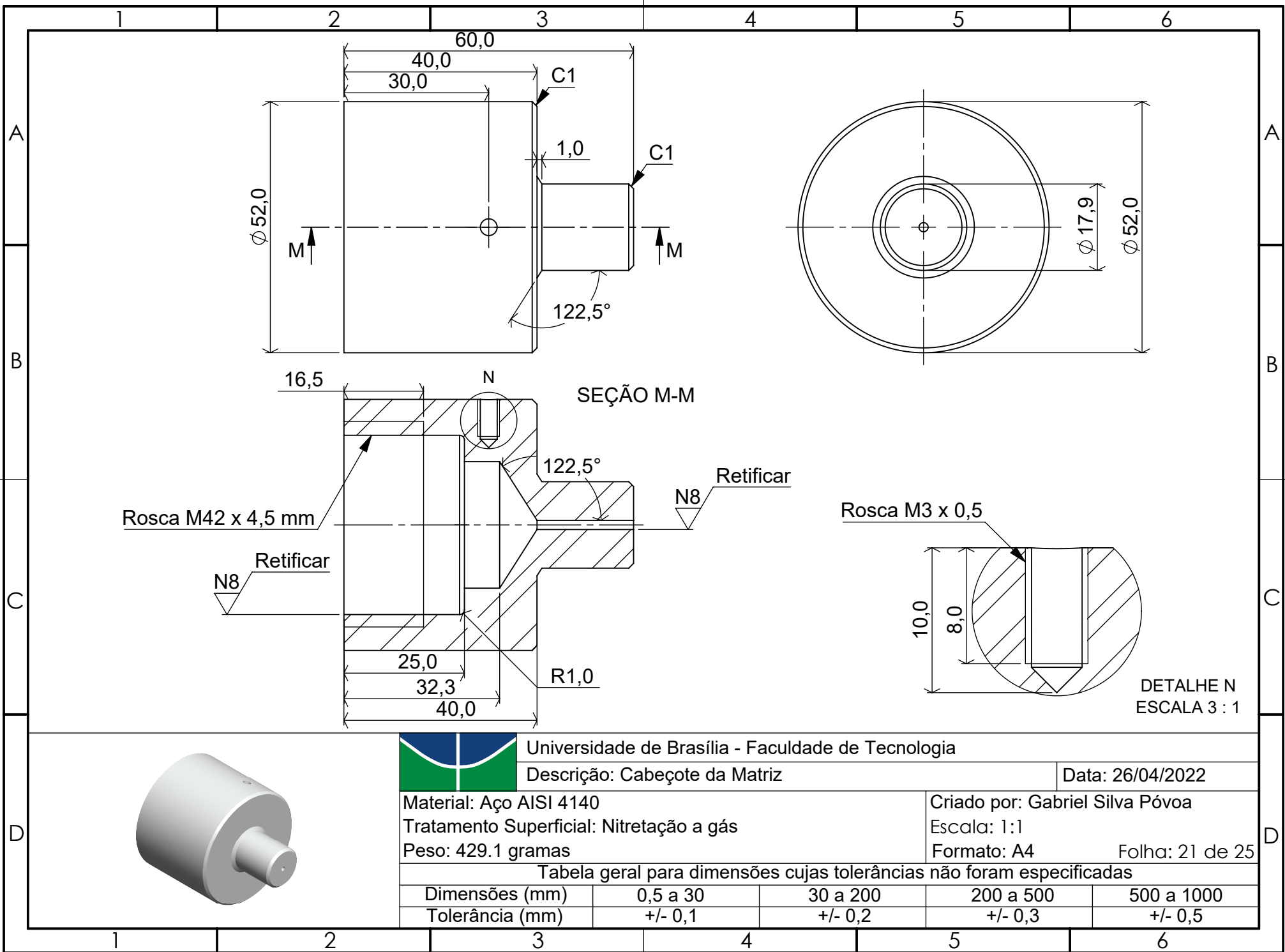
Escala: 1:1

Formato: A4

Folha: 20 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Cabeçote da Matriz

Data: 26/04/2022

Material: Aço AISI 4140

Tratamento Superficial: Nitretação a gás

Peso: 429.1 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 1:1

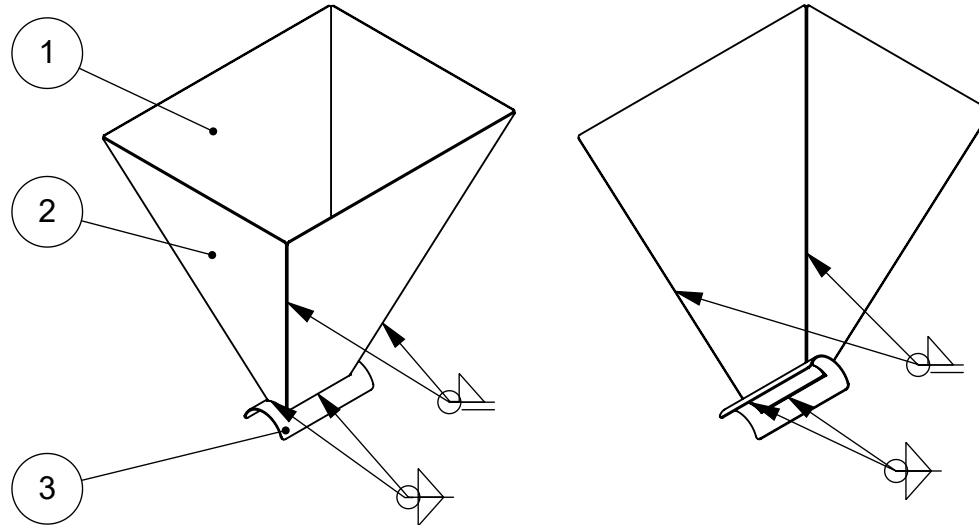
Formato: A4

Folha: 21 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

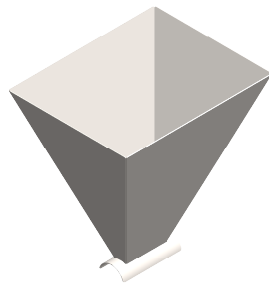
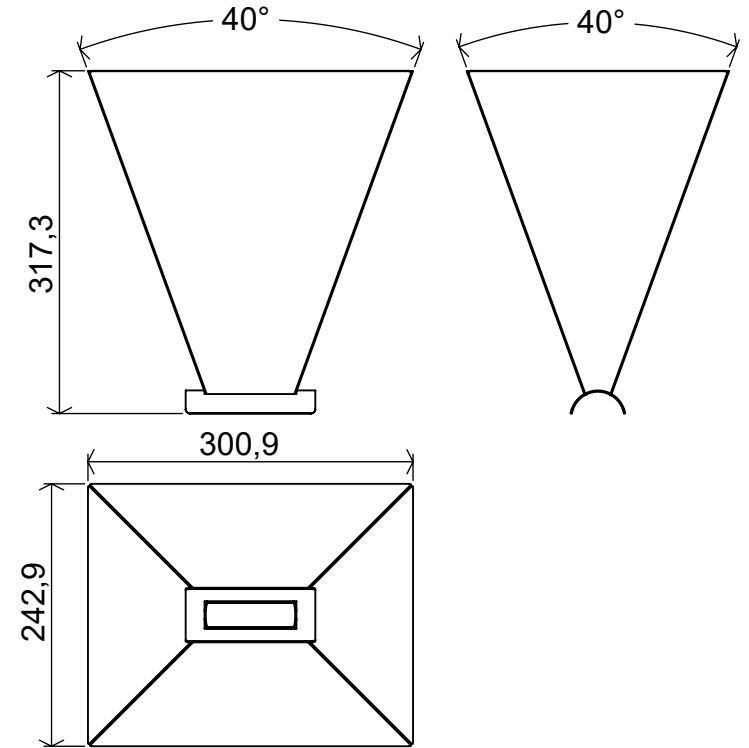
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5

Soldagem e lista de materiais



Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Chapa #18 (1,20 mm) para lateral do Funil	2
2	Chapa #18 (1,20 mm) para frontal do Funil	2
3	Chapa tubular #18 (1,20 mm) para Funil	1

Dimensões máximas



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Funil

Data: 26/04/2022

Material: Aço Carbono Simples

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Tratamento Superficial: Galvanização

Escala: 1:7

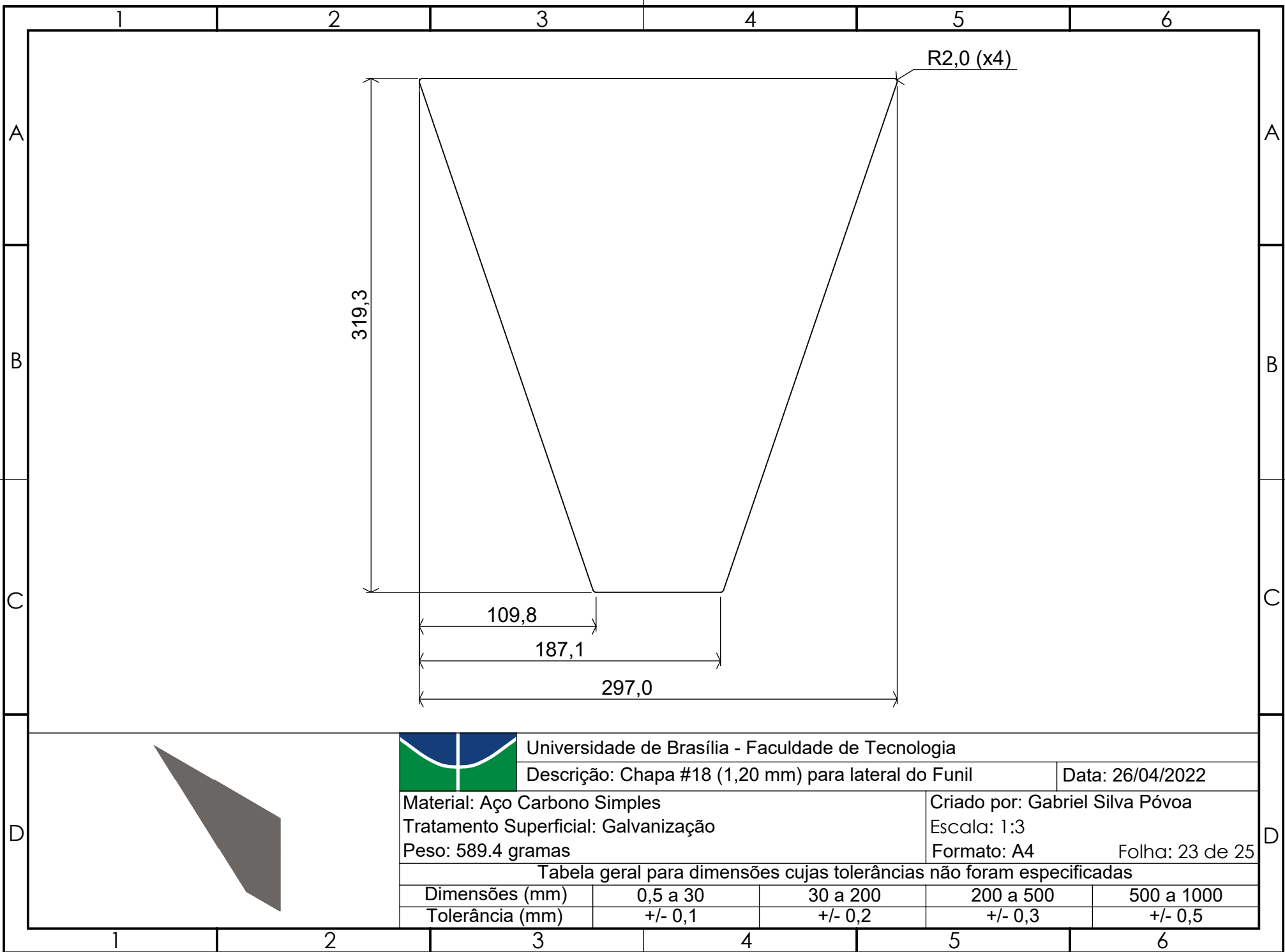
Peso: 2054.8 gramas

Formato: A4

Folha: 22 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Chapa #18 (1,20 mm) para lateral do Funil

Data: 26/04/2022

Material: Aço Carbono Simples

Tratamento Superficial: Galvanização

Peso: 589.4 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

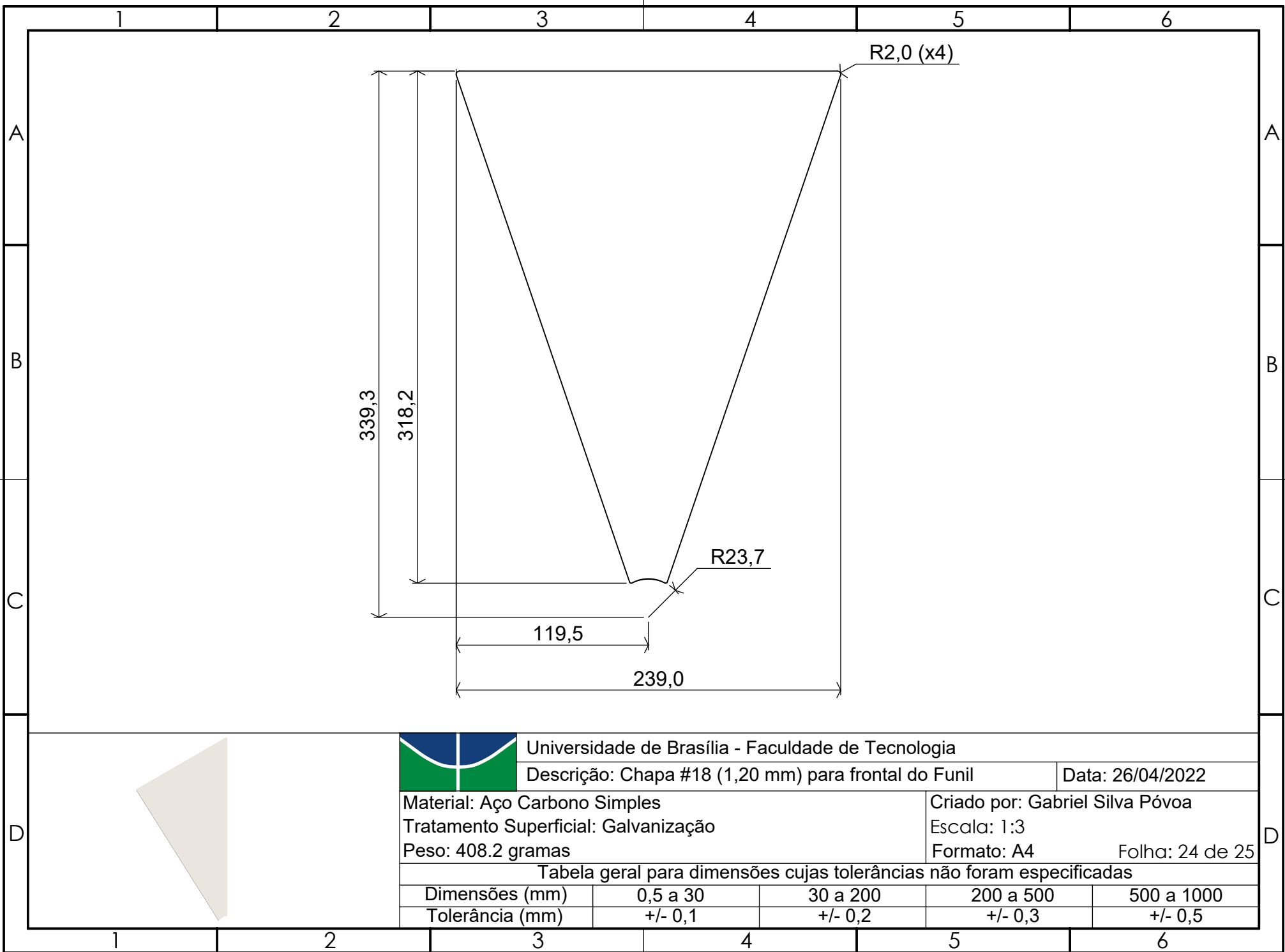
Escala: 1:3

Formato: A4

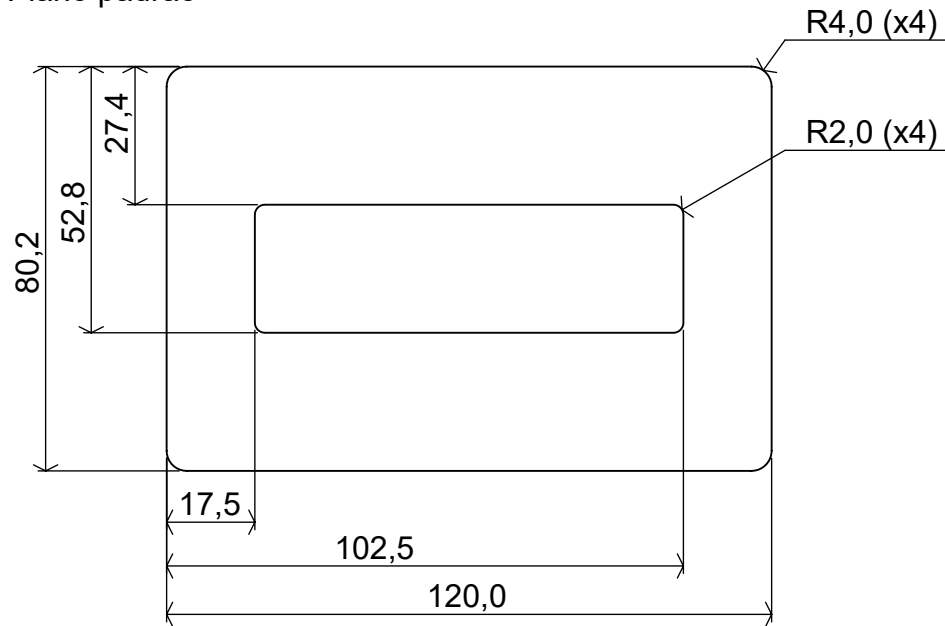
Folha: 23 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

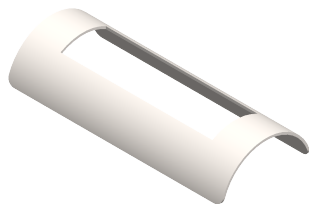
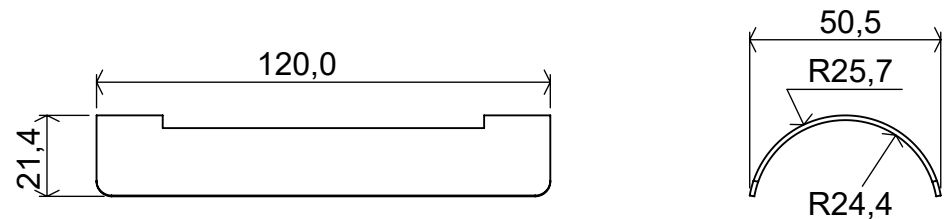
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5



Plano padrão



Vista da peça curvada



Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia

Descrição: Chapa tubular #18 (1,20 mm) para Funil

Data: 26/04/2022

Material: Aço Carbono Simples

Tratamento Superficial: Galvanização

Peso: 59.5 gramas

Criado por: Gabriel Silva Póvoa

Escala: 1:2

Formato: A4

Folha: 25 de 25

Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas

Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5