



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
INFRAESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

RODIMILSON COELHO RODRIGUES

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE EXTRUSORA MONORROSCA COM MATRIZ DE
EXTRUSÃO FILAMENTAR**

Tucuruí - PA

2024

RODIMILSON COELHO RODRIGUES

PROJETO E FABRICAÇÃO DE EXTRUSORA MONORROSCA COM MATRIZ DE EXTRUSÃO
FILAMENTAR

Defesa de Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: tecnologias sustentáveis.

Orientador: Profº.Dr. Walber Alexandre do Nascimento

Coorientador: Profº.Dr. Wassim Raja El Banna

Tucuruí – PA

2024

Banca Examinadora: Aprovado em 25/10/2024

Prof. Dr. Walber Alexandre do Nascimento
(Presidente e Orientador PPGINDE/NDAE/UFGA)

Prof. Dr. Tomás Jeferson Alves de Mélo
(Examinador Externo (PPG-CEMat/UFGC))

Prof. Dr. Wassim Raja El Banna
Examinador Interno (PPGINDE/NDAE/UFGA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBDSistema
de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

R696p Rodrigues, Rodimilson Coelho.
 Projeto e Fabricação de Extrusora Monorroscas com
 Matriz de Extrusão Filamentar / Rodimilson Coelho
 Rodrigues. — 2024.
 117 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Walber Alexandre do Nascimento
 Coorientador(a): Prof. Dr. Wassim Raja El Banna Dissertação
 (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e
 Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2024.

 1. Extrusora. 2. Projeto. 3. Dimensionamento. 4.
 Simulação. 5. Fabricação. I. Título.

CDD 620.1

Dedicatória

Para minha mãe, que sempre foi meu alicerce e minha inspiração. Sua força e amor me guiam em cada passo... É você que me impulsiona a ser melhor todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Jeová Deus pela vida, conhecimento, sabedoria e esperança.

Aos meus ilustres e amigos: o orientador, Prof. Dr. Walber Alexandre do Nascimento, que aceitou esse desafio de me orientar com toda sabedoria, comprometimento, paciência e compreensão, meu muitíssimo obrigado e ao meu coorientador Prof. Dr. Wassim Raja El Banna que pelo incentivo e apoio que me ajudaram a chegar até aqui.

Aos meus pais Raimundo e Maria Lucia e minha família Rodrigues como um todo que são meus exemplos e me impulsionam a buscar o melhor, vocês são o alicerce para a realização dos meus sonhos e obrigado por estarem sempre ao meu lado. Em especial, a minha esposa Maçandra e minhas filhas, Mellony e Myllena respectivamente, por todo companheirismo e paciência durante esta jornada.

A todos os professores da FEM do Campus Universitário de Tucuruí que de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

E a todos os meus amigos que de alguma forma foram um incentivo para que eu continuasse até o fim dessa jornada.

Projeto e Fabricação de Extrusora Monorroscas com Matriz de Extrusão Filamentar.

Grandes estabelecimentos industriais estão sempre à procura de tecnologias cada vez mais sofisticadas para monitorar os processos de fabricação. Este trabalho tem por objetivo o projeto e a construção de uma extrusora monorroscas laboratorial e sua matriz de extrusão para o processamento de polímeros e blendas poliméricas, além de viabilizar estudos na área de reciclagem mecânica de polímeros. A primeira etapa do trabalho envolveu a escolha do tipo de extrusora a ser fabricada. A segunda etapa consistiu no dimensionamento e projeto do equipamento utilizando o software Solidworks. Na terceira etapa, foram selecionados os tipos de materiais componentes mecânicos e elétricos para a montagem da extrusora. Na quarta etapa, realizaram-se os processos de fabricação da extrusora e montagem dos componentes mecânicos e elétricos. Na quinta etapa, fez-se a validação do equipamento, onde foram realizados testes de temperatura e vazão mássica, além de testes mecânicos e elétricos no processamento de um polímero termoplástico, que, nesse caso, foi o polipropileno (PP). A última etapa consistiu em simular uma matriz com perfil cilíndrico, visando estudar as características do fluxo de fusão do polímero e definir como a estrutura da matriz deve ser ajustada para obter o diâmetro desejado. Após o projeto da matriz no software Solidworks, uma simulação foi realizada no software Ansys. Neste caso, estudou-se, por meio da simulação, o comportamento reológico do fundido ao passar pela matriz, analisando-se em qual parte dela são observadas as altas e/ou baixas taxas de cisalhamento quando o polímero flui através da mesma. O fluxo de arrasto e o fluxo de pressão foram então extraídos dos parâmetros da simulação, o que levou ao cálculo do ponto de operação e da pressão operacional para a matriz. Também foi possível calcular a taxa de fluxo de massa e a queda de velocidade na parede da matriz, além de otimizar o perfil da mesma para o formato circular e o diâmetro desejado.

Palavras-chave: Extrusora. Projeto. Dimensionamento. Simulação e Fabricação.

Design and Manufacture of Single Screw Extruder with Filament Extrusion Die.

Large industrial establishments are always looking for increasingly sophisticated technologies to monitor manufacturing processes. This work aims to design and build a laboratory single-screw extruder and its extrusion die for processing polymers and polymer composites, in addition to enabling studies in the area of mechanical recycling of polymers. The first stage of the work involved choosing the type of extruder to be manufactured. The second stage consisted of dimensioning and designing the equipment using Solidworks software. In the third stage, the types of materials and mechanical and electrical components for assembling the extruder were selected. In the fourth stage, the manufacturing processes of the extruder and assembly of the mechanical and electrical components were carried out. In the fifth stage, the equipment was validated, where temperature and mass flow tests were performed, in addition to mechanical and electrical tests in the processing of a thermoplastic polymer, which, in this case, was polypropylene (PP). The last stage consisted of simulating a die with a cylindrical profile, aiming to study the characteristics of the polymer melt flow and define how the die structure should be adjusted to obtain the desired diameter. After designing the die in Solidworks software, a simulation was performed in Ansys software. In this case, the rheological behavior of the melt as it passed through the die was studied through the simulation, analyzing in which part of it the high and/or low shear rates are observed when the polymer flows through it. The drag flow and pressure flow were then extracted from the simulation parameters, which led to the calculation of the operating point and operating pressure for the die. It was also possible to calculate the mass flow rate and the velocity drop at the die wall, in addition to optimizing the die profile for the circular shape and desired diameter.

Keywords: Extruder. Design. Sizing. Simulation and Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Entalpia em função da temperatura para alguns polímeros.	20
Figura 2.2 – Escoamento indesejável durante o aquecimento da chapa.	22
Figura 2.3 – Esquema de uma máquina injetora.	24
Figura 2.4 – Vista em corte de uma extrusora de rosca única.	27
Figura 2.5 – Parâmetros geométricos da rosca de extrusão.	28
Figura 2.6 – Zonas da rosca de extrusão.	30
Figura 2.7 – Extrusora Dupla Rosca mostrando elementos do barril.	31
Figura 2.8 – Classes das extrusoras dupla-rosca quanto à distância entre as roscas.	32
Figura 2.9 – Classificação das extrusoras dupla rosca quanto ao sentido de rotação.	33
Figura 2.10 – Dinâmica de fluxo de uma extrusora dupla rosca.	33
Figura 2.11 – Parafuso de extrusão rosca simples.	35
Figura 2.12 – Parâmetros geométricos para rosca da extrusora.	36
Figura 2.13 – Condições Térmicas para Processamento do PP.	39
Figura 2.14 – Detalhes Internos do Canhão de Passagem do Material.	41
Figura 2.15 – Curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento.	42
Figura 2.16 – Gráfico da viscosidade aparente do PP em função da taxa de cisalhamento e temperatura.	44
Figura 2.17 – variação da pressão em uma extrusora	45
Figura 3.1 – Sistema de redução direto.	48
Figura 3.2 – Redutor de velocidade com redução 1/20.	49
Figura 3.3 – Resistencia elétrica tipo coleira.	51
Figura 3.4 – Inversor de frequência CFW-08.	52
Figura 3.5 – Fluxograma de um controle PID em malha fechada.	53
Figura 3.6 – Curva de resposta ao degrau unitário para um controlador PID.	54

Figura 3.7 – Controlador PID REX-C100FK07-MAN.....	54
Figura 3.8 – Termopar Tipo K.	55
Figura 3.9 – Termopares para controle de fusão cristalina.	55
Figura 3.10 – Etapas de trabalho.	57
Figura 3.11 – Vista explodida da extrusora.	64
Figura 3.12 – Nomenclatura e sistema de coordenadas	66
Figura 3.13 – Parafuso desenrolado.	70
Figura 3.14 – Curva característica Q-P da extrusora.	72
Figura 3.15 – Ponto operacional.	75
Figura 4.1 – Ponto de Operação para uma simulação	78
Figura 4.2 – Curva de velocidade na primeira simulação de 0,251 MPa.	79
Figura 4.3 – Distribuição das velocidades na simulação da matriz.	80
Figura 4.4 – Distribuição das velocidades no canal na simulação	81
Figura 4.5 – Evolução da pressão ao longo da matriz na simulação	81
Figura 4.6 – Distribuição das pressões na matriz na simulação.....	82
Figura 4.7 – Seção final do perfil extrudado de PP	82
Figura 4.8 – Perfil final em extrusão reversa.	84
Figura 4.9 – Modelagem e cortes da matriz com software de desenho 3D.....	85
Figura 4.10 – Detalhe da furação e fixação da resistência.....	86
Figura 4.11– Bancada da Extrusora.....	87
Figura 4.12 – Rosca de Extrusão	87
Figura 4.13 – Suporte do Canhão.	88
Figura 4.14 – Luva de fixação do eixo motor + eixo rosca	88
Figura 4.15 – Funil de Alimentação.....	89
Figura 4.16 – Matriz de Extrusão	89
Figura 4.17 – Canhão de aquecimento	90
Figura 4.18 – montagem do moto redutor.	91

Figura 4.19 – montagem do painel de comando	91
Figura 4.20 – Configuração do painel de comando	92
Figura 4.21 – Curva de aquecimento em função do tempo.....	93
Figura 4.22 – Comprimento do Filamento.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Polímeros utilizados em termoformagem.	19
Tabela 2.2 – Temperaturas de transição dos polímeros para termoformagem.	20
Tabela 2.3 – Parâmetros de Processamento dos Materiais Termoplásticos.....	39
Tabela 2.4 – Índice de consistência e expoente da lei de potência para alguns polímeros.....	43
Tabela 3.1 – 1º lista de materiais.	45
Tabela 3.2 – 2º lista de materiais.	46
Tabela 3.3 – Dados técnicos do Redutor de Velocidade.....	49
Tabela 3.4 – Eficiência de transporte de polímeros.	62
Tabela 4.1 – Variáveis para projeto da rosca.....	73
Tabela 4.2 – Relação de profundidade das zonas.	74

LISTA DE SIGLAS

GLP: Gás liquefeito de petróleo

PE: Polietileno

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PVC: Policloreto de Vinila

ABS: Acrolonitrila-Butadieno-Estireno

T_g : Temperatura de transição vítrea

T_m : Temperatura de fusão da fase cristalina

T_d : Temperatura de decomposição da massa polimérica

P : Fator de forma

EM: Extrusoras mono roscas

EDR: Extrusoras dupla-roscas

EDR-COR: extrusoras dupla rosca co-rotativas

EDR-COM: extrusoras dupla rosca contra rotativas

D_b : diâmetro interno do tubo

D_s : diâmetro externo da rosca

D_i : diâmetro da raiz na zona de alimentação

θ : ângulo da rosca

h_i : profundidade do canal na zona de alimentação

H_i : folga ente a raiz na zona de alimentação e a parede interna do tubo

L_s : comprimento do passo

e : espessura do dente (filete)

δ : folga radial

Rc: Taxa de compressão

L: Comprimento do parafuso de extrusão

W: Largura do filete

Lf: Comprimento na zona de alimentação

Lc: Comprimento na zona de compressão

Ls: Comprimento na zona de saída

hi: profundidade do canal da rosca (zona de alimentação)

hf: profundidade do final da rosca na zona de saída

hc: profundidade da zona de compressão

G: vazão mássica

ρ_0 : densidade

N : rotação angular

ηF : eficiência de transporte

P: potência para transportar o polímero

C_p : capacidade calorífica

ΔT : diferença de temperatura entre o polímero ao entrar na zona de alimentação e o polímero no estado fundido em °C

ΔH : calor latente de fusão do polímero, em kJ/kg.

Ps: potência realmente necessária na rosca de extrusão

Ts: torque atuante na rosca

TM: torque no eixo do motor

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo geral	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Processamento de Materiais Poliméricos	18
2.1.1 Termoformagem	18
2.1.2 Injeção	22
2.1.3 Extrusão	27
2.2 Matriz de extrusão	42
2.2.1 Lei das potências	42
2.2.2 Pontos operacionais da extrusora	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Materiais	45
3.2. Seleção dos Materiais	48
3.2.1 Redutor de velocidade	48
3.2.2 Aquecedores externos	50
3.2.3 Inversores de frequência	51
3.2.4 Controladores de temperatura PID	52
3.2.5 Leitores de temperatura tipo K	54
3.2.6 Escolha dos Materiais da Rosca e do Canhão	56
3.3 Métodos	56
3.3.1. Escolha do tipo de Extrusora	57

3.3.2. Dimensionamento da Rosca de extrusão	58
3.4 Seleção dos Materiais -----	64
3.4.1 Processo de Fabricação da extrusora	64
3.5 Equações de Vazão-----	65
3.5.1 Equações de Velocidade do Polímero Fundido	65
3.4.2 Cálculo do fluxo de Vazão.	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1. Escolha do tipo de Extrusora-----	73
4.2. Dimensionamento do Equipamento -----	73
4.3 Projeto da matriz e cálculo de ponto operacional -----	75
4.4.1 Curva operacional da extrusora na simulação.....	76
4.3.2 Curva matricial de simulação.....	77
4.3.3 Resultados da Simulação	79
4.3.4 Inchamento do Extrudado	82
4.3.5 Extrusão reversa.....	83
4.3.6 Desenho da Matriz de Extrusão.....	85
4.4 Construção da Extrusora -----	86
4.5. Montagem do Sistema de Controle -----	90
4.5.1 Validação do Equipamento	92
5. CONCLUSÃO	95
5.1 Considerações Finais-----	95
5.2 Sugestões para trabalhos Futuros -----	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
7. ANEXOS	102
7.1 Detalhes da Rosca, Canhão e Matriz. -----	102
7.2 Projeto da extrusora	104

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Ao longo dos últimos anos devido à sua versatilidade, leveza e principalmente seu preço, o uso de materiais poliméricos na fabricação de peças e componentes trouxe enormes benefícios para a sociedade, facilitando muitos dos processos conhecidos hoje. Por ser um material leve e maleável com baixa temperatura de operação, os polímeros apresentam grande vantagem em relação a outros materiais como exemplo os metais, cerâmicas e a madeira, onde os mesmos vêm sendo substituídos por materiais poliméricos em muitas aplicações (KANTOVISCKI, 2011).

Apesar dos polímeros serem amplamente utilizados pela humanidade, sua reciclagem ainda apresenta números que poderiam melhorar da ordem de 23% (KANTOVISCKI, 2011). Embora o custo do reaproveitamento dessa matéria prima seja baixo se comparado à síntese de polímeros "virgens", o processo é dificultado pela diversidade de tipos de polímeros, pois abrangem muitas variáveis. Isso pode se tornar um problema muito grande para a sociedade porque o material acaba sendo descartado em lugares inapropriados, dificultando muitas vezes o processo de reciclagem, acabando por causar inúmeros danos ambientais. Esses resíduos, em geral, levam muito tempo para sofrerem degradação espontânea e, quando incinerados em ambientes não controlados, produzem gases poluentes (MANO, BOELLI, 1994; MANCINI, 2004).

Um dos grandes desafios que a sociedade tem enfrentado hoje é proteger e cuidar do meio ambiente. Para reduzir o acúmulo de resíduos sólidos plásticos, muitos pesquisadores vêm se dedicando a reciclagem química, a reciclagem energética e a reciclagem mecânica. A reciclagem química é realizada quando é realizada a transformação dos resíduos em insumos químicos, combustíveis ou matéria-prima para a fabricação de novos produtos poliméricos. A reciclagem energética consiste na sua transformação em energia térmica, através da incineração, permitindo o aproveitamento do poder calorífico armazenado nos plásticos para gerar energia elétrica. Já a reciclagem mecânica consiste em transformar, através de equipamentos de processamento mecânico (como extrusoras, por exemplo) esse material, seja ele oriundo de sobra industrial ou de descarte doméstico e comercial, sem alterar sua estrutura química, de forma que possa ser utilizado na produção de novos produtos

poliméricos (BENTERS, 2008). À medida que este material é cada vez mais utilizado, diversas tecnologias de fabricação foram desenvolvidas visando o aprimoramento e diminuição dos custos em relação ao uso dessa matéria-prima. O processamento desses polímeros é feito através de várias técnicas de produção, sendo os principais: moldagem por sopro, rotomoldagem, termoformagem, injeção e extrusão (KANTOVISCKI, 2011).

Como descrito anteriormente, uma das maneiras econômicas de se reciclar esses polímeros é através da reciclagem mecânica em extrusoras, no entanto, o custo de aquisição de tais equipamentos ainda é alto e a maioria das empresas que as utiliza faz isso exclusivamente para produção e não para reciclagem ou mesmo pesquisa (SPINACÉ; PAOLI, 2004). De acordo com o apresentado, este trabalho tem como finalidade o projeto, construção e validação de uma extrusora monorroscas laboratorial para pesquisa, em blendas e compósitos poliméricos, focada na reciclagem desses materiais.

1.2. Justificativa

A importância desta pesquisa é desenvolver e construir uma extrusora laboratorial que seja viável economicamente e que dê suporte ao Laboratório de Blendas e Compósitos poliméricos, do curso de Engenharia Mecânica do CAMTUC/UFGA, em suas pesquisas na área de reciclagem de materiais poliméricos. Além disso, a aquisição de um equipamento desses foi orçado na empresa LGMT equipamentos industriais e ficou no valor R\$ 226.000,00 isso é muito elevado quando comparado com a sua produção *in loco*, já que temos *know how*, na Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí da UFGA, para o desenvolvimento do projeto e sua fabricação de forma mais econômica. Essa pesquisa também faz parte de uma série de outros projetos que estão sendo desenvolvidos na universidade, como a fabricação de robôs 3D para manufatura aditiva no processo de soldagem, forno para fundição de alumínio com injeção direta de GLP e um projeto de um triturador para reduzir a granulometria de embalagens poliméricas para depois serem processadas em extrusora.

Um outro fator importante, em relação esse projeto, é o desenvolvimento de pesquisas no Campus de Tucuruí, relacionados a compósitos e blendas poliméricas. Uma infinidade de possibilidades de estudos pode ser realizada através dos

extrudados obtidos com esta extrusora, além de pesquisas de parâmetros de processo que podem ser utilizados e modificados no equipamento para melhorar o desempenho dos produtos, sempre buscando a otimização do processo. Além disso, este equipamento pode ser aproveitado pelos professores durante as aulas laboratoriais para apresentação do conteúdo de processamento de polímeros. Portanto, todos esses fatores considerados justificam esse trabalho, levando em consideração que tal equipamento será um facilitador de inúmeras pesquisas que serão realizadas em relação ao estudo de compósitos e blendas poliméricas, além das variáveis do processo de extrusão que estão ligadas com a reologia de processamento desses materiais.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O principal objetivo deste estudo foi de projetar e construir uma extrusora monorroscas laboratorial com matriz de extrusão, para processamento de polímeros e compósitos poliméricos, visando também o processo de reciclagem mecânica desses materiais.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Realizar o dimensionamento do equipamento através de equações matemáticas e simulação computacional.
- b) Projetar o equipamento com os dados encontrados.
- c) Realizar testes de temperatura, velocidade da rosca e torque;
- d) Processar um polímero termoplástico para validar o equipamento;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será descrito, nos tópicos a seguir, os principais tipos de processamentos e equipamentos utilizados em conformação de polímeros termoplásticos, dando uma maior ênfase ao processo de extrusão.

2.1 Processamento de Materiais Poliméricos

2.1.1 Termoformagem

Termoformagem é um conceito genérico para um grupo de processos incluindo: conformação a vácuo, conformação positiva, conformação por sopro ou assistida pneumáticamente, conformação assistida por pistão, etc. Também é considerado um dos métodos mais antigos de formação de objetos a partir de polímeros (THRONE, 2008).

Para Dharia (2006), uma mudança na resistência mecânica de um material com alteração na taxa de deformação pela temperatura caracteriza um material que pode ser termo formado. Trata-se, portanto, de uma inter-relação entre características particulares de cada material, do processo e da técnica aplicada para obtenção do produto acabado.

Para poderem ser termo formados os polímeros precisam ser do tipo termoplásticos. Basicamente eles são classificados, levando em consideração a sua característica térmica, em polímeros termoplásticos. Polímeros termoplásticos são aqueles em que geralmente podem ser fundidos e resfriados repetidamente sem mudança significativa nas propriedades básicas, sendo, portanto, facilmente moldáveis quando fundidos. Tais tipos incluem: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Policloreto de Vinila (PVC), Policarbonato (PC) etc. Portanto, as propriedades dos polímeros variam amplamente e determinam suas aplicações industriais. A Tabela 2.1 lista algumas das propriedades dos principais polímeros termoplásticos (termo formáveis).

Tabela 2.1 – Polímeros utilizados em termoformagem.

Semicristalino
PP (Polipropileno) – Elevada resistência ao calor, elevada resistência química
PE (Polietileno) – Tenacidade, elevada resistência química
Amorfo
PC (Policarbonato) – Resistência as condições de esterilização, auto extingüível, excelente transparência
PMMA (Polimetacrilato de metila) – Ampla colorabilidade, excelente transparência, resistência a agentes atmosféricos, estabilidade a luz
PS (Poliestireno) – Dureza e rigidez, boa colorabilidade, ótima brilhatura, ótima transparência
PVC (Policloreto de vinila) – Elevada rigidez ou flexibilidade, resistente a abrasão, elevada resistência química e auto extingüível
ABS (Acrolonitrila-Butadieno-Estireno) – Boas propriedades mecânicas, dureza, resiliência e tenacidade

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2001).

Durante a termoformagem, a temperatura é um parâmetro essencial para o processamento do polímero. Dessa forma, quando o material está em fases diferentes (cristalina ou amorfa), pode ocorrer alguma variação entre várias propriedades que diferem umas das outras quando processadas. Portanto, controlar a amplitude de temperatura e a uniformidade do material durante todas as etapas do processo de termoformagem é fundamental para obter os resultados desejados (SILVA, 2013).

Outro fator importante a ser considerado é que a entalpia não é constante na faixa de temperatura de operação durante o processamento para os diferentes polímeros utilizados, especificamente os semicristalinos. Para o polipropileno, por exemplo, devido ao aumento do fluxo de calor no material, a temperatura interna do polímero permanece quase constante durante a transição de fase cristalina, logo abaixo da temperatura de fusão cristalina. Isso dificulta muito o controle do processo apenas pelo monitoramento da temperatura do material (SILVA, 2013).

A Figura 2.1 apresenta as curvas características de entalpia de alguns polímeros. Nota-se o comportamento não linear da curva em algumas regiões de transição para alguns dos materiais mostrados (ILLIG, 2001).

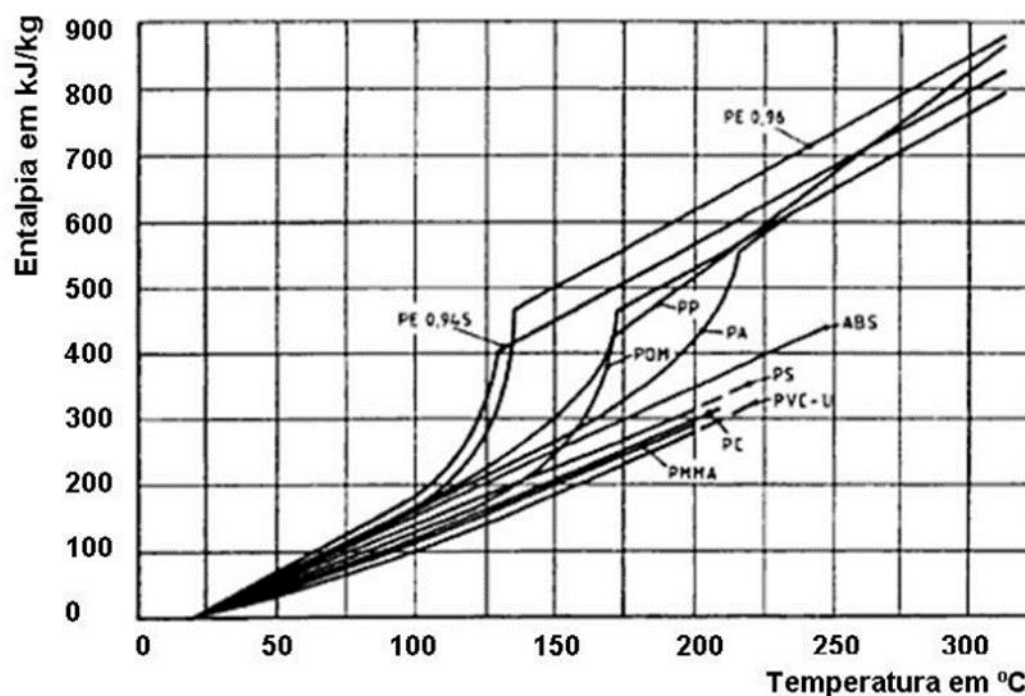


Figura 2.1 – Entalpia em função da temperatura para alguns polímeros.
Fonte: Illig (2001).

Devido às propriedades de transição de fase cristalina (ou vítrea) para amorfo, cada polímero possui uma faixa ideal de temperatura de processamento de termoformagem, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Temperaturas de transição dos polímeros para termoformagem.

Material	Densidade (g/cm ³)	T _g (°C)	T _d (°C)	T _m (°C)
PEAD Polietileno de alta densidade	0,95	-120 – -140	130 – 137	330 – 450
PEBD (Polietileno de baixa densidade)	0,93	-95 – -130	106 – 115	330 – 450
PP (Polipropileno)	0,90	-10	170	330 – 410
EP (Epóxico)	1,17	-30	128 – 145	330 – 410
PS (Poliestireno)	1,05	-85 – 105	240	280 – 440
PTFE (Politetrafluoretileno)	2,20	27	330	510 – 540

PVC (Policloreto de vinila)	1,40	75 – 105	210 – 310	200 – 300
PVDC (Policloreto de vinilideno)	1,70	-18	210	225 – 275
PVF (Polifluoreto de vinila)	1,38	40	200 – 235	370 – 480
PAN (Poliacrilonitrila)	1,18	97	320	250 – 280
PMMA (Polimetacrilato de metila)	1,18	65	160	170 – 230
PET (Politereftalato de etileno)	1,38	81	265	280 – 305
PA6 (Poliamida 6)	1,14	40 – 85	220	310 – 380
PC (Policarbonato)	1,20	147	225	420 – 620

Fonte: Adaptado de Turci (2007).

Onde, de acordo com a Tabela 2.2: T_g representa a temperatura de transição vítrea, T_m a temperatura de fusão da fase cristalina e T_d a temperatura de decomposição da massa polimérica.

A temperatura máxima de uso do polímero é determinada pela temperatura de amolecimento. Para polímeros altamente cristalinos, como PP, esta temperatura está próxima e ligeiramente abaixo da temperatura de fusão cristalina. Se forem utilizadas temperaturas muito altas ou muito próximas à temperatura de fusão cristalina, pequenos cristais começam a fundir em grande escala, o que pode prejudicar a estabilidade térmica, dimensional e mecânica da chapa antes da sua conformação e transformação em um produto (CANEVAROLO, 2002).

A janela de fusão cristalina maior permite que a folha de plástico retenha sua resistência mecânica e estabilidade térmica por mais tempo durante a fusão da rede cristalina. Dessa forma, evita-se o estiramento excessivo da chapa antes de entrar na matriz, conforme mostra a Figura 2.2. Em geral, se a temperatura da chapa for muito baixa, o polímero será transportado com segurança através do forno para o molde, mas isso pode levar ao acúmulo excessivo de tensão interna, o que pode causar problemas com estiramento assistido, conformação, corte e automação. Por outro lado, se a temperatura for muito alta, a resistência mecânica da chapa será reduzida, facilitando o escoamento precoce, o que favorece o efeito de flacidez.

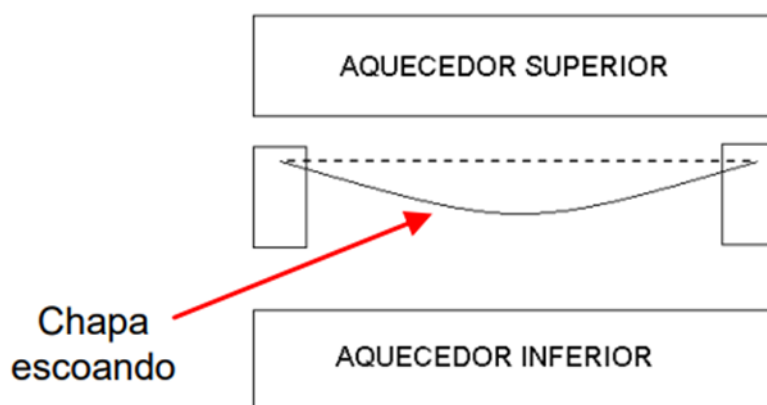


Figura 2.2 – Escoamento indesejável durante o aquecimento da chapa.
Fonte: Adaptado de Silva (2013).

O material formado deve ser resfriado em tempo suficiente para ser cortado, retirado do molde e enviado para coleta e empilhamento. O comportamento do material durante o resfriamento é fundamental para o processo. O material deve esfriar rapidamente na cavidade para que tenha uma estrutura rígida o suficiente para ser removido do molde. Esse tempo de resfriamento afeta diretamente a produtividade da máquina, mas pode ser acelerado pela circulação de água fria nas ranhuras e canais ao redor da máquina (SILVA, 2013).

De qualquer forma, um bom entendimento de como um material se comporta durante o aquecimento e resfriamento é essencial para garantir que o processo funcione corretamente e resulte em um produto de qualidade.

2.1.2 Injeção

A moldagem por injeção é um dos principais processos de fabricação de peças a partir de materiais poliméricos. É usado principalmente para termoplásticos, mas também pode processar elastômeros e termofixos. O processo de injeção é adequado para produção em massa, pois a matéria-prima geralmente é transformada no produto acabado em apenas uma etapa, e também tem a vantagem de um processo totalmente automatizado para alta qualidade e reprodutibilidade das peças. (MICHAELI et al, 1995).

A fabricação de peças através da moldagem por injeção tem sido amplamente utilizada na produção de produtos plásticos. Cerca de 32% de todos os materiais plásticos processados no mundo são processados por moldagem por injeção (C-

MOLD DESIGN GUIDE, 1994). A moldagem por injeção é usada para a produção em massa de peças idênticas ao molde, obtidas pela introdução de polímero fundido em uma cavidade do molde. Uma grande vantagem desse processo é que ele é adequado para moldar por injeção peças de considerável complexidade geométrica, sejam pequenas formas, como engrenagens de relógio, ou peças maiores, como peças de barco ou o para-choque de um carro. A moldagem por injeção é considerada uma das técnicas mais complexas no processamento de materiais poliméricos (DUPRET, 1999). Seu crescimento se deve principalmente ao desenvolvimento de novos materiais plásticos e aos avanços na tecnologia de moldagem por injeção.

2.1.2.1 Ciclo de injeção

O processo de moldagem por injeção de plástico é um processo cíclico que consiste basicamente em quatro etapas importantes. São eles: preenchimento, recalque, resfriamento e extração/expulsão.

Primeiramente, um funil é alimentado na máquina de moldagem por injeção junto com a resina e os aditivos apropriados para aquecer dentro da máquina o material a ser injetado. Começa então a primeira etapa, chamada de enchimento ou injeção, na qual o polímero aquecido acima da temperatura de fusão é injetado na cavidade do molde. Após o preenchimento completo da cavidade, inicia-se a segunda etapa, que é o recalque. Neste ponto, mais material fundido é forçado a entrar na cavidade a uma pressão ligeiramente inferior a pressão de injeção para compensar a contração já esperada do polímero durante a solidificação. Esta etapa é seguida por uma fase de resfriamento na qual o molde é resfriado até que a peça esteja sólida o suficiente para ser ejetada do molde. O último passo ocorre quando o molde é aberto e a peça é extraída, permitindo-se que o molde seja novamente fechado para dar início a um novo ciclo (TANG et al, 2005).

Na Figura 2.3 exibe um esquema básico de uma máquina injetora, e seus componentes.

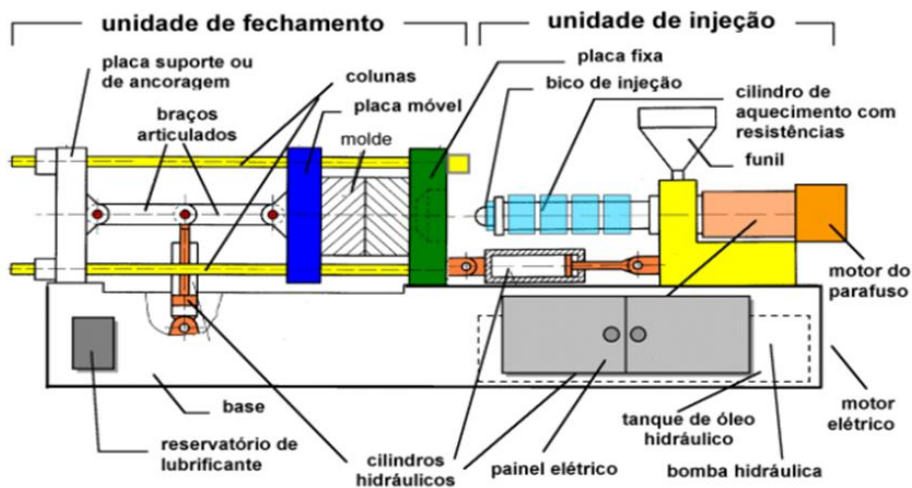


Figura 2.3 – Esquema de uma máquina injetora.
Fonte: Tino (2005).

2.1.2.2 Influências no processo de injeção

Para a fabricação de peças moldadas por injeção, deve-se ter em mente que suas propriedades são sempre em função de parâmetros de processamento, incluindo o tipo de material com propriedades inerentes. Esses parâmetros incluem o tipo de molde e máquina utilizada e todas as suas variáveis. Cada máquina tem limites diferentes para a pressão de fechamento do molde, o torque para girar o parafuso, a pressão exercida pelo pistão sobre a massa fundida e outras diferenças. Os materiais poliméricos selecionados para processamento possuem características próprias que podem variar de lote para lote, fornecedor, aditivo ou mesmo variação induzida por contaminação no caso dos reciclados. Por outro lado, um molde pode ser especialmente projetado para um determinado material ou mesmo para uma determinada máquina de moldagem por injeção. Dependendo do projeto do molde (com câmara quente, com injeção de gás, com múltiplas cavidades, com duas ou três placas), podem ser geradas peças com propriedades diferentes. O design do produto também afeta as propriedades mecânicas, pois as peças podem ter paredes finas, paredes espessas, paredes variáveis ou até nervuras. O processo em si é modificável, ou seja, usando um molde específico em uma máquina injetora específica, usando um material específico, as variáveis do processo podem ser ajustadas (MANRICH, 2005).

As principais variáveis que podem ser manipuladas e controladas durante o processo de injeção são a temperatura, pressão, tempo e velocidade do polímero fundido (MARAGHI, 1997).

2.1.2.3 Temperatura do polímero fundido

O controle da temperatura do fundido é considerado o fator mais crítico na moldagem por injeção, pois esse parâmetro afeta diretamente a viscosidade do polímero fundido. A mudança na temperatura do fundido, e conseqüentemente na sua viscosidade, afetam outros parâmetros como a velocidade de injeção, velocidade alternada do parafuso, tempo de resfriamento do molde, pressão de injeção, etc. (DUBAY, 2001).

2.1.2.4 Temperatura das paredes do molde

A temperatura da parede da cavidade é importante para a qualidade da peça, economia de processo, precisão dimensional e repetibilidade precisa. Além das propriedades térmicas do material, é essa temperatura que determina o tempo de resfriamento. Em peças com espessura de parede inferior a 2,5 mm, um aumento significativo da pressão hidráulica ocorre na fase de injeção. Isso se deve a um aumento na viscosidade do fundido devido ao resfriamento das paredes da cavidade, o que reduz a espessura do núcleo fundido. A pressão máxima nas proximidades do canal de injeção é menos afetada pela temperatura do molde, mas a pressão aplicada ainda é derivada da alteração do processo de resfriamento (JOHANNABER, 1994).

2.1.2.5 Pressão na cavidade do molde

Durante a moldagem de uma peça, podem-se distinguir três etapas básicas relacionadas à pressão na cavidade: preenchimento da cavidade (etapa de injeção), compressão do material fundido (etapa de compressão) e manutenção o material que está se solidificando sobre pressão (etapa de compactação). Essas três etapas podem estar relacionadas a certos efeitos relacionados à qualidade da peça conformada. Por exemplo, a etapa de injeção afeta principalmente a aparência da peça moldada, por fatores como: Distribuição do material, Orientação das moléculas, Efeito de “jetting”, formação de bolhas, textura e brilho e contracção, enquanto a etapa de compactação afeta principalmente seu tamanho por várias maneiras como: Densificação, Fluxo do material, pressão de compactação e tempo de compactação (JOHANNABER, 1994).

Para Johannaber (1994), a curva de pressão da cavidade também fornece

informações sobre erros típicos na tecnologia do processo de injeção. Picos de alta pressão, como durante a fase de compactação, podem causar sérias dificuldades. Isso é causado pelo fato de que a pressão de injeção ser menor que a pressão de recalque durante a compactação. Esse erro pode levar a diferenças significativas no peso ou tamanho dos componentes moldados.

Vários fatores devem ser observados e fazem com que a pressão da cavidade mude. Mudanças na velocidade do parafuso podem alterar significativamente a pressão. A temperatura elevada do molde aumenta a propagação da pressão dentro da cavidade, isso por que o material fundido encontra menor resistência térmica ao fluir pela cavidade. Isso pode tornar o enchimento mais fácil da cavidade, mas também pode causar um aumento de pressão devido à menor taxa de solidificação no ponto de contato com as paredes do molde. A geometria da porta tem um efeito significativo na pressão de compactação durante o resfriamento, pois a porta atua como um canal de comunicação entre a máquina injetora e a cavidade do molde (JOHANNABER, 1994).

2.1.2.6 Velocidade da rosca e tempo de injeção

De acordo com Johannaber (1994), a única velocidade relevante no processo de moldagem é a velocidade mútua do parafuso, que apenas afeta o processo durante a injeção. A velocidade de injeção é inversamente proporcional à rotação do parafuso, o que aumenta a pressão hidráulica. Isso ocorre devido às restrições de fluxo na ponta do bico e na comporta.

Além disso, a perda de pressão de enchimento da cavidade aumenta com a diminuição da velocidade de injeção, influenciando o processo de resfriamento. Isso leva a:

- Aumento da viscosidade do material fundido na cavidade
- Formação mais rápida de uma camada de superfície sólida na parede da cavidade
- Diferentes níveis de pressão na cavidade

Consequentemente, para compensar a injeção mais lenta, é necessário aumentar significativamente a pressão de fechamento para garantir a duplicação da

superfície na cavidade. Por razões de economia de energia e pela qualidade do produto injetado, a velocidade de injeção geralmente deve ser escolhida a mais ideal possível.

2.1.3 Extrusão

O processo de extrusão é provavelmente a operação unitária mais importante na área de moldagem de materiais poliméricos por ser um processo contínuo e de alta produtividade. O processo de extrusão tem sido utilizado como meio de conformação de materiais desde o século 18. No entanto, foi somente na segunda metade do século 20 que o processo se tornou um método útil para a indústria da borracha e fabricação de cabos, de modo que seu potencial não foi totalmente atingido com o advento dos materiais poliméricos termoplásticos (ROSATO, 1998).

O processo de extrusão ocorre em um dispositivo chamado de extrusora. A função de uma extrusora é basicamente processar polímeros através da fusão, do transporte e mistura dos mesmos; com ou sem adição de outros componentes, conformando o material de forma ininterrupta. Os principais componentes de uma extrusora são: rosca, barril (canhão), motor, sistema de alimentação, sistema de aquecimento, sistema de resfriamento, matriz, sistema de fixação da rosca e sistema de dosagem (TADMOR e GOGOS, 2006). A Figura 2.4 mostra uma vista em corte de uma extrusora de rosca simples.

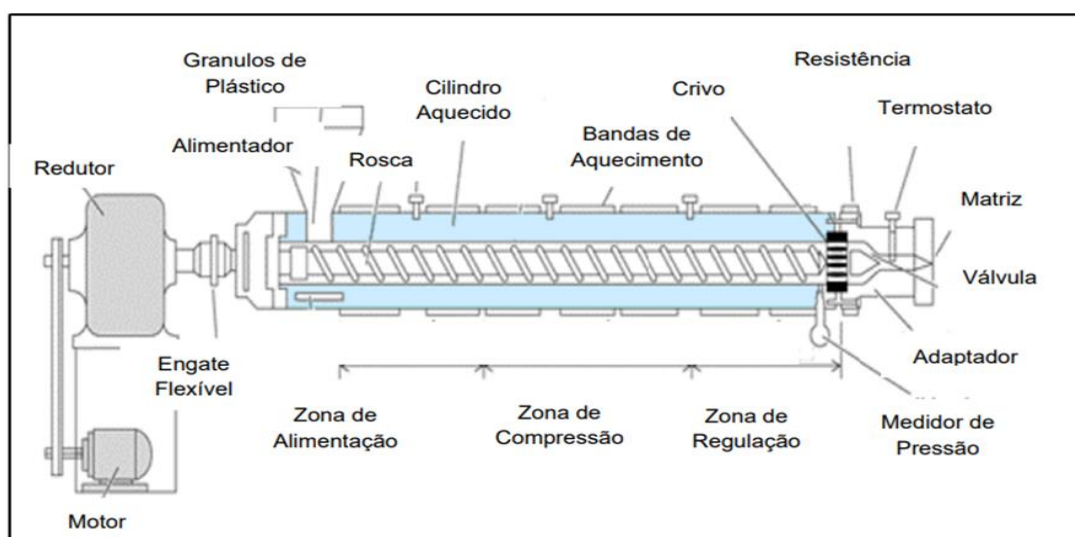


Figura 2.4 – Vista em corte de uma extrusora de rosca única.
Fonte: Parente (2006).

O processo de extrusão consiste basicamente em alimentar o material polimérico na forma granular ou em pó através de um funil conectado a um cilindro extrusor (barril) que é aquecido por resistência elétrica. A alimentação do polímero é transportada pelo movimento de uma rosca sem-fim dentro do barril e, ao longo deste caminho do parafuso, o material é gradualmente aquecido, plastificado, homogeneizado, comprimido e finalmente forçado através de uma abertura na extremidade da matriz (BLASS, 1988). Após sair da matriz, o material assume a forma definida de uma peça e deve ser resfriado abaixo da temperatura de transição vítrea ou cristalização para garantir a estabilidade dimensional. Esse resfriamento geralmente é realizado por meio de sistemas de injeção de ar ou resfriamento a água (PEREIRA, 2009). As principais variáveis operacionais de um processo de extrusão de rosca simples são: velocidade da rosca e distribuição de temperatura ao longo do canhão.

Dentre os principais componentes de uma extrusora, a rosca pode ser considerada a mais importante, pois é através de sua extensão que o material passa pelos fenômenos térmicos e mecânicos envolvidos no processo. Os principais parâmetros geométricos da rosca extrusora (Figura 2.5) são o número de filetes paralelos, diâmetro interno da rosca (D_i), diâmetro externo (D_e), passo da rosca (P), ângulo da hélice (θ) e a profundidade do canal (dc) (RAUWENDAAL, 2013).

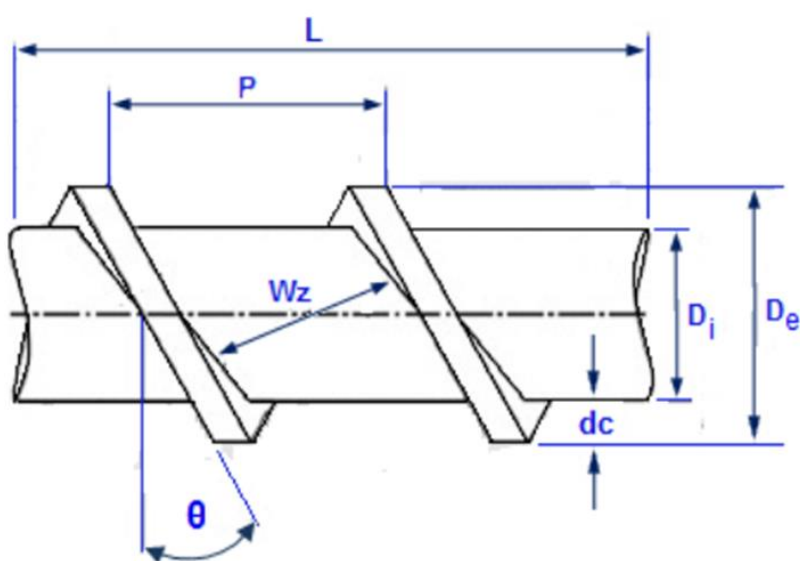


Figura 2.5 – Parâmetros geométricos da rosca de extrusão.
Fonte: Rauwendaal (2013).

Em geral, esses parâmetros geométricos de uma rosca estão relacionados ao fator de forma (ρ), que é a relação entre o diâmetro externo e o diâmetro interno da rosca, conforme a Equação 2.1 (MICHAELI, 1995).

$$\rho = \frac{De}{Di} \quad (2.1)$$

Este parâmetro está relacionado às características da rosca e não ao tamanho do equipamento utilizado. Outro parâmetro fundamental para a classificação de roscas é a relação entre comprimento e seu diâmetro maior (L/De), a relação de comprimento.

O tipo de rosca utilizada depende do material que será processado, cada material polimérico requer uma certa combinação de variáveis geométricas. As roscas utilizadas no processo de extrusão normalmente possuem três zonas distintas ao longo do perfil axial, conforme mostrado na Figura 2.6, com os seguintes detalhes (RAUWENDAAL, 2013):

- Zona de alimentação: Nesta parte da rosca, a profundidade do canal é constante e o material sólido passa pelo resultado do movimento relativo entre os perfis de partículas, ou seja, a superfície da rosca e a superfície do barril se movem. O escoamento das partículas depende da força, basicamente de atrito, que compacta rapidamente, formando um leito de sólidos que se desloca em direção à zona de compressão;
- Zona de Compressão: Nesta zona da rosca, o polímero é basicamente fundido de duas formas: aquecimento viscoso e calor fornecido pelo aquecimento externo;
- Zona de Dosagem: Nesta zona, o polímero fundido é homogeneizado. A profundidade do canal é constante, mas menor que a profundidade da zona de alimentação. Desta forma, em altas taxas de cisalhamento, garante-se a homogeneização do material em termos de composição e uniformidade de temperatura, antes de ser bombeado para o cabeçote e matriz da extrusora, onde ocorre a estruturação do material.



Figura 2.6 – Zonas da rosca de extrusão.
Fonte: Rauwendaal (2013).

O amplo uso de extrusoras pela indústria de materiais poliméricos deve-se ao seu funcionamento contínuo e à versatilidade da configuração dos perfis de barril e rosca, o que permite que o processo de extrusão apresente alta produtividade. Apesar de ser um processo de fácil operação, vale ressaltar que durante a extrusão ocorrem alguns fenômenos físicos de difícil compressão, como: transporte de material sólido com geometrias complexas, transferência de energia (térmica, cinética, viscosa), transições de fase de materiais não newtonianos, etc (WHITE, 1990).

2.1.3.1 Tipos de Extrusora

As extrusoras são as maiores máquinas de processamento na indústria de termoplásticos e desempenham um papel importante nas indústrias relacionadas. É claro que as máquinas de processamento mais numerosas na indústria de polímeros sempre foram extrusoras de rosca única (mono rosca). No entanto, pode-se constatar que nos últimos anos houve um crescimento industrial de extrusoras multi roscas, principalmente as extrusoras de dupla-rosca (WHITE, 1990).

As extrusoras de rosca simples, também conhecidas como extrusoras mono roscas (EM) (ver Figura 2.4), utilizam apenas uma rosca no barril para extrusão, inicialmente essas foram as primeiras e mais utilizadas na indústria de polímeros, pois fatores como custo baixo e simplicidade de operação a tornaram popular no mercado (VIGNOL, 2005). No entanto, nas últimas décadas, o uso de extrusoras multi roscas, especialmente extrusoras dupla-rosca (EDR), tornou-se mais comum devido às suas melhores capacidades de mistura e homogeneização de materiais, além de se ajustar a rosca e a máquina conforme necessário o material processado (WHITE, 1990).

A função básica de uma extrusora é transportar, fundir, misturar e moldar polímeros. Os principais componentes são: Rosca de Arquimedes, cilindro (barril), motor de movimento da rosca, sistema de redução, sistema de alimentação, sistema de aquecimento, sistema de refrigeração, matriz de formação (funil), sistema de fixação da rosca, sistema de refrigeração na alimentação (TADMOR e GOGOS, 1979).

2.1.3.2 Extrusora dupla rosca

Uma extrusora de dupla rosca é um dispositivo cuja principal característica é a operação simultânea de duas roscas Arquimedianas no transporte de materiais (Figura 2.7). Por volta da década de 1930, as primeiras extrusoras de dupla rosca apareceram na Itália (RAUWENDAAL, 2013).

A extrusora dupla rosca é um dispositivo de mistura muito versátil que vem ocupando gradativamente um espaço importante no processamento de polímeros, principalmente em processos especiais como processamento reativo, processamento de materiais sensíveis, degradação controlada, etc. As principais vantagens em comparação com as extrusoras de rosca única incluem melhor alimentação, menor tempo de residência e distribuição mais estreita, maior capacidade de mistura de componentes, propriedades de autolimpeza, fluxo positivo, configuração de várias roscas e barris, melhor controle das variáveis operacionais e maior área de transferência de calor (LAWAL e KALYON, 1995).

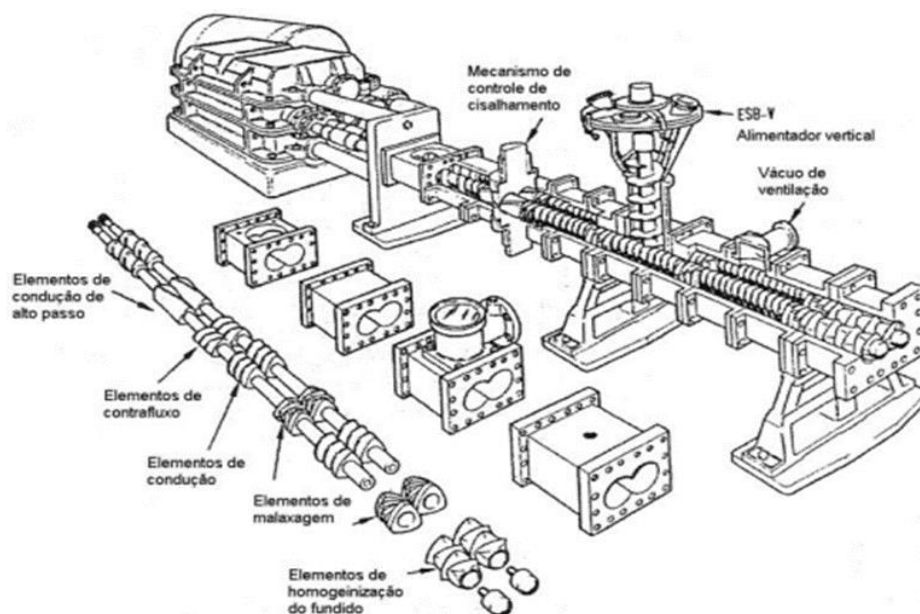


Figura 2.7 – Extrusora Dupla Rosca mostrando elementos do barril.
Fonte: Tadmor e Gogos (2006).

Entre as principais características das extrusoras de dupla rosca, podemos citar:

- Adição e homogeneização de aditivos sem ultrapassar a temperatura de degradação;

- Alta tensão de cisalhamento que promove a dispersão de aglomerados de partículas;
- Homogeneizar dois ou mais materiais com viscosidades diferentes sem criar uma mistura final em camadas ou em camadas;
- Fornece tensão de cisalhamento e história térmica uniforme para diferentes tipos de partículas;
- Permite o controle preciso do processo de mistura.

As extrusoras de dupla rosca são geralmente classificadas de acordo com o posicionamento entre as roscas e o sentido de rotação das mesmas (TADMOR e GOGOS, 2006). Em relação ao posicionamento entre os fios, a diferença entre a EDR é a distância entre os centros dos fios, que são divididos em interpenetrantes, tangenciais e não interpenetrantes (Figura 2.8).

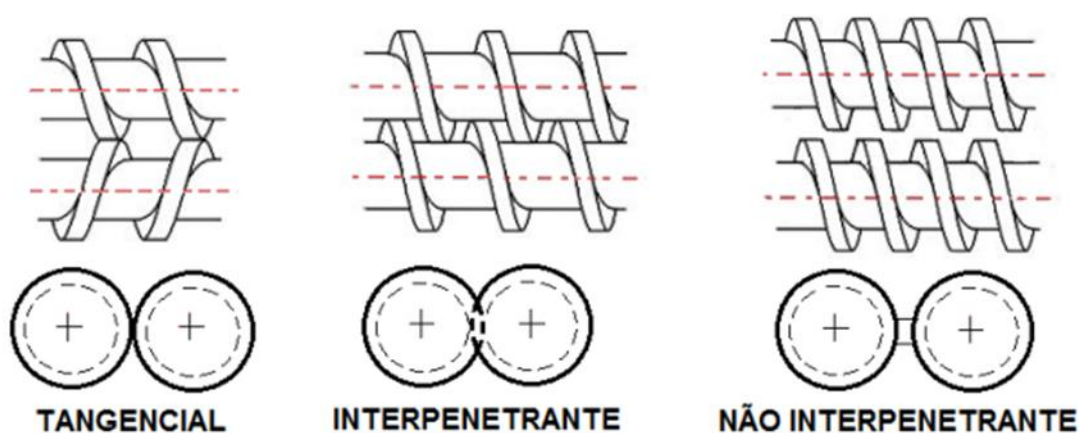


Figura 2.8 – Classes das extrusoras dupla-rosca quanto à distância entre as roscas.
Fonte: Tadmor e Gogos (2006).

Extrusoras interpenetrantes são aquelas em que a distância entre os centros dos eixos do parafuso é menor que a soma de seus raios; as tangenciais são aquelas em que a distância entre os centros dos eixos das roscas é igual à soma de seus raios; já as não interpenetrantes são aqueles cuja soma dos raios é maior que a distância entre seus centros de eixo.

Quanto ao sentido de rotação, elas são divididas em extrusoras dupla rosca co-rotativas (EDR-COR), quando as duas roscas giram no mesmo sentido, e extrusoras dupla rosca contra rotativas (EDR-CON), quando giram em sentido oposto, conforme a Figura 2.9 (RAUWENDAAL, 2013).

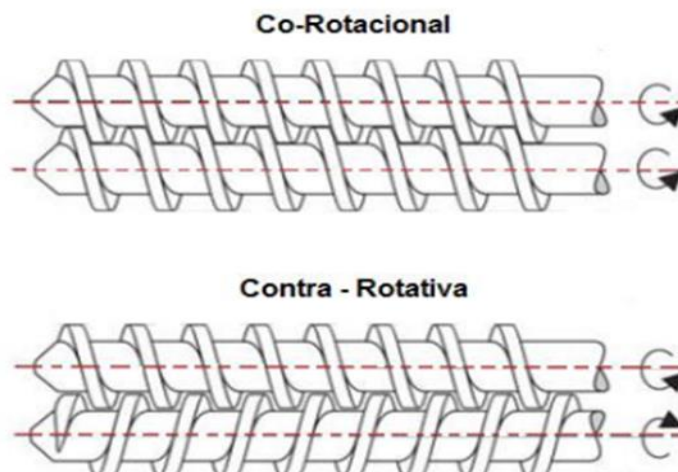


Figura 2.9 – Classificação das extrusoras dupla rosca quanto ao sentido de rotação.
Fonte: Tadmor e Gogos (2006).

A maneira como as roscas funcionam determina as características operacionais e a aplicação das EDR. Por exemplo, se considerar a geometria da seção transversal de uma extrusora de dupla rosca co-rotativa interpenetrante (Figura 2.10). Como já mencionado, o barril consiste em duas meias-câmaras conectadas em paralelo de igual diâmetro nas quais as roscas interagem. A dinâmica do fluxo neste canal é em forma de oito, o que facilita a mistura ou reação entre os componentes processados, pois cada rotação transfere material de uma rosca para a outra, criando uma nova região interfacial. Essas regiões são formadas por mecanismos de deformação, flexão e redirecionamento do fluxo na região entre as linhas (WHITE, 1990).

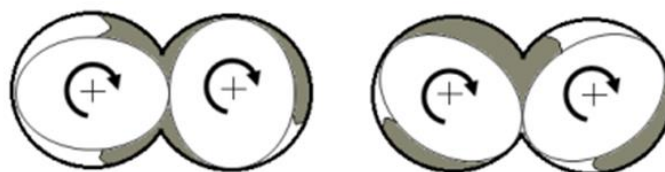


Figura 2.10 – Dinâmica de fluxo de uma extrusora dupla rosca.
Fonte: Tadmor e Gogos (2006).

Por exemplo, no caso de uma extrusora de dupla rosca co-rotativa, o transporte do material é dependente de um fluxo de arrasto, onde à medida que as roscas giram, o material é transportado e, no ponto de penetração mútua, o material é completamente transferido de uma rosca para outra, como se estivesse se raspando,

conferindo ao dispositivo uma característica de autolimpeza. (RAUWENDAAL, 1991; BRETAS, 2000).

A grande maioria das EDRs são desenvolvidas com disposição modular ao longo da rosca, onde é formado pela combinação de peças individuais que se encaixam ao longo da haste. Desta forma, diferentes perfis de rosca podem ser montados para um melhor controle de cisalhamento, condições de mistura, capacidade de transporte, tempo de permanência suficiente, ou seja, o desempenho desses equipamentos é determinado principalmente pela configuração de rosca estabelecida. (ZLOCZOWER e TADMOR, 1994; RAUWENDAAL, 2013).

A combinação de altas temperaturas e altas taxas de cisalhamento durante o processamento de extrusão, devido a uma combinação de degradação termomecânica e oxidativa, pode levar a mudanças consideráveis na estrutura molecular do polímero, afetando as propriedades físicas e mecânicas do material processado. As condições utilizadas para a extrusão têm um efeito significativo nas propriedades reológicas dos polímeros portanto, devem ser controladas (WHITE, 1990).

No contexto deste trabalho, será fornecida mais evidências para a extrusora mono rosca, pois é o principal equipamento de pesquisa utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

2.1.3.3 Extrusora monorrosca

Segundo Rauwendaal (2001), a extrusora monorrosca é o tipo de extrusora mais utilizado na indústria de polímeros, e suas vantagens são o custo relativamente baixo, robustez e confiabilidade, e uma relação custo-desempenho favorável. Ainda segundo Rauwendaal (2001), a primeira extrusora para material termoplástico foi construída em 1935 por Paul Troester na Alemanha. As extrusoras, são amplamente utilizadas na indústria de termoplásticos, apresentam-se nas formas de monorrosca (simples), conforme mostrado na Figura 2.11, e rosca múltipla, respectivamente.

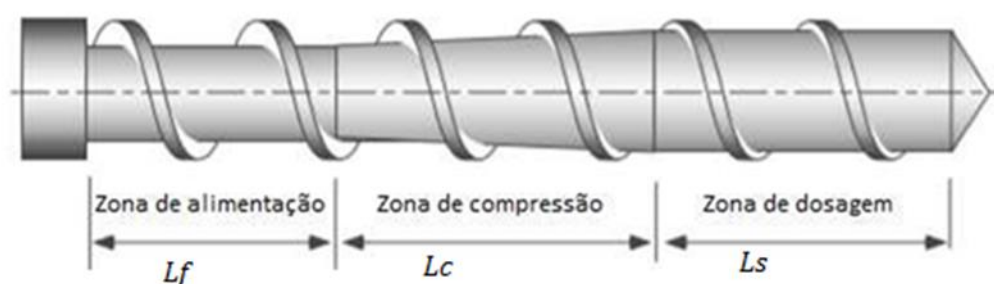


Figura 2.11 – Parafuso de extrusão rosca simples.
Fonte: adaptado de Rauwendaal (2014).

Quanto aos tipos de roscas utilizados na extrusão de termoplásticos, Raquez et al. (2008) menciona que:

A extrusora de rosca única é normalmente utilizada para trabalhos simples como derretimento, plastificação e descarga para produção de filmes, tubos e perfis. A extrusora de rosca dupla, de acordo com suas características específicas, pode ser utilizada para operações como homogeneização, dispersão de pigmentos e aditivos, formação de ligas, mistura reativa, concentração, devolatilização e polimerização. A maior diferença entre a extrusora de rosca única e dupla é o mecanismo de transporte. Embora, em máquinas de rosca única, isso dependa de forças de fricção na zona de alimentação de sólidos e forças viscosas na zona de derretimento, com rosca dupla isso é altamente dependente da configuração geométrica das roscas, e seu caráter de deslocamento positivo. (RAQUEZ. 2008).

De acordo com Kelly et al. (2006), o projeto da rosca de extrusão é fundamental para a otimização do processo. A geometria da rosca afeta diretamente a taxa de saída do material, taxa de fusão, mistura, uniformidade de temperatura e eficiência do processo. Para entender melhor o processo de extrusão, é necessário analisar cada parâmetro do processo, as características geométricas do sistema e as propriedades do material a ser extrudado. As características do processo incluem temperatura de resistência, rotação do parafuso de extrusão, gradiente de pressão interna, taxa de saída do material (massa ou volume) e tempo de residência. As principais características de um parafuso de extrusão são comprimento, a relação comprimento/diâmetro ou L/D , os respectivos tamanhos das áreas de alimentação, compressão e saída, largura do filete, passo da rosca e profundidade da rosca em

cada seção (KELLY et al., 2006). As características geométricas da rosca desta pesquisa, em estudo são em suma representadas na Figura 2.12, que corresponde à rosca projetada para este trabalho.

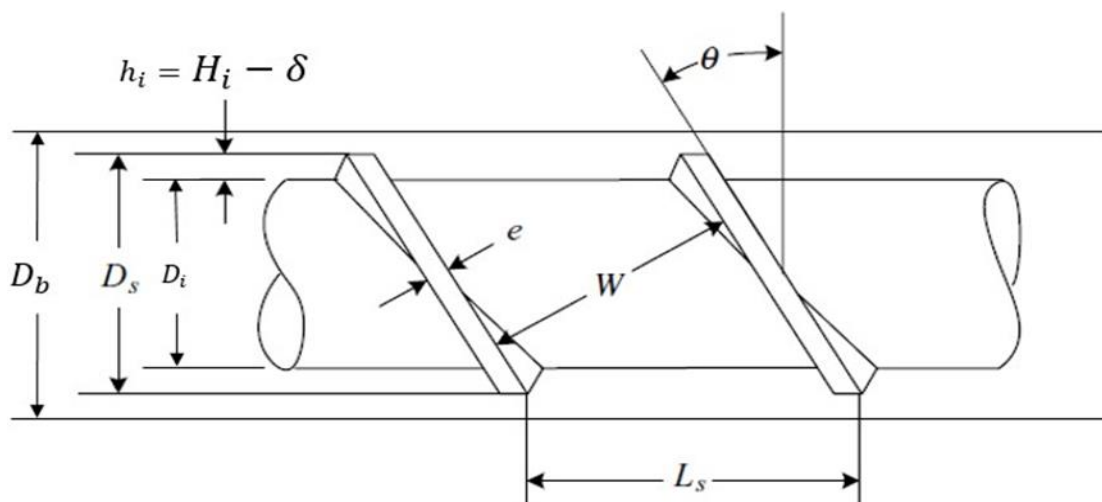


Figura 2.12 – Parâmetros geométricos para rosca da extrusora.
Fonte: Adaptado de Tadmor (2006).

Onde temos os seguintes parâmetros:

- D_b : diâmetro interno do tubo (mm);
- D_s : diâmetro externo da rosca (mm);
- D_i : diâmetro da raiz na zona de alimentação (mm);
- θ : ângulo da rosca (°);
- h_i : profundidade do canal na zona de alimentação (mm);
- H_i : folga entre a raiz na zona de alimentação e a parede interna do tubo (mm);
- L_s : comprimento do passo (mm);
- e : espessura do dente (mm);
- δ : folga radial (mm);
- Rc : Taxa de compressão (-);

- L : Comprimento do parafuso de extrusão (mm);
- W : Largura do filete (mm);
- L_f : Comprimento na zona de alimentação (mm);
- L_c : Comprimento na zona de compressão (mm);
- L_s : Comprimento na zona de saída (mm).

De acordo com Deng et al, (2014), para a seleção do parafuso de extrusão, geralmente depende do material que está sendo processado. Em geral, é utilizada uma rosca simples padrão de passo quadrado, ou seja, o passo é igual ao diâmetro de saída do parafuso (D_s). De acordo com Rauwendaal (2001), essa geometria de rosca é a mais utilizada em processos de extrusão na indústria e é adequada para diversos tipos de materiais, porém não é a melhor e, portanto, não promove ótima produtividade, mistura ou plastificação no caso de cada material específico. Para uma primeira tentativa de projeto, essa geometria é interessante porque, apesar de suas limitações, é simples e pode ser fabricada por usinagem convencional e fornece vários parâmetros de projeto, como comprimento da zona de extrusão, relação L/D , folgas de H 's e a relação de projeto indicada por Rauwendaal (2001).

Um parâmetro geométrico importante é a taxa de compressão R_c , que é a profundidade da zona de alimentação dividida pela profundidade da zona de saída, que determina a taxa de compressão do material à medida que flui através do barril. A extrusão muito rápida fará com que o parafuso de extrusão trave durante a operação, aumentando a quantidade de material sólido na zona de compressão. No presente caso, uma zona de compressão muito longa também é indesejável porque aumenta o volume e o peso total da cabeça de extrusão (FREITAS, M. S. 2015).

Para um bom processo de extrusão, segundo Deng (2014), sua qualidade pode ser expressa pela pressão de fusão, temperatura, viscosidade ou taxa de saída do material ao final do processo. Os mesmos autores afirmam que o controle da temperatura de derretimento e a uniformidade térmica são fatores fundamentais na qualidade do produto e no consumo de energia. Tal afirmação confirma os pontos fortes do projeto, que é o uso de resistência tubular (tipo coleira) de temperatura controlada e também aponta a importância do estudo de distribuição térmica nas zonas do cabeçote.

O tempo de residência é uma característica do processo e representa quanto tempo o material permanecerá na extrusora. É um fator inversamente dependente da rotação da extrusora no processo.

A pressão interna no barril é geralmente proporcional à velocidade de extrusão ou rotação do parafuso. Qualquer aumento na temperatura reduzirá a pressão e a viscosidade. Durante o processo de extrusão, a pressão de extrusão pode ser controlada pela rápida resposta da velocidade do parafuso. Em contraste com isso, a mesma resposta às mudanças de temperatura é muito mais lenta (DENG et al., 2014).

A temperatura do polímero liquefeito em seu fluxo é um parâmetro chave do processo. Segundo Bur et al (2004), ela afeta muitos parâmetros críticos do material incluindo viscosidade, densidade da resina e a dinâmica de degradação. Nesse caso, esse controle ocorre somente pela resistência elétrica do tipo coleira que envolve a parte final do barril de extrusão.

2.1.3.4 Parâmetros de Processo

Para processamento de materiais em extrusoras de pequeno e grande porte (industriais), o primeiro passo é definir o tipo de material que será extrudado no equipamento, pois todos os equipamentos serão ajustados para garantir que o material atinja as condições mínimas para seu processamento. Existe uma correlação entre as condições térmicas necessárias para o processamento do PP quando a taxa de compressão é de 3:1, e diversos materiais estão listados na Tabela 2.3, juntamente com seus parâmetros de sintonia para o processamento adequado.

De acordo com John et al. (2014), para ajustar corretamente o dispositivo Figura 2.13, alguns parâmetros normalmente fornecidos pelos fabricantes de matéria-prima devem ser considerados:

- Perfil de temperatura de processamento;
- Melhor design da rosca de processamento;
- Condições adequadas de secagem do material;
- Comprimento adequado da última seção de extrusão.

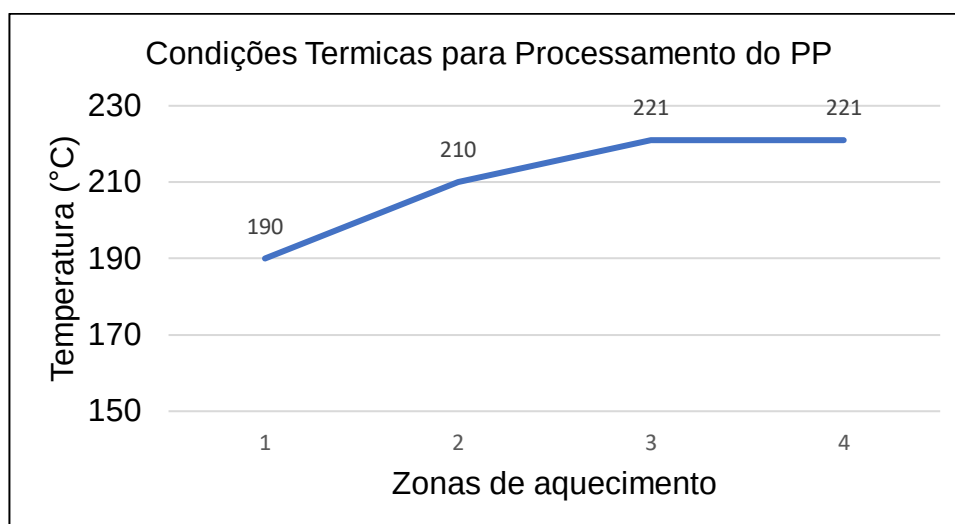


Figura 2.13 – Condições Térmicas para Processamento do PP.
Fonte: Adaptado de John et al. (2014).

Tabela 2.3 – Parâmetros de Processamento dos Materiais Termoplásticos.

MATERIAL	TAXA DE COMP. DA ROSCA	ZONA DE ALIMENTAÇÃO °F(°C)	ZONA DE TRANSIÇÃO °F(°C)	ZONA DE FUSÃO °F(°C)	ZONA DE CRISTALIZAÇÃO °F(°C)
ABS	2.75:1	400(204)	425(219)	440(227)	460(238)
NYLON 6	3.9:1	420(216)	460(238)	480(249)	500(260)
NYLON 6.6	3.6:1	530(277)	535(280)	545(285)	540(282)
PEBD	3.5:1	340(171)	355(180)	365(185)	375(191)
PEBDL	-	300(149)	325(163)	364(185)	410(210)
PEAD	3:1	340(171)	380(193)	400(204)	400(204)
PP	3:1	375(190)	410(210)	430(221)	430(221)
OS	3:1	350(177)	400(204)	440(227)	450(232)
HIPS	2.5:1	375(191)	420(216)	450(232)	450(232)
PMMA	1.8:1	360(182)	400(204)	430(221)	445(230)

PVC FLEXÍVEL	2.5:1	265(130)	340(171)	355(181)	365(181)
PVC RÍGIDO	2.5:1	300(149)	320(160)	340(171)	365(181)
PC	2.25:1	510(266)	530(277)	550(288)	560(293)
Noryl®	2.1:1	450(232)	480(249)	510(266)	510(266)
Ultem®	2.1:1	600(316)	640(338)	675(357)	675(357)
PET	3:1	520(270)	550(290)	510(265)	510(265)
PBT	2.5:1	470(243)	490(254)	500(260)	500(260)
PSF	2.5:1	550(288)	600(316)	650(343)	650(343)
Acetal	3.6:1	400(204)	390(199)	400(204)	410(210)
TPU	3:1	330(166)	360(182)	380(193)	380(193)

Fonte: John et al. (2014).

Após selecionar o material a ser extrudado, deve-se considerar as condições de temperatura, rotação do motor e pressão diferencial (Controla a pressão exercida sobre o material, influenciando sua deformação e fluxo) que o equipamento deve ter suficientes para alterar o estado físico do material.

No entanto, alguns dispositivos possuem parâmetros de construção fixos, como o barril de passagem do material, bicos de extrusão e velocidades fixas do motor (rotações por minuto). Porém, neste projeto, devido a aplicação da malha de controle e o controle das variáveis de processo, é possível ajustar a temperatura, a rotação do motor e alterar o diâmetro do bico de extrusão, para que esses ajustes sejam realizados até que o produto atinja os requisitos mínimos de fabricação (JOHN et al. 2014).

Um ponto importante a ser considerado ao montar uma planta de extrusão é que quaisquer ajustes feitos na temperatura do processo devem primeiro considerar: o tipo de resina, índice de fluidez, tipo de rosca e a taxa de transferência de calor (JOHN et al. 2014).

Vários fatores devem ser considerados na operação da máquina extrusora, pois afetam a funcionalidade do canhão e da rosca (DAVIS, S N. 1988).

- Partida a frio da rosca no sistema;
- Iniciar o movimento da rosca com plástico presente no canhão em estado vítreo;
- Aquecimento do canhão não uniforme;
- Conjunto, canhão, rosca e motor desalinhados;
- Rosca imprópria para o sistema;
- Aditivos ou formulação de poliméricos abrasivos;
- Canhão errado para aplicação;
- Corrosão causada por polímeros ou aditivos.

Em pesquisas e estudos realizados por Davis (1988 apud JOHN, et al.,2014), comprovou-se a existência de três ambientes que podem causar desgaste na rosca ou mesmo danificá-la:

- Abrasivo;
- Corrosivo;
- Adesivo.

Como mencionado anteriormente, o desenho da rosca é uma variável muito importante para o perfeito funcionamento do processo. A Figura 2.14 mostra o aumento do diâmetro da rosca, de acordo com a zona de compressão desejada, a rosca tem um diâmetro menor na zona de alimentação e aumenta continuamente, reduzindo a passagem de uma parte para a outra, de forma a comprimir o material para a material extrudado de acordo com a Tabela 2.3.

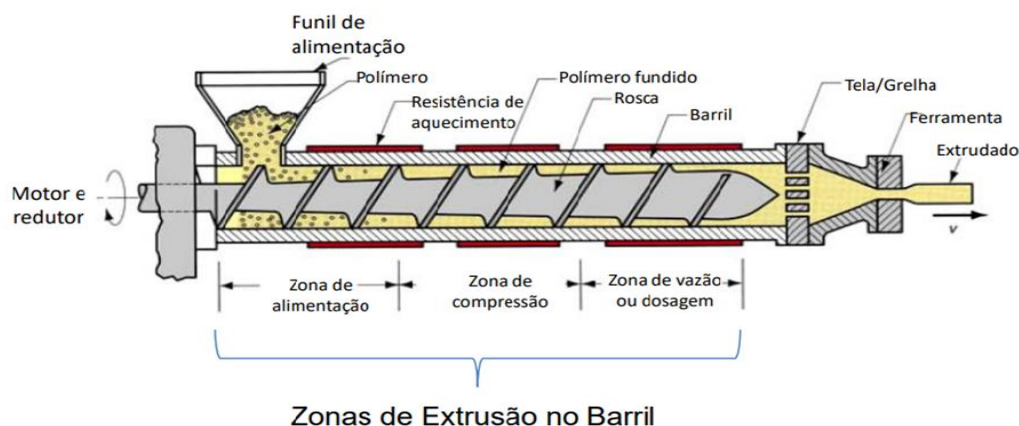


Figura 2.14 – Detalhes Internos do Canhão de Passagem do Material.
Fonte: Adaptado de (BRITTI, CUNHA e AFONSO, 2006).

2.2 Matriz de extrusão

2.2.1 Lei das potências

A Lei das Potências é um modelo simples para a representação de uma curva viscosidade - taxa de cisalhamento para o comportamento do plástico fundido. O fato de a viscosidade do polímero fundido diminuir com a taxa de cisalhamento é de grande importância no processo de extrusão. Portanto, é importante conhecer a magnitude da mudança que ocorrerá em um determinado polímero. A forma geral da curva viscosidade-taxa de cisalhamento de um o polímero pseudoplástico fundido terá a aparência mostrada na Figura 2.15.

A viscosidade em taxas de cisalhamento muito baixas é independente das taxas de cisalhamento. Portanto, o fluido se comporta como um fluido Newtoniano em baixas taxas de cisalhamento. O valor da curva em baixa taxa de cisalhamento " η_0 " refere-se a uma viscosidade newtoniana. O valor da curva em alta taxa de cisalhamento " η_∞ " refere-se a um limite de viscosidade que tende ao infinito. Este valor é difícil de determinar experimentalmente porque os efeitos da pressão e da temperatura tornam-se muito pronunciados nessas altas taxas de cisalhamento (mais de 10^{-6} s^{-1}).

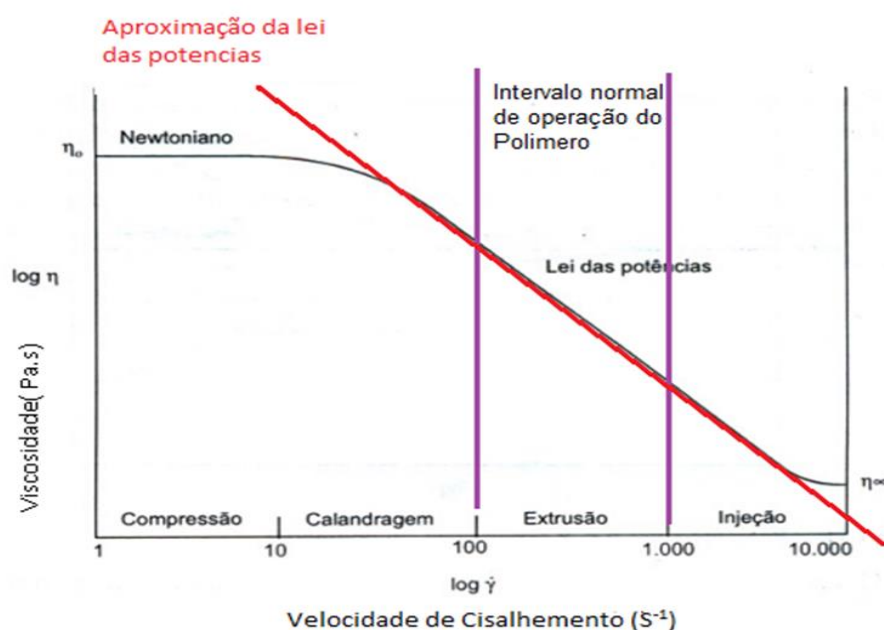


Figura 2.15 – Curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento
Fonte: Adaptado de (BRETAS E D'AVILA, 2000)

A variedade de taxas de cisalhamento encontradas na maioria das operações de processamento de polímeros está entre 1 e 10.000 s⁻¹. A partir da Figura 2.15, pode-se observar que dentro desta faixa, a curva de viscosidade e taxa de cisalhamento é aproximadamente linear. Este é o caso da maioria dos polímeros. Além disso, a figura 2.15 mostra uma escala logarítmica com componente duplo. A escala log-log é benéfica devido ao contraste de ordens de grandeza entre as viscosidades do fluido e as taxas de cisalhamento. Uma linha reta em um gráfico log-log representa uma relação que é a lei de potência. Isso normalmente é escrito como:

$$\eta = m(T^\circ C)\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.2)$$

Onde m é o índice de consistência do fluido e n é o expoente da lei de potência (Osswald, 2006, P.137)

Tabela 2.4– Índice de consistência e expoente da lei de potência para alguns polímeros

Polímero	m (Pa·s ⁻¹)	n	$T(^{\circ}\text{C})$
PEBD	6×10^3	0,39	160°
PEAD	2×10^4	0,41	180°
PP	$7,5 \times 10^3$	0,38	200
Poliamida 66	6×10^2	0,66	290
Policarbonato	6×10^2	0,98	300
Poliestireno (PS)	2.8×10^4	0,28	170

Fonte: OSSWALD (2006)

A Figura 2.16 mostra as curvas de aproximação da lei de potência para o processamento do Polipropileno PP. Como pode ser visto, a faixa de taxa de cisalhamento está entre 10 e 1000 s⁻¹.

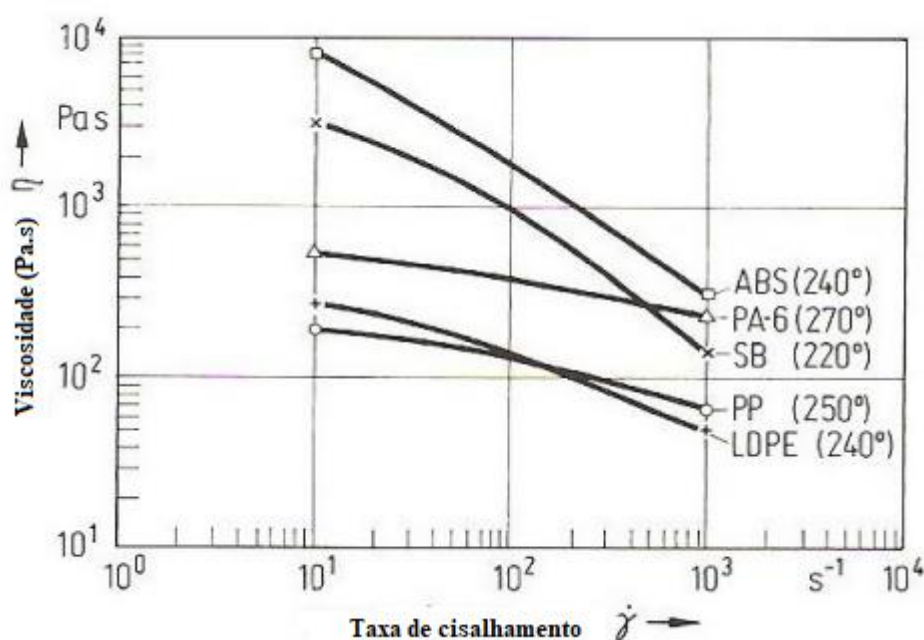


Figura 2.16 – Gráfico da viscosidade aparente do PP em função da taxa de cisalhamento e temperatura.

Fonte: Crawford, 1998

2.2.2 Ponto operacional dá extrusora

Middlemann (1977) estimou a faixa de operação de uma extrusora monorrosca usando as equações do fluido newtoniano e da lei de potência, assumindo um fluxo isotérmico. No entanto é importante lembrar que normalmente o polímero é introduzido na extrusora no estado sólido, depois convertido em fundido entre as regiões 1 e 2, portanto sua modelagem só é relevante para as regiões 2 e 3, na região 1, há uma mistura de material sólido com o fundido.

Como visto, o cálculo da potência de extrusão necessária é baseado na vazão volumétrica da extrusora e no calor necessário para fundir o polímero a ser utilizado. Segundo MANRICH (2005), para calcular com precisão a vazão mássica da extrusora $\dot{m}$, deve-se levar em consideração a zona de dosagem na rosca do canal. Nesta região, o volume total de fluxo será causado pela combinação de dois efeitos, o volume de fluxo devido à rotação do parafuso sobre o polímero fundido $\dot{Q}_d$, e o fluxo de pressão volumétrica da saída da zona de dosagem $\dot{Q}_p$, devido ao diferencial de pressão entre a entrada e a saída da zona.

Este gradiente de pressão é causado pela fusão do material polimérico, próximo ao final da área de dosagem, através da grade e tela do filtro. Uma pequena abertura da matriz, bem como um alto volume de fluxo, produzirão um aumento significativo de pressão na entrada da matriz, o que levará a um forte efeito diferencial de pressão, que reduzirá significativamente o volume total de fluxo. O perfil de pressão da extrusora está ilustrado na Figura 2.17.

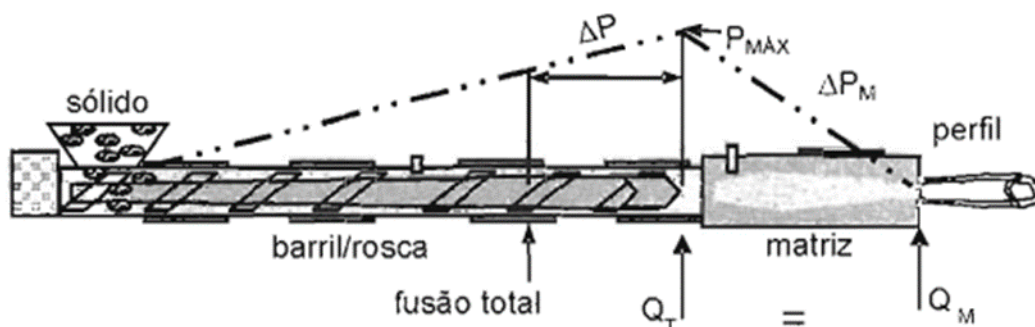


Figura 2.17 – variação da pressão em uma extrusora
Fonte: MANRICH (2005 pg 168)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a escolha dos materiais utilizados nesse projeto, foi levado em consideração inúmeras pesquisas de autores diferentes, onde os mesmos idealizam um equipamento com as mesmas características desta proposta e enumera materiais semelhantes para sua confecção.

Nas Tabela 3.1 e 3.2 são listados os materiais selecionados para este projeto, bem como seu quantitativo associado.

Tabela 3.1 – 1º lista de materiais.

PRODUTO	INFORMAÇÃO TÉCNICA	QTD
Chave Seccionadora	Efe Semitrans 63a	1,00

Botão de Emergência	Bate-gira-destrava HB2ES542 / HB2PE1	1,00
Contadoras	Chave Contatora 25a Lc1d009, 110v/220	2,00
Painel Elétrico	Caixa Hermética, Caixa Montagem, Quadro Comando, 60x50x25	1,00
Controlador Térmico	Controlador Digital Temperatura Rex-c100fk07-m 0 A 400°C	4,00
Termopar	Sensor Termopar Sonda Tipo K 2 Metros	4,00
Motor Redutor	Moto Redutor 1/3cv 0,33cv 1/20 Saída 86 Rpm Trifásico	1,00
Tubo aço inox	Tubo de Ø ext. 1. 3/8"x 7/16" espessura X 750mm. Aço aisi 304	1,00
Tarugo aço inox	Tarugo aço inox 304 Ø ext. 1" x 750 mm	1,00
Tubo aço carbono	Tubo de Ø ext. 2"x 1. 1/8" espessura X 750mm. Aço 1030	1,00
Resistência Elétrica	Resistência Coleira Mica - 50x50mm 220v - 300w	3,00
Resistência Elétrica	Resistência Coleira Mica - 60x60mm 220v - 350w	1,00
Mancal	UCFL-205 mancal + rolamento	1,00
Metalon	30x30x18x6 m	2,00
Cantoneira	1 1/4 x 1/8 x 6	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 3.2 – 2º lista de materiais.

PRODUTO	INFORMAÇÃO TÉCNICA	QTD
Eletrodo	Eletrodo de Titanium 6013 X	1,00

	2,50	
Disco de Corte	Disco de Corte Titanium Fino 4 1/2" x 1,00 x 7/8"	5,00
Disco Desbaste	Disco de Desbaste Norton Classic 4 1/2 x 1/4 x 7/8	1,00
Disco Flap	Disco de FLAP Norton Classic 4 1/2 x 7/8 grão 40	1,00
Barra Chata	1.1/4" x 1/8" com 6 m	1,00
Folha de Madeira	Folha de Madeira compensado 20 mm	1,00
Chave Seletora	Chave Seletora 2 Posições Fixas 90° 1na	1,00
Botão sinalizador verde	Botão sinalizador 22 mm	1,00
Botão sinalizador vermelho	Botão sinalizador 22 mm	1,00
Inversor	Inversor De Frequência Weg Cfw 08 De 2 Cv 380 Volts	1,00
Conectores	Conectores	70,00
Cabo Elétrico	Condutor 1,5mm	20,00
Cabo Elétrico	Condutor 2mm	5,00
Cabo Elétrico	Cabo PP Instalação Elétrica Extensão 3 Vias 2,5mm	3,00
Tinta	Tinta Metálica 900 ml cinza	1,00
Solvente	Solvente	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o polímero que será processado nesse trabalho, será utilizado o polipropileno virgem em pellets de 5 mm, o mesmo foi escolhido pela facilidade de compra no mercado nacional. Isso porque o polipropileno faz parte da família das poliolefinas e corresponde a aproximadamente 60% da demanda global de termoplásticos, os diferentes tipos de polietileno respondem por aproximadamente 65% do mercado, sendo o polipropileno responsável por 43%.

3.2. Seleção dos Materiais

3.2.1 Redutor de velocidade

Segundo Rauwendaal (2014), o sistema de redução aumenta o torque do motor enquanto reduz a rotação transmitida a rosca de extrusão, adaptando assim o motor às necessidades da extrusora. A maioria das extrusoras deve funcionar em torno de 100 a 200 rpm, o que não é possível sem o auxílio de um redutor.

O ideal é que a velocidade da rosca permaneça constante, pois as flutuações na velocidade podem causar alterações no fluxo do polímero e, portanto, alterações nas dimensões do produto extrudado. A velocidade não deve ser muito alta, pois afetará diretamente o cisalhamento do polímero, reduzindo sua viscosidade e tornando-o potencialmente inadequado para extrusão.

Ela também não pode ser muito baixa, pois irá aumentar o tempo no qual o polímero sofre a ação do calor, que pode ser sensível, podendo assim causar degradação em sua estrutura. É normalmente utilizado sistemas de engrenagens de dentes retos ou sem fim (Figura 3.1) com taxas de redução que variam de 10:1 a 20:1. A eficiência desse sistema é alta, variando de 96 a 98%.

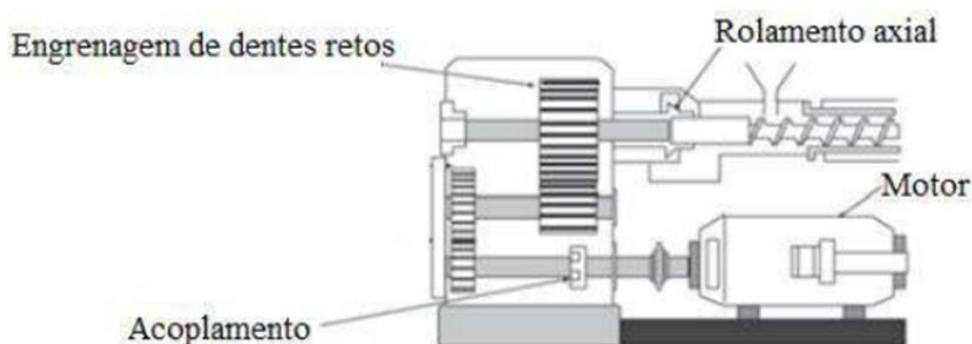


Figura 3.1 – Sistema de redução direto.
Fonte: GILES (2005).

Para este projeto foi selecionado o redutor de velocidade modelo EMRV042 Weg Lilo (Figura 3.2) tipo coroa e rosca sem fim com carcaça de alumínio, para motor de 0,33cv que reduz 20 vezes a velocidade, possui eixo de entrada maciço com diâmetro de 16mm e eixo de saída com diâmetro de 18mm. Na Tabela 3.9 estão expostas as informações técnicas do redutor de velocidade utilizado no projeto.

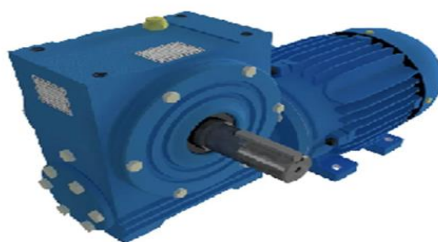


Figura 3.2 – Redutor de velocidade com redução 1/20.
Fonte: Lilo redutores (2022).

Tabela 3.3 – Dados técnicos do Redutor de Velocidade.

Rotação na entrada do moto redutor	1750 rpm
Redução	20
Rotação na saída do moto redutor	88 rpm
Potência do motor acoplado ao moto redutor	0,33cv (0,25kw)
Torque na saída do moto redutor	18,46Nm (1,88kgfm)
Carga que o moto redutor consegue erguer com diâmetro de 100 milímetros na saída	38 kg
Carga Radial que o eixo do redutor suporta	160 kg
Carga Axial que o eixo do redutor suporta	50 kg
Fator de velocidade com até 1800 rpm de entrada e carga moderada	1
Fator de Partida com até 10 arranques por horas e carga moderada	1
Fator de serviço com tempo de trabalho de até 10 horas por dia e carga moderada	1
Viscosidade do óleo utilizado no redutor em temperatura de até 40°C DIN51519	460
Quantidade de óleo	0,15 Litros
Rendimento	0,701
Peso aproximado do redutor	5kg

Fonte: Lilo redutores (2022).

3.2.2 Aquecedores externos

Segundo RAUWENDAAL (2014), o aquecedor externo é projetado para fornecer o calor necessário para que o polímero atinja um estado fundido, o que não é possível apenas pelo trabalho mecânico e forças de atrito facilitadas pela rotação da rosca de extrusão. Existem três métodos de aquecimento para a extrusora, ou seja, aquecimento elétrico, aquecimento de fluido térmico ou aquecimento a vapor. O princípio de funcionamento do aquecimento elétrico é que uma certa quantidade de calor será gerada pela corrente que passa pelo condutor, que depende da resistência do condutor e da magnitude da corrente. Este método de aquecimento tem grandes vantagens sobre os outros dois métodos de aquecimento porque cobre uma faixa de temperatura mais ampla, tem baixo custo, alta eficiência e não apresenta problemas de limpeza.

Ainda de acordo com RAUWENDAAL (2014), os aquecedores elétricos são normalmente colocados em várias zonas ao longo do barril da extrusora. As extrusoras pequenas normalmente têm de 2 a 4 zonas, enquanto que máquinas maiores têm de 5 a 10 zonas. Na maioria dos casos, cada zona é controlada de forma independente para manter um perfil de temperatura em toda extensão do canhão, que pode ser aumentada ou diminuída, dependendo do tipo de polímero que está sendo processado e das condições de operação.

Um tipo comum de aquecedor elétrico é chamado de resistência coleira, mostrado na Figura 3.3, e é fabricado por várias empresas e está disponível em vários diâmetros. Normalmente, seu exterior é feito de aço inoxidável ou latão, e seu interior contém mica, que é composta por uma variedade de minerais que, quando combinados, atingem um alto nível de resistência elétrica.

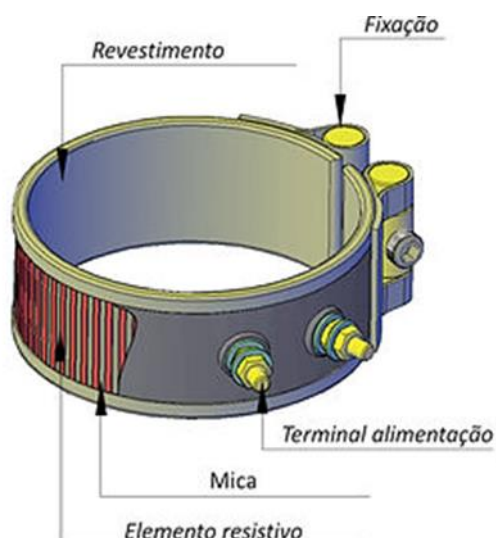


Figura 3.3 – Resistência elétrica tipo coleira.
Fonte: Anluz (2022)

3.2.3 Inversores de frequência

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que pode variar a velocidade de rotação de um motor elétrico trifásico. O nome "Inversor de frequência" é dado pela forma como funciona, ele controla a velocidade injetando um valor de frequência no motor. A utilização de um inversor de frequência oferece uma série de vantagens, dependendo do modelo oferecido pelo fabricante, que combinam a possibilidade de variar a velocidade por meio de controles especiais já implementados no dispositivo. Além de proporcionar total flexibilidade no controle de velocidade, esses controles não incorrem em perdas significativas no torque do motor, são programados para aceleração suave e freiam diretamente o motor sem a necessidade de freios mecânicos, além de diversas formas de controles preferenciais e externos que podem ser até por meio de redes de comunicação. Tudo isso com excelente precisão de movimentos.

Para este projeto foi selecionado o inversor de Frequência WEG CFW-08 (Figura 3.4) que incorpora a mais avançada tecnologia disponível para variação de velocidade em motores de indução trifásicos.

Destinado para o acionamento de motores trifásicos. Na faixa de potência de 0,25 a 20cv.



Figura 3.4 – Inversor de frequência CFW-08.
Fonte: WEG (2022).

3.2.4 Controladores de temperatura PID

Segundo Nise (2012), um sistema de controle é montado a partir de subsistemas ou plantas para obter uma saída desejada com um determinado desempenho dado uma entrada específica.

Nise (2012) ainda define duas configurações padrões que podem ser encontradas na arquitetura de sistemas de controle, a saber:

- Controle em malha fechada;
- Controle em malha aberta.

A Figura 4.6 mostra um diagrama de circuito típico para controle de malha fechada. As entradas são os valores desejados ou o setpoints do sistema de controle, também conhecidos como variáveis controladas. Uma planta é um sistema onde um controlador atuará para atingir um setpoint, e o controlador atuará na planta por meio de parâmetros chamados de variáveis manipuladas. O controlador deve definir o erro cíclico comparando o valor medido pelo sensor na saída da planta com o valor estabelecido como setpoint, e então enviar um sinal de correção ao atuador. O controlador deve reduzir o erro para ter um valor ideal ou aceitável na saída conforme relatado por Pinto (2005).

O controle em malha aberta segue o fluxograma de um sistema em malha fechada, mas sem realimentação, ou seja, esse controle não é sensível a distúrbios

que possam ocorrer no fluxo do processo conforme Figura 3.5.

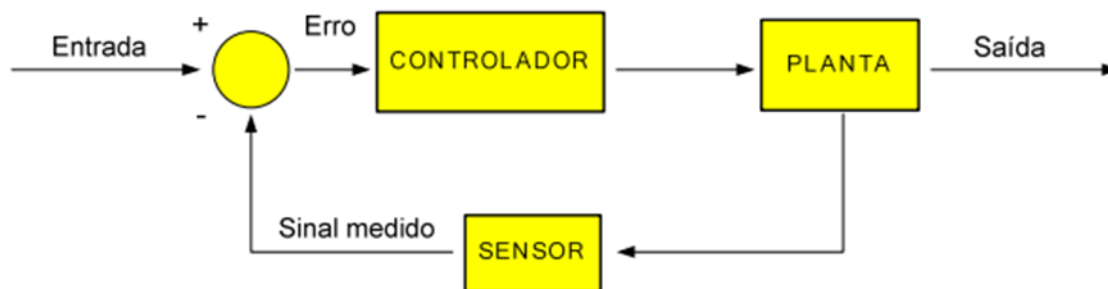


Figura 3.5 – Fluxograma de um controle PID em malha fechada.
Fonte: Adaptado Pinto (2005).

Segundo Pinto (2005) o modo que o sinal de comando aos atuadores é formulado nos controladores pode variar conforme método construtivo do aparelho, a saber:

- Controladores de duas posições (liga-desliga);
- Controladores Proporcionais (P);
- Controladores do tipo Integral (I);
- Controladores do tipo Proporcional Integral (PI);
- Controladores do tipo Proporcional Derivativo (PD);
- Controladores do tipo Proporcional + Integral + Derivativo (PID).

Os controladores PID combinam as três características básicas de ganhos: proporcional, integral e derivativo. Portanto, componentes com esta arquitetura eliminam erros de regime permanente que é a diferença entre o valor esperado e o valor real obtido do sinal e possuem uma boa resposta dinâmica que é o tempo para o qual a resposta é estável, por serem rápidas e trazerem maior estabilidade para compensar por distúrbios ou alterações que possam ocorrer no sistema (NISE,2012).

A Figura 3.6 ilustra o comportamento da curva de um controlador PID comparado a outros tipos. Observe que o erro em regime permanente é zero e a resposta dinâmica é rápida.

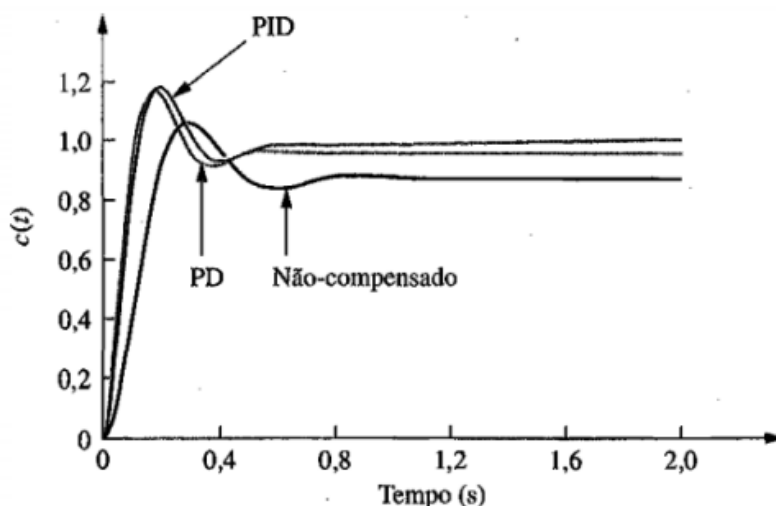


Figura 3.6 – Curva de resposta ao degrau unitário para um controlador PID.
Fonte: Nise (2012).

Para este projeto foi selecionado um controlador PID da marca RKC modelo REX-C100FK07-MAN (Figura 3.7) com capacidade de controle de temperatura da faixa de -199°C até 1372°C, sem necessidade de rele de estado sólido até 600°C.



Figura 3.7 – Controlador PID REX-C100FK07-MAN.
Fonte: RKC instrument (2022).

3.2.5 Leitores de temperatura tipo K

Para controlar a temperatura do processo, são necessárias ferramentas que monitoram e corrigem continuamente a temperatura em tempo real, retornando-a aos limites operacionais sem perturbar o processo. Em sistemas de extrusão onde a temperatura do fundido é uma propriedade específica de cada material, é necessário primeiramente conhecer as propriedades do material a ser extrudado para poder dimensionar o equipamento a ser utilizado. Para ler a corrente durante o processo, as extrusoras normalmente usam termopares, conforme mostrado na Figura 3.8. Um

termopar é um instrumento de medição que gera um sinal que um microcontrolador pode ler em tempo real para seu ambiente de instalação.



Figura 3.8 – Termopar Tipo K.
Fonte: Autoria própria (2022)

Existem diversos tipos de termopares no mercado, e sua aplicação é realizada de acordo com as necessidades de precisão e controle de cada processo. A Figura 3.9 mostra como instalar um termopar no cilindro da extrusora para uma melhor leitura do polímero fundido, que no caso será a posição A.

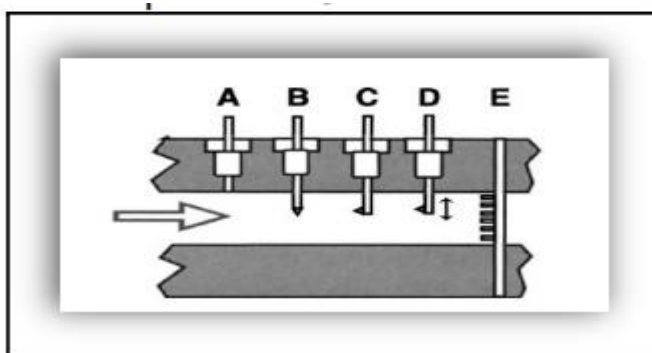


Figura 3.9 – Termopares para controle de fusão cristalina.
Fonte: John et al. (2014).

Para esta planta de extrusão foi selecionado termopares do tipo K com ponta de contato regulável com as seguintes características:

- Temperatura de Operação: 0 - 400°C;
- Precisão: +/- 0.05°C;
- Comprimento do Cabo: 1m;
- Material do Cabo: Malha Trançada;
- Pode ser imerso em líquidos não corrosivos.

3.2.6 Escolha dos Materiais da Rosca e do Canhão

Com base em pesquisas realizadas, o próximo passo foi projetar a rosca e selecionar o material para sua confecção, nesse caso o material da rosca já selecionado foi o aço AISI 304 que possui as seguintes características:

- Elevada resistência à corrosão em meios agressivos severos;
- Boa resistência a altas temperaturas e a temperaturas criogênicas;
- Acabamento superficial de alto polimento;
- Baixo custo de manutenção com vida útil muito longa;
- Ideal para ambientes que exigem higiene e limpeza;
- Favorável relação custo/benefício a longo prazo.

O aço aisi 304 é o mais utilizado produto inoxidável no mundo. Conhecido como 18-8, o aço aisi 304 possui 18% cromo e 8 % Níquel na sua composição química. Esta combinação de elementos essenciais aos aços inoxidáveis o classifica na família austenítica a mais comum e aplicável no mundo (CHIAVERINI, 2008).

Para o material do canhão optou-se por uma construção onde o mesmo teria uma configuração com embuchamento do mesmo material da rosca (aço AISI 304) e paredes com espessura de 6 mm de bucha com aço AISI 304 e a capa SAE 1020, com furos para alimentação e conexão dos termopares.

3.3 Métodos

Este capítulo apresenta uma proposta para a construção de uma planta de extrusão de polímeros e, ainda, um projeto com o objetivo de validar a referida arquitetura proposta.

A Figura 3.10 apresenta a metodologia utilizada para realização deste trabalho. Esta parte do trabalho foi dividido em 5 etapas descritas a seguir.

do material sólido e pelas propriedades viscosas do fundido (PEARSON, 1985; SHAH; GUBTA, 2003; RAUWENDAAL, 2014).

Como a proposta deste projeto é a construção de um equipamento para pesquisa laboratorial, deve-se levar em consideração vários fatores construtivos para a produção da extrusora, uma vez que a usinagem de componentes complexos como uma rosca de extrusão dupla poderia ser um desafio para as empresas de usinagem na região, por não se dispor de equipamentos de usinagem com comando numérico capaz de fazer dois avanços simultâneo.

Tendo esses parâmetros em mente optou-se para construir uma extrusora monorroscas.

3.3.2. Dimensionamento da Rosca de extrusão

O passo inicial para o desenvolvimento do projeto da mini extrusora é a escolha do diâmetro da rosca, pois através do diâmetro pode-se calcular todos os outros parâmetros envolvidos no projeto. Tendo em vista que este projeto se trata de uma bancada para pesquisa, o diâmetro de 24 mm é o que melhor se aplica ao projeto, pois tarugos de 1" são mais facilmente encontrados na indústria de perfilados.

A partir da escolha e definição do diâmetro externo da rosca (D_s), foi possível dimensionar (Equação 3.1) as outras zonas e perfis da extrusora. Entretanto alguns valores precisaram ser assumidos. O diâmetro interno do tubo (D_b) deve ser encontrado com base no diâmetro externo da rosca. Assim:

$$D_b = D_s + 2 * \delta \quad (3.1)$$

Segundo Giles (2005), a folga entre a parede do tubo e a rosca deve ser pequena, em torno de 0,025 mm de diâmetro (D_s) para extrusoras pequenas e 0,1 mm para extrusoras maiores. No entanto, segundo Menrich (2018), deve haver uma folga (δ) entre a rosca e o cano, que é de cerca de 0,15 mm. Independentemente da teoria que se apresente, a folga deve ser pequena o suficiente para evitar o fluxo reverso e evitar a perda de pressão no sistema.

Observação: A teoria de folga mais aceitável é a desenvolvida por Manrich (2005) (Equação 3.2) porque considera um valor múltiplo do diâmetro da rosca ao invés de um valor fixo.

$$\delta = 0.001 * D_s \quad (3.2)$$

Como funciona bem com diferentes polímeros, um valor do comprimento do passo da rosca (L_s) igual ao diâmetro da mesma (D_s) geralmente é usado para obter uma rosca quadrada:

Com isso pode-se calcular o ângulo da rosca (θ) usando-se essa relação ilustrada na Equação 3.3.

$$\theta = \arctang \frac{L_s}{\pi D_s} \quad (3.3)$$

Giles (2005) afirma que a espessura do filete “e” (Equação 3.4) de uma rosca quadrada costuma ser igual a 0,1 D_s , esse percentual é o que melhor se aplica para essa configuração de rosca.

$$e = 0,1 D_s \quad (3.4)$$

Para encontrar a largura do canal do filete (W) (Equação 3.5) é preciso ter a espessura do filete (e) e o ângulo do filete (θ).

$$W = L_s \cdot \cos \theta - e \quad (3.5)$$

Para o Cálculo das Zonas de aquecimento Manrich (2005) nos apresenta parâmetros simples para encontrá-los, tem-se que:

Zona de Alimentação (Equação 3.6):

$$L_f = 3,13 D_s \quad (3.6)$$

1ª Zona de Compressão (Equação 3.7):

$$L_{c_1} = 8,33 D_s \quad (3.7)$$

2ª Zona de Compressão (Equação 3.8):

$$Lc_2 = 1,04Ds \quad (3.8)$$

Zona de Dosagem (Equação 3.9):

$$Ls = 12,5Ds \quad (3.9)$$

A partir das zonas calculadas pode-se encontrar o comprimento útil da rosca (L) Equação 3.10).

$$L = LF + Lc_1 + Lc_2 + Ls \quad (3.10)$$

Como a profundidade do canal da rosca h_i para diâmetro de 24 mm não está especificado para as pesquisas de Giles (2005) seguiu-se a recomendação do mesmo que afirma que a razão h_i/D normalmente se encontra entre 0,1 e 0,3. Então adotou-se (Equação 3.11):

$$h_i = 0,15Ds \quad (3.11)$$

Para encontrar a folga entre a raiz na zona de alimentação e a parede interna do tubo (H_i), basta somar a profundidade do canal da rosca h_i com a folga entre o filete e o barril (δ), então (Equação 3.12):

$$H_i = h_i + \delta \quad (3.12)$$

Para encontrar a profundidade do final da rosca (h_f) na zona de saída, Manrich (2005) a relaciona com a taxa de compressão (R_c), como a taxa de compressão para o PP que varia de 3,1 a 3,5, desse modo tem-se que (Equação 3.13):

$$\frac{h_i}{h_f} = RC \Rightarrow h_f = \frac{h_i}{R_c} \quad (3.13)$$

Para se encontrar a profundidade da zona de compressão ou transição e considerando que h_i/D_s é igual a 0,15, como explicado por Martinez (2018), h_i assume o valor de 3,6 mm. Conhecendo a razão de compressão que é de 3.5, h_f se torna igual a 1,028 mm. Como a razão h_c/h_i média existente é de 0,71, o valor de h_c calculado pode ser encontrado pelo uso da Equação 3.14.

$$\frac{h_c}{h_i} = 0,71 \Rightarrow h_c = 0,71h_i \quad (3.14)$$

Para o cálculo do diâmetro externo do barril (D_e), basta multiplicar o diâmetro da rosca por 2, conforme a Equação 3.15. Nesse caso tem-se que:

$$D_e = 2 \cdot D_s \quad (3.15)$$

Para encontrar o diâmetro do núcleo da rosca (D_a) na zona de alimentação, utiliza-se a Equação 3.16.

$$D_a = D_b - 2h_i \quad (3.16)$$

Como o comprimento da ponta da rosca de extrusão é considerado igual à D_s que tem o valor de aproximadamente 24mm, o ângulo da ponta da rosca será de 24,75°.

Como forma de avaliação o cálculo da vazão mássica empírico proposto por Rao (2012) (Equação 3.17), será possível comparar com outras máquinas existentes no mercado.

$$G = 60 \cdot \rho_0 \cdot N \cdot n_f \cdot \pi^2 \cdot H_i \cdot D_b \cdot (D_b - H_i) \frac{W}{W+e} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3.17)$$

Onde:

- G : vazão mássica (kg/h);
- ρ_0 : densidade (estado fluido) (kg/m³) (Tabela 2.2);
- N : rotação angular = 80 rpm
- ηF : eficiência de transporte (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Eficiência de transporte de polímeros.

Eficiência de transporte para alguns polímeros		
Polímero	Tubo liso	Tubo ranhurado
PEBD	0,44	0,8
PEAD	0,35	0,75
PP	0,25	0,6
PVC	0,45	0,8
PET	0,17	0,52
PC	0,18	0,51
PS	0,22	0,65

Fonte: Adaptado de RAO (2012).

Conforme GILES (2005), a potência necessária para levar o polímero no estado sólido, presente na zona de alimentação, até o estado fundido à uma determinada vazão mássica é dada pela Equação 3.18.

$$P = \frac{G.C_p.\Delta T + G.\Delta H}{3,6} \quad (3.18)$$

Onde:

- P é a potência para transportar o polímero, em W ;
- G é a vazão mássica em kg/h ;
- C_p é a capacidade calorífica em $kJ/kg \text{ } ^\circ C$;
- ΔT é a diferença de temperatura entre o polímero ao entrar na zona de alimentação e o polímero no estado fundido em $^\circ C$;
- ΔH é o calor latente de fusão do polímero, em kJ/kg . (Em polímeros amorfos, esse valor é igual a zero).

Em regra, cerca de 90% da energia total da rotação da rosca em extrusoras de barril liso é empregada na variação da temperatura do polímero. Os outros 10% da potência é consumida na zona de alimentação, na pressurização do polímero, e devido a perdas mecânicas. No entanto, para estimar a potência realmente necessária

ainda deve-se levar em conta as perdas no sistema de transmissão, do motor, as perdas de calor para o ambiente, assim como as perdas de calor para o sistema de resfriamento existente no início do canal de alimentação. Segundo Frankland (2012) a eficiência total de uma extrusora levando em conta todos esses fatores é em torno de 65%.

De posse da informação sobre a vazão mássica, pode-se então determinar P , restando apenas determinar ΔT , visto que ΔH e C_p são propriedades do polímero. O ΔT adequado a se utilizar irá depender do polímero a ser extrudado. O valor de ΔH é bastante dependente do grau de cristalinidade do polímero. Quanto maior for este, maior será o valor de ΔH . O grau de cristalinidade do PP comercial varia entre 40% a 70%.

A potência realmente necessária na rosca de extrusão, em W , para o funcionamento da extrusora, será calculada considerando a eficiência de 65% sobre o valor calculado pela Equação 3.19, como explicado anteriormente.

$$P_s = \frac{P}{0,65} \quad (3.19)$$

Segundo Johnson, K. (2001) o torque atuante na rosca, em N.m, será então obtido a partir da Equação 3.20.

$$T_s = \frac{P_s}{\omega} \quad (3.20)$$

Onde ω é a rotação da rosca em radianos por segundo.

De posse da informação a respeito do torque atuante na rosca, pode-se escolher um motor elétrico adequado, considerando o fator de redução utilizado. Dessa forma, Johnson, K. (2001) nos mostra que o torque necessário no eixo do motor, em kgf.m, será dado pela Equação 3.21.

$$T_M = \frac{T_s}{9,81.i} \quad (3.21)$$

Onde i é o momento de inércia.

Foi então consultado um catálogo de motores elétricos, e foi selecionado o motor que pudesse desenvolver um conjugado maior que TM , que representa o chamado conjugado resistente. Dessa forma, garante-se que o motor irá suportar a carga, desde a partida até a sua rotação nominal.

Após o dimensionamento feito realizou-se o desenho utilizando software *SOLIDWORKS* conforme Figura 3.11, para mais detalhes ver pagina 115.

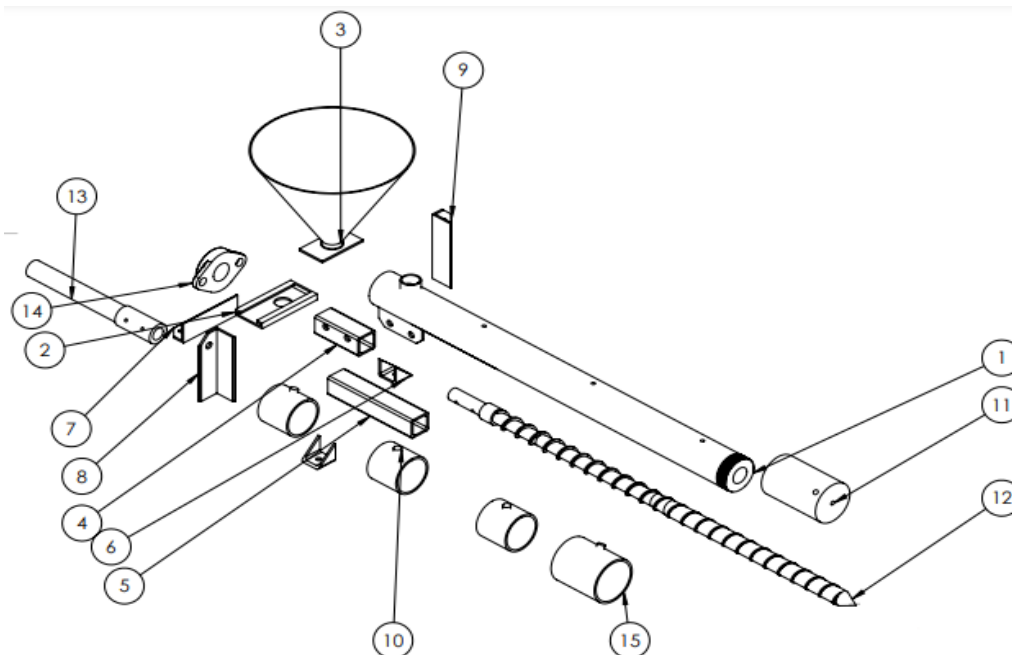


Figura 3.11 – Vista explodida da extrusora.
 Fonte: Autoria própria (2022).

3.4 Seleção dos Materiais

Após o dimensionamento do equipamento e realização do desenho, selecionou-se os materiais, conforme as Tabelas 3.1 e 3.2, levando em consideração o quantitativo de cada item.

3.4.1 Processo de Fabricação da extrusora

A usinagem e fabricação das peças da extrusora foi feita na empresa Centro de Usinagem Metal forte com sede na cidade de Breu Branco estado do Pará.

Para a usinagem da rosca foi necessário um acompanhamento diário pois se trata de uma confecção complexa a ser usinada no torno, pois para a usinagem da

mesma foi necessário a avanço simultâneo em dois eixos, no entanto caso aja dificuldade para esse tipo de avanço no torno convencional, como segunda opção o rebaixamento cônico do filete poderia ser feito em uma mandrilhadora.

As demais partes do equipamento foi fabricada seguindo detalhes do projeto e montados no laboratório de máquinas operatrizes da UFPA Campus Tucuruí, onde foi feito ajustes no projeto caso fosse necessário, além do ajuste fino de componentes mais precisos e instalação de circuitos elétricos.

3.5 Equações de Vazão

3.5.1 Equações de Velocidade do Polímero Fundido

Do ponto de vista teórico, a zona de dosagem é analisada com maior profundidade; nesta zona os cálculos são bastante simplificados em comparação com as outras zonas porque todo o material está em estado fundido e pode ser considerado homogêneo. Considerando algumas aproximações, os resultados da análise podem ser expressos na forma de equações simples que são úteis como uma primeira aproximação ao funcionamento da extrusora nesta área (CAMPBELL, 2013).

Para o cálculo e estudo da movimentação do material através do parafuso, assume-se:

- O processo é contínuo e o estado estacionário foi alcançado.
- O canal do parafuso tem seção retangular.
- O sistema de coordenadas é o da Figura 3.12.
- O canal do parafuso está desenrolado.
- O cilindro é uma superfície plana que se move sobre o canal do parafuso, arrastando o material.
- O polímero fundido tem comportamento newtoniano.
- O material fundido tem um comportamento incompressível.

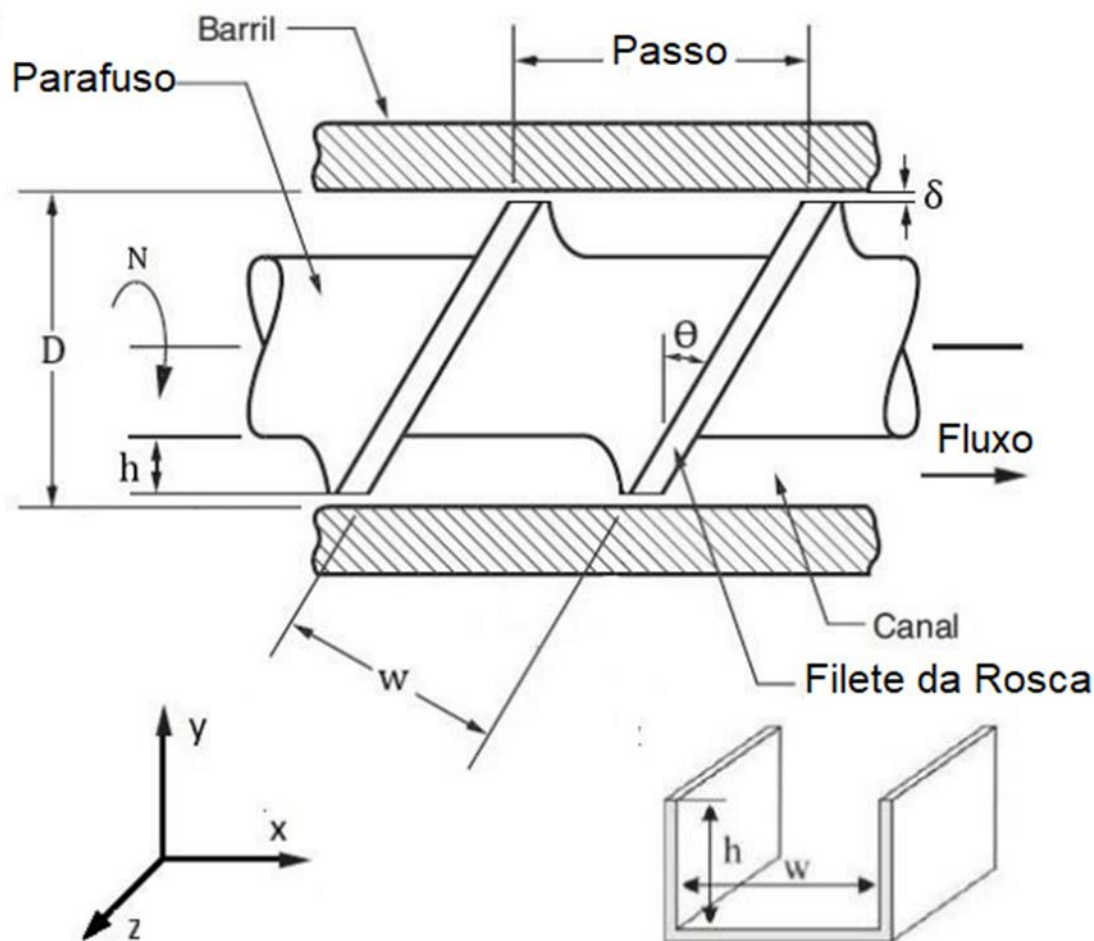


Figura 3.12 – Nomenclatura e sistema de coordenadas
Adaptado de Tadmor (2006).

Onde:

D é o diâmetro do parafuso

w é a largura do canal

h é a profundidade do canal (ele varia conforme a zona)

N é o número de voltas que o parafuso gira.

θ é o ângulo da rosca do parafuso com a vertical

δ é a folga entre o cilindro e a rosca

Conforme mencionado acima, existem dois tipos de fluxo ao longo do eixo Z . O fluxo de fricção ou fluxo de arrasto é responsável pelo movimento do material e é causado pelo movimento da superfície do cilindro (sempre em $+Z$ ou em direção a matriz). Quando há algum impedimento ao fluxo (por exemplo, um bico, válvula, etc.), um gradiente de pressão é criado na direção Z , o que provoca um fluxo na direção $-Z$ denominado fluxo de pressão ou fluxo de retrocesso.

A análise de escoamento nesta seção baseia-se na consideração do escoamento newtoniano e isotérmico de um fluido incompressível em um canal retangular de largura w e altura h . δ (folga parafuso-cilindro) é desprezada porque $\delta \ll h$ e o fluxo é considerado uniforme. Realizando um equilíbrio de momento em um sistema deste tipo, obtém-se a seguinte expressão conforme Equação 3.22 (equação de Navier-Stokes).

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) \quad (3.22)$$

Onde:

$\frac{dP}{dz}$ = gradiente de pressão ao longo do canal.

v = velocidade do fluido no canal

η = viscosidade do fluido

A equação anterior pode ser simplificada se for considerado que $w \gg h$, de modo que $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$ o que significa negligenciar o efeito que as paredes do canal podem ter no fluxo. Com isto, às equações de fluxo são simplificadas para a equação 3.23:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) \quad (3.23)$$

Utilizando esta última equação, obtém-se resultados que diferem em menos de 10% daqueles obtidos com a equação completa se a relação entre a largura do canal (w) e a sua profundidade (h) for superior a 10. Este é precisamente o caso da maioria dos parafusos usados em máquinas extrusoras de plástico.

Integrando a equação (3.23) obtém-se:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{y}{\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) + C_1$$

Integrando novamente obtém-se a Equação 3.24:

$$v = \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) + C_1 y + C_2 \quad (3.24)$$

Levando em consideração as condições de contorno: quando $y = 0$, ou seja, próximo ao parafuso $V = 0$. Substituindo esta condição na Equação (3.24), obtém-se $C_2 = 0$. Por outro lado, próximo à parede do cilindro onde $y = h$, a velocidade será $v = V$, velocidade linear periférica do cilindro, resultando em:

$$V = \frac{h^2}{2\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) + C_1 h$$

$$C_1 = \frac{V}{h} - \frac{h}{2\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right)$$

Substituindo o valor de C_1 e C_2 na Equação (3.24) obtém-se a Equação (3.25)

$$v = \frac{Vy}{h} - \frac{hy}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

$$v = \frac{Vy}{h} - \frac{y(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (3.25)$$

Dois termos aparecem no segundo membro desta equação. A primeira varia linearmente com y e depende da velocidade do parafuso; representa fluxo de arrasto ou fricção; o segundo será negativo ou zero (e varia entre 0 e h), então se opõe ao movimento do material em direção ao bocal da matriz, dando um perfil de velocidade parabólico que depende da queda de pressão ao longo do parafuso; portanto, representa o fluxo ou pressão reversa. A soma desses dois termos representa a velocidade resultante em qualquer ponto do canal.

3.4.2 Cálculo do fluxo de Vazão.

Segundo Crawford, (1998) a vazão do material extrudado pode ser calculada como o produto da velocidade do material e da seção do parafuso. Pode-se partir da Equação (3.25), integrando o produto da velocidade e da largura do canal entre os limites $y = 0$ e $y = h$ obtendo com isso a Equação 3.26.

$$Q = \int_0^h wv \, dy = \int_0^h \frac{wVy}{h} \, dy + \int_0^h \frac{wy(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \, dy \quad (3.26)$$

De onde se obtém a Equação 3.27.

$$Q = \frac{wVh}{2} - \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (3.27)$$

Assim como no caso da velocidade, o fluxo também possui dois termos. O primeiro representa o fluxo de arrasto e o segundo o fluxo de pressão, para esse equacionamento desconsiderou-se o fluxo de escape:

$$\text{Fluxo de Arraste: } Q_D = \frac{wVh}{2}$$

$$\text{Fluxo de Pressão: } Q_P = \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

Onde:

Q_D – Fluxo de arrasto (m³/s)

Q_P – Fluxo de pressão

D – Diâmetro do parafuso (m)

N – Rotação do parafuso (rpm)

h – Profundidade do canal do parafuso (m)

θ – Ângulo da hélice do parafuso

L – Comprimento do parafuso (m)

P – Pressão de operação (Pa)

η – Viscosidade (Pa. s)

(Crawford, 1998. P.256)

Agora é interessante escrever a Equação (3.27), que descreve o fluxo de material através do parafuso, em função das dimensões do mesmo, utilizando a notação da Figura 3.13.

Segundo Crawford, (1998) se for imaginado o parafuso cortado ao longo de uma geratriz e desenrolado, desprezando a largura do filete, conforme representado na Figura 3.13, pode-se escrever a seguinte equação:

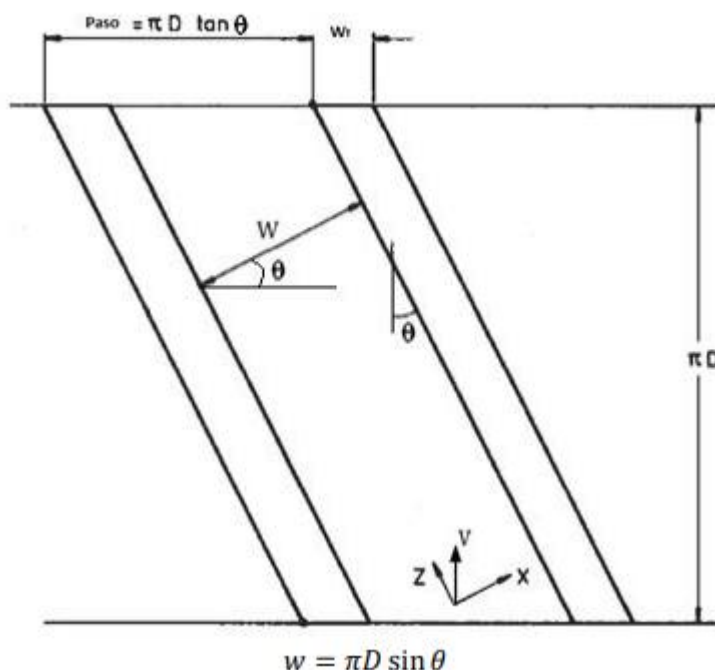


Figura 3.13 – Parafuso desenrolado.
Fonte: Crawford, 1998

Se V é a velocidade com que o cilindro se move no parafuso, em termos de velocidade angular $V = \pi D N$, e está direcionado em um ângulo θ com a rosca do parafuso e tem duas componentes v_Z e v_X paralelas ao eixo Z e o eixo X , respectivamente:

$$v_Z = V \cos \theta = \pi D N \cos \theta$$

$$v_X = V \sin \theta = \pi D N \sin \theta$$

Uma partícula fluida descreve um movimento muito complexo dentro do canal, mas apenas a componente v_Z é responsável pelo avanço do fluido ao longo do canal. A componente X atua num plano normal ao eixo Z e provoca um movimento circulatório importante para melhorar a mistura e a transferência de calor, mas não

para a capacidade de transporte do parafuso. Portanto, para calcular a vazão de material basta considerar vZ .

Substituindo os valores assim encontrados de W e V no primeiro termo da Equação (3.27) tem-se:

$$\frac{whV}{2} = \frac{\pi D \sin\theta h \pi D N \cos\theta}{2} = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2}$$

O segundo termo da Equação (3.27) pode ser expresso em termos das dimensões do parafuso, levando em consideração que se o parafuso estiver completamente desenrolado pode-se escrever:

$$\frac{L}{Z} = \sin\theta \rightarrow dZ = \frac{dL}{\sin\theta}$$

Onde L é o comprimento do cilindro (canhão) e Z o comprimento total do canal do parafuso, uma vez desenrolado, ao longo do qual existe um gradiente de pressão (dP/dZ). Desta forma o segundo termo da Equação (3.27) pode ser escrito como:

$$\frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) = \frac{\pi D \sin\theta h^3}{12\eta} \frac{dP}{dL} \sin\theta = \frac{\pi D \sin^2\theta h^3 \Delta P}{12 \eta L}$$

Se for considerado que a queda de pressão ao longo do parafuso é constante e tomando incrementos $dP/dL = cte = \Delta P/L$, a equação (3.27) pode ser escrita da seguinte forma Equação (3.28).

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} - \frac{\pi D \sin^2\theta h^3 \Delta P}{12 \eta L} \quad (3.28)$$

A equação (3.28) é uma linha reta em uma representação de Q versus ΔP e é conhecida como linha reta operacional ou equação característica do parafuso, conforme mostrado na Figura 3.14. Esta reta é muito útil para se prever o ponto de operação na saída da extrusora.

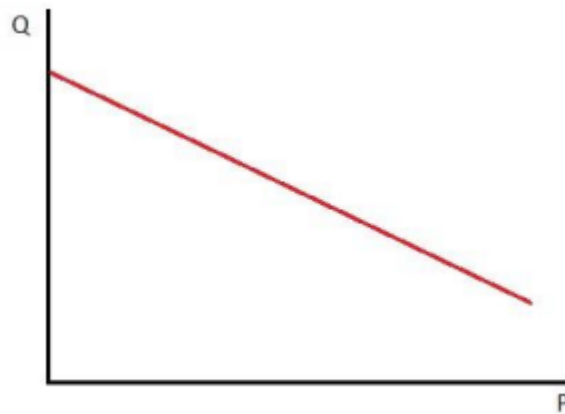


Figura 3.14 – Curva característica Q-P da extrusora.
Fonte: Crawford, 1998

Quando não há aumento de pressão na extremidade da extrusora, na entrada da matriz, qualquer fluxo é devido ao arrastamento, e a vazão máxima Q_{max} pode ser obtida reduzindo a equação a um único termo e obtendo com isso a Equação (3.29):

$$Q = Q_{max} = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} \quad (3.29)$$

Por outro lado, quando há uma grande queda de pressão na extremidade da extrusora $Q = 0$, obtém-se a pressão máxima da equação, de modo que a equação é a seguinte:

$$\frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} = \frac{\pi D \sin^2 \theta h^3 P}{12 \eta L}$$

Onde tem-se a Equação (3.30):

$$P = P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan\theta} \quad (3.30)$$

(Crawford, 1998, p.257)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Escolha do tipo de Extrusora

A extrusora escolhida para este projeto levando-se em consideração as dificuldades construtivas para usinagem da rosca em empresas da região foi uma extrusora monorroscas com diâmetro da rosca igual a 24 mm e 600mm para comprimento do canhão.

4.2. Dimensionamento do Equipamento

De acordo com o equacionamento algébrico apresentado, a Tabela 4.1 apresenta as principais variáveis para a modelagem em *SOLIDWORKS* da rosca de extrusão.

Tabela 4.1 – Variáveis para projeto da rosca.

Variáveis calculadas	Equação	Medidas
Diâmetro interno do barril (D_b)	3.2	24,048 mm
Comprimento útil da broca (L)	3.11	600,00 mm
Passo (L_s)	3.10	24,00 mm
Diâmetro da rosca (D_s)	-	24,00 mm
Diâmetro de raiz na zona de alimentação (D_a)	3.16	16,84 mm
Profundidade do canal na zona de alimentação (h_i)	3.12	3,6 mm
Profundidade do canal na zona de compressão (h_c)	3.15	2,55 mm
Profundidade do canal na zona de saída (h_f)	3.14	1,028 mm
Folga na zona de alimentação entre filete e barril (H_i)	3.13	3,624 mm
Largura do canal (W)	3.6	20,47 mm
Ângulo (θ)	3.5	17,65°
folga radial entre o filete e o barril (δ).	3.3	0,024 mm

Espessura do filete (e)	3.5	2,4 mm
Vazão mássica (G)	3.17	4,87 kg/h
Potência para transportar o polímero (P)	3.18	267,2 W
Torque necessário no eixo do motor (T_M)	3.20	0,25 kgf.m
Taxa de Compressão (RC)	H1/H3	3,5
Razão L/D	L/D	25:1

Fonte: Autoria própria (2022).

Com os dados encontrados pode-se desenhar a rosca de acordo com os seguintes parâmetros:

- Diâmetro da rosca = 24mm;
- Comprimento da rosca = 600mm;
- Ângulo da hélice para rosca quadrada = $17,6^\circ$;
- Passo do filete (s) = Diâmetro da rosca (Ds);
- Taxa de Compressão (RC) = 3,1 a 3,5;
- Razão L/D entre 16:1 a 30:1 = $600/24=25:1$.

A Tabela 4.2 exibe a relação de profundidade das zonas.

Tabela 4.2 – Relação de profundidade das zonas.

Relação de Profundidade				
Ds = 24mm	Zona de Alimentação:(H1) 3,6 mm	1ª Zona de Compressão: (H2) 3,6 a 2,556	2ª Zona de Compressão: (H3) 2,556 a 1,028	Zona de Dosagem: (H3) 1,028

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados obtidos seguem os mesmos parâmetros encontrados por Martinez (2018) e Guariente (2019) em seus trabalhos, levando em consideração o equacionamento proposto.

4.3 Projeto da matriz e cálculo de ponto operacional

Segundo Crawford (1998) para obter a vazão característica de uma matriz projetada para a extrusão de um perfil cilíndrico maciço, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Q = KP$$

Onde: $K = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d}$ para uma seção circular de raio R e comprimento L_d .

Portanto:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} P \quad (4.1)$$

A equação (4.1) permite representar as características da matriz na Figura 3.15 e a intersecção das duas curvas características, que será o ponto de operação da extrusora. Esta curva é útil porque mostra o efeito que as alterações em vários parâmetros terão na saída da matriz. Por exemplo, aumentar a velocidade da rosca N, deslocaria a curva característica da extrusora para cima. Da mesma forma, um aumento no raio da matriz R, aumentaria a inclinação da curva característica da matriz e em ambos os casos a produção da extrusora aumentaria.

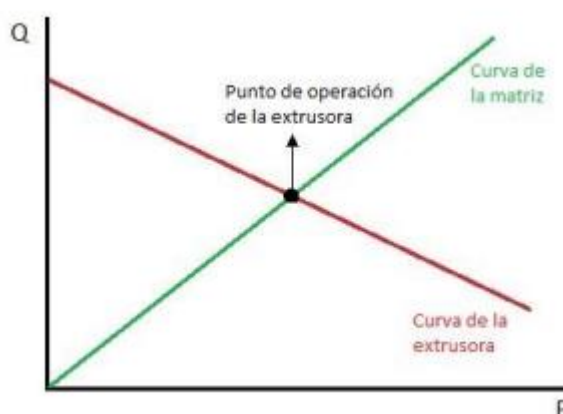


Figura 3.15 – Ponto operacional.
Fonte: Crawford, 1998

O ponto operacional para uma combinação de matriz e extrusora também pode ser determinado a partir das Equações (3.29) e (3.32).

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} - \frac{\pi D \sin^2\theta h^3}{12\eta} \frac{P}{L} = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} P$$

Portanto, para uma matriz de seção circular, a pressão no ponto de operação é determinada pela Equação 4.2:

$$P_{op} = \left\{ \frac{2 \pi \eta D^2 N h \sin\theta \cos\theta}{\frac{R^4}{2L_d} + \frac{Dh^3 \sin^2\theta}{3L}} \right\} \quad (4.2)$$

Uma dimensão muito importante é o comprimento da matriz. Em geral, deve ser o mais longo possível. Contudo, a resistência total da matriz não deve ser aumentada até ao ponto em que ocorra um consumo excessivo de energia e um sobreaquecimento do fundido.

O comprimento necessário da matriz depende não apenas do tipo e da temperatura do material termoplástico fundido, mas também da vazão. A deformação do fundido na seção de entrada da matriz causa invariavelmente uma tensão interna que diminui gradualmente com o tempo (relaxamento). Em geral o objetivo é permitir que o fundido relaxe antes de atingir o bocal. Caso contrário, as dimensões e as propriedades mecânicas do produto poderão variar, especialmente com resfriamento rápido.

4.4.1 Curva operacional da extrusora na simulação.

A partir das equações de vazão e pressão máxima mostradas nas seções anteriores (Equação 3.29 e 3.30), obtém-se a curva vazão - pressão de uma extrusora cujas características são:

D = diâmetro da Rosca = 24 mm ou 0,024 m

θ = Ângulo de inclinação da hélice = 17,65°

N = rotação da rosca/rpm = 30

L = comprimento da rosca = 0,6 m

h = altura do filete na zona de saída = 0,002 m

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} = \frac{\pi^2 0,024^2 (\sin 17,65^\circ \cos 17,65^\circ) 0,002 \frac{30}{60}}{2} =$$

$$Q = 8,23 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 2,67 \text{ kg/h}$$

Como na Equação 3.17 usa uma rotação de 80 rpm a diferença apresentada é aceitável.

Para determinar o P_{max} na saída do parafuso, assume-se que $Q = 0$

$$P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan \theta}$$

A viscosidade é dada pela lei de potência: $\eta = m(T^{\circ}C) \gamma^{n-1}$

Onde:

$\eta = 0,38$ conforme visto na Tabela 2.4.

E a taxa de cisalhamento para uma seção transversal circular é dada por:

$$\gamma = \frac{4 Q}{\pi R^3} = \frac{4 (8,23 \times 10^{-7})}{\pi (3,0 \times 10^{-3})^3} = 122 \text{ s}^{-1}$$

Onde R = raio do canal circular através do qual o polímero fundido flui, e onde Q_{max} é a vazão experimental do fluxo através do canal, para encontrar a taxa de cisalhamento e a viscosidade.

Com base na curva viscosidade – taxa de cisalhamento da Figura 2.16, onde a viscosidade máxima para o polipropileno (PP) a 250°C é 200 Pa.s. O valor da viscosidade para uma taxa de cisalhamento de 122 s⁻¹ corresponde a 150 Pa.s.

Portanto, P_{max} para um polímero com a referida densidade e com $Q = 0$ é:

$$P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan \theta} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0,024 \cdot 0,6 \cdot \frac{30}{60} \cdot 150}{0,002^2 \tan 17,65^{\circ}} = 15.995.065 \text{ Pa} \approx 16 \text{ MPa}$$

4.3.2 Curva matricial de simulação

Para calcular a vazão de uma matriz onde se deseja obter um perfil cilíndrico maciço com diâmetro de 6,0 mm, utiliza-se a equação descrita em uma das seções anteriores e escreve-se:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} \cdot P = \frac{\pi \cdot (3,0 \times 10^{-3})^4}{8 \cdot 150 \cdot 0,094} \cdot 16 \times 10^6 = 36 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Onde:

R = Raio da matriz

L_d = Comprimento da Matriz

η = Viscosidade

A pressão operacional para a referida matriz e a referida extrusora é:

$$P_{op} = \left\{ \frac{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D^2 \cdot N \cdot h \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\frac{R^4}{2L_d} + \frac{Dh^3 \sin^2 \theta}{3L}} \right\} =$$

$$= \left\{ \frac{2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 0,024^2 \cdot \frac{30}{60} \cdot 0,002 \cdot \sin 17,65^\circ \cdot \cos 17,65^\circ}{\frac{(3,0 \times 10^{-3})^4}{2 \cdot 0,094} + \frac{0,024 \cdot 0,002^3 \sin^2 17,65}{3 \cdot 0,6}} \right\} =$$

$$= 355.945,73 \text{ Pa ou } 0,355945 \text{ MPa}$$

Com isso finalmente pode-se calcular a Vazão operacional, usando a pressão operacional:

$$Q_{op} = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} \cdot P = \frac{\pi (3,0 \times 10^{-3})^4}{8 \cdot 150 \cdot 0,094} \cdot 0,355945 \times 10^6 =$$

$$= 8,03 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

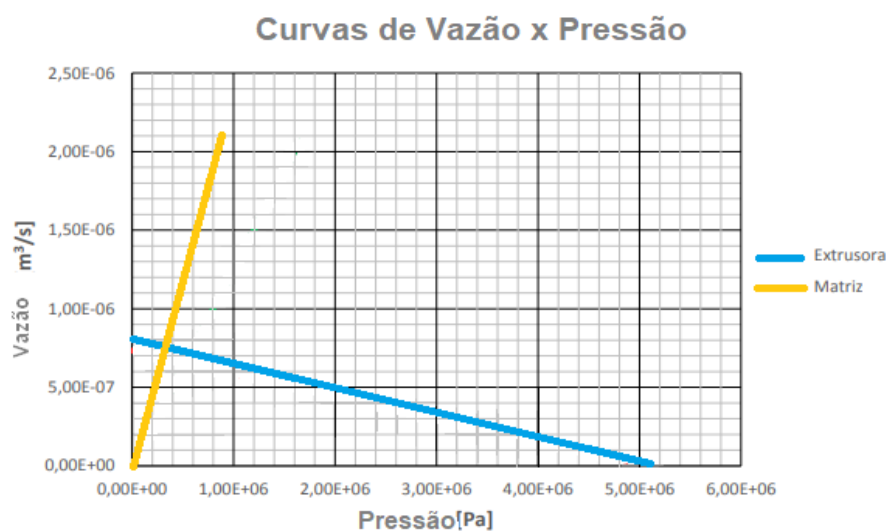


Figura 4.1 – Ponto de Operação para uma simulação
 Fonte: Autoria própria (2023)

4.3.3 Resultados da Simulação

Uma vez calculados os pontos operacionais para uma matriz com diâmetro de 5,5 mm na seção do canal e inserido no Programa Polydata, os resultados da simulação são os seguintes para extrusão direta.

Vazão de massa:

O gráfico a seguir obtido no Ansys analisa a vazão mássica para o ponto de operação obtido para a matriz analisada.

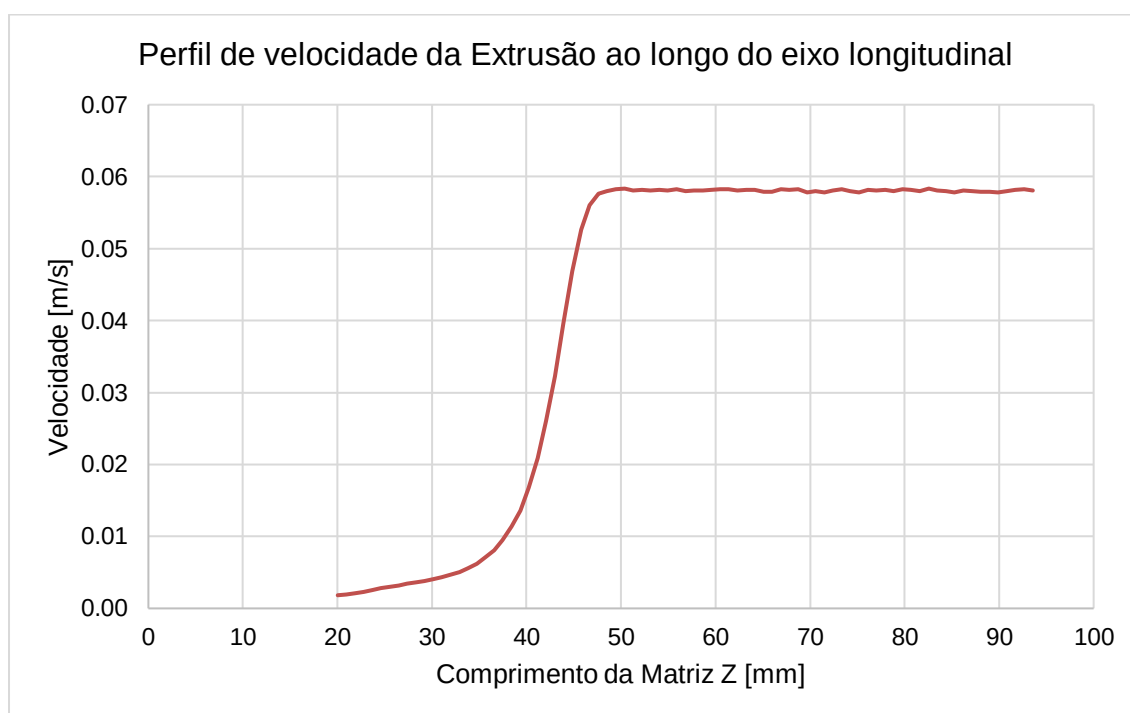


Figura 4.2 – Curva de velocidade na primeira simulação de 0,251 MPa.

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir do gráfico pode-se obter a velocidade máxima e a velocidade média para uma pressão de 0,251 MPa:

$$V_m = \frac{V_{max}}{2} = \frac{0,058}{2} = 0,029 \text{ m/s}$$

Conhecendo a Área de saída da matriz que é de $2,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ e a velocidade média, bem como a densidade do polipropileno fundido com base ASTM D1505 que é de $0,760 \text{ g/cm}^3$, a vazão de massa pode ser calculada:

$$G_m = \rho \cdot v_m \cdot A = 760 \cdot 0,029 \cdot 2,8 \times 10^{-5} = 6,0 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \cdot 3600 s =$$

$$= 2,22 \frac{kg}{h}$$

Segundo Crawford (1998), para que a vazão do material seja uniforme, as relações entre a velocidade de entrada e a velocidade de saída devem ser iguais à razão entre a área de saída e a área de entrada na direção do fluxo.

Relação entre velocidades (Entrada/Saída):

$$\frac{V_{ent}}{V_{sai}} = \frac{3,6 \times 10^{-3}}{5,9 \times 10^{-2}} = 0,061$$

Relação entre as Áreas (Saída/Entrada):

$$\frac{A_{sai}}{A_{ent}} = \frac{2,8 \times 10^{-5}}{4,5 \times 10^{-4}} = 0,062$$

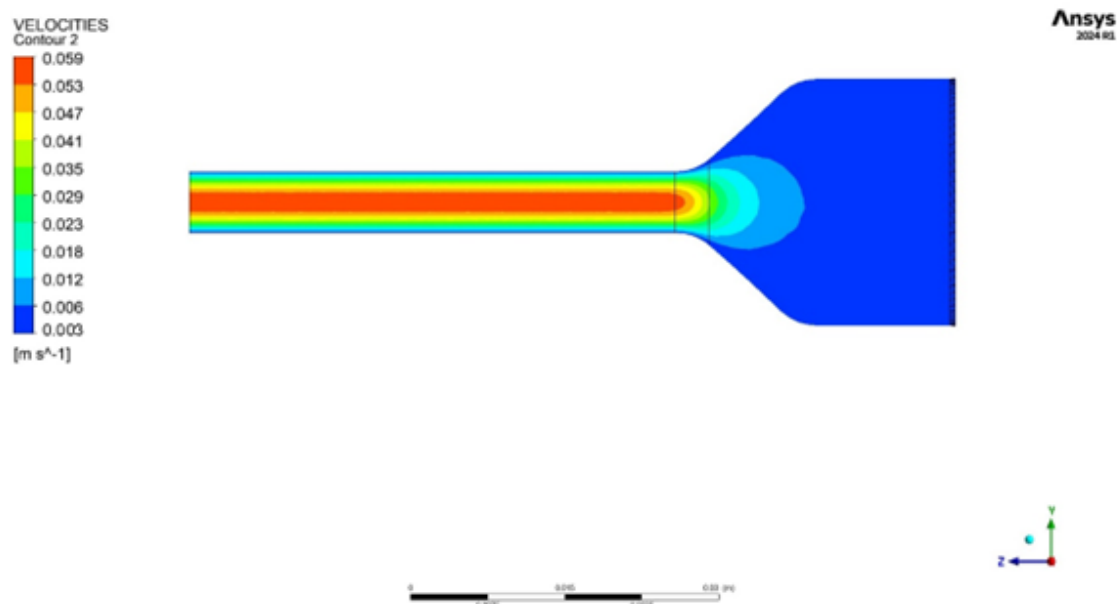


Figura 4.3 – Distribuição das velocidades na simulação da matriz.
Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se um fluxo uniforme onde as velocidades máximas são atingidas no centro do canal circular como pode ser visto na Figura 4.4 a seguir:

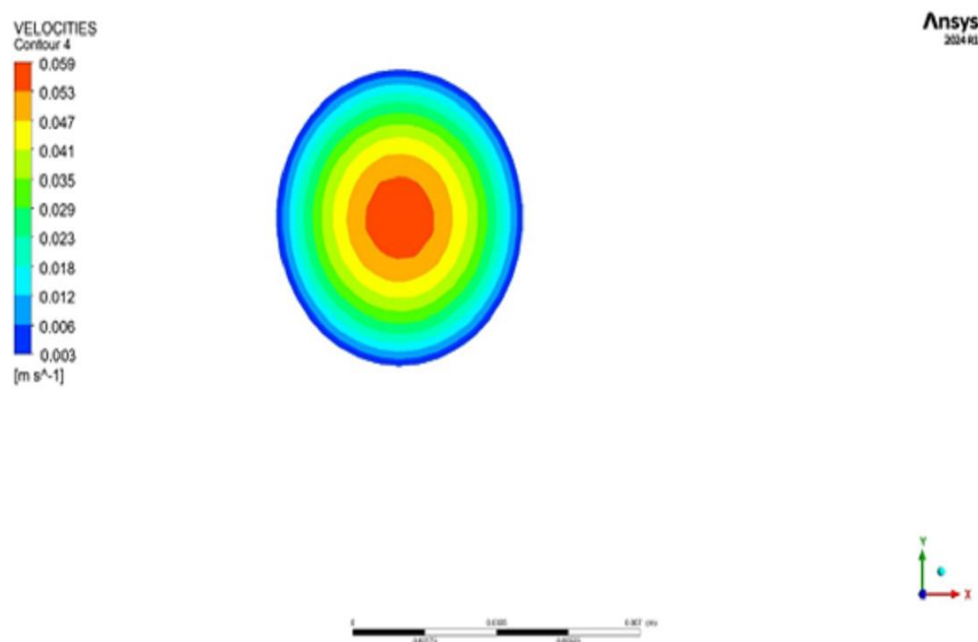


Figura 4.4 – Distribuição das velocidades no canal na simulação
 Fonte: Autoria própria (2024)

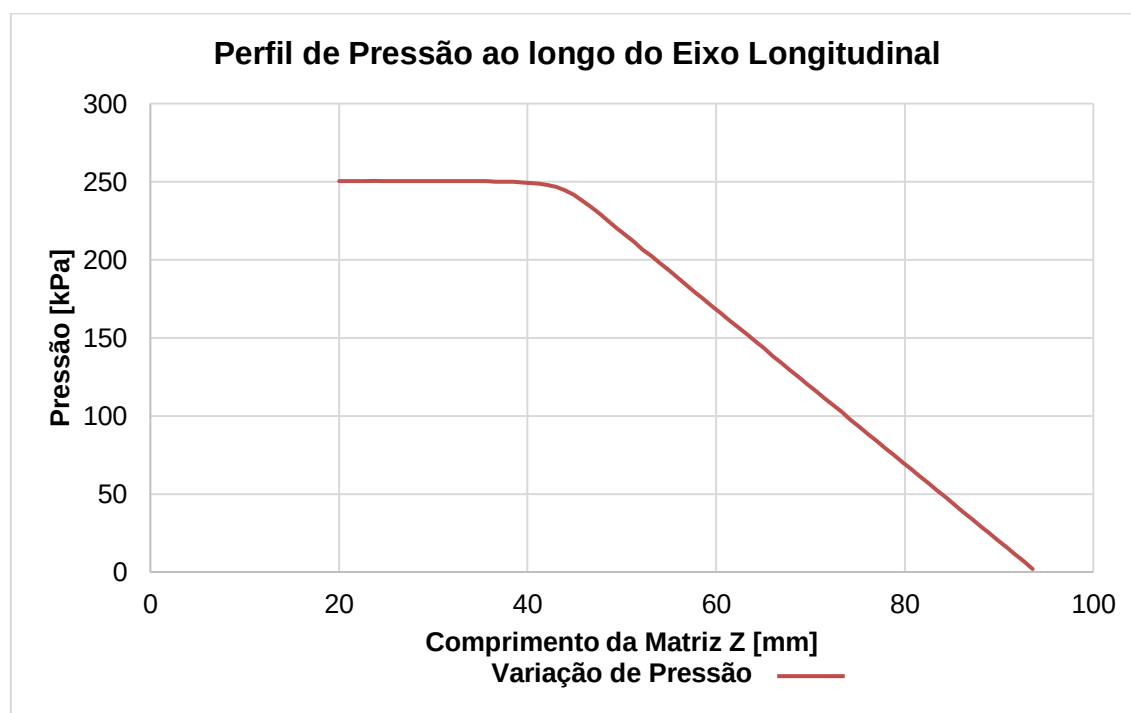


Figura 4.5 – Evolução da pressão ao longo da matriz na simulação
 Fonte: Autoria própria (2024)

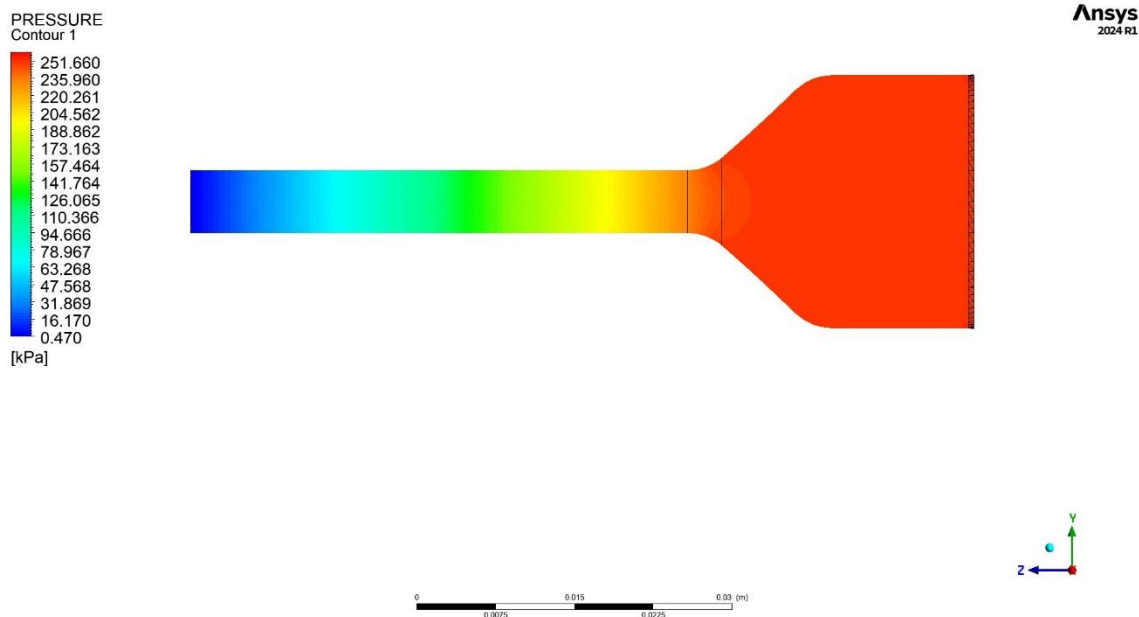


Figura 4.6 – Distribuição das pressões na matriz na simulação.
Fonte: Autoria própria (2024)

Pode-se observar que a pressão diminui à medida que o fluido atinge o orifício de saída, permanecendo varável até atingir a seção transversal (0,0055 m), onde a queda de pressão é de quase 0 Pa ao atingir o orifício de saída.

4.3.4 Inchamento do Extrudado

Utilizando um paquímetro para realizar a medição final do sólido extrudado de PP após o mesmo ser resfriado é calculada e comparada com a seção de saída da matriz para encontrar a taxa de expansão na saída ao passar por um canal com as características simuladas.

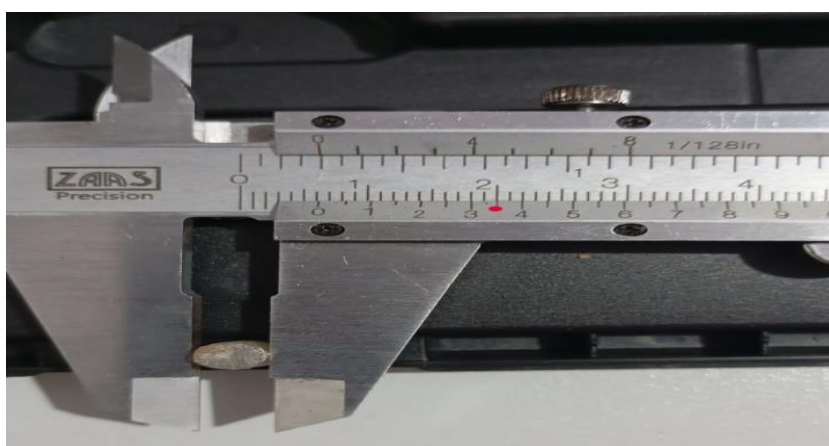


Figura 4.7 – Seção final do perfil extrudado de PP
Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 4.7 pode-se ver a seção de saída do sólido uma vez extrudado quando adquiriu sua forma final. Com esses dados calcula-se o inchamento do extrudado, que é dada pela seguinte Equação (4.3):

$$r_e = \frac{D_{ex}}{D_{ma}} \quad (4.3)$$

Onde:

r_e é a razão de expansão

D_{ex} é o diâmetro da seção extrudada

D_{ma} é o diâmetro do furo da matriz

$$D_{ex} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot 3,17 \times 10^{-5}}{\pi}} = 6,35 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{ma} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot 2,34 \times 10^{-5}}{\pi}} = 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Nesse caso a taxa de expansão será:

$$r_e = \frac{D_{ex}}{D_{ma}} = \frac{6,35 \times 10^{-3}}{5,5 \times 10^{-3}} = 1,15$$

4.3.5 Extrusão reversa

A extrusão reversa será realizada com os mesmos parâmetros calculados para a primeira extrusão, tanto nas dimensões do fluxo quanto na matriz. O objetivo é calcular a geometria que o canal de saída deve ter para obter a seção final desejada do perfil extrudado só que agora com diâmetro de 6,0 mm.

Conforme pode ser visto na Figura 4.8, a seção do perfil extrudado é a seção que se deseja, que corresponderá a um diâmetro de 6,0 mm. Portanto, a seção do canal de saída necessária para que o perfil extrudado tenha a seção desejada será aquela calculada ao realizar a extrusão reversa marcada na Figura 4.8 .

Seção desejada no perfil extrudado: $2,84 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

$$D_{ex} = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,84 \times 10^{-5}}{\pi}} = 6,00 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Através da razão de expansão calculada anteriormente, pode-se verificar que a seção obtida nos testes empíricos para extrusão reversa está correta:

Logo:

$$r_e = \frac{D_{ex}}{D_{ma}} = \frac{6,00 \times 10^{-3}}{D_{ma}} = 1,15$$

$$D_{ma} = \frac{6,00 \times 10^{-3}}{1,15} = 5,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Este será o diâmetro que o canal da matriz deverá ter para extrudar um perfil maciço com diâmetro de 6,00 mm, para esta condição de processo e do material usado, porque o inchamento do extrudado depende de muitos parâmetros.

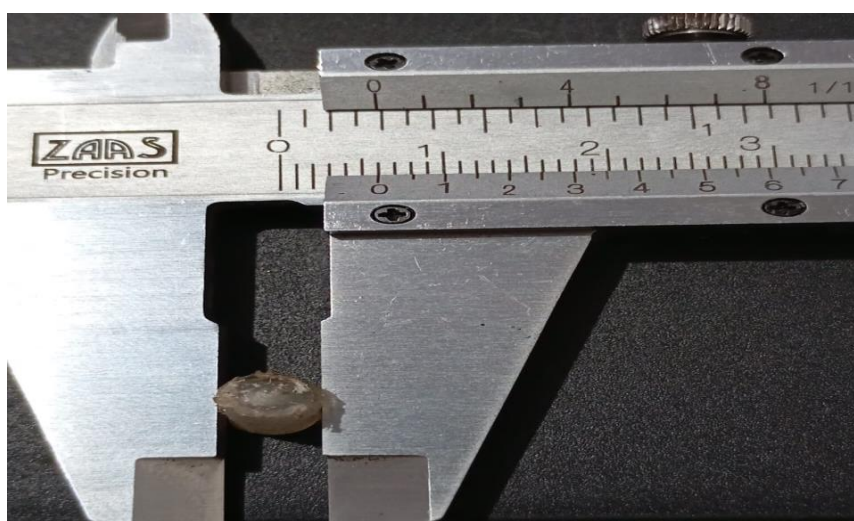


Figura 4.8 – Perfil final em extrusão reversa.
Fonte: Autoria própria (2024)

4.3.6 Desenho da Matriz de Extrusão

Com base na pesquisa da base teórica, a matriz de extrusão foi projetada usando o software de design 3D Autodesk Inventor Professional 2015 para extrudar uma seção sólida cilíndrica com diâmetro de 6,00 mm.

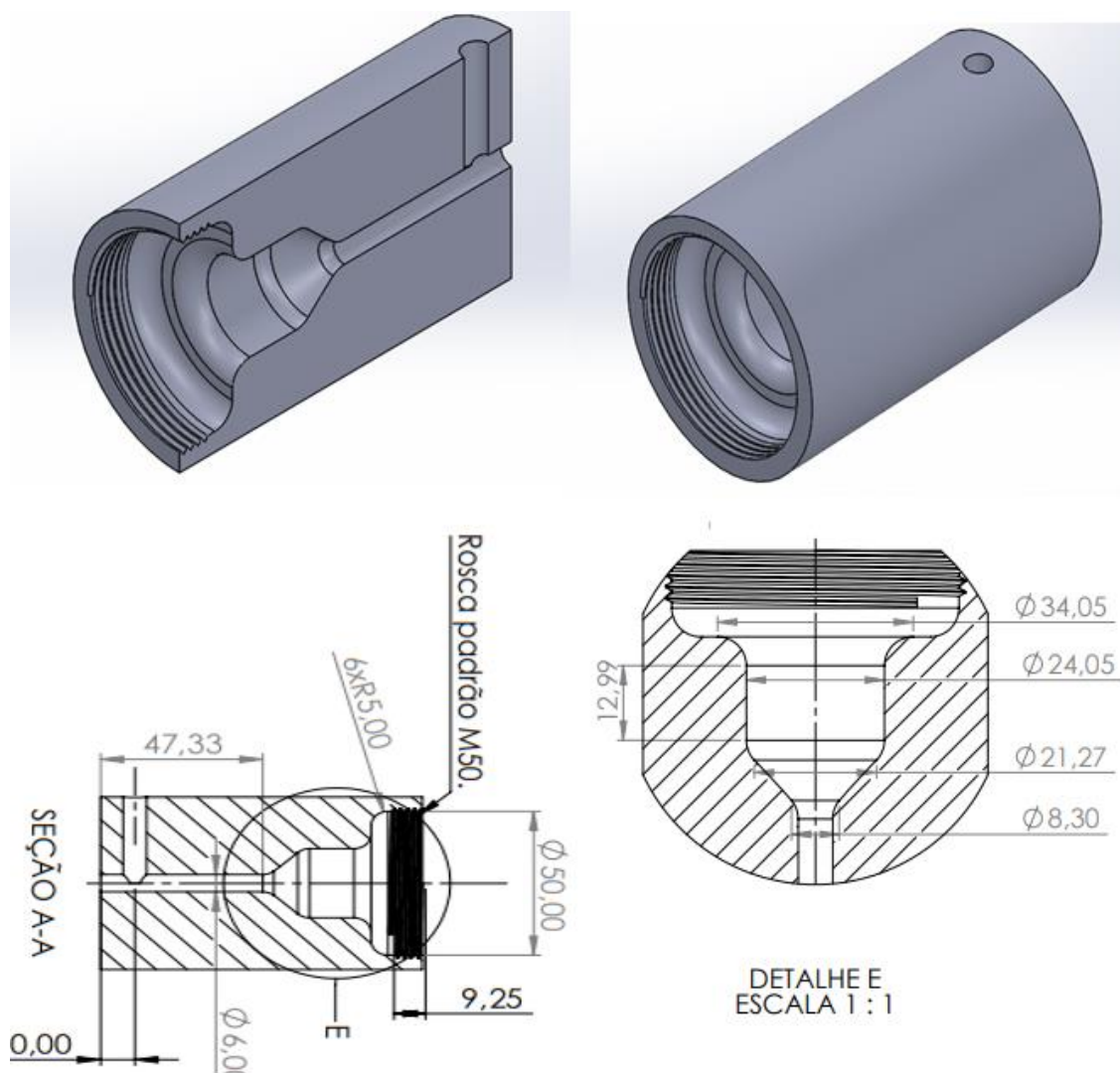


Figura 4.9 – Modelagem e cortes da matriz com software de desenho 3D
 Fonte: Autoria própria (2024)

O desenho da matriz será confeccionado em aço AISI 304 e usinado nas seguintes dimensões de 94 x Ø 60 mm. Da entrada até o início do bocal, a matriz possui 37 mm para que as velocidades e pressões do fluido se estabilizem, e cheguem ao bocal com valores uniformes. Isto alcançará maior regularidade de fluxo em toda a matriz. O canal do bico da matriz tem um comprimento de 47,33 mm para minimizar o inchamento do polímero na saída.

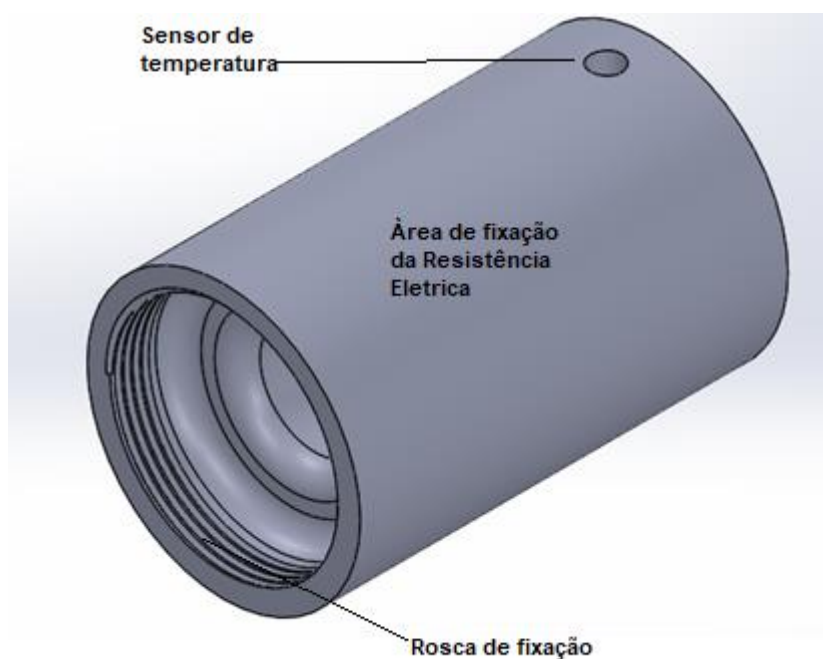


Figura 4.10 – Detalhe da furação e fixação da resistência
Fonte: Autoria própria (2024)

A matriz consiste em um cilindro na qual será fixada no canhão da extrusora. Além disso, possui furos para acomodar sensores de temperatura a fim de monitorar a temperatura do fluido ao passar pelo bocal, e uma área para a fixação da resistência de aquecimento.

4.4 Construção da Extrusora

Para desenvolver e construir uma extrusora, foram obtidos diversos materiais e contratada mão de obra especializada para a fabricação das peças do dispositivo e montagem dos mesmos. Todos os equipamentos listados neste capítulo e seus desenhos técnicos estão incluídos no anexo.

O primeiro dos itens a ser construído, foi a estrutura metálica para sustentação do equipamento Figura 4.11



Figura 4.11– Bancada da Extrusora
Fonte: O autor (2024)

Em seguida, foi usinado a rosca de extrusão (Figura 4.12), que foi utilizada neste projeto. A mesma apresenta um diâmetro externo constante de 24mm em todas as suas seções e o comprimento acompanha a medida total do canhão de extrusão de 600 mm. Apesar das dificuldades encontradas para a confecção desta rosca, ainda assim a mesma foi usinada conforme projeto e com o material selecionado.



Figura 4.12 – Rosca de Extrusão
Fonte: O autor (2024).

O passo seguinte foi a fabricação do suporte do canhão (Figura 4.13) e da Luva de fixação do eixo motor + eixo rosca (Figura 4.14).

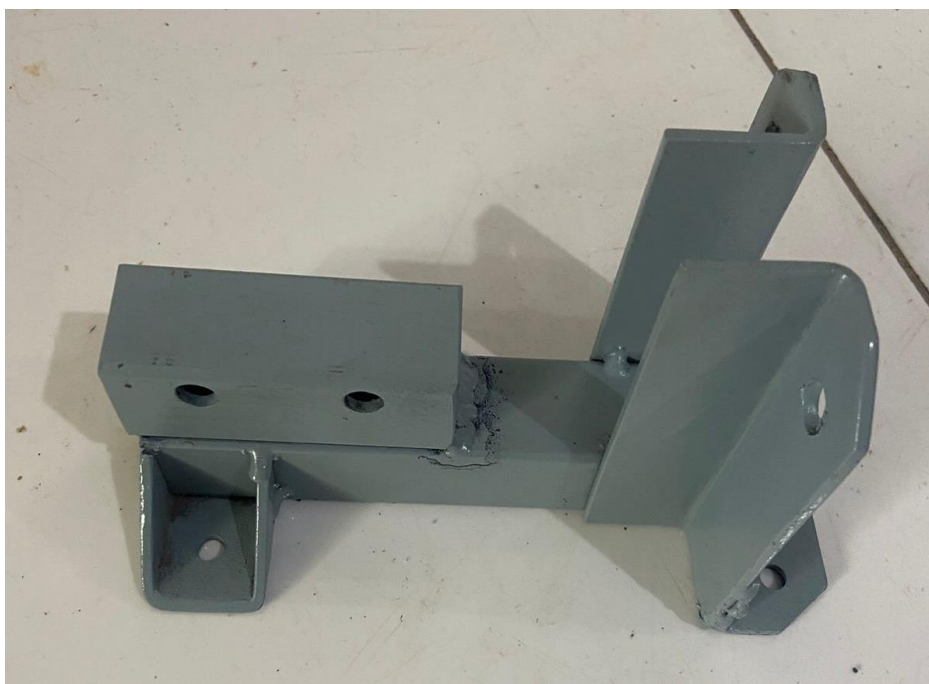


Figura 4.13 – Suporte do Canhão.
Fonte: O autor (2024).



Figura 4.14 – Luva de fixação do eixo motor + eixo rosca
Fonte: O autor (2024).

Após a construção do suporte do canhão e demais componentes para a fixação da rosca de extrusão, foi desenvolvido e construído o sistema de alimentação do equipamento (Figura 4.15), sob a forma de um funil, para garantir melhor escoamento do material, durante o seu processamento.



Figura 4.15 – Funil de Alimentação
Fonte: O autor (2024).

No próximo passo, foi realizado o desenvolvimento da matriz de extrusão (Figura 4.16).

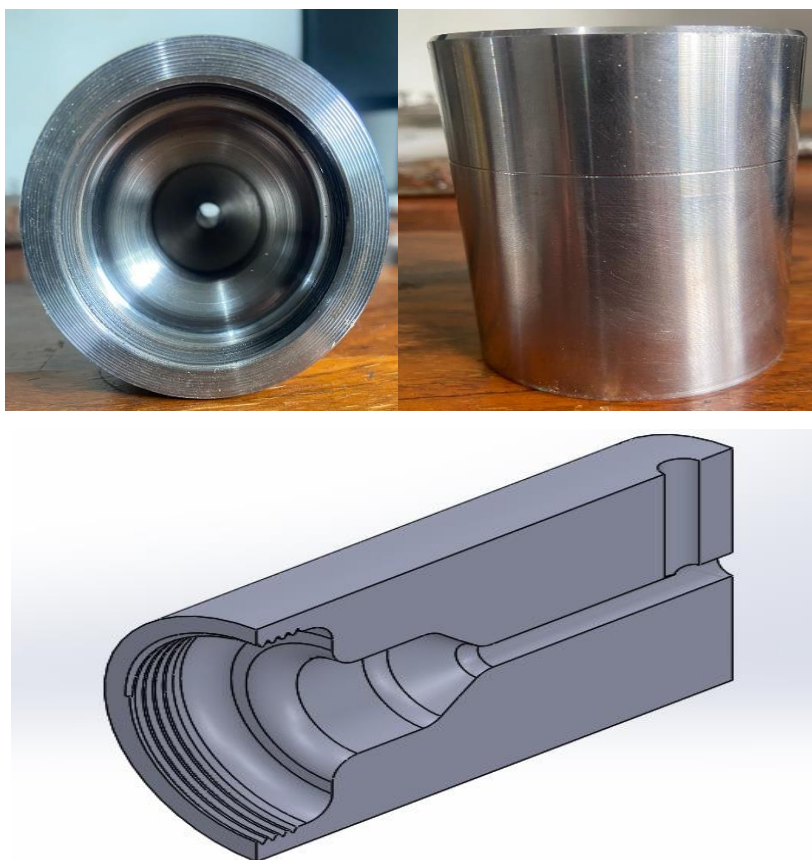


Figura 4.16 – Matriz de Extrusão
Fonte: O autor (2024).

4.5. Montagem do Sistema de Controle

O sistema de controle de aquecimento e resfriamento do canhão projetado é baseado em uma grade de 4 controladores PID, equipados com 4 sondas termopares do tipo K com regulagem do bico de contato, 5 resistências de 300W e 1 de 350W na matriz de extrusão com uma tensão nominal de operação de 220V. O sistema de controle de rotação do motor é baseado em um sistema analógico um inversor de frequência e um motor trifásico de 0,250kW com redutor de saída de 86rpm. As informações técnicas deste motor são apresentadas na Tabela 4.3.

A montagem do equipamento se deu pela instalação das resistências no canhão conforme figura 4.17



Figura 4.17 – Canhão de aquecimento
Fonte: O autor (2024).

Logo após a montagem do canhão veio a montagem do moto redutor no mancal e no suporte do canhão com a finalidade de centralizar o mesmo conforme Figura 4.18.

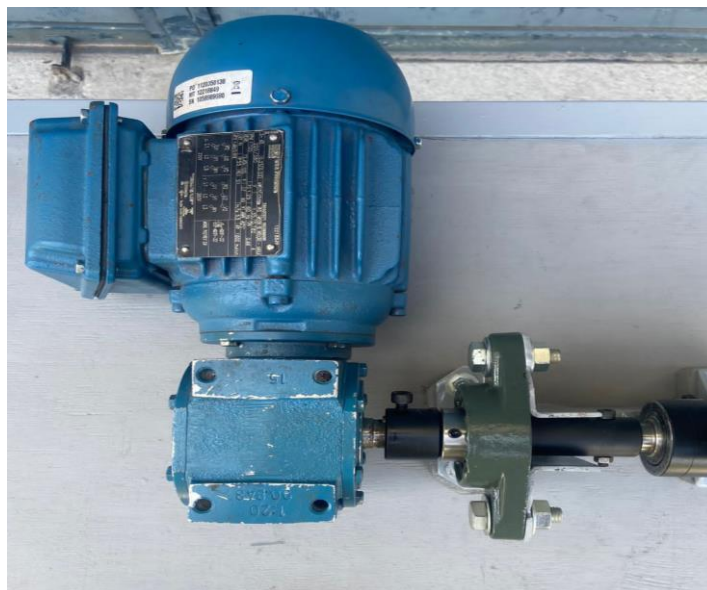


Figura 4.18 – montagem do moto redutor.
Fonte: O autor (2024).

Após a montagem da parte mecânica, deu-se início a montagem do painel de comando com os controladores PID e demais componentes da parte elétrica, o dimensionamento do circuito de comando é fundamental para um bom funcionamento do equipamento.

A instalação de componentes de proteção de qualquer sistema elétrico foi projetada com o objetivo de diminuir ou evitar risco de vida e danos materiais, quando ocorrer situações anormais durante a operação do mesmo conforme Figura 4.19.

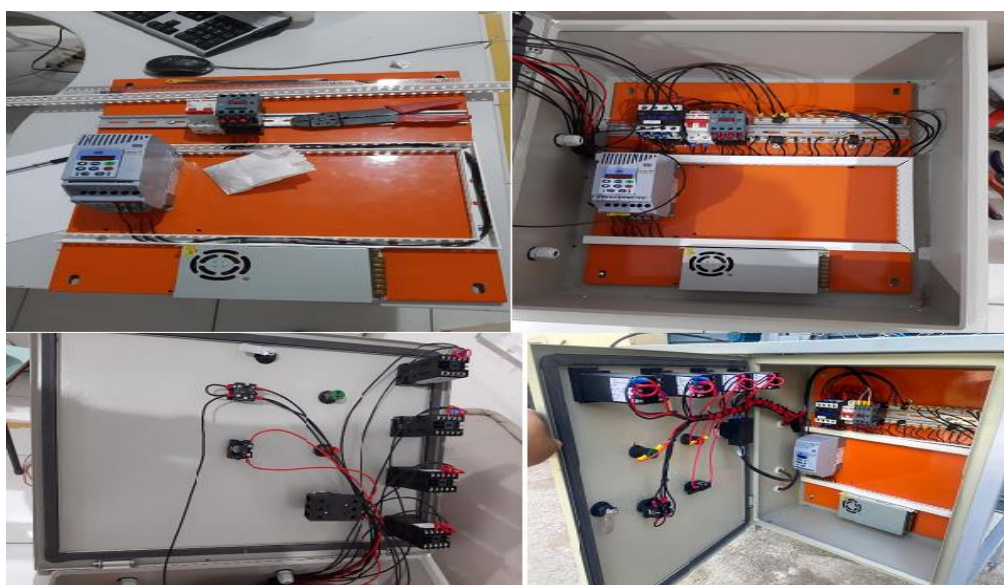


Figura 4.19 – montagem do painel de comando
Fonte: O autor (2024).

O painel de comando e potência, ilustrado na Figura 4.20, é composto por 4 controladores de temperatura PID, devidamente configurados conforme a parametrização necessária para o processo. Lâmpadas de indicação do modo de funcionamento, sendo possível o modo manual. Botoeira de emergência e botão de energização do equipamento.

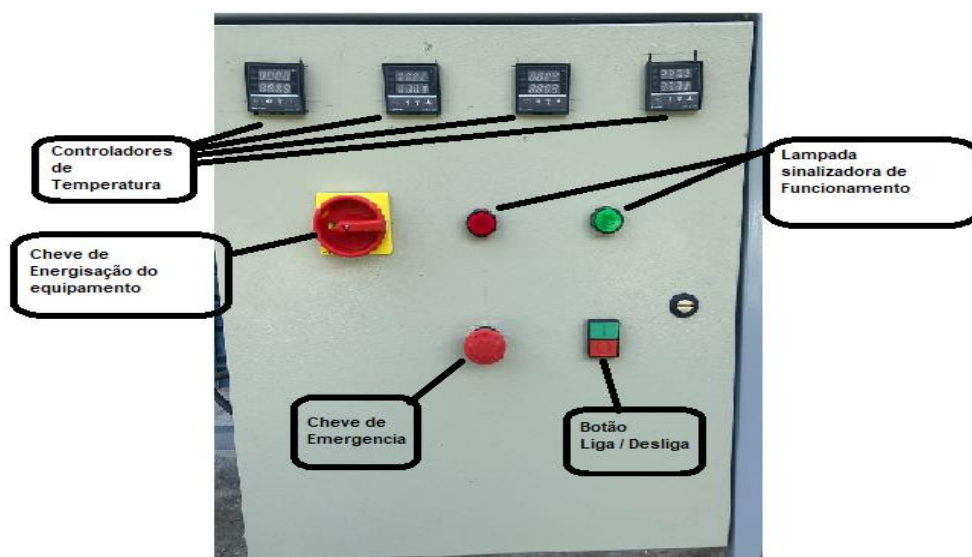


Figura 4.20 – Configuração do painel de comando
 Fonte: O autor (2024).

4.5.1 Validação do Equipamento

Para validação do funcionamento da extrusora e dos elementos nela instalados, primeiramente foi realizado o *start up* do conjunto de equipamentos com o sistema de aquecimento desligado. O objetivo deste método foi avaliar possíveis desalinhamentos ou esforços excessivos que possam gerar sobre carga ou mesmo travamento do sistema de potência.

Após a confirmação do funcionamento do equipamento, foi realizado o acionamento dos aquecedores automaticamente e coletado a curva de aquecimento em função do tempo. Esse procedimento foi devidamente medido a cada 2:30 minutos com o equipamento termômetro digital conforme Figura 4.21.

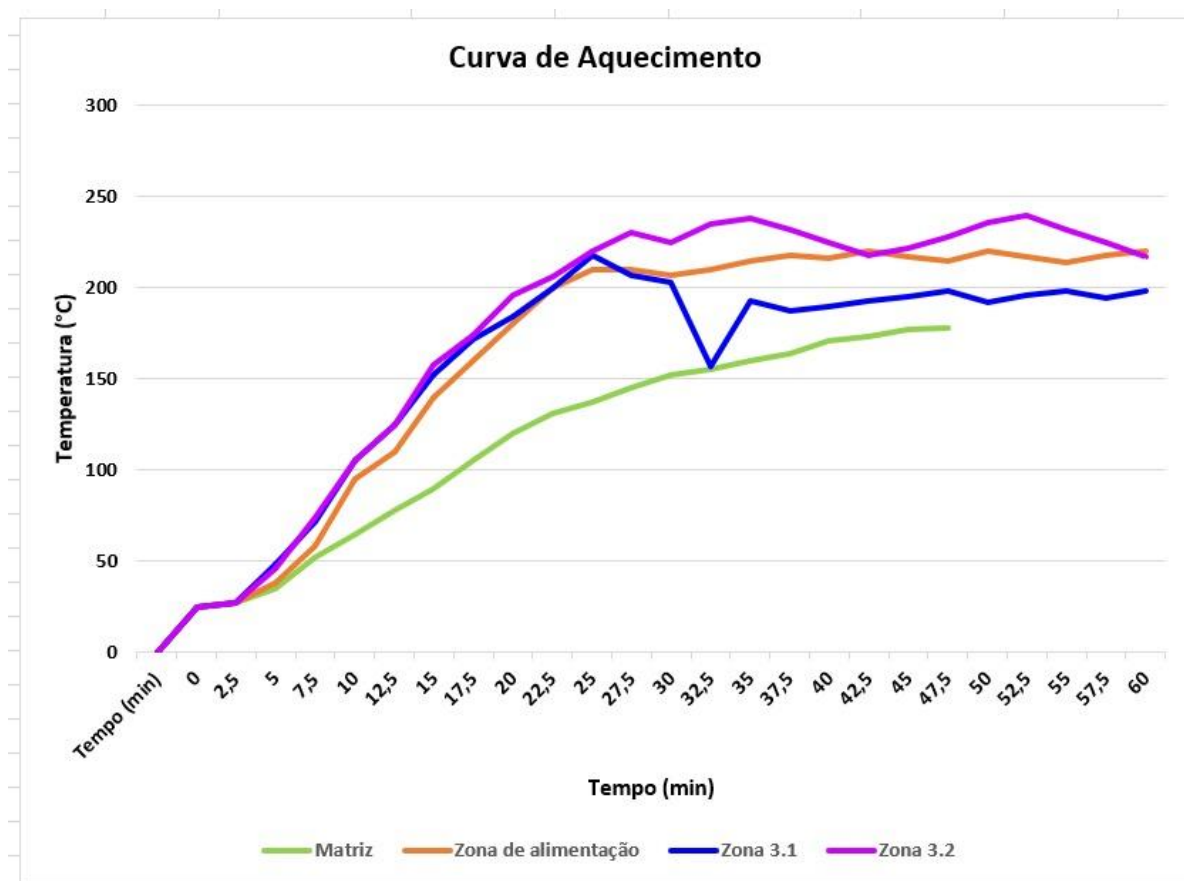


Figura 4.21 – Curva de aquecimento em função do tempo.
 Fonte: O autor (2024).

Após estabilizar o funcionamento da extrusora e iniciar o processo de extrusão, foi feito a medição do filamento por 5 segundos para se calcular a vazão real da mesma conforme Figura 4.22.



Figura 4.22 – Comprimento do Filamento.
 Fonte: O autor (2024).

Para o cálculo da Vazão real do equipamento, temos os seguintes dados coletados:

Parâmetros

- Comprimento do filamento (L) = 1,24 m = 124 cm
- Diâmetro do filamento (D) = 6 mm = 0,6 cm
- Densidade do material = 900 kg/m³
- Tempo de medição (t) = 5 s

Cálculo

- Área da seção transversal (A) = $\pi \times (D/2)^2 \approx 28,27 \text{ cm}^2$
- Volume do filamento (V) = $A \times L \approx 28,27 \text{ cm}^2 \times 124 \text{ cm} \approx 3503,48 \text{ cm}^3$
- Volume em m³ (V) = $3503,48 \text{ cm}^3 / 1.000.000 \approx 0,003503 \text{ m}^3$
- Vazão (Q) = $V / t \approx 0,003503 \text{ m}^3 / 5 \text{ s} \approx 0,0007006 \text{ m}^3/\text{s}$
- Vazão em kg/h = $Q \times 3600 \times \text{densidade} \approx 0,0007006 \text{ m}^3/\text{s} \times 3600 \times 900 \text{ kg/m}^3 \approx 2,26 \text{ kg/h}$

Resultado

A vazão Real da extrusora é aproximadamente 2,26 kg/h.

Como a vazão de massa calculada em função da velocidade simulada foi de Q = 2,22 kg/h e a vazão real de 2,26 kg/h, observa-se que a extrusora apresenta validações de funcionalidade dentro das expectativas do que foi projetada.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- ✓ Dentre as extrusoras existentes, para processamento de polímeros termoplásticos, a que melhor se adequa a esta pesquisa é a extrusora monorroscas, devido à sua simplicidade na fabricação e ao custo-benefício proporcionado, principalmente em regiões com limitações de infraestrutura de usinagem;
- ✓ O dimensionamento da rosca foi o ponto de partida para a execução do projeto no Software SOLIDWORKS e logo após a escolha dos materiais selecionados, como o aço AISI 304, que foram ideais para a construção, tanto pela resistência à corrosão quanto pela durabilidade em ambientes exigentes.
- ✓ O processo de fabricação e montagem dos componentes mecânicos e elétricos foi bem sucedido, culminando em um equipamento funcional, pronto para validação com testes de temperatura, vazão e resistência mecânica, utilizando polipropileno como material de base a ser extrudado;
- ✓ A pesquisa proporcionou um dimensionamento eficaz da rosca e dos demais componentes do equipamento, utilizando equações empíricas e simulação computacional para garantir que o projeto atingisse os objetivos propostos;
- ✓ Um dos pontos mais relevantes da pesquisa foi a utilização de simulações computacionais, com destaque para o software Ansys. Essa ferramenta possibilitou uma análise detalhada do comportamento reológico do fundido ao passar pela matriz, analisando-se em qual parte dela são observadas as altas e baixas taxas de cisalhamento quando o polímero flui através da mesma.
- ✓ O fluxo de arrasto e o fluxo de pressão foram então comparados com os dados equacionados dos extraídos nos parâmetros da simulação, o que levou ao cálculo do ponto de operação e da pressão operacional para a extrusora, proporcionando uma visualização do comportamento reológico do polipropileno durante o processo de extrusão e com isso calculando o percentual de inchamento do extrudado, isso foi essencial para se otimizar o perfil da mesma chegando-se o formato circular e o diâmetro desejado.

5.2 Sugestões para trabalhos Futuros

Em suma, a execução eficaz do projeto da rosca e da matriz foi fundamental para o sucesso do desenvolvimento da extrusora. O trabalho não apenas vai contribuir para a pesquisa em reciclagem de polímeros, mas também estabelece um modelo de como a simulação e os cuidados com design podem ser utilizados para criar equipamentos eficientes e sustentáveis. A extrusora monorrosca, portanto, não representa apenas um avanço técnico, mas também uma ferramenta que pode promover inovações importantes na área de processamento de polímeros.

Assim, como forma de otimizar e induzir outras pesquisas na área de projeto de equipamentos e processamento é pertinente sugerir algumas recomendações para trabalhos futuros, como:

- Realizar simulações utilizando o Ansys na rosca da extrusora;
- Adicionar os acessórios na extrusora como calhas para banho e triturador;
- Realizar misturas poliméricas com o objetivo de produzir madeira plástica;
- Adicionar Tecnologias de Sensoriamento em Tempo Real como PLC e software de controle;
- Avaliar o Desempenho com Diferentes Polímeros Reciclados.
- Avaliar sistema de arrefecimento do cilindro.
- Projeto de rosca com elementos de mistura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J.A.C. **Planeta Plástico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, p.218-219, 2001.

ANLUZ. **Solução em Aquecimento Elétrico para Qualquer Aplicação**. Catálogo resistência elétrica tipo coleira, 2016. Disponível em: . Acesso em: 11 outubro 2022.

Arno Blass, **Processamento de Polímeros**, Universidade Federal de Santa Catarina, editora da UFSC, 2 edição, Florianópolis, (1988).

BEREAUX, Yves; CHARMEAU, J.-Y; MOGUEDET, M. **Um modelo simples de rendimento e desenvolvimento de pressão para parafuso único**. Journal of Materials Processing Technology, [S.I.], v. 1, pág. 612-618, jan. 2009.

BRITTI BACALHAU, J.; CUNHA, T.; AFONSO, C. N. M. Effect of Ni content on the Hardenability of a Bainitic Steel for Plastics Processing. **COBEM 2017 (24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering)**, Curitiba, 2006.

BUR, A.J.; ROTH, S.(2004) **Temperature Gradients in the Channels of a Single Screw Extruder**, *Polymer Engineering and Science*, NOVEMBER 2004, Vol. 44, No. 11.

CAMPBELL, Gregory A.; SPALDING, Mark A. **Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders**. Munich: Hanser, 2013. 769 p.

CAMPBELL, Gregory A.; SPALDING, Mark A. **Analyzing and Troubleshooting**.

CANEVAROLO Jr, S.V. **Ciência dos polímeros**. 2º ed. São Paulo: Artliber, 2006. 286p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

Chong, S., Pan, G. T., Chin, J., Show, P. L., Yang, T. C. K., & Huang, C. M. (2018). **Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching**. *Sustainability*, 10(11), 3960.

Crawford, R.J., (1998), **Plastics Engineering**, 3rd ed, Butterworth-Heinemann Publisher, Oxford.

DAVIS. **the davis-standard profit protection plan for plastic processors**. pawcatuck, ct : I.N., 1988.

DENG, J.; LI, K.; HARKIN-JONES, K.; PRICE, M.; KARNACHI, N.; KELLY, A.; VERA-SORROCHI, J.; COATES, J.; BROWN, E.; FEI, M. (2014) **Energy monitoring and quality control of a single screw extruder**, *Applied Energy* 113, 1775–1785.

DHARIA, A. **Aparato para testes prevê as possibilidades de moldagem de diferentes tipos de chapas** - Plástico Industrial, São Paulo, v.8, n.95, p.24, 2006. Disponível em:<[http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/baixarconsulta.asp?codi go=135](http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/baixarconsulta.asp?codi%go=135)>. Acesso em 12 set 2023.

DROBNY, J.G.(2007) **Handbook of Thermoplastic Elastomers**. William Andrew Inc. ISBN: 978-0-8155-1549-4.

DUBAY, R. **Self-optimizing MPC of melt temperature in injection moulding**. The University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 2001.

DUPRET F., COUNIOT A., MAL O., VANDERSHUREN L., VERHOYEN O. - **Modelling And Simulation Of Injection Molding** - CESAME, Unitd de Mecanique Appliquee, Université catholique de Louvain, avenue G. Lemaître 4-6, B- 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium, 1999.

EITZLMAYR, A. et al. **Mechanistic modeling of modular co-rotating twin-screw extruders**. International Journal of Pharmaceutics, v. 474, n. 1–2, p. 157–176, 2014. ISSN 03785173. Disponível em: .<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378517314005602> >.

FRANKLAND, Jim. **Extrusion: How to estimate and control head pressure**.2018. Disponível em: . Acesso em: 26 set. 2023.

FRANKLAND, Jim. **What output should you expect?**. 2012. Disponível em: <<https://www.ptonline.com/articles/what-output-should-you-expect>> . Acesso em: 10 out. 2022.

FRANKLAND, Jim. **Why Barrier Screws & Rigid PVC Don't Always Mix**. 2014. Disponível em:<<https://www.ptonline.com/articles/extrusion-why-barrier-screws-rigid-pvc-dont-always-mix>> . Acesso em: 10 out. 2022.

Freitas, M. S. (2015) **Análise paramétrica e validação experimental de um cabeçote de extrusão baseado em rosca, para impressão 3-D**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 113 p.

GILES, Harold F.; WAGNER, John R.; MOUNT, Eldridge M. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. Norwich: William Andrew, 2005. 539 p.

Guariente E.R (2019). **Projeto preliminar de uma máquina extrusora para produção de filamento de polietileno para impressoras 3d**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul, RS. 105p.

ILLIG, A. **Thermoforming - A Practical Guide**. Hanser, Munich, 2001. 242p.

JOHANNABER, Friedrich. **Injection Molding Machines**. 3 ed. Munich; Vienna; New York: Hanser; Cincinnati: Hanser / Gardner, 1994. 320p.

JOHN, R, ET AL. **EXTRUSION: THE DEFINITIVE PROCESSING GUIDE AND HANDBOOK**. 1 ed, Massachusetts: ELSEVIER INC, 2014.

Johnson, K. (2001). **Dynamics of Rotating Systems**. Wiley.

KANTOVISCKI, Adriano. **Materiais Poliméricos: Processos de transformação de polímeros**. 2011. Disponível em: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/d6matPolimMod2.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2022.

KELLY, A.L., BROWN, E.C.; COATES, P.D. (2006) **The Effect of Screw Geometry on Melt Temperature Profile in Single Screw Extrusion**, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, Publicado online, Wiley Interscienc.

LAFRATTA, F. H. **Uso de fluido refrigerante, temporariamente confinado, em molde rápido para a injeção de termoplásticos**. 2004. 180 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.-G.; Feld, T.; Hoffmann, M.; **Business & Information Systems Engineering**, 2014, 6, 239.

Lawal, A. Kalyon, D.M. **Squeeze flow of viscoplastic fluids subject to wall slip**, Polym. Eng. Sci. 38 (1998) 1793–1804.

Lilo motoredutor <<https://www.motoredutor.com.br/motoredutor-reducao-de-1-20-com-motor-de-0-33cv-4polos-wn2/prod-1030231>> “Acesso em 11 out 2022”.

MANCINI, S. D. et al. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.14, p.69-73, 2004.

MANO, E. B.; BONELLI, C. M. C. **A Reciclagem de plásticos pós consumidos**. Rev. Química. Industrial., Rio de Janeiro, n. 698, p. 18-22, 1994.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber Editora, 2005. 431p.

MARAGHI, Ron. **Defeitos de moldagem na injeção de plásticos**. Salvador: Plassoft Tecnologia, 1997. 135p.

MICHAELI, Walter et al. **Tecnologia dos plásticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 205p.

MIDDLEMAN, S. **Fundamentals of polymer processing**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1977. 540 p.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6 Edição, Wiley, Colorado, 2012.

OSSWALD, Tim A. et al. **International Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers**. Munique: Hanser, 2006. 877 p.

PARENTE, Ricardo alves. **Elementos estruturais de plásticos reciclados**. Universidade de são paulo. São carlos : s.n., 2006. Dissertação de mestrado.

PEARSON, J. R. A. **Mechanics of polymer processing**. England: Springer Science & Business Media, 1985.

PEREIRA, F. S. G. **Polímeros, fundamentos científicos e tecnológicos**, Instituto federal de educação, ciência e tecnologia de Pernambuco, IFPE, Recife 2009.

PINTO, F. D. C. **Sistemas de Automação e Controle**. CST, Serviço nacional de aprendizagem industrial, SENAI-ES, 2005.

QUELHO, P. E. Q., **Desenvolvimento de extrusora experimental e software para controle e supervisão das variáveis de extrusão do abs**. 2018. p. 114f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

RAO, Natti S.; SCHOTT, Nick R. **Understanding Plastics Engineering Calculations: Hands-on Examples and Case Studies**. Munique: Hanser, 2012. 195 p.

RAO, Natti S.; SCHUMACHER, Gunter. **Fórmulas de projeto para engenheiros de plásticos**. Carl Hanser Verlag GmbH Co.KG, 2014.

RAO. Natti S. SCHOTT. Nick R. **Understanding Plastics Engineering Calculations**. Handson Examples and case studies. HANSER, 327 Route 21c, Ghent NY 12075, USA, 2012.

RAQUEZ, J-M; NARAYAN, R.; DUBOIS, P.(2008) Recent Advances in Reactive Extrusion Processing of Biodegradable. **Polymer-Based Compositions, Macromol. Mater. Eng.** 2008, 293, 447–470.

RAQUEZ, J-M; NARAYAN, R.; DUBOIS, P.(2008) **Recent Advances in Reactive Extrusion Processing of Biodegradable**. Polymer-Based Compositions, Macromol. Mater. Eng. 2008, 293, 447–470.

RAUWEMDAAL, C. **How to Get Peak Performance e Efficiency Out of Your Extrusio** Lina, Part1. Plastics Technology. 2010. < Disponível em <http://www.ptonline.com/articles/how-to-get-peak-performance-efficiency-out-of-yourextrusion-line---part-i> >.

RAUWENDAAL, C. (2001) **Polymer extrusion**. Editora: Hanser-Verlag Gardner Publications. p. 1-20; p.119-153; p. 425-434.

RAUWENDAAL, C. **Mixing in polymer processing**. Marcel Dekker, Inc., 1991.

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion**. Hanser Publishers 5th edition, Munich, 2014. RCK Instrument. **Specialist in measurement and control, engineering equipment catalog**, 2022 Disponível em <https://www.rkcinst.co.jp/english/> Acesso em: 08 out 2022.

ROSATO, D.V. **Extruding Plastics**, A practical processing handbook, Plastics Institute of America Rhode Island School of Design Chatham, MA, 02633 USA, 1998.

SHAH, A.; GUBTA, M. **Simulation of polymeric flow in a twin-screw extruder**: an analysis of elongational viscosity effects. In: ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference, 2003, Nashville. Proceedings... Nashville, 2003.

SILVA, H. M. **Desenvolvimento de uma termoformadora compacta para produtos descartáveis**. 142 p. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

Single-Screw Extruders. Munich: Hanser, 2013. 769 p.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Química Nova, São Paulo, v. 28, n. 1, p.65-72, 12 nov. 2004.

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer Processing**, John Wiley and Sons, New York, 1979.

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer processing**. Wiley, 2nd , 2006.

TANG, S.H. et al. **Design and thermal analysis of plastic injection mould**. Universiti Putra Malaysia, Selangor, Malaysia, 2005.

THRONE, J. L. **Understanding thermoforming**. 2ª edição. Munique: Carl Hanser Verlag, 2008. 288 p.

TURCI, L. **Breve Rassegna sui Processi di Termoformatura**. 2007 Disponível em: https://www.ingmould.unimore.it/CampusOne/VisualizzazioneIng/egneria/StreamFile.asp?File=../MaterialeDidattico/Matdidattico5610/Termoformatura_LTurci_2007.pdf. Acesso em: 19 set 2022.

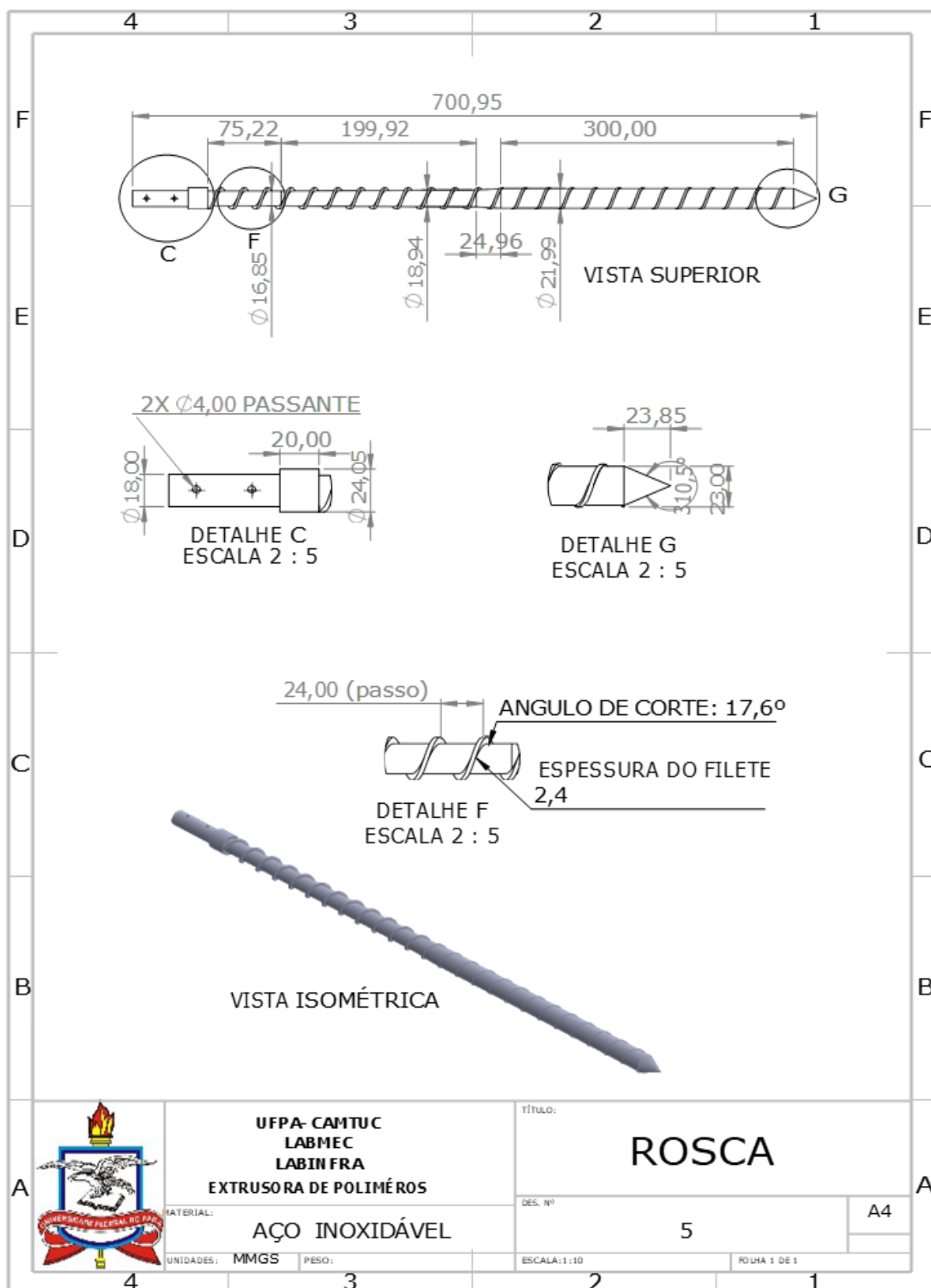
VIGNOL, L.d.A. **Desenvolvimento de Modelos Simplificados para o Estudo da Extrusão de Polímeros**. 2005. 152 p, Tese de Mestrado em engenharia química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

WEG. **Inversores de frequência para aplicações industriais**. Catalogo de inversores modelo CF08, 2022. Disponível em <https://www.weg.net/catalog/weg/US/pt/Drives/Inversores-de-Frequ>: Acesso em 08 out. 2022.

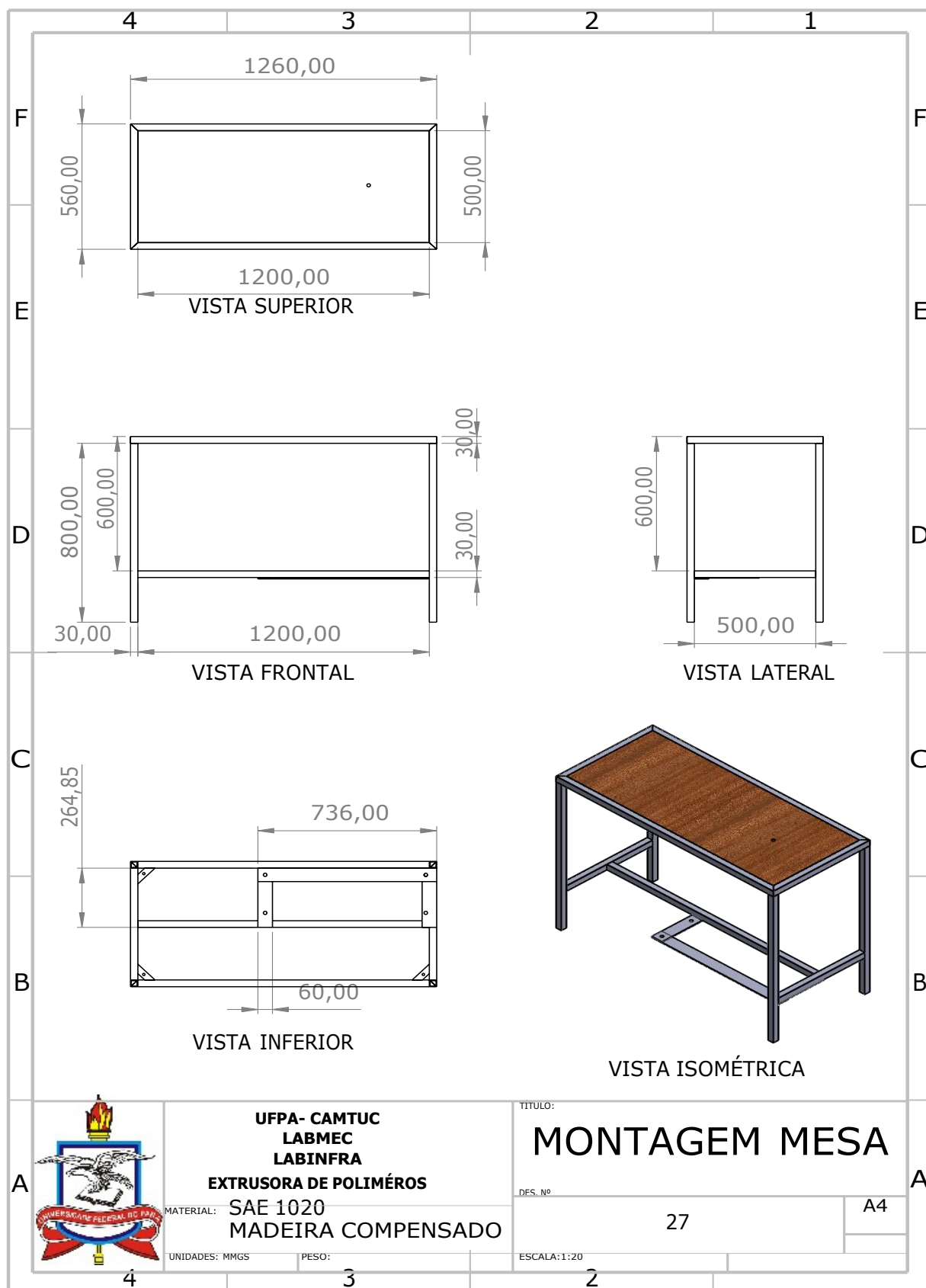
WHITE, J. L. **Twin Screw Extrusion: technology and principles**, Hanser Publishers, Munich, New York, 1990.

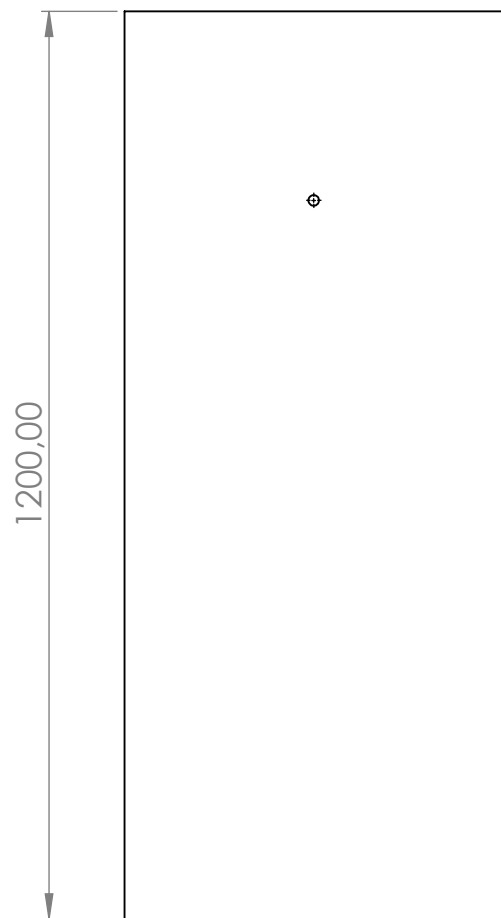
7. ANEXOS

7.1 Detalhes da Rosca, Canhão e Matriz.



7.2 Projeto da extrusora





VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA LATERAL



**UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS**

MATERIAL:
MADEIRA COMPENSADO

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

MADEIRA MESA

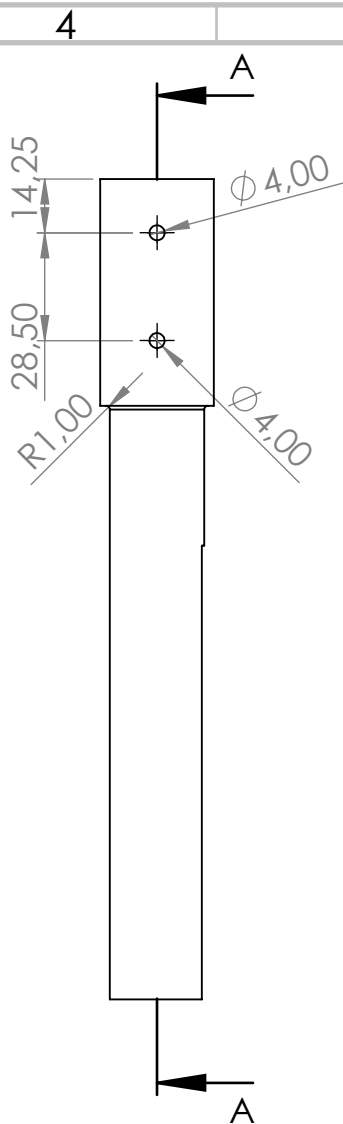
DES. Nº

13

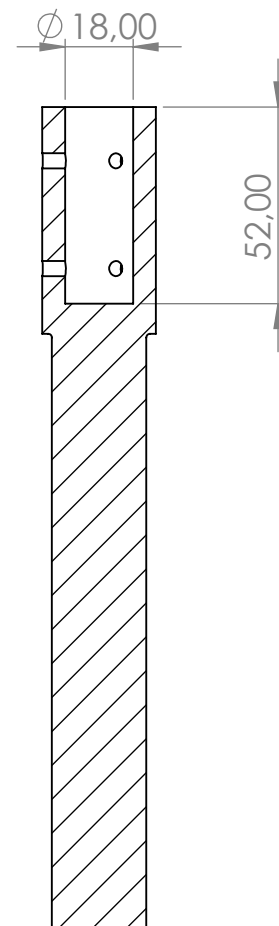
A4

ESCALA:1:10

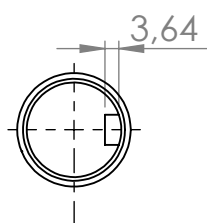
FOLHA 1 DE 1



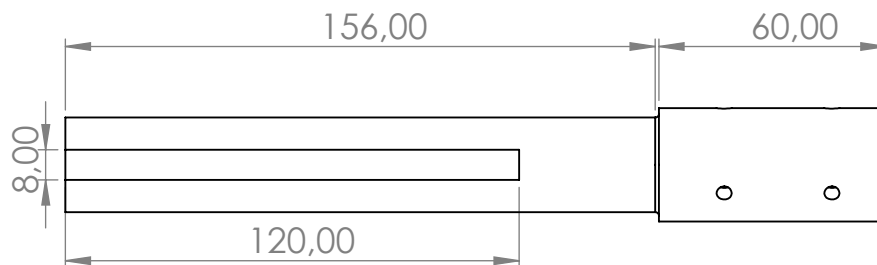
VISTA SUPERIOR



SEÇÃO A-A
ESCALA 1 : 2



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA 1:5



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

EIXO

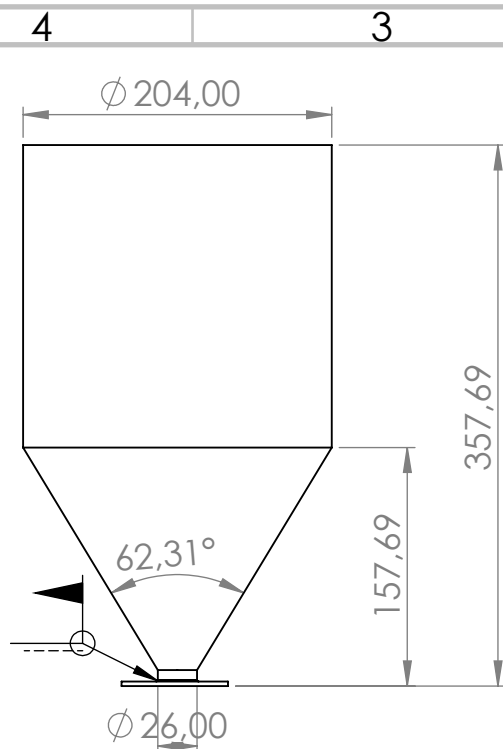
DES. Nº

11

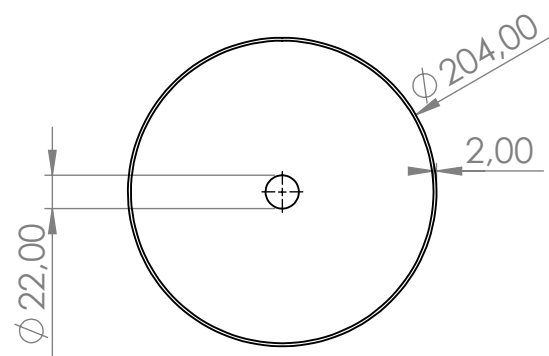
A4

ESCALA:2

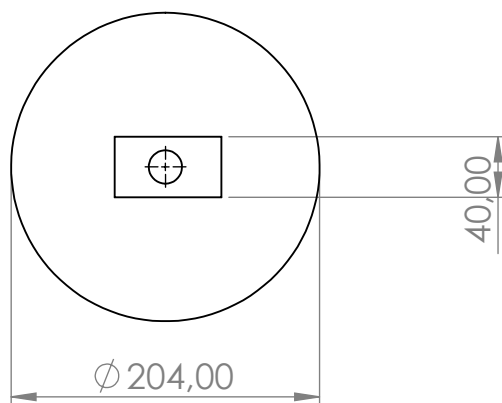
FOLHA 1 DE 1



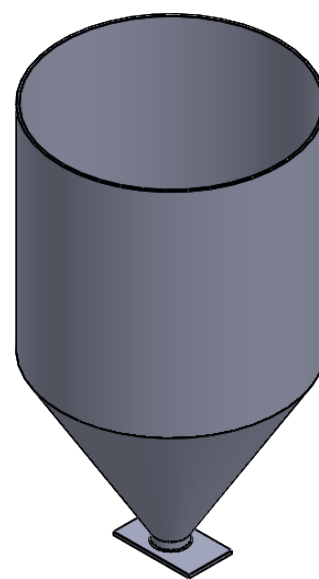
Vista Frontal



Vista Superior



Vista superior



Vista Isométrica



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLIMÉROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES:

PESO:

TÍTULO:

FUNIL

DES. Nº

1

A4

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1

4

3

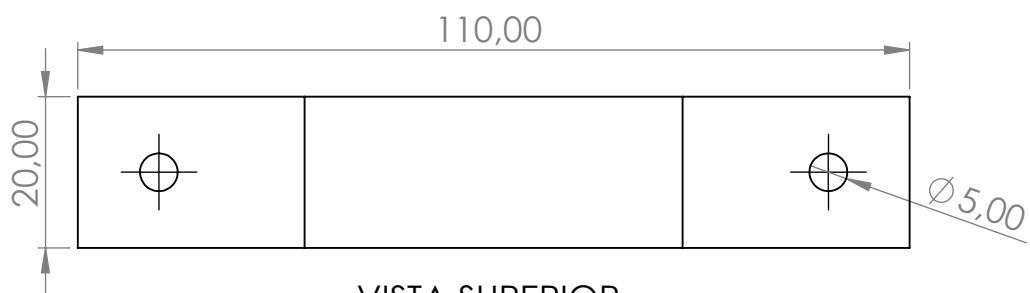
2

1

107

F

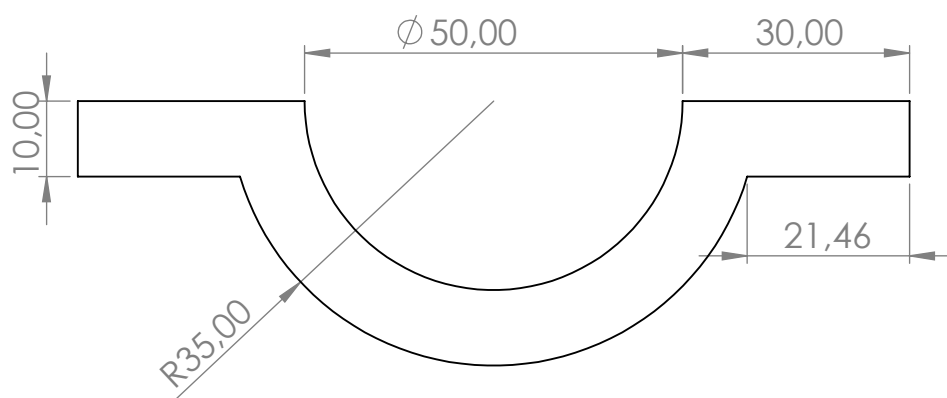
F



VISTA SUPERIOR

E

E



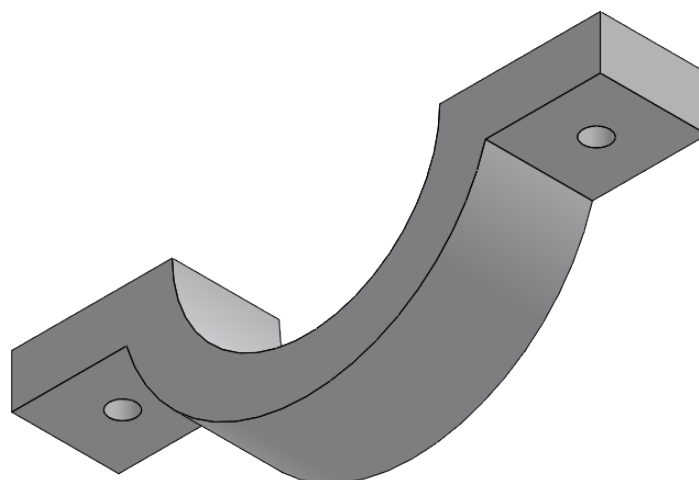
VISTA FRONTAL

D

D

C

C



VISTA ISOMÉTRICA

B

B

A

A



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

BRAÇADEIRA INF

DES. Nº

9

A4

ESCALA: 1:1

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

4

3

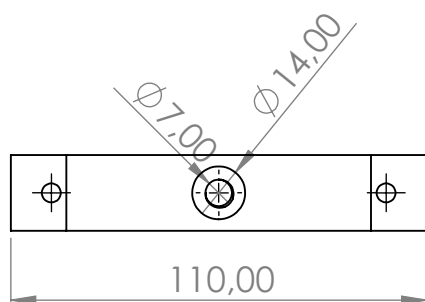
2

1

108

F

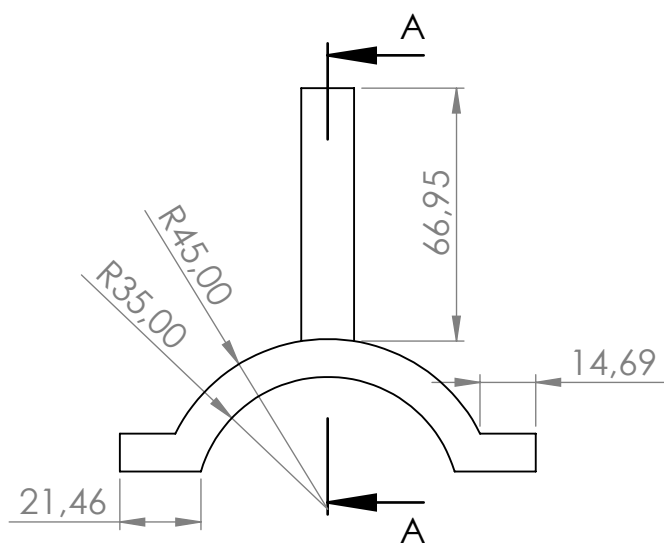
F



VISTA SUPERIOR

E

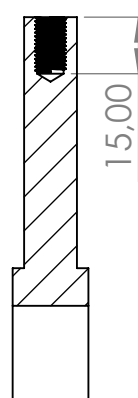
E



VISTA FRONTAL

D

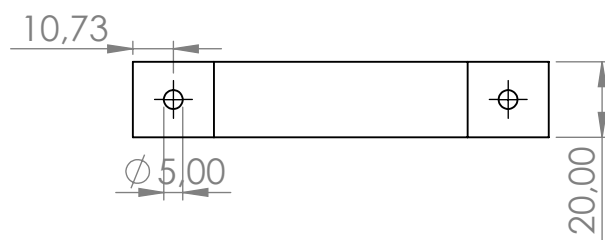
D



SEÇÃO A-A

C

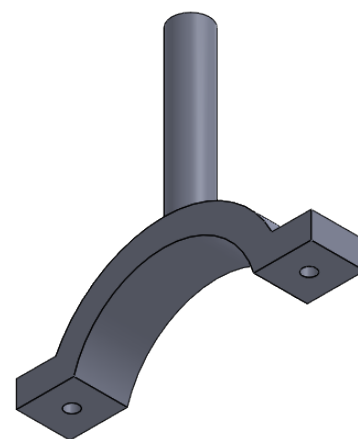
C



VISTA INFERIOR

B

B



VISTA ISOMÉTRICA

A

A



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

SUPORTE BRAÇADEIRA

DES. Nº

10

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

4

3

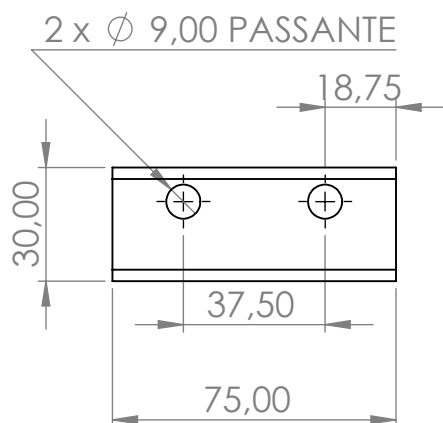
2

1

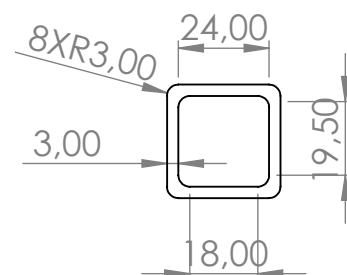
109

F

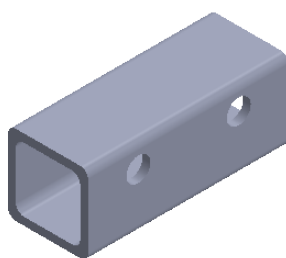
F



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL

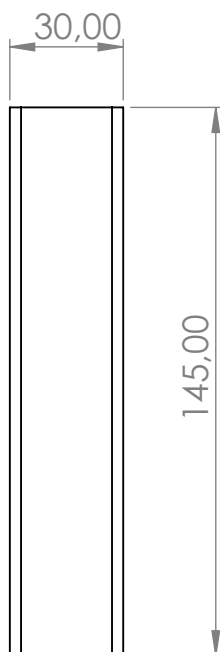


VISTA ISOMÉTRICA

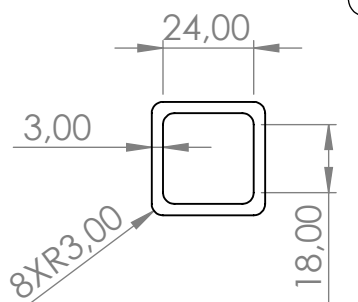
DESENHO A

D

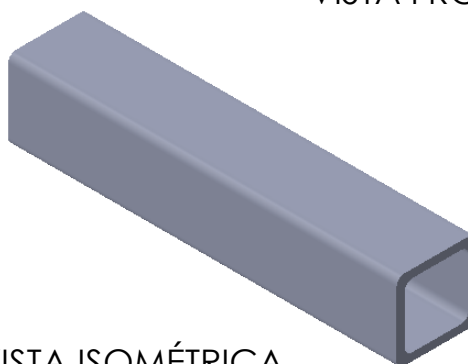
D



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA ISOMÉTRICA

DESENHO B

C

C

B

B

A

A



**UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS**

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES:

MMGS

PESO:

TÍTULO:

DESENHO A: PEÇA 1-SUPORE DO CANHÃO
DESENHO B: PEÇA 2-SUPORE DO CANHÃO

DES. Nº

6

A4

ESCALA: 1:1

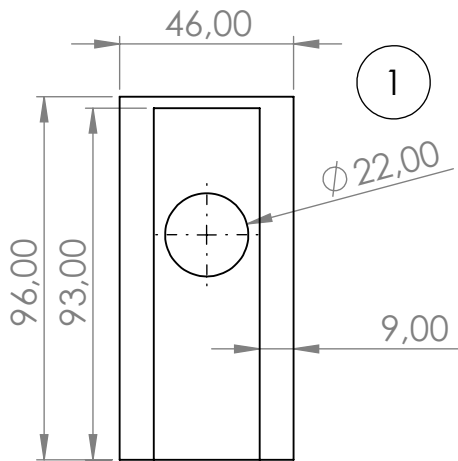
FOLHA 1 DE 1

4

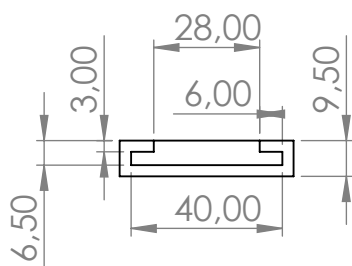
3

2

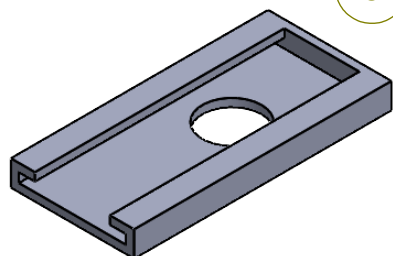
1



Vista Superior



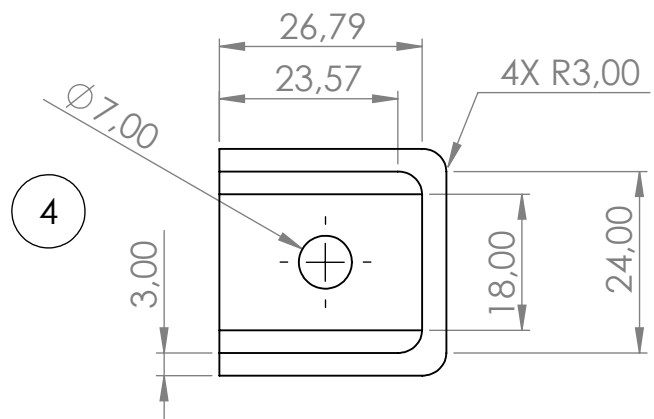
Vista Frontal



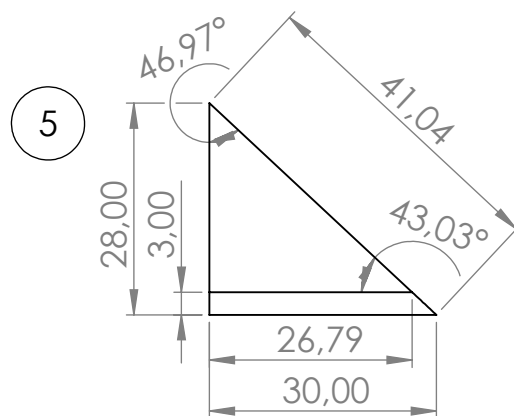
Vista Isométrica

1, 2 e 3 são DTM da base do funil.

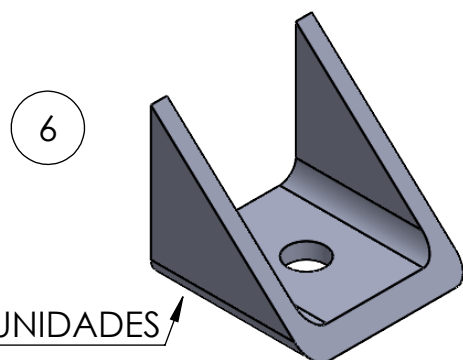
4, 5 e 6 são DTM da peça 6-suporte do canhão.



Vista Superior



Vista Lateral



Vista Isométrica

FABRICAR DUAS UNIDADES



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL: SAE 1020

UNIDADES:

PESO:

TÍTULO: BASE DO FUNIL (1,2 e 3)
PEÇA 6 - SUPORTE DO CANHÃO
(4,5 e 6)

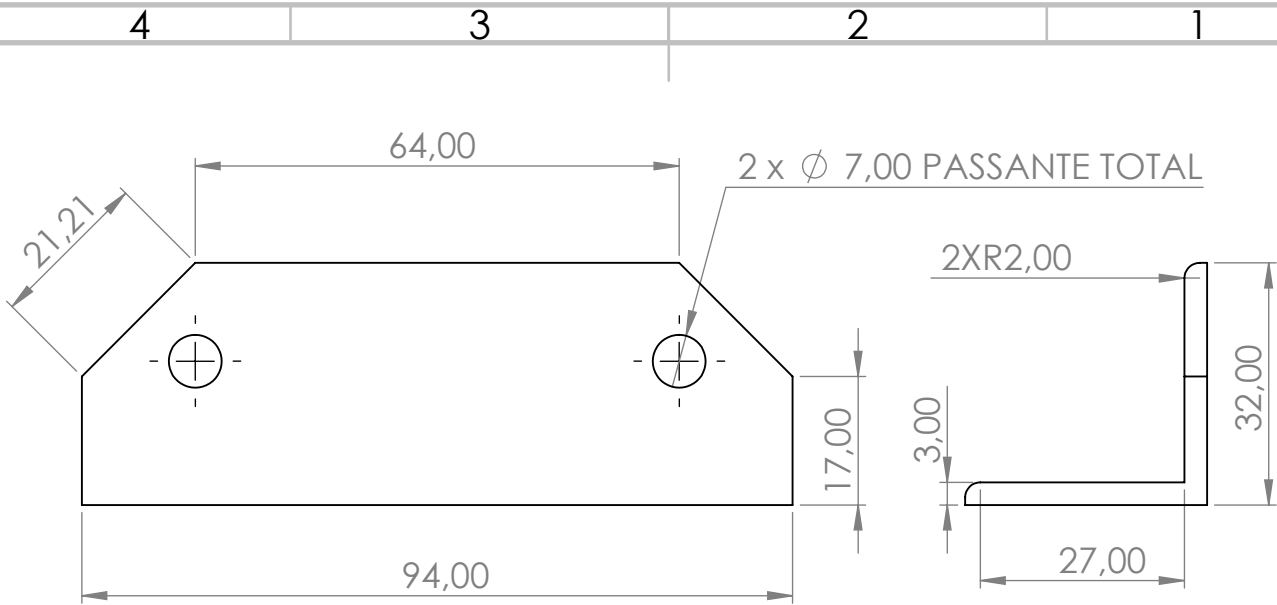
DES. Nº

2

A4

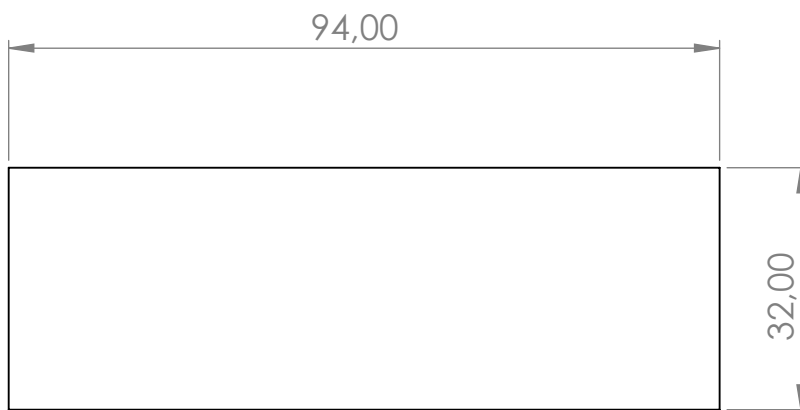
ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1

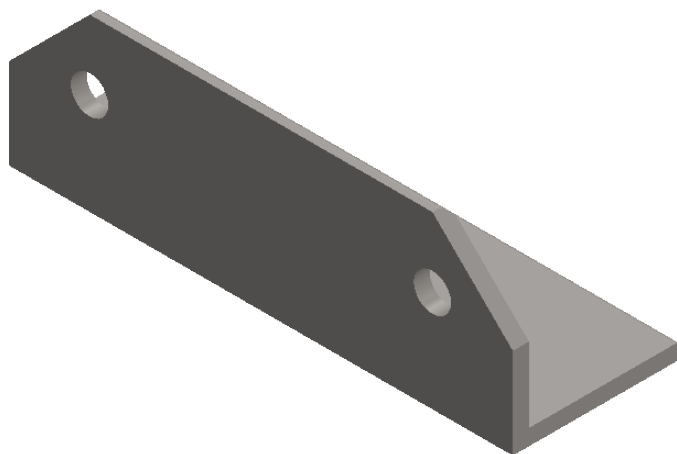


VISTA FRONTAL

VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR



VISTA ISOMÉTRICA



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

PEÇA 7-SUPORTE CANHÃO

DES. Nº

7

A4

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

112

F

F

E

E

D

D

C

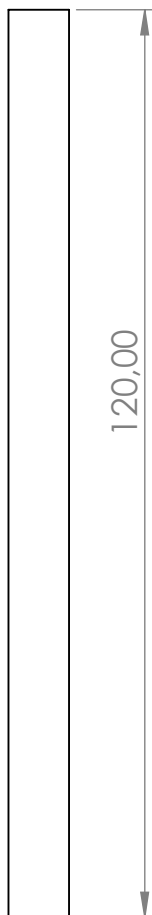
C

B

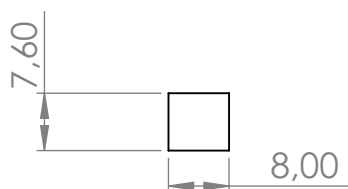
B

A

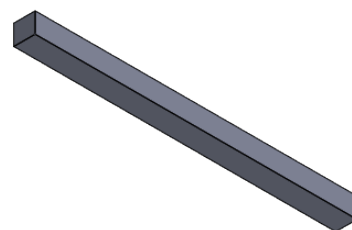
A



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA ISOMÉTRICA 1:2



UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLIMÉROS

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES: MMGS

PESO:

TÍTULO:

CHAVETA

DES. Nº

12

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

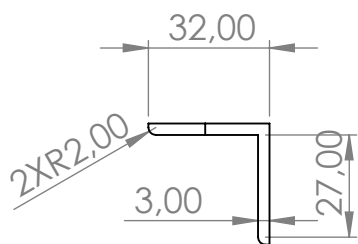
4

3

2

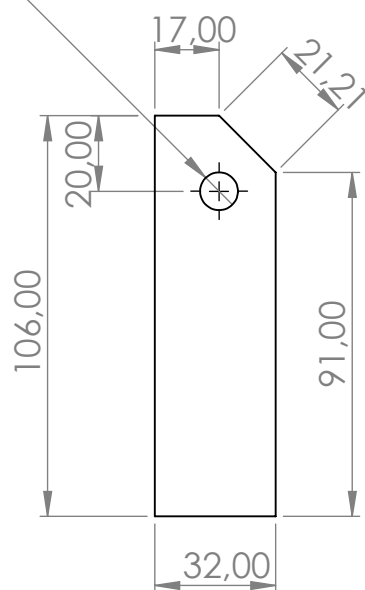
1

DESENHO A



VISTA SUPERIOR

Ø 10,00 PASSANTE TOTAL

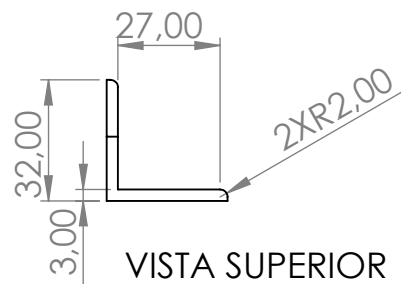


VISTA LATERAL



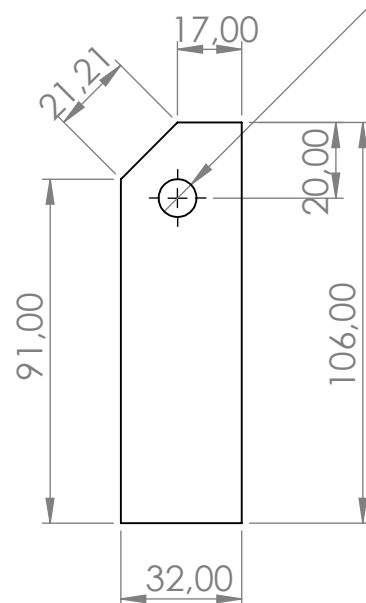
VISTA ISOMÉTRICA

DESENHO B



VISTA SUPERIOR

Ø 10,00 PASSANTE TOTAL



VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA



**UFPA - CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLIMÉROS**

MATERIAL:

SAE 1020

UNIDADES:

MMGS

PESO:

TÍTULO:

DESENHO A: PEÇA 4-SUORTE DO CANHÃO
DESENHO B: PEÇA 5-SUORTE DO CANHÃO

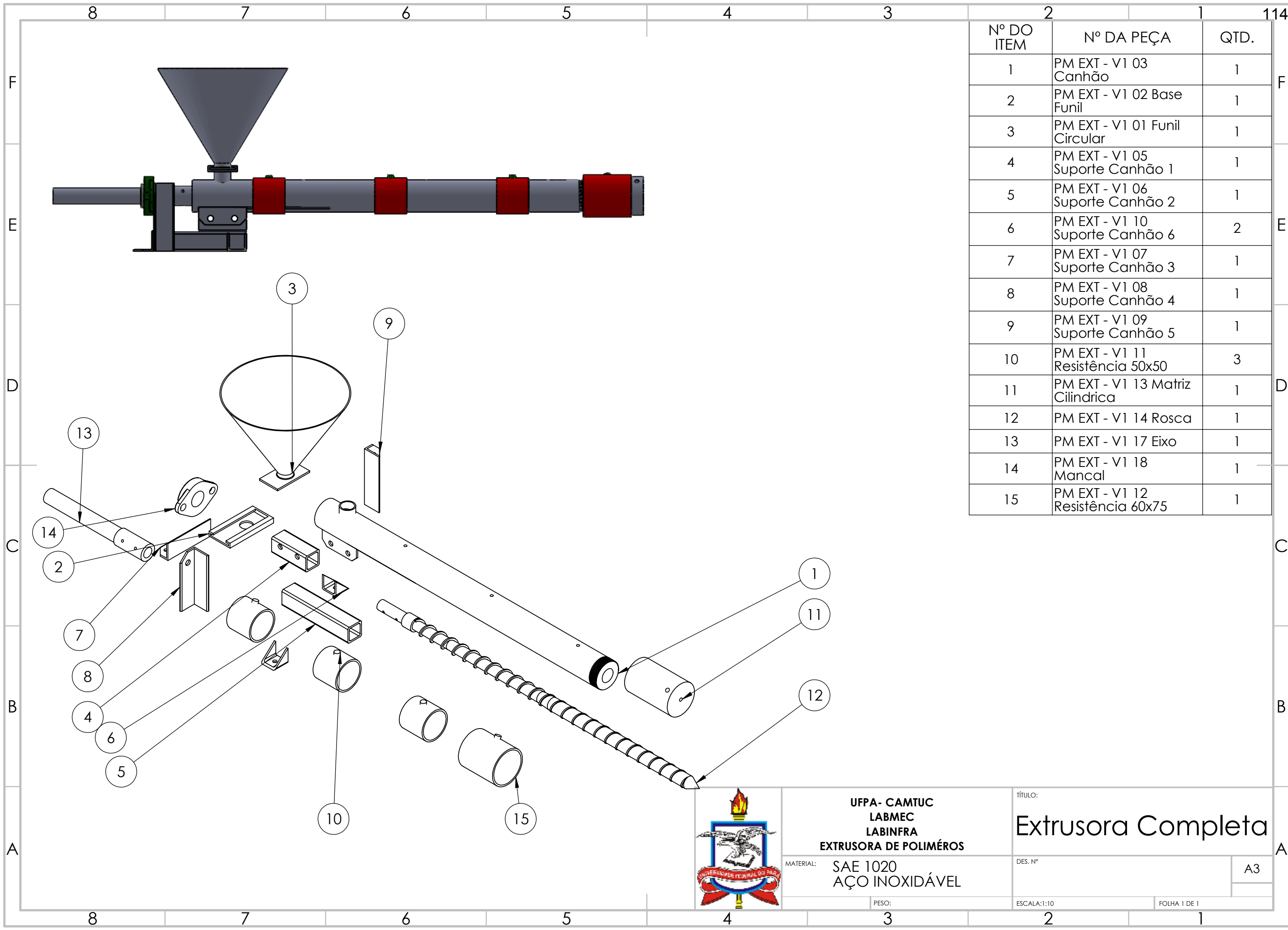
DES. Nº

8

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	PM EXT - V1 03 Canhão	1
2	PM EXT - V1 02 Base Funil	1
3	PM EXT - V1 01 Funil Circular	1
4	PM EXT - V1 05 Suporte Canhão 1	1
5	PM EXT - V1 06 Suporte Canhão 2	1
6	PM EXT - V1 10 Suporte Canhão 6	2
7	PM EXT - V1 07 Suporte Canhão 3	1
8	PM EXT - V1 08 Suporte Canhão 4	1
9	PM EXT - V1 09 Suporte Canhão 5	1
10	PM EXT - V1 11 Resistência 50x50	3
11	PM EXT - V1 13 Matriz Cilíndrica	1
12	PM EXT - V1 14 Rosca	1
13	PM EXT - V1 17 Eixo	1
14	PM EXT - V1 18 Mancal	1
15	PM EXT - V1 12 Resistência 60x75	1



UFPA- CAMTUC
LABMEC
LABINFRA
EXTRUSORA DE POLÍMEROS

MATERIAL: SAE 1020
AÇO INOXIDÁVEL

TÍTULO:
Extrusora Completa

DES. Nº A3

PESO: ESCALA:1:10 FOLHA 1 DE 1

