UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

Projeto aberto de um cabeçote customizado vertical baseado em extrusão por monorosca

Aluno: Luiz Eduardo Frezzatto Santos
Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos
2023

LUIZ EDUARDO FREZZATTO SANTOS

Projeto aberto de um cabeçote customizado vertical baseado em extrusão por monorosca.

Versão Corrigida

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Projeto Mecânico.

Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F896p

Frezzatto Santos, Luiz Eduardo
Projeto aberto de um cabeçote customizado vertical baseado em extrusão por monorosca. / Luiz Eduardo Frezzatto Santos; orientadora Zilda de Castro Silveira. São Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Projeto. 2. Cabeçote miniaturizado. 3. extrusão. 4. polímeros. 5. medição de temperatura. 6. protótipo funcional. 7. manufatura aditiva. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: **LUIZ EDUARDO FREZZATTO SANTOS**

Título da tese: "Projeto aberto de um cabeçote customizado vertical baseado em extrusão por monorosca"

Data da defesa: 02/02/2023

Comissão Julgadora	**Resultado**
Profª. Associada **Zilda de Castro Silveira** **(Orientadora)** (Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)	**Aprovado**
Prof. Titular **Jonas de Carvalho** (Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)	**Aprovado**
Prof. Dr. **Armando Italo Sette Antonialli** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	**Aprovado**
Prof. Dr. **Flavio Yukio Watanabe** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	**Aprovado**
Prof. Dr. **Fabio Mazzariol Santiciolli** (Faculdade de Tecnologia de Campinas/FATEC)	**Aprovado**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meu pais, Antonio e Eliana, à minha noiva, Diana, aos meus irmãos Luciano e Paulo, e a meu amigo Guilherme Donatti pelo apoio, ajuda e dedicação durante todos os anos de trabalho e pesquisa.

Agradecimentos

Aos meus pais pela atenção, dedicação, paciência e por estarem a todo tempo a meu lado durante toda a caminhada.

À minha noiva, Diana, pelo amor incondicional, companheirismo, dedicação e entrega perante todas as dificuldades.

Aos meus companheiros de laboratório Joaquim Manoel Justino e Henrique Takashi Idogava pelos anos de parceria, pesquisa e aprendizado.

À minha orientadora Zilda de Castro Silveira pela atenção e oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional frente à linha de pesquisa.

Ao meu grande amigo Guilherme Donatti pelo empenho no desenvolvimento da pesquisa conjunta, pela oportunidade de crescimento profissional e por acreditar em todo meu potencial.

Aos amigos Henrique Garcia, Larissa Castelucci e Leonardo Simião pelo acolhimento e amizade em momento de grande necessidade.

Às minhas amigas Sarah Mayrink e Bárbara Mayrink por todo apoio, auxílio e companheirismo.

À Ana Paula Martins pelos conselhos e ajuda na reta final da pesquisa.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de pesquisa concedida para o desenvolvimento do estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos e à Universidade de São Paulo pela infraestrutura e oportunidade de continuidade do estudo científico.

Epígrafe

A emoção mais antiga e mais forte da humanidade é o medo, e o mais antigo e mais forte de todos os medos é o medo do desconhecido.

H.P. Lovecraft

RESUMO

SANTOS, L.E.F (2023) **Projeto aberto de um cabeçote customizado vertical baseado em extrusão por monorosca**. 2023. 216p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O objetivo deste trabalho foi aprimorar e customizar dentro do conceito de manufatura aberta, o projeto de um cabeçote de extrusão vertical miniaturizado baseado em monorosca, para aplicação em manufatura aditiva. Cabeçotes de extrusão assistidos tiveram grande impulso no final dos anos 2000, com objetivo inicial de expandir a variedade de materiais para uso em impressoras 3D, reduzir os custos associados à fabricação da matéria-prima e aumentar a taxa de deposição de material, quando comparada com cabeçotes tradicionais alimentados por matéria-prima filamentar. Diversos estudos podem ser identificados no empenhos do desenvolvimento deste tipo de equipamentos muitas vezes realizados de forma assistemática do ponto de vista de projeto de engenharia sem uma correlação com características técnicas dos materiais escolhidos. Desta maneira, o presente estudo apresenta a proposta de melhoria de um cabeçote de extrusão com foco no reprojeto do sistema de transmissão e sistema de aquisição de temperatura priorizando a facilidade de manufatura dos componentes de maneira modular e avaliar sua capacidade de extrusão por meio de estimativas entre as relações de velocidades de rotação e vazão de material. A avaliação dos dados experimentais advindos do processamentos de materiais permitiram correlacionar a capacidade de funcionamento do equipamento com extrusoras horizontais amplamente utilizadas na indústria de polímeros. Além disso a predileção pelo uso de materiais de fácil obtenção para a manufatura dos componentes e montagem do sistema permite alta replicabilidade para uso do sistema em laboratórios e grupos de pesquisa para diversas aplicações.

Palavras-chave: projeto; cabeçote miniaturizado; extrusão; polímeros; medição de temperatura; protótipo funcional; manufatura aditiva.

ABSTRACT

SANTOS, L.E.F (2023) **Open design of a customized vertical printhead.based on single screw.** 2023. 216p. Thesis (Doctor´s Degree in Mechanical Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

The main goal of this study was to improve and customize, within the concept of manufacturing, the design of a miniaturized vertical extrusion print head based on a single screw, for application in additive manufacturing. Assisted extrusion heads had a great boost in the late 2000s, with the initial objective of expanding the variety of materials for use in 3D printers, reducing costs associated with the manufacture of raw materials and increasing the rate of material deposition, when compared to traditional heads fed by filamentary raw material. Several studies can be identified in efforts to develop this type of equipment, which are often carried out in an unsystematic way from an engineering design point of view without a correlation with the technical characteristics of the chosen materials. In this way, the present study presents the proposal for the improvement of an extrusion printhead with a focus on the redesign of the transmission and temperature acquisition system, prioritizing the components manufaturability in a modular way and evaluating its extrusion capacity through estimates between the rotational speeds and material flow relationships. The evaluation of the experimental data from the materials processing allowed to correlate the equipment's functioning capacity with horizontal extruders widely used in the polymer industry. Besides, the predilection for using easily obtainable materials for the manufacture of components and assembly of the system allows high replicability for the system application in laboratories and research groups for various uses.

Key words: design; *miniaturized printhead; extrusion; powder melt; temperature measures; functional prototype; additive manufacturing..*

Lista de Figuras

Figura 1 - Relacionamento entre processamento, estrutura e propriedades.....26
Figura 2 - Componentes básicos de uma extrusora de polímero de rosca simples.....27
Figura 3 - Exemplo de uma rosca de extrusão com perfil de compressão de passo único.....28
Figura 4 - Representação esquemática de rosca dupla co-rotacional e contra-rotacional.....30
Figura 5 - Representação do movimento de partículas durante o processo de extrusão 30
Figura 6 - Esboço de uma rosca única de extrusão cônica, com passo constante e perfil de compressão.....31
Figura 7 - Corte A-A da rosca de extrusão. Representação das direções x, y e z, nas quais ocorre fluxo do material. O corte A-A é feito executado em um ângulo de 90º em relação à direção z, ou em relação ao filete da rosca 32
Figura 8 – Material em transporte na rosca de extrusão 33
Figura 9 – Representação qualitativa das parcelas de perda de energia.....36
Figura 10 - Perfis de velocidade ao longo comprimento do canal.....38
Figura 11 – Estratégias para misturar polímeros com aditivos.....39
Figura 12 – Curva de variação do módulo de elasticidade em função da temperatura 40
Figura 13 - Aplicações baseadas em junção de camadas 41
Figura 14- Etapas do processo de Manufatura Aditiva: modelagem geométrica e geração do protótipo físico.....43
Figura 15- Normas ISO e ASTM para Manufatura Aditiva 44
Figura 16 - Publicações por ano do uso de técnicas aditivas na industria farmacológica.....46
Figura 17 - Princípios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material.....49
Figura 18 – Cabeçotes de extrusão valendo-se de rosca.....51
Figura 19 – Vista esquemática da tecnologia FDM com duas seringas de extrusão.....52
Figura 20 - Exemplo de posicionamento de aquecedores em um barril de extrusão.....55
Figura 21 - Componentes de um cabeçote de MA por FFF.....57
Figura 22 - Curvas de termo-resistências distintas.....59
Figura 23 - Representação de um termômetro de radiação.....60
Figura 24 - Diagrama de blocos dos principais componentes de uma câmera térmica.....61
Figura 25 - Configurações de posicionamento de termopares.....62
Figura 26 – Esboços digitais dos cabeçotes de impressão pautados em rosca única, desenvolvidos por (a) Bellini (2002) e (b) Reddy, Reddy e Ghosh (2007).....64
Figura 27 – Representação esquemática das modificações de projeto propostas e implementadas baseadas em extrusão por rosca vertical: propostas por: (a) Kumar et al. (2018) (b) Zhou et al. (2018) e (c) Silveira et al. (2014a) e Leng et al. (2019).....67
Figura 28 - Representações esquemáticas dos projetos alternativos dedicados a processamento e impressão de baixa escala: (a) Annoni, Giberti e Strano. (2016), (b) Canessa, Baruzzo e Fonda (2017) c) Liu, Hinduja e Bartolo (2017) e (d) Khondoker e Sameoto (2019) 69
Figura 29 - Classificação de partículas.....73
Figura 30 - (a) Protótipo funcional da impressora 3D; (b) cabeçotes de extrusão intercambiáveis 74
Figura 31 - (a) Mock-up do cabeçote com auxílio da técnica SLS, para avaliação de tolerâncias e montagem; (b) transmissão engrenagem e sem fim fabricado com técnica SLM 75
Figura 32 – Estrutura funcional da impressora 3D experimental com cabeçotes intercambiáveis 77
Figura 33 - Principais dimensões de uma rosca de extrusão 79
Figura 34 – Esquemático de um reômetro capilar. 82

Figura 35 – Curvas experimentais relacionando tensão de cisalhamento x velocidade, para a PA 12 natural e PA 12 utilizada no processo aditivo SLS. 84
Figura 36 – Relação Velocidade do fluído x Taxa de Cisalhamento, para PCL CAPA 6505 da Solvay. ...84
Figura 37 – Arranjo de cilindros coaxiais usado, para determinar a viscosidade de um fluido. 85
Figura 38 – Curva de torque do motor de passo NEMA 23, Catálogo de motores de passo Automotion. 88
Figura 39 – Desenho técnico da rosca de extrusão. 90
Figura 40 – Desenho técnico do barril. 91
Figura 41 - Modelo tridimensional do mini cabeçote de extrusão 92
Figura 42 - – Mock-up do cabeçote de extrusão e seu acoplamento no equipamento Fab@CTI. 93
Figura 43 – Mini-rosca extrusora produzida por usinagem em aço inoxidável 304. 94
Figura 44 – Sistema de redução produzido em SLM após pós-processamento e remoção de suporte. 94
Figura 45 - Perfil de temperatura teórico do barril 95
Figura 46 – Sistema de instrumentação térmica e simulação térmica do cabeçote de extrusão. (a)Cabeçote de extrusão com termopares acoplados para análise de temperatura, (b) imagem termográfica do cabeçote em funcionamento e (c) perfil de temperatura para aquecimento de 90oC 96
Figura 47 – Fluxograma do projeto de pesquisa do cabeçote intercambiável de extrusão por rosca simples. 99
Figura 48 - Freio de Prony para levantamento da curva de torque 102
Figura 49 - Sistema experimental para levantemento da curva de torque 103
Figura 50 – Diagrama MEI do cabeçote de extrusão. 105
Figura 51 - Vista explodida do modelo computacional do cabeçote na versão atual 106
Figura 52 - Roscas de extrusão confeccionadas em equipamento CNC 107
Figura 53 - Barril e bico extrusor 109
Figura 54 - Comparativo entre barris do cabeçote: (a) atual projeto; (b) projeto original. 110
Figura 55 - Bico do cabeçote de extrusão. (a) vista em corte; (b) peça usinada em latão 111
Figura 56 - Curva de torque NEMA 23 112
Figura 57 - Experimento para obtenção da curva torque vs. velocidade de rotação 113
Figura 58 - Curva de torque levantada experimentalmente 115
Figura 59 - Comparativo entre curva de torque dos motores de passo 116
Figura 60 - Comparativo entre curva de torque do motor Kalatec e Sanyo 116
Figura 61 - Componentes do sistema de redução. (a) parafusp sem-fim; (b) coroa 119
Figura 62 - Sistema de redução 120
Figura 63 - Zonas de interesse para estudo térmico. (a) Zona de homogeneização; (b) matriz (bico)121
Figura 64 - vista em corte do bloco de aquecimento do cabeçote de extrusão 122
Figura 65 - (a) Cartucho cerâmico 40W; (b) Termistor NTC 100K 122
Figura 66 - Representação tridimensional do barril montado com suportes aletados 123
Figura 67 - Sistema de aquecimento do projeto original (Resistência helicoidal). 124
Figura 68 - Diagrama de funcionamento do sistema 126
Figura 69 - Diagrama da ligação entre os componentes do sistema de acionamento 129
Figura 70 - Diagrama de blocos com a síntese do sistema. 130
Figura 71 - Montagem experimental para análise térmica do cabeçote 132
Figura 72 - Pontos e regiões de interesse para medição de temperatura 134
Figura 73 - Imagem térmica do cabeçote para condição de 100ºC 135
Figura 74 -Imagem térmica do sistema após transcorridos 30 minutos 136
Figura 75 - Curva de DSC do PP CP141 137

Figura 76 - Curva de viscosidade vs taxa de cisalhamento do PP 138
Figura 77 - Espectro infravermelho do PP virgem 140
Figura 78 - Vista em detalhe do espectro infravermelho do PP virgem (600 a 1400cm^{-1}).....140
Figura 79 - Indicação das bandas adicionais oriundas da copolimerirazão do PP CP141 141
Figura 80 - Verificação do preenchimento do parafuso de extrusão.....142
Figura 81 - Identificação das zonas do parafuso de extrusão 143
Figura 82 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 20rpm e 180ºC.....143
Figura 83 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 40rpm e 180ºC.....143
Figura 84 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 60rpm e 180ºC.....144
Figura 85 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 20rpm e 220ºC.....144
Figura 86 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 40rpm e 220ºC.....145
Figura 87 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 60rpm e 220ºC.....145
Figura 88 - Curva de vazão de material [g/h] x rotação [rpm] 147
Figura 89 - Curva de acumulado de massa [g] a 180ºC.....148
Figura 90 - Curva de acumulado de massa [g] a 200ºC.....148
Figura 91 - - Curva de acumulado de massa [g] a 220ºC.....149
Figura 92 - Espectro de análise do PP processado a 180ºC.....150
Figura 93 - Espectro de análise do PP processado a 200ºC.....151
Figura 94 - Espectro de análise do PP processado a 220ºC.....151
Figura 95 - Micrografia do PP com aditivo de talco (10%) 152

Lista de Tabelas

Tabela 1 –Materiais comerciais para processamento em equipamentos de Manufatura Aditiva 53
Tabela 2 - Parâmetros estimados para o parafuso de extrusão 80
Tabela 3 - Parâmetros de projeto para o pré-cálculo do conjunto barril e rosca 81
Tabela 4 - Valores extraídos da Figura 36, com faixa de valores mais estreitos. 87
Tabela 5 - Propriedades do PP CP141.....98
Tabela 6 - Propriedades do aço SAE 4340 107
Tabela 7 - Propriedades do aço inox AISI 304 110
Tabela 8 - Dados experimentais do levantamento da curva de torque.....114
Tabela 9 - Parâmetros construtivos do par coroa/parafuso sem-fim.....119
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do Bronze TM-23.....120
Tabela 11 - Propriedades térmicas dos diversos materiais empregados no sistema de aquecimento do cabeçote.....125
Tabela 12 - Pinos utilizados para conexão entre os componentes eletrônicos 129
Tabela 13 - Valores aproximados dos componentes empregados nos cabeçotes (realizado em junho/2022). 131
Tabela 14 - Valores de temperature (°C) medidos no cabeçote por dois diferentes equipamentos..134
Tabela 15 - Vazão (g/h) para diferentes temperaturas em diferentes velocidades de rotação 146

Lista de Siglas e Abreviaturas

θ - ângulo da rosca (graus)

δ - folga entre rosca e barril na região de plastificação [mm]

3D – tridimensional

3DP – 3D Printing

4D – Quadridimensional

ABS - Acrilonitrilo-butadieno-estireno

AGMA – American Gear Manufacturers Association

ASA – acrilonitrila-estireno-acrilato

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATR - refletância total atenuada

b - largura do canal da rosca [mm]

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

CNC – Controle Numérico Computacional

CP – CoPolímero

CTI – Centro de Tecnologia da Informação

DfAM – Design for Additive Manufacturing

DOE – Design of Experiments

D_s - Diâmetro da rosca [mm]

DSC - calorimetria diferencial por varredura

DTA - análise térmica diferencial

e – espessura do filete [mm]

EBM – Electro beam Melting

FDM – Fused Filament Modeling

FFF – Fabricação por Filamento Fundido

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

H – Profundidade do canal [mm]

hi´´ - profundidade final do canal da rosca [mm]

hi’ - profundidade inicial do canal da rosca [mm]

HoQ – House of Quality

ISO – International Organization for Standardization

L - comprimento total da rosca [mm]

L/D – relação entre comprimento e diâmetro da rosca

LENS – Laser Engineered Net Shaping

LOM – Laminação aditiva de folhas

L_s – Passo do parafuso [mm]

MA – Manufatura Aditiva

MEI – Matéria-Energia-Informação

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

N – Velocidade de rotação da rosca [rpm]

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

NTC – *Negative Temperature Coefficient*

PA – Poliamida

PAM - Pellet Additive Manufacturing

PC – Policarbonato

PCL - Policaprolactona

PEEK - poliéter-etér-cetona

PGA – Poli (ácido glicólico)

PID – Proporcional, Integrativo, Derivativo

PLA - Poli (ácido lático)

PP - Polipropileno

PTC – *Positive Temperature Coefficient*

PVOH – álcool polivinílico

Qd – Fluxo de arraste [kg/h]

Qe – Fluxo de escape [kg/h]

QFD – Quality Function Deployment

Qp – Fluxo de contrapressão [kg/h]

RAMPS - RepRap Arduino Mega Pololu Shield

RC – Taxa de Compressão

Rpm – rotações por minuto

RRUPE - Rich Rap Universal Pellet Extruder

SLA - Estereolitografia

SLM – Selective Laser Melting

SLS – Selective Laser Sintering

Tg- temperatura de transição vítrea [ºC]

Tm – temperatura de fusão [ºC]

T_{NF} – Temperatura de não-fluxo [ºC]

UV – Ultravioleta

Sumário

1 INTRODUÇÃO 22

1.1. OBJETIVO 24

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24

2 EMBASAMENTO TEÓRICO 26

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROCESSAMENTO POR EXTRUSÃO 26

2.2 ROSCAS DE EXTRUSÃO: CONCEITOS SOBRE TRANSPORTE E MISTURA EM ROSCA ÚNICA 31

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE MISTURAS 38

2.4 CONCEITOS E MODELOS DE EXTRUSÃO COM POLÍMEROS 39

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUFATURA ADITIVA 41

2.5.1 CONCEITOS EM TÉCNICA ADITIVA POR EXTRUSÃO 48

2.6 COMPORTAMENTO TÉRMICO EM EXTRUSORAS DE POLÍMERO 54

2.6.1 INSTRUMENTAÇÃO PRA MEDIÇÕES DE TEMPERATURA 57

2.6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE SENSORES PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA 58

2.6.2.1 SENSORES RESISTIVOS 59

2.6.2.2 MÉTODOS BASEADOS EM RADIAÇÃO 60

2.6.3 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA EM EXTRUSORAS DE POLÍMEROS 61

3 REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE CABEÇOTES DE EXTRUSÃO ASSISTIDOS 64

4 APRESENTAÇÃO DO PROJETO E PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO PROJETO 72

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA DE DESENVOLVIMENTO DE CABEÇOTE CUSTOMIZADOS BASEADO EM ROSCA .72

4.2 PROJETO DO CABEÇOTE INTERCAMBIÁVEL BASEADO EM ROSCA DE COMPRESSÃO: CONSIDERAÇÕES SOBRE O PRÉ-DIMENSIONAMENTO, FABRICAÇÃO, MONTAGEM E TESTES EXPERIMENTAIS 75

4.2.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO BARRIL-PARAFUSO DE EXTRUSÃO, SISTEMA DE ACIONAMENTO E SISTEMA DE AQUECIMENTO 77

4.2.1.1 RESTRIÇÕES DE PROJETO 78

4.2.1.2 ESCOLHA DA GEOMETRIA DA ROSCA 78

4.2.1.3 ESTIMATIVA DA TAXA DE CISALHAMENTO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS POR MEIO DE ENSAIO POR REOMETRIA CAPILAR 81

4.2.1.4 ESTIMATIVA DO TORQUE ESTÁTICO DO PARAFUSO DE EXTRUSÃO PARA ESCOLHA DO MOTOR DE PASSO E ESCOLHA DO MOTOR E SISTEMA DE TRANSMISSÃO 85

4.2.2 *MOCK-UP* PARA AVALIAÇÃO DAS TOLERÂNCIAS E MONTAGEM 92

4.2.3 MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO PERFIL DE TEMPERATURA DO BARRIL 95

5 MATERIAIS E MÉTODOS 98

5.1 MATERIAIS 98

5.1.1 PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA TESTES 100

5.1.2 CARACTERIZAÇÕES TERMOANALÍTICAS DO POLIPROPILENO (PP) 100
5.1.2.1 REOMETRIA DE PLACAS PARALELAS 100
5.1.2.2 FTIR 101
5.1.2.3 DSC 101
5.1.3 PREPARO DA AMOSTRA PARA MEV: 101
5.2 ANÁLISE DE VAZÃO 102
5.3 FREIO DE PRONY 102
5.4 ANÁLISE TÉRMICA 103
5.4.1 TERMOGRAFIA 103
5.4.2 TERMISTOR 104

6 APRIMORAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO CABEÇOTE DENTRO DO CONCEITO DE *OPEN DESIGN* E *OPEN MANUFACTURING* 105

6.1 SUBSISTEMA BARRIL-ROSCA 106
6.2 SUBSISTEMA DE ACIONAMENTO: LEVANTAMENTO DA CURVA DE TORQUE E CALIBRAÇÃO DO MOTOR DE PASSO. 111
6.3 SUBSISTEMA DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE 117
6.4 SUBSISTEMA DE AQUECIMENTO 120

7 MONTAGEM DO PROTÓTIPO FUNCIONAL DO CABEÇOTE VERTICAL DE EXTRUSÃO 126

7.1 MICROCONTROLADOR MEGA 2560 127
7.2 DRIVER WD2404 128
7.3 MÓDULO RAMPS 1.4 E FIRMWARE MARLIN 130
7.4 BREVE ANÁLISE DE CUSTO ENTRE VERSÕES DO CABEÇOTE 130

8 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO 132

8.1 ANÁLISE TÉRMICA 132
8.2 CARACTERIZAÇÃO DO PP 137
8.2.1 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO POLIPROPILENO POR DSC 137
8.2.2 REOMETRIA DE PLACAS PARALELAS 138
8.2.3 FTIR 139
8.3 SACA ROSCA 141
8.4 ANÁLISE DE VAZÃO 146
8.4.1 CURVAS DE ACUMULADOS DE MASSA 147
8.5 FTIR MATERIAL PROCESSADO 150
8.6 MEV 152

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS 154

9.1 TRABALHOS FUTUROS 156

REFERÊNCIAS 159

APÊNDICE A - REOLOGIA APLICADA AO PROCESSO DE EXTRUSÃO 175

APENDICE B – DADOS OBTIDOS COM RELAÇÃO VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E VAZÃO. 186

APENDICE C – ANÁLISES DE MICROGRAFIAS DE MISTURA. 192

APENDICE D – CÓDIGO NEMA 23 201

APENDICE E – PRÉ-DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO 205

APENDICE F - FLUXOGRAMA 215

1 Introdução

O aumento da variedade dos filamentos para impressão 3D tem possibilitado novas aplicações e funcionalidades como, por exemplo, a fabricação de componentes flexíveis, condutores de eletricidade, componentes com maior resistência termomecânica, bactericidas, com gradientes de propriedades ou capazes de alterar suas características de acordo com estímulos externos (tendência conhecida como impressão 4D), medicamentos personalizados, entre outras aplicações (ROBERSON *et al.*, 2015; TORRADO *et al.*, 2015; GARDAN, 2018; GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ; SARABIA-VALLEJOS; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, 2019).

Entretanto, a elaboração de filamentos para impressão 3D a partir de materiais alternativos envolve etapas adicionais de processamento no estado fundido para que ocorra a mistura dos diferentes compostos e sua conformação, o que requer o atendimento de demandas específicas em termos das propriedades dos filamentos, implicando em maior consumo de recursos e na possibilidade de degradação térmica ao longo do processo (ROBERSON *et al.*, 2015; SINGH; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017; ZHOU et al., 2018).

Neste contexto, diferentes cabeçotes de impressão 3D baseados no processo de extrusão vêm sendo implementados, possibilitando o uso de polímeros previamente fundidos, granulados (pellets) ou em pó combinados com materiais múltiplos (partículas metálicas, cerâmicas ou mesmo outros polímeros) para mistura e deposição direta do material resultante, evitando, assim, etapas precedentes associadas à fabricação de filamentos (BELLINI; SHOR; GUCERI, 2005; VOLPATO *et al.*, 2015; CHENG et al., 2011; GONZALEZ-GUTIERREZ *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2018 TSENG, et al, 2018; ZHOU et al., 2018).

Amplamente utilizado na indústria de plásticos, o processo de extrusão consiste na conversão de matéria-prima em um produto com densidade e forma uniformes, realizada por meio da passagem forçada do material por uma matriz sob condições controladas (MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2014). Além da conformação final do material em perfis contínuos, a extrusão por rosca é utilizada na mistura dos diferentes compostos ou aditivos que constituem um produto plástico como, por exemplo, cargas de preenchimento, retardantes de chama, corantes e plastificantes (MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2014).

Os cabeçotes de extrusão denominados assistidos (*EAM – Extrusion Additive Manufacturing)* tiveram grande impulso no final dos anos 2000 com objetivo inicial de expandir a variedade de materiais para uso em impressora 3D, reduzir os custos associados à fabricação da matéria-prima e aumentar a taxa de deposição de material, quando comparada com cabeçotes tradicionais alimentados por matéria-prima filamentar (NETTO, et al, 2021). A literatura mais específica para extrusão envolvendo matéria-prima sob estado particulado em manufatura aditiva, desde a segunda metade dos anos 2000, é composta por trabalhos envolvendo o desenvolvimento de cabeçotes baseados em roscas para fabricação aditiva. Entretanto, a diversidade dessas concepções de projeto são feitas muitas vezes, de forma assistemática, do ponto de vista de projeto de engenharia, sem uma correlação com características técnicas dos materiais de engenharia escolhidos.

Bellini (2002) desenvolveu um equipamento utilizando parafuso de extrusão para transporte e deposição de material, sendo este o trabalho pioneiro na área. Deste estudo diversos outros se originaram utilizando mecanismos semelhantes com soluções diversas. Reddy, Reddy e Gosh (2007) propuseram melhorias na alimentação adicionando um dispositivo desacoplado da unidade de extrusão, além disso, é feito o emprego de rosca de extrusão com perfil de compressão.

Dentre as diferentes soluções podem ser destacados os trabalhos de Kumar et al. (2018) o qual adaptou uma broca de transporte ao cabeçote de uma fresadora, Zhou et al. (2018) utilizando uma rosca de seção constante idealizaram um barril com quatro entradas de material em diferentes posições possibilitando o uso de diversos materiais além de estudar o tempo de residência. Silveira et al (2014) e Leng et al (2019) utilizaram roscas cônicas para melhoria da plastificação e homogeneização do material em processamento.

Além destes, Annoni et al. (2016) acoplou a uma injetora um parafuso de extrusão para carreamento de material ao passo que a deposição é feito pelo primeiro dispositivo; Canessa et al. (2017) utilizou uma bomba de cavidade progressiva para controle do fluxo de material; Liu et al (2017) acoplou uma câmara da liquefação para bombeamento de material já em estado pastoso para carreamento e deposição; e Khondoker et al (2019) utilizou uma unidade de plastificação para geração de filamentos os quais são processados em manufatura aditiva pelo emprego de uma cabeçote de deposição convencional de impressão 3D.

Assim, o par rosca-barril está diretamente associado à função extrudar adequadamente, uma vez que sua movimentação e consequente capacidade de originar tensões de cisalhamento e, portanto, o potencial de mistura considerando a geração de energia termomecânica é necessária para promover a plastificação do material. E, ainda, por meio de movimentos circulares nos canais formados entre a rosca e o barril, gerados por fluxos de arraste e contrapressão, as partículas sólidas das cargas e aditivos ou gotículas de material fundido, no caso de blendas, são distribuídos e dispersados (MANRICH, 2005; KOHLGRÜBER, 2008; RAUWENDAAL, 2014).

Neste contexto, o desenvolvimento de cabeçotes e equipamentos customizados de extrusão baseados em roscas para manufatura aditiva, de porte experimental (*middle-end*) e, com estruturas de projeto e manufatura abertos, em contrapondo aos equipamentos industriais possibilita a flexibilização da fabricação aditiva por extrusão, com matéria-prima particulada, podendo inclusive gerar filamentos por meio de formulações *"in loco"*, favorecendo um melhor entendimento do processo de extrusão e, portanto, das propriedades finais (mecânicas) das peças fabricadas (SILVEIRA et al, 2014 a; DÁVILA et al, 2015, TSENG, et al, 2018, NETTO, et al, 2021).

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi aprimorar e customizar, dentro do conceito de projeto e manufatura abertos, o projeto de um cabeçote de extrusão vertical miniaturizado baseado em monorosca para aplicação em manufatura aditiva.

1.1.1. Objetivos específicos

I. Reprojeto do sistema de transmissão;
II. Reprojeto do sistema de aquisição de temperatura;
III. Fabricação dos componentes do cabeçote focando principalmente nos processos de manutenção e replicabilidade;

IV. Avaliação da capacidade de extrusão por meio de estimativas entre relações de velocidades de rotação e vazão de material.

2 Embasamento teórico

Procedeu-se, a priori, uma pesquisa bibliográfica que contemplasse estudos empreendidos em anos recentes acerca da Manufatura Aditiva, compreendendo os processos aditivos definidos pela norma ISO/ASTM 52900 (2015), a contextualização do processo aditivo por extrusão e suas variações em termos de mecanismos de deposição, e conceitos básicos de processamento de polímeros por extrusão. Ao longo deste capítulo são tecidas breves sinopses acerca dos estudos arrolados na linha de pesquisa que possibilitaram pautar a presente tese.

2.1 Considerações sobre processamento por extrusão

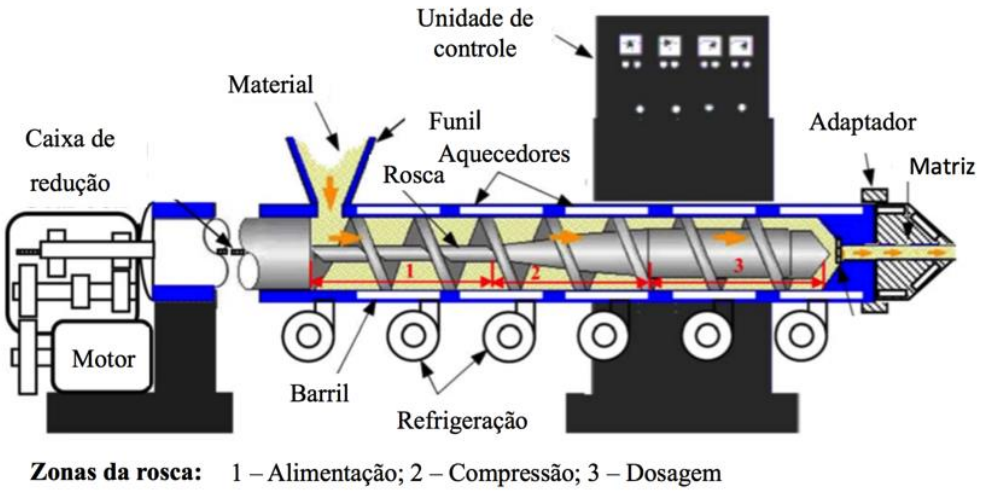
A estrutura ou "morfologia" de um polímero (orientação molecular, tamanho do cristal e cristalização) decorre das condições térmicas e mecânicas (como por exemplo, a relação tensão e deformação) processadas durante sua conformação. As propriedades do polímero derivam de sua estrutura, principalmente da orientação molecular. Por conseguinte, as condições de processamento, estrutura e propriedades de um produto fabricado com polímeros estão interrelacionados, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Relacionamento entre processamento, estrutura e propriedades

Fonte: Adaptado de Chung (2020)

Segundo Rauwendaal (2014), a primeira extrusora de material termoplástico foi construída em 1935 por Paul Troester, na Alemanha. A Figura 2 mostra esquematicamente os componentes básicos constituintes de um equipamento de extrusão industrial.

Figura 2 - Componentes básicos de uma extrusora de polímero de rosca simples



Fonte: Adaptado de Abeykoon *et al.* (2012).

O termo “extrusão” deriva do latim, “ex” – força e “tudere” - empurrar. Portanto, extrusão se constitui no processo de conformação, que produz peças com comprimentos ilimitados e seção transversal constante, pressionando o material a se deslocar através de um cabeçote sob condições de pressão e temperatura controlada. Desta maneira, a moldagem por extrusão apresenta característica essencial, que a distingue de todos outros processos de conformação de polímeros (BARRA, 2021).

As extrusoras industriais, utilizadas para o processamento de polímeros apresentam diferenciadas configurações geométricas. Essas combinações acontecem porque os polímeros apresentam pesos moleculares distintos, logo, alteram o tempo de relaxação no transcorrer do processo, além de requerer elevada ou reduzida quantidade de energia e demandar menor ou maior tempo para sua fusão (MANRICH, 2013).

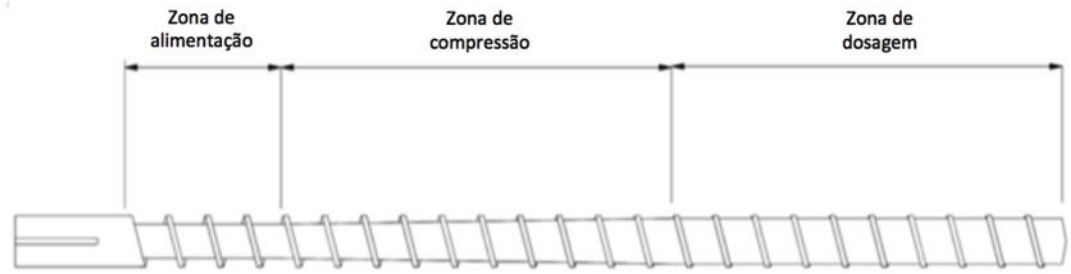
O parafuso de extrusão, designado de rosca, acumula as funções de projeto de transportar, fundir e plastificar a matéria-prima, quer sob a forma granular ou em pó. O movimento de rotação entre a rosca única e o barril ou canhão, ou ainda, entre roscas duplas e estas com o barril geram tensões de cisalhamento em razão do escoamento do material, gerando uma parcela de energia que atua na vazão total da extrusora em consequência do atrito entre esses elementos. O gradiente de pressão gerado devido a seção transversal do perfil geométrico, passo, altura e profundidade das roscas, no parafuso de extrusão também interfere no fluxo total do sistema (RAUWENDAAL, 2014; MANRICH, 2013).

Manrich (2013) aponta que, de modo geral, em um sistema de rosca única, o movimento de rotação gerador das tensões de cisalhamento sobre o material produzem 80% da energia termomecânica necessária para transformar o material, polímero, e sendo complementado por dispositivos de aquecimento externo.

A Figura 3 ilustra uma representação esquemática de uma rosca de extrusão única, de perfil cônico, de compressão com passo constante e profundidade variável.

O trabalho mecânico é imprescindível em extrusoras visto que os materiais poliméricos dispõem de reduzida condutividade térmica e, em geral elevada viscosidade ao se plastificar. Por essa razão, o posicionamento correto dos aquecedores nas regiões de transformação de fase ou de maior tempo de mistura, como nas regiões de malaxagem, nas roscas duplas é crucial.

Figura 3 - Exemplo de uma rosca de extrusão com perfil de compressão de passo único



Fonte: Adaptado de Vera-Sorroche *et al.* (2013).

A rosca de extrusão é capaz de executar múltiplas funções em equipamentos diversos, desde transporte de materiais a granel até a geração de peças, incluindo uso potencial em manufatura aditiva.

À vista disso, o projeto das geometrias das roscas, com foco em regiões específicas, demanda sua execução de forma customizada atendendo a critérios de projeto como, por exemplo, máximo rendimento, vazão constante, plastificação e homogeneização adequada sem a ocorrência da degradação do material e falhas na peça final.

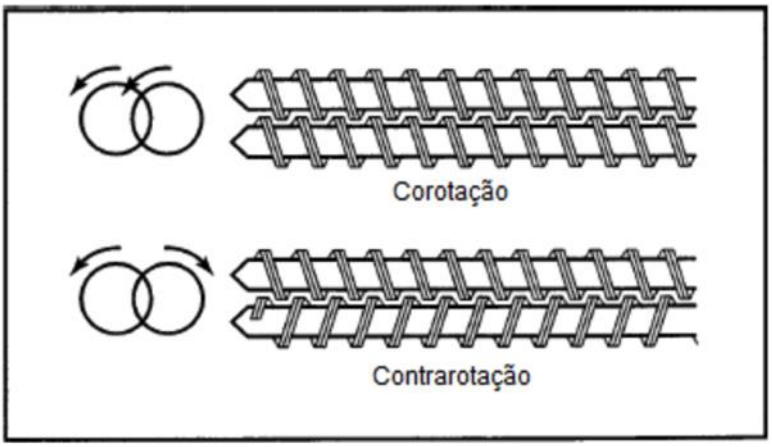
Tanto as roscas únicas ou duplas podem ser projetadas com diferentes perfis geométricos e/ou distintas configurações. De modo simplificado os sistemas de roscas únicas, monoroscas apontam as seguintes vantagens: simplificação do projeto, fabricação, montagem e manutenção e, consequentemente, menor custo. Por outro lado, demonstram reduzida capacidade de mistura mesmo com aditivos quando comparadas a sistemas de dupla roscas e em consequência podem manifestar, superaquecimento no transcorrer do processamento. Por conseguinte, os materiais que revelam maior tendência a degradação devem ser rejeitados para o processamento em sistemas de rosca única de extrusão (RAUWENDAAL, 2014)

Os sistemas corrotacional ou contrarotacional fundamentados em dupla rosca permitem misturas de dois ou mais materiais, incluindo adição de pigmentos, preenchedores e plastificantes. Sua capacidade de mistura é elevada em comparação com os sistemas de rosca única, em função do incremento da tensão de cisalhamento causada pela rotação entre as roscas e, das mesmas com a parede interna do barril. Por conseguinte, diferentes perfis podem ser modularizados e sua capacidade de mistura se vincula, também, com a flexibilidade de regiões de transporte e de mistura dispersivas e distributivas em segmentos específicos, mostrando menor tendência de aquecimento, maior produtividade e controle de processo. Como contraponto, requer elevado consumo de energia, maior custo e em decorrência às elevadas tensões de cisalhamento, como também restrição a algumas famílias de polímeros.

As roscas neste tipo de extrusoras exibem rotação no mesmo sentido, co-rotação, ou em sentidos opostos, contra rotação, conforme ilustrado na Figura 4. Roscas co-rotacionais são as mais indicadas para operações de mistura e homogeneização. Estas dispõem de um mecanismo de transporte semelhante àquele

observado em uma extrusora monorosca. A presença de duas roscas estabelece a vantagem de as mesmas serem auto-limpantes, o que reduz o escorregamento e garante o transporte de material à frente da máquina (FIORIO, 2011).

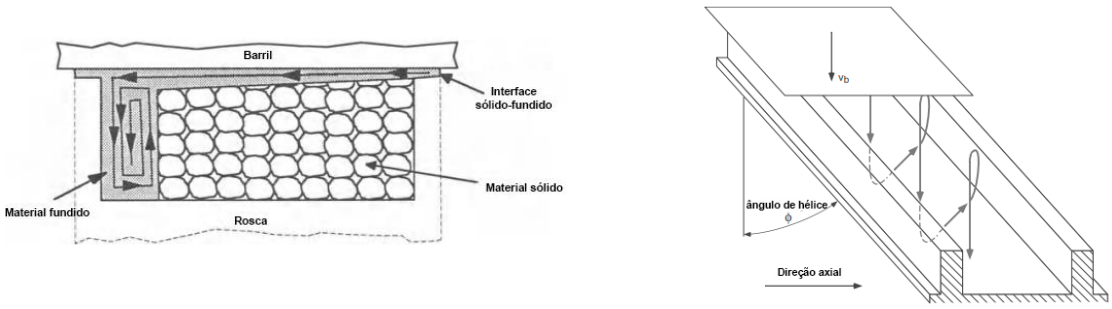
Figura 4 - Representação esquemática de rosca dupla co-rotacional e contra-rotacional



Fonte: Drobny (2007) *apud* Freitas (2014).

O material fundido percorre trajetórias constantes com movimento que causa sua elongação num ciclo de mistura dispersiva e distributiva como ilustrado na figura 5.

Figura 5 - Representação do movimento de partículas durante o processo de extrusão



(a) (b)

Fonte: Adapatado de (a) Stevens e Covas (1995) e (b) Rauwendaal, (2014).

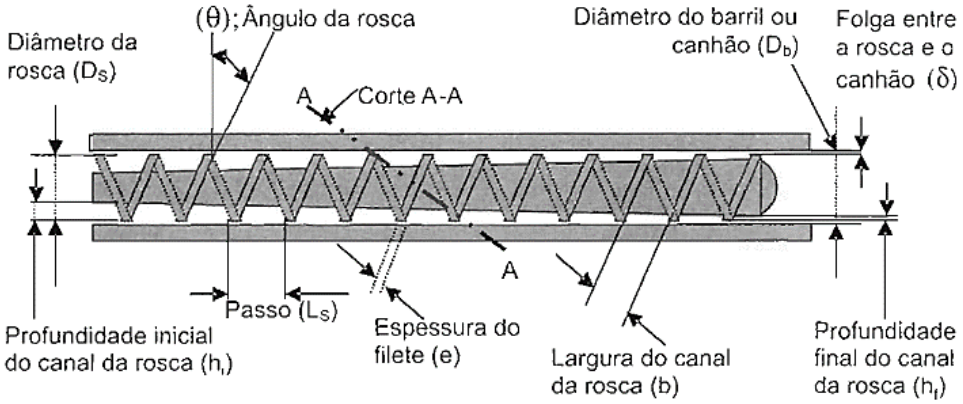
No contexto da manufatura aditiva, há estudos recentes que apontam o emprego de sistemas dupla rosca para produção de medicamentos, em razão de sua

precisão de dosagem e possibilidade de customização ou medicamento personalizado (LIU et al, 2020).

2.2 Roscas de extrusão: conceitos sobre transporte e mistura em rosca única

O conceito de parafuso de extrusão foi pautado no conceito de parafuso de Arquimedes ou bomba de parafuso concebido pelo matemático, físico e inventor Grego Arquimedes. A Figura 6 retrata uma representação esquemática contendo os principais parâmetros geométricos associados a uma rosca de seção variável simples de extrusão.

Figura 6 - Esboço de uma rosca única de extrusão cônica, com passo constante e perfil de compressão.



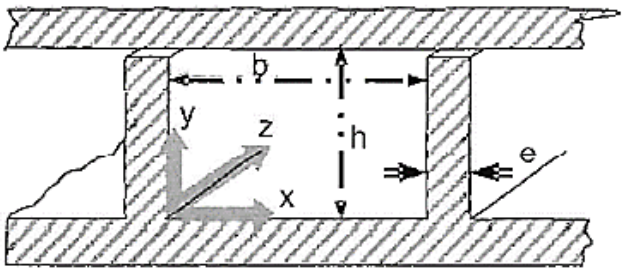
Fonte: Manrich (2013)

A rosca de extrusão única ou monorosca dispõem de larga aplicação na mistura, homogeneização e transporte no processamento de termoplásticos, correspondendo a cerca de 80% dos equipamentos industriais. Seu comprimento está relacionado ao diâmetro e ao tipo de polímero ou compósito a ser processado (MANRICH, 2013)

Usualmente, os filetes neste tipo de rosca formam um ângulo de hélice em torno de 17°, e, neste caso, seu passo dispõe de valor próximo ou igual ao diâmetro.

A Figura 7 mostra um plano de corte "A-A" da figura 6 em umas das regiões de mistura da rosca na qual identifica-se as direções de escoamento do fluido (x, y e z) e alguns dos parâmetros do filete de rosca (passo, altura e espessura).

Figura 7 - Corte A-A da rosca de extrusão. Representação das direções x, y e z, nas quais ocorre fluxo do material. O corte A-A é feito executado em um ângulo de 90º em relação à direção z, ou em relação ao filete da rosca

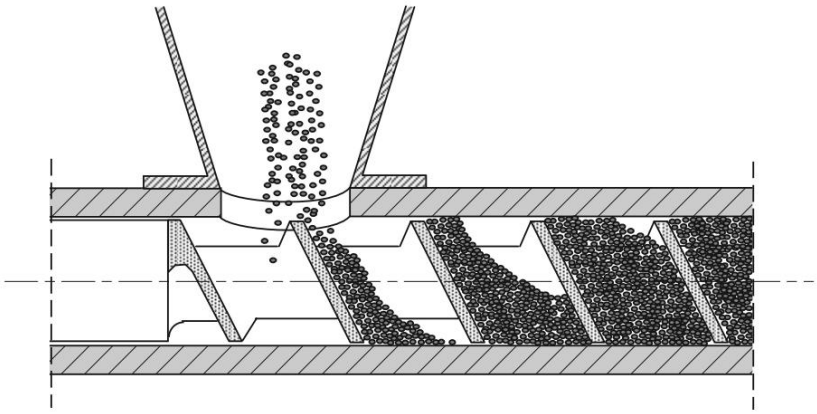


Fonte: Manrich (2013)

Nas roscas de extrusão é possível dosar o material mediante a gravidade, podendo o mesmo ser armazenado em um funil, em temperatura ambiente sob a forma granular ou pó, dispondo de pouca densidade aparente. Segundo Manrich (2013) os valores variam entre 0,3 a 0,6 g/cm^3 conforme o formato do grão e do tipo de polímero utilizado.

À medida que o material se desloca nas regiões de transformação da rosca, a densidade se eleva em torno de duas a até quatro vezes seu valor inicial em decorrência do amolecimento do polímero e da eliminação de ar nos espaços entre os grãos (figura 8). Sob esta condição o material necessita ser comprimido ao longo da rosca com a finalidade de compensar o efeito de amplificação assim como manter as tensões de cisalhamento adequadas favorecendo o fluxo do material.

Figura 8 – Material em transporte na rosca de extrusão



Fonte: Rauwendaal (2014)

Manrich (2013) recomenda que a taxa de compressão precisa ser igual ou superior a variação da densidade do material em processo. Ainda, segundo o autor, as roscas únicas de extrusão dispõem de taxa de compressão entre 1,8:1 até 5,5:1, correspondente à função do material termoplástico a ser conformado. Neste caso, os materiais que sofrem degradação em função da tensão de cisalhamento elevada devem estar submetidos a compressão, apenas, para compensar a variação da densidade.

Assim sendo, o projeto de roscas únicas ou simples de extrusão são executados para um determinado tipo ou classes de polímeros termoplásticos com diferentes configurações dos parâmetros mostrados na figura 6.

As roscas únicas podem possuir “combinações geométricas” distintas a fim de promover maior taxa de cisalhamento e melhoria da mistura, adicionando funções intermediárias de dispersão e distribuição do material, nas regiões de mistura/homogeneização (MANRICH, 2013).

Com o intuito de elevar a taxa de cisalhamento é preciso promover uma mudança geométrica localizada de modo a impelir o polímero a fluir por pequenos canais. Este processo, sob elevadas temperaturas do material, permite que se mantenha maior uniformidade da temperatura, com menor gasto de energia. Marinch (2013) menciona, resumidamente, o exemplo do elemento “Maddock”: que adjacente a uma barreira sob o formato de anel contendo uma seção transversal composta de

elementos dentados possibilita que através da abertura do anel o material flua pelos canais formados entre si.

Soluções geométricas que mantenham por um período de tempo o fluxo do material confinado em uma determinada trajetória, bem como variações no passo e aumento dos filetes, podem melhorar as condições de mistura e extrusão do material (MANRICH, 2013).

As roscas de extrusão simples cônicas e de passo constante ou variável são descritas por um conjunto de parâmetros geométricos, apresentados na figura 6, que norteiam seu projeto: Diâmetro da rosca (D_s), comprimento total da rosca (L), espessura do filete (e), folga entre rosca e barril na região de plastificação (δ), ângulo da rosca (θ), profundidade inicial do canal da rosca (hi'), profundidade final do canal da rosca (hi´´) e largura do canal da rosca (b).

A relação entre o diâmetro da rosca (D_s) e seu comprimento total (L) afeta o comportamento termomecânico gerado pelo atrito e dispositivos elétricos externos no subsistema de extrusão; o perfil de distribuição de pressão varia à medida que o material se desloca sob efeitos de cisalhamento do material para as regiões de homogeneização e plastificação, até que se obtenha compactação e isotropia da massa polimérica (MANRICH, 2013).

A rosca de extrusão, portanto, mantem relação direta na qualidade final do produto e, também sofre interferência dos demais componentes que compõem o sistema de extrusão. Neste aspecto, cabe pontuar alguns destes elementos:

a) Funil + rastelo: elemento cuja função é conduzir o material em estado de pó ou granular até a região de transporte da rosca. Optou-se por um rastelo, que facilita a desaglomeração de pós finos bem como propicia a condução homogênea do material. Um dosador fundamentado em fuso de movimentação, também, pode ser empregado com o intuito de controlar a vazão volumétrica do material de modo discreto ou continuo;
b) Par barril-rosca: suficientemente compridos a fim de gerar pressão, plastificação e transmissão de calor;
c) Restrição: após a rosca para gerar pressão. Esta restrição pode ser a própria matriz e/ou a uma grelha contendo ou não telas filtrantes.

d) Parafuso de extrusão (rosca): projetado de modo a atender a função de comprimir, cisalhar e homogeneizar a matéria-prima;
e) Controle do perfil de temperatura: a temperatura deve ser monitorada continuamente no trajeto do material, desde a zona de alimentação até a região final de transporte, de modo a evitar aderência do material na superfície da rosca, condição que conduz a alteração de seu fluxo, além de causar variação na vazão da extrusora. A temperatura deve se manter invariável ao longo do comprimento do par rosca-barril. Nas zonas de compressão e dosagem a temperatura deve ser em grau superior ao da região antecessora, condição que favorece a plastificação do material sem provocar sua degradação;
f) Controle da velocidade de rotação (N) da rosca: com o propósito de manter o fluxo contínuo de material favorecendo o regime permanente na geração de peças conformadas de maneira homogênea.

Um conjunto de parâmetros podem ser variados a fim de que o processo de extrusão seja apropriado aos diferentes tipos de materiais, poliméricos e compósitos, o que proporciona versatilidade e alterações de funções, como:

a) Relação L/D (relação entre diâmetro externo e comprimento total da rosca): Ao se variar o diâmetro a vazão total do processo é alterada e, consequentemente, a área disponível para aquecimento é alterada por naturezas mecânica e térmica. O mesmo princípio se aplica à variação do comprimento L.
b) Passo do parafuso (Ls) e profundidade do canal (h): as forças de cisalhamento nos eixos de referência, o calor gerado e a vazão volumétrica da extrusora são afetados pela profundidade do canal, considerando-se que haja velocidade constante de rotação da rosca (N). Caso ocorra alteração na velocidade de rotação da rosca, o fluxo altera o grau de mistura do material, logo, a variação da rotação afeta significativamente o cisalhamento sobre o material e o calor gerado por atrito.
c) Matriz (bico calibrado): propicia a modificação do decremento de pressão ao longo do parafuso de extrusão;
d) Temperaturas ao longo do barril, da rosca de extrusão e na matriz (bico): podem ser modificadas/otimizadas, a fim de gerar máxima integridade do objeto extrudado. Temperaturas elevadas reduzem consideravelmente a viscosidade do polímero conduzindo à degradação do material no interior do subsistema

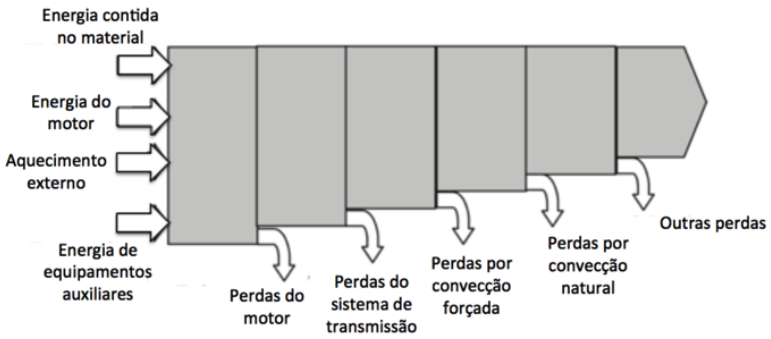
barril-rosca, além do colapso geométrico da massa que é extrudada pelo bico, impedindo a formação da estrutura. Temperaturas reduzidas provocam a baixa qualidade de mistura, a heterogeneidade do objeto e a má qualidade da peça extrudada.

Segundo Deng *et al.* (2014), as fontes de energia que fundem efetivamente o polímero diz respeito ao aquecimento do barril por meio de dispositivos externos, mantas ou resistências térmicas, e o trabalho mecânico oriundo da rotação da rosca, o qual é transferido sob a forma de energia térmica à massa polimérica pelos mecanismos de atrito, arraste, e diferença de pressão, contrapressão. Em geral, se a rotação da rosca é reduzida, a maior quantidade da energia para derreter o material provem do aquecimento do barril. Em contrapartida, se a rotação da rosca é elevada, o aquecimento por atrito provido pela rosca se torna a principal fonte de energia. Assim sendo, a obtenção da maior eficiência do sistema de extrusão pode ser atingida pela otimização da velocidade e rotação da rosca. O aquecimento desnecessário do barril poderá ocasionar perda considerável da energia térmica para o ambiente.

Extrusoras industriais, geralmente, são equipadas com controladores de temperatura e de rotação do motor acoplados à rosca, visando otimizar o consumo energético da máquina. Controladores do tipo PID (proporcional-integrativo-derivativo) são utilizados com maior frequência (DENG, *et al.,* 2014).

Abeykoon *et al.* (2014) apontam que perdas de energia se verificam em diversos estágios do processo, seja sob a forma de energia elétrica, mecânica ou térmica. A figura 9 ilustra uma representação qualitativa das perdas em um sistema barril rosca.

Figura 9 – Representação qualitativa das parcelas de perda de energia



Fonte: Adaptado de Abeykoon *et al.* (2014).

Muitos dos parâmetros envolvidos no processo de extrusão referem-se à temperatura de aquecimento do barril e/ou à velocidade de rotação, e à geometria da rosca. Dentre eles são apontados a viscosidade do material e a vazão de saída do material da extrusora, que está diretamente associada à capacidade produtiva da máquina. No item 2.5 será tratado especificamente a instrumentação para medição térmica, com foco no sensoriamento.

O perfil de temperatura ao longo da extrusora, também, é apontado como um dos parâmetros fundamentais associados ao rendimento energético do processo, uma vez que os graus de temperatura nas diferentes zonas da rosca de extrusão afetam o consumo de energia. Além disso, a temperatura interfere diretamente na variação do gradiente de pressão no processo de extrusão, que faz com que a velocidade de rotação da rosca possa ser maior alterando, assim, a taxa de cisalhamento. Considera–se sempre que a vazão total é dada pela equação 1:

$$Qtotal = Qd \pm Qp \pm Qe \qquad (1)$$

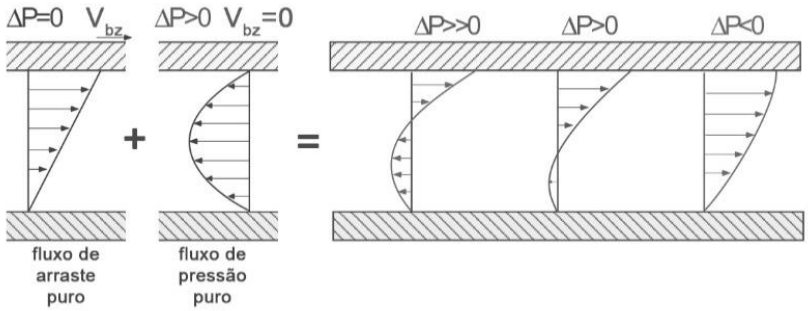
A capacidade de mistura de uma extrusora é função do fluxo resultante no interior do barril-rosca obtido por intermédio de três parcelas Qd, Qp e Qe relacionados diretamente ao arraste (*drag*), à pressão e ao escape, respectivamente.

A primeira parcela está associada fundamentalmente ao movimento de rotação entre elementos barril-rosca, gerando arraste e perfil de velocidade linear do polímero aderido às paredes internas do barril e em contato com as superfícies da rosca. (BRETAS; DÁVILA, 2005, STEVENS; COVAS, 1995, WHITE; POTENTE, 2002).

A restrição na saída da matriz da extrusora produz fluxo de pressão com perfil parabólico de velocidades em direção oposta ao arraste no momento em que a variação da mesma é positiva. A vazão provocada pelo fluxo de pressão é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e, inversamente proporcional à viscosidade do material (STEVENS; COVAS, 1995 , WHITE; POTENTE, 2002, RAUWENDAAL 2014, GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

No caso da viscosidade do polímero ser constante, os fluxos de arraste e contrapressão podem ser sobrepostos de modo que a vazão resultante seja dada pela somatória das duas parcelas. A figura 10 mostra diferentes situações do perfil de velocidade (RAUWENDAAL 2014).

Figura 10 - Perfis de velocidade ao longo comprimento do canal.



Fonte:Adaptado de Rauwendaal (2014).

A análise do escoamento do fluido está vinculada a uma série de hipóteses simplificadoras, tais como considerar o polímero como fluido homogêneo, o comportamento newtoniano em condições isotérmicas e a operação em regime permanente. Aplicadas estas hipóteses, o fluxo de escape pode ser considerado como desprezível (STEVENS; COVAS, 1995; BRETAS; DÁVILA, 2005, WHITE; POTENTE, 2002).

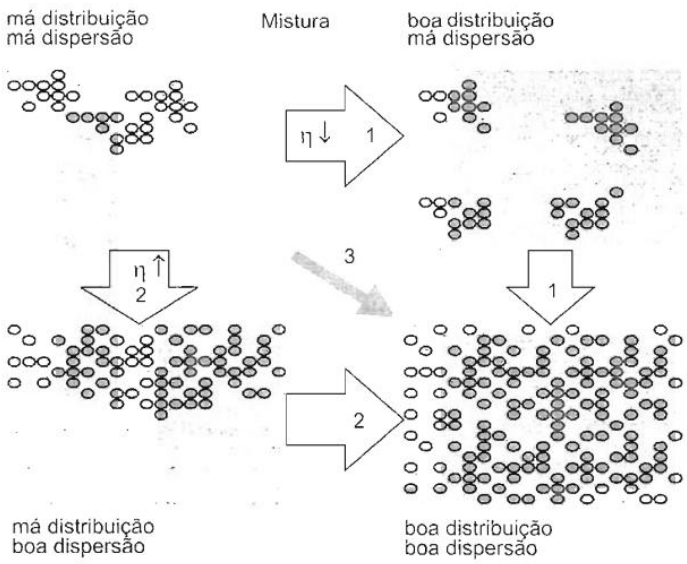
2.3 Considerações sobre misturas

Segundo Manrich (2013), métodos específicos se mostram imprescindíveis a fim de se proceder ao processamento de misturas de tipos distintos de polímeros ou com pigmentos, cargas e aditivos. A ordem de inserção destes componentes é capaz de alterar as propriedades do produto final. A dispersão e distribuição dos pigmentos, das fibras e cargas devem ocorrer de modo equilibrado evitando assim que estes aditivos criem uma nova fase na matriz polimérica originando uma frágil interação entre ambos ou, ainda, revelarem capacidade reduzida de transmissão das tensões. A dispersão integral dos aglomerados acarretará plena interação com a matriz

possibilitando a transferência de tensões do polímero, principalmente no decorrer do processo de mistura ocasião em que há a ativação de forças, originadas por cisalhamento ou tensões mecânicas, sobre o fluido.

Estas forças são, então, as responsáveis pelo rompimento dos aglomerados particulares, e sua eficiência está diretamente correlacionada à viscosidade da matriz polimérica em que estão inseridas. A variação da viscosidade do polímero no transcorrer do processo de mistura interfere na qualidade da dispersão e distribuição dos aditivos como mostrado na figura 11.

Figura 11 – Estratégias para misturar polímeros com aditivos.



Fonte: Manrich (2013).

2.4 Conceitos e modelos de extrusão com polímeros

Segundo Manrich (2005), polímeros compõem-se de materiais de origem orgânica ou inorgânica, sintética ou natural, com elevado peso molecular e, variedades estruturais repetitivas, meros, as quais exibem reduzido peso molecular.

A compreensão precisa das propriedades poliméricas é de suma relevância para o entendimento de seu comportamento, assim como das condições imprescindíveis para seu processamento. Nesta seção serão abordados conceitos e informações sobre os polímeros quanto às suas propriedades, além de se proceder a um breve estudo reológico pertinente ao comportamento polimérico.

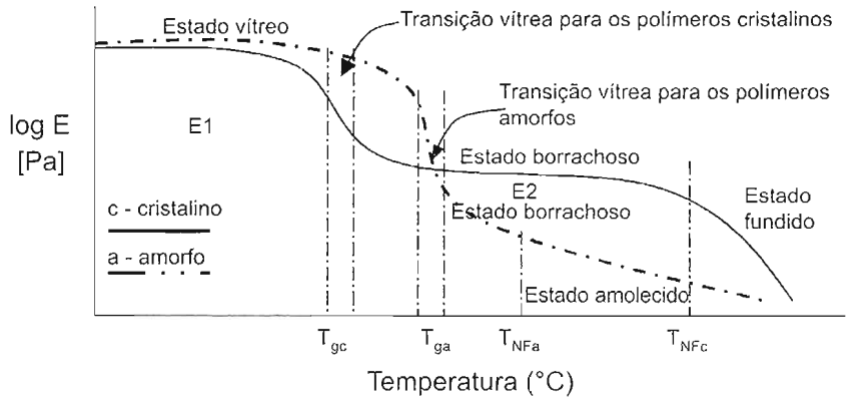
O estado físico de polímeros pode ser definido como líquido, sob esta condição é observada ausência de cristalinidade, ou sólido, estado em que o polímero exibe cristalinidade parcial (MANRICH, 2005).

Identificado o estado físico em que o polímero se encontra, duas grandezas mostram-se ser relevantes para o seu processamento, uma pertinente à temperatura de transição vítrea (T_g) e outra à temperatura de fusão cristalina (T_m). Na T_m transcorre a alteração de fase do material, ou seja, este transita da forma-cristalina para a amorfa e vice-versa. Em contrapartida na T_g não se constata variação de fase, contudo a mobilidade molecular se altera (MANRICH, 2005). Ainda, cabe ressaltar que os polímeros amorfos, em geral, não possuem T_m.

A determinação da temperatura de fusão em que se sucede o processamento de polímeros em estado fundido (semicristalinos) pode ser empreendida por intermédio de calorimetria diferencial por varredura (DSC). Por sua vez a T_g pode ser averiguada por testes como DSC, análise térmica diferencial (DTA) e pela curva PvT (MANRICH, 2005).

Por outro lado, a temperatura de não-fluxo (T_{NF}) é determinada como sendo aquela em que o polímero exibe comportamento predominantemente viscoso em função da sua temperatura se encontrar elevada e, altamente viscoelástico se a mesma estiver reduzida (MANRICH, 2005). A figura 12 ilustra o comportamento de deformação do polímero em função da temperatura.

Figura 12 – Curva de variação do módulo de elasticidade em função da temperatura



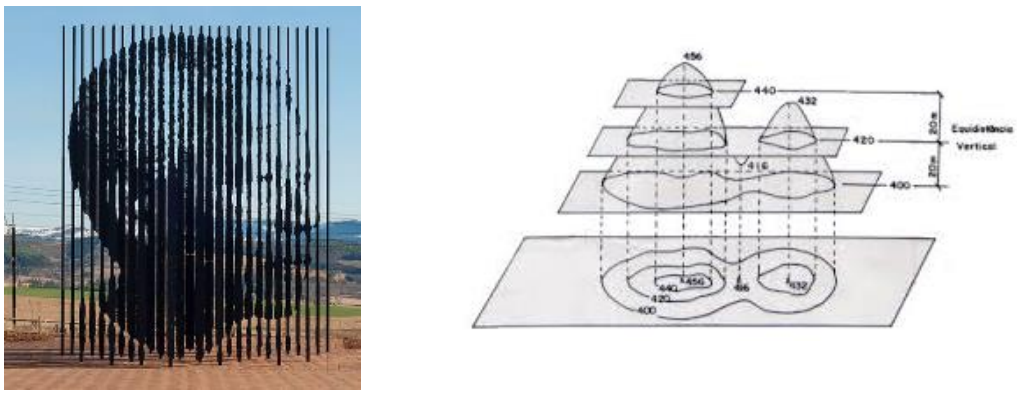
Fonte: Manrich (2005)

Ainda cabe ressaltar, segundo Manrich (2005), que os polímeros devem ser processados a 50ºC acima da T_{NF}, no mínimo, evitando, assim, elevados valores de tensão de cisalhamento que são capazes de acarretar degradação do material.

2.5 Considerações sobre Manufatura Aditiva

O conceito de empilhamento ou fatiamento por camadas para montagem de “sólidos” surgiu no final do século XVIII a partir dos estudos desenvolvidos sobre topografia e fotoesculturas respectivamente (Figura 13) (BOURELL et al., 2017; VOLPATO, 2017; THOMPSON et al., 2016).

Figura 13 - Aplicações baseadas em junção de camadas



(a) (b)

(a) Fotoescultura. Fonte: Sa-venues (2019); (b) Imagem de topografia. Fonte: Educação (2019)

A concepção sobre Manufatura Aditiva, a princípio denominada “Prototipagem Rápida” nos anos de 1980, começou se consolidar como tecnologia gradativamente no final dos anos de 1960 por intermédio de técnicas aditivas, como a fotopolimerização (SLA – Estereolitografia), a fusão de pós poliméricos em 1972 e, pelo processo de laminação aditiva de folhas (LOM) em 1979 (VOLPATO, 2017). A técnica aditiva por extrusão de filamentos de polímero foi patenteada pela empresa norte americana Stratasys®, denominada FDM (CRUMP, 1992; TURNER; GOLD, 2015).

Durante os anos de 1980 e 1990 houve o incremento acentuado de patentes e publicações acadêmicas acerca de processos de manufatura aditiva. Técnicas de

estruturação por meio de matéria-prima em estado viscoso, sob forma de filamentos e de pós foram gradualmente comercializadas entre o final da década de 80 e meados da década de 90, tais como a estereolitografia, a laminação em folhas, o jateamento de aglutinante, a extrusão de material e deposição por energia dirigida (WOHLERS, 2017; THOMPSON et al., 2016; VOLPATO, 2017).

Nesse período, as aplicações da manufatura aditiva consistiam na geração de protótipos visuais em áreas de arquitetura e protótipos físicos com intuito de proceder à análise do modelo de produtos no decorrer do ciclo de manufatura. Estas aplicações desempenharam papel relevante na análise funcional e geométrica do produto na fase anterior à de produção (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

Entre os anos de 1990 e 2000 a evolução da tecnologia possibilitou o emprego de peças fabricadas não mais como protótipos visuais ou físicos, mas como protótipos técnicos e produtos finais, atendendo a requisitos técnicos concernentes à tolerâncias geométricas e, propriedades físicas e mecânicas adequadas para determinadas aplicações (NOVAKOVA-MARCINCINOVA et al., 2012; FORD; DESPEISSE, 2016).

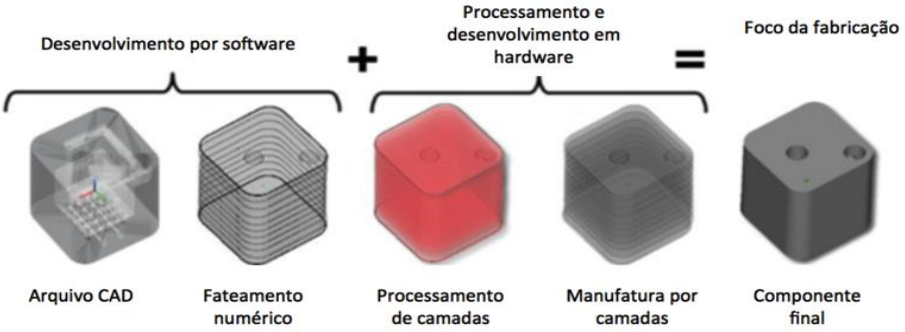
A partir dos anos 2000, frente ao rápido desenvolvimento tecnológico em áreas de tecnologia da informação, ciência dos materiais e microeletrônica, por exemplo, os processos aditivos classificados com relação à estruturação física entre as camadas e a forma da matéria-prima passaram a incorporar metais e materiais híbridos. Esses incrementos têm possibilitado aplicações em diversas áreas do conhecimento como, a automotiva, a medicina regenerativa, a odontologia, os bens de consumo e alimentos (TURNER; STRONG; GOLD, 2014; GAO et al., 2015; FORD; DESPEISSE, 2016; DÁVILA et al., 2016, WOHLERS, 2017).

As novas possibilidades para geração de peças técnicas e funcionais alavancaram o emprego dos equipamentos de manufatura aditiva industriais e semiprofissionais nos sistemas produtivos e a MA tornou se um dos pilares tecnológicos do conceito da indústria 4.0 (WAHLSTER et al., 2014; WOHLERS, 2017).

O termo técnico “Manufatura Aditiva” foi definido pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) por meio da norma ASTM F2792 (mlo2009), esta, posteriormente, foi atualizada como ISO/ASTM 52900 (2015). Assim, a MA se define como técnica de fabricação fundamentada na adição de material, se sucedendo de modo controlado e seletivo, possibilitando obter geometrias de alta complexidade,

geralmente pelo processo de deposição de camadas (ISO/ASTM, 2015; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A Figura 14 mostra as etapas de geração de uma peça por tecnologia aditiva.

Figura 14- Etapas do processo de Manufatura Aditiva: modelagem geométrica e geração do protótipo físico.

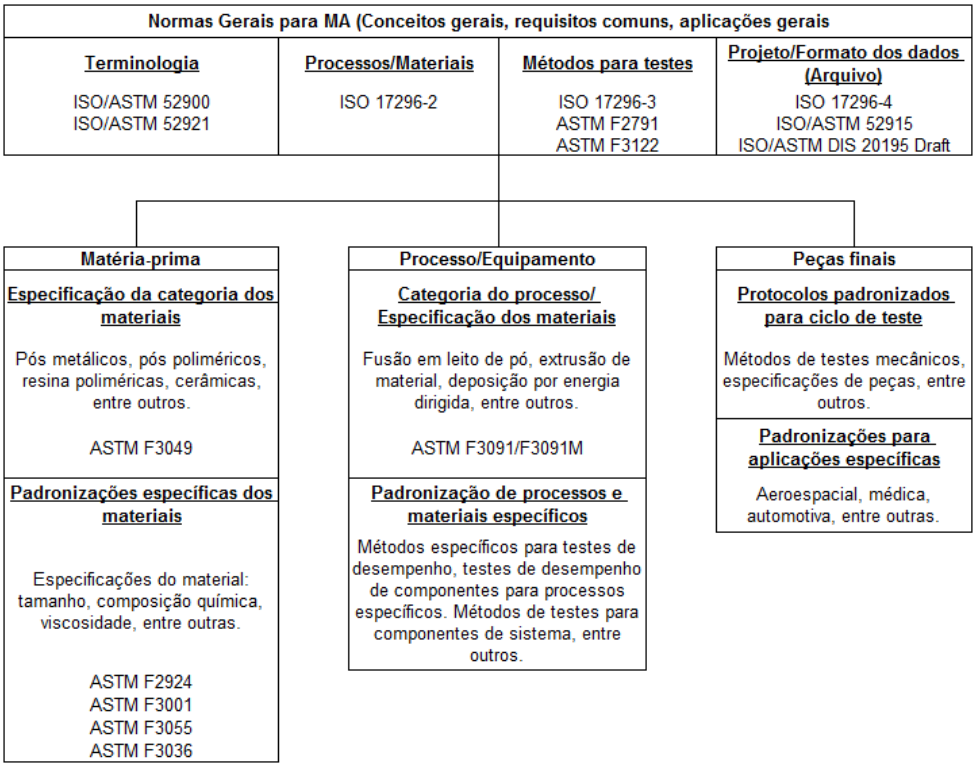


Fonte: Adaptado de Sidambe (2014).

Cabe ressaltar que na literatura técnica e na linguagem de usuários domésticos há uma gama de sinônimos com a finalidade de nomear a manufatura aditiva em decorrência do segmento de sua aplicação. Dentre estes podem ser elencados *3D printing,* manufatura rápida *(Rapid Manufacturing); construtive manufacturing; generative manufacturing; Free Form Fabrication; e-manufacturing;* Manufatura digital direta *(Direct digital manufactruing);* Manufatura de bancada (*Desktop manufacturing*) (ISO/ASTM, 2015; VOLPATO, 2017).

Com relação à classificação de diferentes técnicas em MA, dois órgãos mundiais de padronização técnica, a ASTM e a ISO (*International Organization for Standardization*) estabeleceram normas relacionadas à terminologia, como citado anteriormente, considerando o tipo de processo aditivo, o tipo e forma de matéria-prima e os procedimentos para efetuar testes técnicos (THOMPSON et al., 2016; ISO/ASTM, 2015). Este conjunto de normas encontra-se sintetizado conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15- Normas ISO e ASTM para Manufatura Aditiva



Fonte: Traduzido de Thompson *et al.* (2016).

Por intermédio da tecnologia da informação, cada vez mais consolidada, o conceito de programa e projetos abertos começaram a se consolidar durante a segunda metade dos anos 2000. O projeto RepRap da Universidade de Bath (WOHLERS, 2017) se constituiu na criação da primeira impressora 3D não comercial, tendo como objetivo a concepção de um equipamento tridimensional auto replicável de tecnologia aberta e colaborativa. Praticamente no mesmo período, o projeto Fab@Home se ateve ao desenvolvimento de uma impressora 3D de projeto aberto, na Universidade de Cornell (MALONE; LIPSON, 2007).

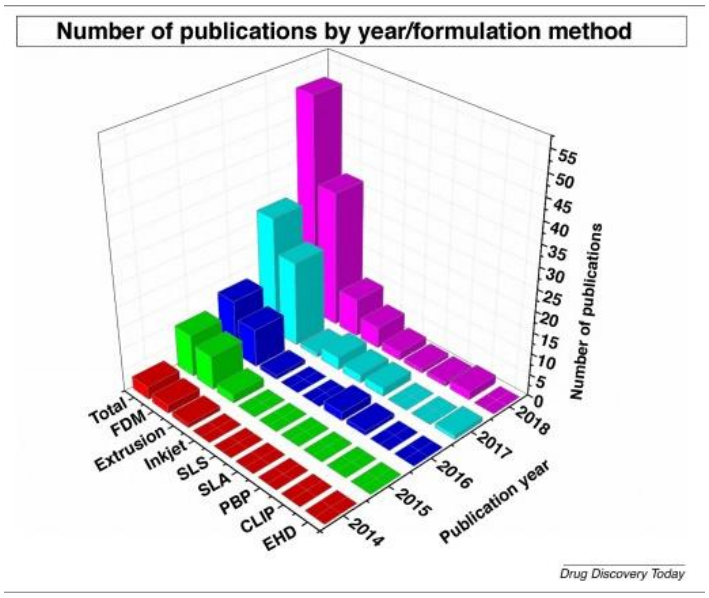
A impressão 4D compreende o uso de técnicas aditivas conjugadas com o desenvolvimento de materiais avançados de engenharia e projeto de propriedades físico-químicas e mecânicas com potenciais aplicações nas áreas de nanotecnologia, biofabricação, saúde, aeronáutica e aeroespacial, defesa e, também, em bens de consumo (indústria têxtil, automotiva, dentre outras) (GARDAN, 2018). Neste contexto, as pesquisas básicas e aplicações na área de Manufatura Aditiva podem ser classificada em segmentos como, por exemplo, os propostos pelo periódico *Virtual*

and Physical Prototyping (2019) o qual elenca quatro grandes áreas da Manufatura Aditiva.

a) Projeto direcionado para Manufatura Aditiva (DfAM): incluindo otimização topológica, projeto biomimético e estruturas com gradiente funcional;
b) Impressão 4D: matérias inteligentes, polímeros e ligas com memória de forma, estruturas degradáveis, impressão com multimateriais, impressão com metais, polímeros, cerâmicas e compósitos;
c) Manufatura hibrida: combinação de técnicas aditivas com subtrativas e de conformação;
d) Impressão 3D funcional: projeto e protótipos funcionais como, por exemplo, cabeçotes para processamento de diferentes tipos de matéria-prima, hardware e programas de geração de trajetórias otimizadas.

Novas tendências de aplicação para a MA na área farmacológica tem despontado nos últimos oito anos. Gioumouxouzis, Karavasili e Fatouros (2019) elucida diversas aplicações tais como liberação controlada de dosagem de substâncias executada por meio da forma de preenchimento das cápsulas, formulações com dispersão em locais específicos realizada pela adição de camadas responsivas ao pH, entre outros. Além destes, ainda são elencados usos na fabricação de implantes intrauterinos, subcutâneos e para liberação prolongada de medicações utilizado para tratamento de câncer pancreático. A figura 16 apresenta um levantamento do número de publicações entre os anos de 2014 e 2018 no que diz respeito à utilização de diferentes técnicas aditivas empregadas na indústria farmacológica.

Figura 16 - Publicações por ano do uso de técnicas aditivas na industria farmacológica



Fonte: Adaptado de Gioumouxouzis, Karavasili e Fatouros (2019)

Comparada com os processos de fabricação subtrativos e de conformação, a tecnologia de Manufatura Aditiva permite o conceito de fabricação digital e, ainda mais, a possibilidade de geração de superfícies e geometrias complexas, bem como, a fabricação sob demanda (GAO et al., 2015; FORD; DESPEISSE, 2016; ALAFAGHANI et al., 2017).

A montagem de componentes em subconjuntos e conjuntos que compõem o produto pode ser minimizada, ou mesmo eliminada, contribuindo para a redução do custo total entre 50 a 70% e, redução de até 90% no tempo de lançamento no mercado por meio de gradativos protótipos no *time to market.* (PHAM; GAULT, 1998; GAO et al., 2015; VENKATARAMAN et al., 2000; COOPER, 2001; ALAFAGHANI et al., 2017).

Segundo relatório Wohlers (2017), Ford e Despeisse (2016) e Panda et al. (2017), o uso direto ou mesmo complementar de técnicas aditivas implica em redução do uso de ferramental ou moldes para a produção, a manufatura descentralizada, a redução de estoque, a manufatura por demanda e a manufatura ágil, a sustentabilidade e o baixo impacto ambiental, bem como, a fabricação digital que permite o compartilhamento e a personalização de produtos (ALAFAGHANI et al., 2017; HU, 2013). Outros benefícios proporcionados pela Manufatura Aditiva incluem

economia e, eventualmente, o reaproveitamento da matéria-prima do próprio processo ou das estruturas de suportes, peças com menor porosidade inerente e interação entre os diferentes usuários envolvidos no ciclo de desenvolvimento do produto (*Stakeholders*) (FORD; DESPEISSE, 2016).

Por outro lado, desafios e barreiras da tecnologia de MA representam o outro braço de seu emprego e desenvolvimento em pesquisa básica e tecnológica, posto que equipamentos industriais destinados à geração de peças de elevada qualidade e quantidade são onerosos. Há um número reduzido de fabricantes desta classe de equipamentos, principalmente no tocante a atributos primordiais requeridos pelos sistemas de fabricação, como repetibilidade e robustez. Estes atributos exercem influência determinante na majoração do valor de aquisição dos mesmos, assim como nos custos inerentes à matéria-prima e à manutenção, habitualmente vinculadas à fabricação. Além de que, deve haver a exigência de qualificação técnica interdisciplinar para o profissional operar sistemas que demandam equipamentos de manufatura aditiva.

Em determinados casos fabricantes restringem a quantidade de matéria-prima a ser empregada em seus equipamentos, gerando limitação de sua utilização, especificamente para a produção de materiais. Além do mais, a necessidade de periféricos, no que tange aos processos aditivos EBM e LENS, e o reduzido volume de produção da máquina (*Build*) contribuem para onerar o valor do emprego de técnicas aditivas em ambientes industriais e segmentos específicos quando comparados com técnicas de fabricação convencionais (GAO et al., 2015 WOHLERS, 2017). A velocidade de impressão é outra variável significativa a ser considerada, a qual demonstra como seu incremento pode influenciar diretamente na qualidade da peça e, na maior quantidade de produção em determinado período de tempo (GAO t al., 2015).

A etapa de pós-processamento é imprescindível, tanto para as técnicas aditivas que utilizam termoplásticos e, principalmente, metais devendo ser acrescentada ao tempo total de fabricação de peças geradas por manufatura aditiva (GAO et al., 2015). Para os materiais metálicos o pós-processamento depende de processos convencionais de fabricação, tais como usinagens e retificações, os quais, além de auxiliar no aprimoramento dimensional da peça impressa é fundamental para remoção das estruturas de suporte (BOURELL et al., 2017)

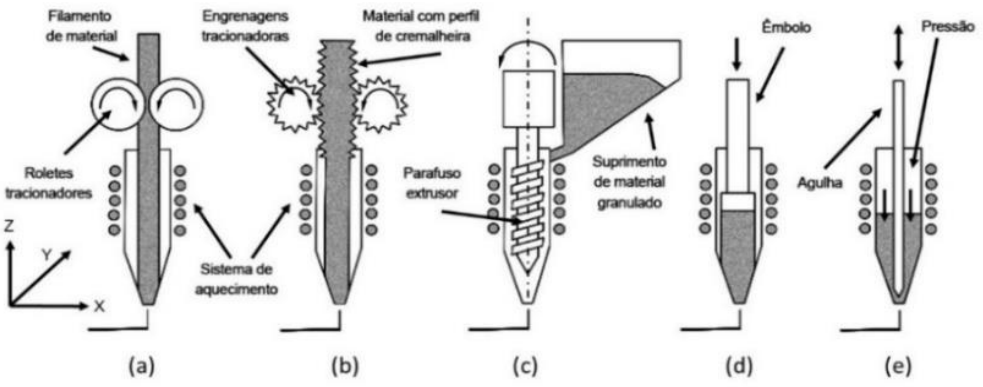
Nesse contexto, a Manufatura Aditiva propicia diferentes frentes de pesquisa pautadas no conceito de *Design for Additive Manufacturing* (THOMPSON et al., 2016; WOHLERS, 2017), compreendendo uma série de conceitos e técnicas de desenvolvimento de projeto, fabricação, ciência dos materiais, sistema de controle e conceitos em biomimética. Inserido nesse novo modelo de desenvolvimento destacam-se a redução de peso com uso de otimização topológica e projeto bioinspirado, estruturas celulares, e, a impressão 4D juntamente com o estabelecimento de diretrizes de projeto e treinamento em projeto focado em Manufatura Aditiva (THOMPSON et al., 2016; WOHLERS, 2017; OH; ZHOU; BEHDAD, 2018).

2.5.1 Conceitos em técnica aditiva por extrusão

A técnica aditiva por extrusão e deposição de material teve a primeira patente FDM® registrada pela empresa norte-americana Stratasys e, posteriormente, a comercialização do equipamento respaldado sob este processo (CRUMP, 1992; TURNER; GOLD, 2015). Esta técnica é conhecida na atualidade como Fabricação por Filamento Fundido (*Fused Filament Fabrication,* FFF) (JONES et al., 2011).

A patente FDM® está fundamentada em um sistema no qual a matéria-prima é fornecida no estado sólido sob a forma filamentar é conduzida a uma câmara de liquefação com auxílio de um rolo trator, conforme mostrado na Figura 17 (a). Na entrada da câmara, a porção sólida do filamento age como um pistão forçando a massa fundida por meio de um bocal responsável por depositar o material sobre o substrato (TURNER, STRONG e GOLD, 2014; ROCHA et al., 2014; ISO/ASTM, 2015). Contudo, há outros mecanismos e princípios físicos bem como formas estruturais diferenciadas da matéria-prima que podem ser processadas.

Figura 17 - Princípios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material



(a)Filamento contínuo, (b) varetas com perfil de cremalheira, (c) material em estado granulado, (d) êmbolo e (e) pressão com agulha controladora de vazão. Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Volpato (2017), o filamento pré-processado deve conter as propriedades físicas adequadas a fim de garantir o escoamento contínuo de fios ou pontos que mantenham a forma após deposição e boa adesão entre si a medida que sucessivas camadas de material são adicionadas.

Os processos fundamentados em extrusão são particularmente limitados pela dependência de polímeros amorfos como matéria-prima, o que restringe a variedade de materiais compatíveis e, consequentemente, a aplicabilidade das peças fabricadas assim como o incremento desta tecnologia. Grande parte do que é produzido pelos processos de extrusão, geralmente empregando ABS (copolímero acrilonitrila butadieno estireno) e PLA (poliácido lático), é utilizado apenas como protótipo de visualização por não apresentar propriedades mecânicas adequadas em termos de resistência e isotropia para uso como componentes funcionais (PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014; SINGH; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017).

Soluções construtivas e alternativas para materiais sólidos são apontados por Volpato (2017), tais como o emprego de varetas dentadas as quais são tracionadas por engrenagens, e a aplicação de material em pó que é transportado por um parafuso de extrusão. Para o caso de materiais já amolecidos ou viscosos, a compressão pode se suceder por intermédio do uso de êmbolo ou de aplicação direta de pressão.

De fato, o emprego de matéria-prima sob o estado de pó em um cabeçote com parafuso de extrusão é interessante não apenas pela possibilidade de processar

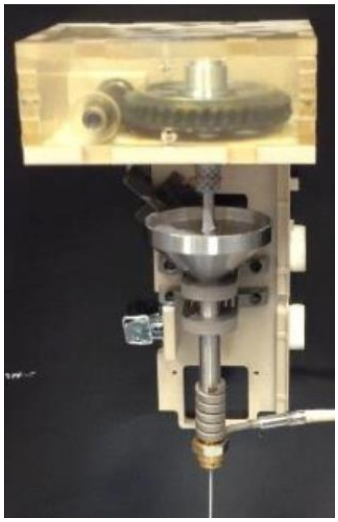
materiais distintos *in-loco* com ajuste de suas propriedades conforme os requisitos do processo e aplicação por meio da incorporação de aditivos, cargas de reforço ou a combinação com outros polímeros, mas, também, pelo fato de que parte do calor necessário para a fusão ou amolecimento do material ser gerada como consequência do atrito do material em constante movimentação no interior da extrusora. Entretanto, esse tipo de solução construtiva apoiada em extrusão por rosca ainda se mostra pouco explorada na MA por evidenciar desafios multidisciplinares relacionados com projeto de rosca, fabricação e ciência de materiais.

Exemplos de cabeçotes respaldados no princípio de extrusão por rosca simples podem ser encontrados na literatura como, por exemplo, em Bellini, Shor e Guceri (2005). Estes desenvolveram um sistema de deposição com rosca transportadora que pode ser alimentado diretamente com granulados de pós cerâmicos e ligantes à base de poliolefinas. Ragaert, Cardon e Degrieck (2011) desenvolveram um cabeçote microextrusor com a finalidade de utilizar polímeros biodegradáveis como o PLA, PCL e PGA (poliácido glicólico) tendo o propósito de aplicações em engenharia tecidual**.** E, Cheng *et* al. (2011) por sua vez, demonstraram a aplicabilidade da teoria de extrusão de polímeros em um projeto de-novo cabeçote composto por rosca extrusora tendo como objetivo a melhoria da qualidade das peças fabricadas pela técnica aditiva por extrusão.

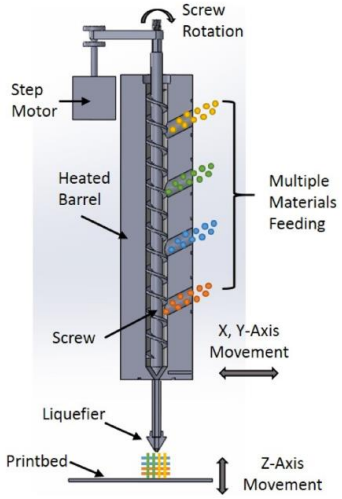
Ribeiro e Silveira (2013), Inforçatti Neto (2013); Silveira *et al.* (2021) apresentaram uma plataforma de construção respaldada no projeto Fab@home contendo um cabeçote de rosca com seção transversal variável, capaz de promover o processamento controlado de matéria-prima sob o estado de pó, como alternativa de deposição para processos aditivos por extrusão (figura 18 (a)).

Zhou et al. (2018) e Tseng et al. (2018) identificaram a lacuna existente nas possibilidades do processamento de determinados materiais como o álcool polivinílico (PVOH) e poliéter-etér-cetona (PEEK), respectivamente. À vista disso, foram propostas soluções sob a forma de novos dispositivos de extrusão a fim de suprir a demanda de uso destes polímeros. Os cabeçotes desenvolvidos se pautaram em técnica de extrusão valendo-se de roscas com o intuito de transporte, compressão e fusão do material em manipulação (figura 18 (b) e (c)).

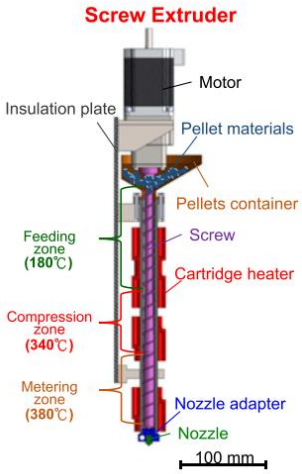
Figura 18 – Cabeçotes de extrusão valendo-se de rosca



(a)



(b)

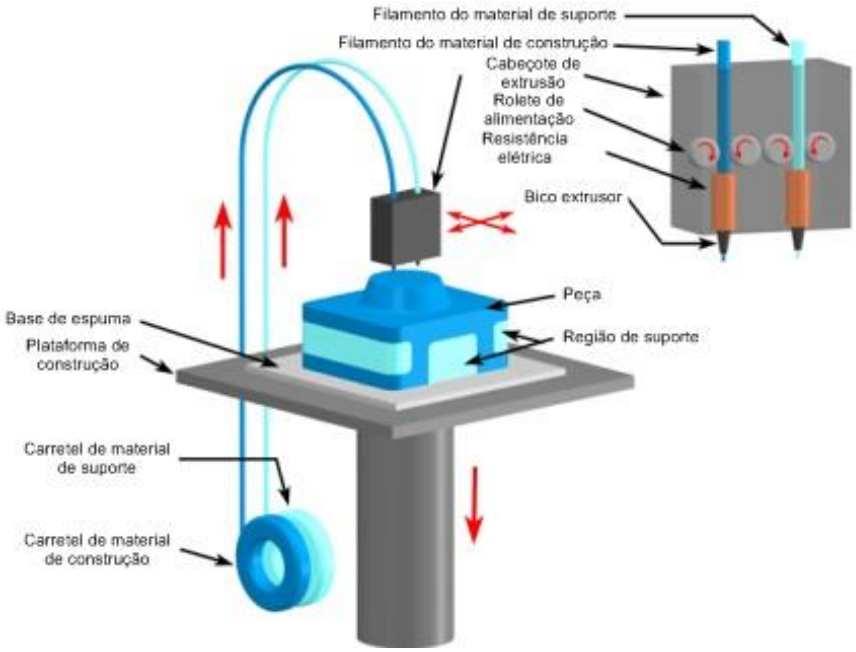


(c)

(a)Rosca de seção transversal variável, (b) para processamento de PVOH.e (c) para processamento de PEEK.
Fonte: Fonte: Freitas (2014), Zhou et al. (2018) e Tseng, et al. (2018)

O princípio cinemático de movimentação de uma impressora 3D está pautado na movimentação de um cabeçote de extrusão no plano XY, em que há a deposição contínua e seletiva de material sobre uma plataforma de deposição ou outra superfície semelhante, a qual se move ao longo do eixo Z. Ao se finalizar a camada, a plataforma se desloca para baixo e, se reinicia o processo de deposição originando uma camada subsequente (Wohlers, 2017). A camada antecedente com o declínio de sua temperatura, sofre a solidificação do material e, consequentemente, adere à camada subsequente conforme ilustrado na Figura 19. Como condição imposta para a ocorrência satisfatória do processo de deposição, o material deve se encontrar em estado semilíquido ou viscoso (CHUA; LEONG; LIM, 2003; VOLPATO, 2017).

Figura 19 – Vista esquemática da tecnologia FDM com duas seringas de extrusão



Fonte: Adaptado de 3Dparts (2019)

O processo aditivo FFF permite a construção de geometrias suspensas por intermédio da aplicação de material de suporte que pode ser distinto ou o mesmo daquele da peça, o qual é removido após a finalização do processo (CHUA; LEONG; LIM, 2003; GAO et al., 2015; THOMPSON et al., 2016).

Comumente os materiais empregados no processo FFF são constituídos por polímeros termoplásticos sob a forma filamentar de estrutura semicristalinos ou amorfas (BOURELL et al, 2017; TURNER; STRONG; GOLD, 2014). Dentre estes se destacam acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poliácido lático (PLA), acrilonitrila-estireno-acrilato (ASA), policarbonato (PC), Poliamida (PA) e polipropileno (PP) (NOVAKOVA-MARCINCINOVA et al., 2012; TURNER; STRONG; GOLD, 2014; B CASAVOLA et al., 2016; BOURELL et al., 2017).

A tabela 1 exibe uma relação de materiais empregados no processo FFF, além de outros que podem ser aplicados sob outras técnicas de MA e sua classificação.

Tabela 1 –Materiais comerciais para processamento em equipamentos de Manufatura Aditiva

Material	Amorfo	Semicristalino	Thermofixo	Extrusão de material	Fotopolimerização em cuba	Jateamento de material	Fusão em leito de pó	Jateamonto de material colante	Laminação em folhas	Deposição por energia dirigida
ABS	X			X						
Policarbonato (PC)	X			X						
Blenda de PC/ABS	X			X						
PLA	X			X						
polieteremida (PEI)	X			X						
Acrilico			X		X	X				
Acrilato			X		X	X				
Epoxi			X		X	X				
Polyamida (PA) 11 e 12		X					X			
PA pura		X					X			
PA reforçado com vidro		X					X			
PA reforçado com carbono		X					X			
PA reforçado com metal (Al)		X					X			
Poliestireno	X									
Polipropileno		X					X			
Poliéster ("Flex")							X			
Poli(éter-éter-cetona) (PEEK)		X		X			X			
Poliuretano termoplástico (Elastômero)				X			X			
Chocolate		X		X						
Papel									X	
Ligas de alumínio							X	X	X	X
Ligas de Co-Cr							X	X		X
Ouro							X			
Ligas de níquel							X	X		X
Prata							X			
Aço inoxidável							X	X	X	X
Titânio							X	X	X	X
Aço ferramenta							X	X		X

Fonte: Adaptado de Bourell et al. (2017)

Segundo Volpato (2017), Wohlers (2017) e Gao et al. (2015), o processo aditivo fundamentado na técnica FFF, mostra como principais vantagens:

a) Mecanismo simplificado de derretimento e deposição das camadas no substrato para formação da peça, quando comparado com outras técnicas aditivas;
b) Uso de materiais termoplásticos de grau de engenharia;
c) Não requer pós-cura após o processamento;
d) Os equipamentos industriais, com matéria-prima controlada, permitem a geração de peças funcionais com propriedades mecânicas adequadas para algumas aplicações nas áreas de bem de consumo, mecânica e médicas;
e) Os equipamentos 3D do tipo *desktop* podem ser utilizados em escritórios de engenharia, laboratórios de ensino técnico e de graduação ou mesmo para uso doméstico, porém, com o cuidado de que alguns polímeros podem exalar monômeros tóxicos a saúde.

Entretanto, dentre as limitações da técnica de extrusão destacam-se:

a) Como consequência do controle do diâmetro do bico de deposição, a precisão e a resolução dimensionais são restritas em função do bico determinar a faixa de diâmetro do filamento depositado e a espessura de camadas;
b) Há a necessidade de estrutura de suportes em regiões suspensas ou com geometrias negativas com ângulos de inclinação inferior ao de suporte, ocasionando acréscimo de matéria-prima;
c) Há a necessidade de pós-processamento para remoção das estruturas de suporte de forma mecânica ou química;
d) Há limitação de materiais, conforme citado anteriormente, além de poder ser considerado o processo aditivo moroso, comparado à usinagem convencional, limitado pela vazão do material no bico de extrusão e pela cinemática cartesiana do equipamento, principalmente no que se refere à movimentação da mesa nos planos XY que contém o substrato para deposição de material.

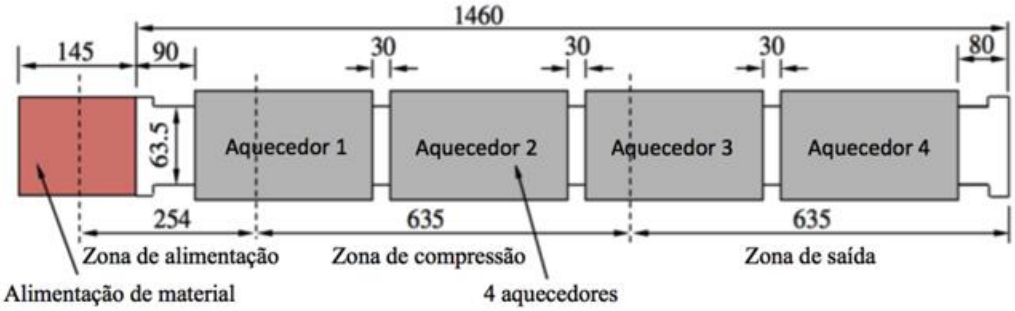
2.6 Comportamento térmico em extrusoras de polímero

Nos processos de extrusão, a estabilidade térmica se constitui em uma variável relevante para a obtenção de produtos de boa qualidade, de maneira que pequenas variações na temperatura possam vir a afetar e prejudicar as propriedades do material em processamento (ABEYKOON et al, 2013). Deste modo, torna-se imprescindível o contínuo monitoramento da temperatura tencionando garantir que o processo transcorra de maneira controlada. Abeykoon et al (2013) pontuam distintos parâmetros que são capazes de afetar a homogeneidade térmica do material durante seu processamento dentre eles a rotação e geometria da rosca. Outra importante condição a se considerar concerne à variação da temperatura em diferentes posições radiais da matriz sendo mais adequado se proceder ao monitoramento do perfil radial em contraposição a um único ponto.

Entretanto, ainda, de acordo com Abeykoon et al (2014), o monitoramento do perfil de temperatura se mostra dificultoso em razão das implicações causadas no fluxo de material. Usualmente são empregues termopares fixados às paredes do barril para (medição) aferição de temperatura, todavia esses aferem o calor presente no metal do barril não evidenciando capacidade de expressar com exatidão a temperatura de extrusão ou suas variações.

As extrusoras de polímero por rosca podem ser aquecidas por diferentes princípios, como fluido, resistência elétrica ou vapor. Comumente são mais utilizadas as extrusoras que operam por intermédio de resistências elétricas em razão da facilidade de controle, por faixa mais extensa de temperatura de trabalho e maior eficiência (WHITE; POTENTE, 2002). O procedimento consiste em dispor as resistências ao redor do barril em contato com sua parede externa tendo por finalidade conduzir calor até sua parte interna. A quantidade de aquecedores posicionados varia de acordo com o comprimento do barril de modo a indicar diferentes zonas de aquecimento, as quais são controladas independentemente. Um exemplo desta disposição pode ser observada na figura 20.

Figura 20 - Exemplo de posicionamento de aquecedores em um barril de extrusão



Fonte: Abeykoon et al (2014)

Ao se tratar objetivamente de cabeçotes de extrusão para deposição de filamento fundido (FFF), não é possível proceder ao controle do perfil de temperatura de maneira mais uniforme. O referido processo transcorre pelo tracionamento de material para o interior do cabeçote no qual este será conformado à quente e extrudado por um bico calibrado. Cabe ressaltar que a temperatura imposta ao material durante o processamento deve estar acima da sua temperatura de transição vítrea (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

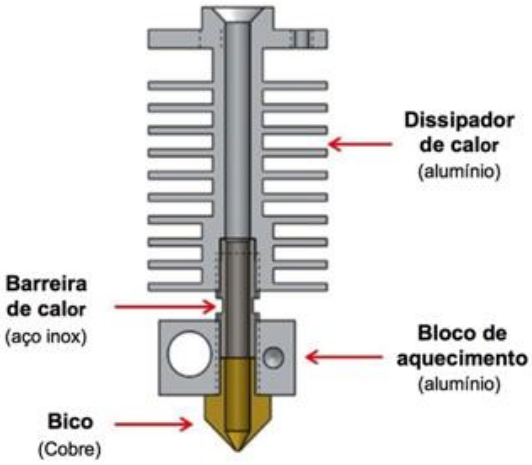
Os cabeçotes empregados no processo FFF são, em sua maioria, equipados com sensores e um sistema de controle de temperatura em malha fechada com intuito de manter a temperatura do sistema constante impedindo, principalmente, que o bico sofra variações que possam prejudicar o fluxo continuo de material extrudado

(TURNER; STRONG; GOLD, 2014, TURNER; GOLD, 2015). Ainda, o gradiente de temperatura é outra variável a ser considerada, inicialmente a temperatura do sistema deve estar ao mesmo grau da ambiental e, em sequência evoluir em um crescente de modo a evitar que componentes manufaturados em polímeros como PLA e ABS sejam danificados, para tal, mecanismos de dissipação de calor são adicionados aos equipamentos a fim de criar zonas de isolamento térmico (JEREZ-MESA *et al.*, 2016).

Os componentes constituintes de cabeçotes de extrusão FFF, em número de quatro são os responsáveis por seu comportamento térmico. (Figura 21), sendo estes:

a) Bloco de aquecimento: equipado com uma resistência elétrica e um termistor responsáveis pelo aquecimento e monitoramento de temperatura, respectivamente, este é confeccionado em metal, geralmente alumínio, sendo os condutores do fluxo de calor do sistema, além de manter o bico extrusor em temperatura de processamento.
b) Bico: neste componente ocorre a estricção do material, este passa por um orifício de diâmetro constante, em geral de 0,4mm. O bico precisa ser mantido a temperatura constante evitando que decorram variações no fluxo de material e/ou alterações das propriedades reológicas do polímero.
c) Barreira de calor: também conhecido como garganta, representa a primeira medida mitigadora para proteção térmica do sistema. É confeccionada em material com baixa condutividade térmica de modo a impedir que o fluxo de calor atinja segmentos superiores do cabeçote.
d) Dissipador de calor: superfície aletada para dissipação de calor por condução que contribui para redução da temperatura no sistema. Este pode ser equipada com um cooler externo ampliando a troca de calor das superfícies, ocasionando resfriamento mais rápido do sistema.

Figura 21 - Componentes de um cabeçote de MA por FFF



Fonte: Adaptado de Jerez-Mesa et al (2016)

2.6.1 Instrumentação pra medições de temperatura

Define-se como instrumentação a ciência que correlaciona os métodos, técnicas e instrumentos com a finalidade de medição, registro, controle e observação de fenômenos físicos. A instrumentação pode ser aplicada como uma ferramenta para o controle de processos ou desenvolvimento de sistemas de aquisição, os quais são capazes de transmutar grandezas físicas tais como massa, pressão, temperatura, entre outras, em dados digitais (NORTHROP, 2005).

No âmbito da engenharia ao se enfatizar um problema, há a possibilidade de solucioná-lo por intermédio da adoção de abordagens teórica e experimental. Muitos problemas demandam a aplicação de ambos os métodos dependendo de sua natureza. Investigações em temas situados na fronteira do conhecimento implicam em abordagens extensivamente experimentais, uma vez que as teorias e modelos, ainda, se encontram em processo de desenvolvimento. Desta maneira, as demandas por soluções realizam-se em vieses teórico e experimental concomitantemente (DOEBELIN, 1990).

Perante o exposto, a instrumentação é uma ferramenta adotada no desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados com o intuito de coletar informações necessárias em estudos experimentais. Assim, além de possibilitar a

coleta de informações acerca das grandezas físicas e do controle do processo, a instrumentação viabiliza meios para análises experimentais na solução de problemas. Segundo Doebelin (1990), para estudos experimentais as principais aplicações consistem em:

- Testar a validade de predições teóricas baseadas em hipóteses simplificadoras: aperfeiçoamentos teóricos baseados em comportamentos empíricos.
- Formulação de relações empíricas em condições nas quais inexistem teorias adequadas de aplicação.
- Determinação de variáveis, componentes, parâmetros de sistemas, materiais e índices de desempenho.
- Análise de fenômenos com o intuito de se desenvolver uma nova teoria
- Solução de equações matemáticas por meios de analogias.

A seleção de instrumentos de medição mais adequados decorre diretamente do conhecimento do operador acerca das tecnologias disponíveis, de maneira que as medições evidenciem a maior precisão os dados.

Tendo como foco direcionado à instrumentação como ferramenta de medição de temperatura na presente seção e, por outro lado, o propósito deste estudo de analisar o perfil térmico de um cabeçote de extrusão por rosca a seção subsequente contemplará os distintos métodos plausíveis de aplicação.

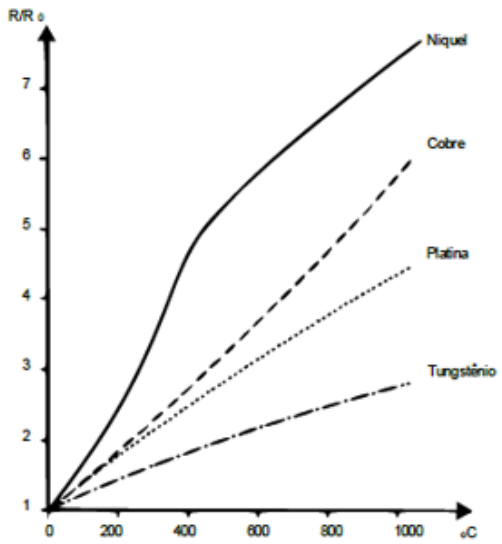
2.6.2 Considerações sobre sensores para medição de temperatura

Técnicas diversas de aplicação na medição da temperatura são viáveis seja do ambiente, de uma superfície ou do escoamento de um fluido. Estas técnicas podem empregar dispositivos e princípios variados correlacionando a temperatura com outras grandezas físicas. Algumas destas técnicas e dispositivos são mostrados nas subseções seguintes:

2.6.2.1 Sensores Resistivos

Os sensores resistivos ou termo-resistência se apoiam na variação da resistência elétrica de um metal, a qual ocorre com variação da temperatura. Seu comportamento é, majoritariamente, linear apresentando boa estabilidade e coeficiente de temperatura positivo (figura 22). São capazes de operar em ampla faixa de temperatura, no entanto apresentam custo mais elevado quando comparado a outros sensores (MORRIS, 2001).

Figura 22 - Curvas de termo-resistências distintas



Fonte: Morris (2001)

Nesta classificação, também, se enquadram os termistores, sensores feitos de metal semi-condutor com princípio de funcionamento idêntico ao das termoresistências, ou seja, com a variação de temperatura, a resistência elétrica sofre alterações. Os termistores classificam-se de acordo com seu coeficiente de temperatura, sendo ele positivo (PTC – *Positive Temperature Coefficient*) ou negativo (NTC – *Negative Temperature Coefficient*). Morris (2001) pontua que os NTCs são mais utilizados que os PTCs por apresentarem comportamentos mais lineares Entretanto, quando comparados com as termoresistências, os termistores são mais frágeis, menos estáveis e operam em faixa operacional reduzido, por outro lado,

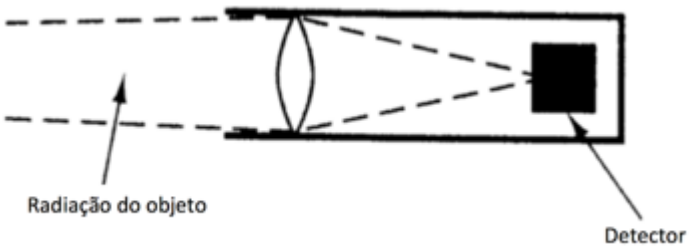
evidenciam resposta mais imediata às variações de temperatura e apresentam custo inferior (AL-HAWARI; AL-BOOL; MOMANI, 2011)

2.6.2.2 Métodos baseados em radiação

Objetos e corpos materiais emitem radiação eletromagnética em função de sua temperatura (acima de -273ºC). A temperatura do corpo interfere no comprimento de onda da radiação e na intensidade emitida pelo mesmo, permitindo sua determinação (MORRIS, 2001). Equipamentos capazes de medir a temperatura destes corpos são designados como pirômetros ou termômetros de radiação.

Os termômetros de radiação, em alguns casos, são capazes de medir temperaturas entre -100 ºC e 10000 ºC correspondente a comprimentos de onda na faixa infravermelha entre 0,72 µm e 1000µm com precisão de até 0,05% (MORRIS, 2001). A figura 23 mostra os esquemático de um termômetro de radiação.

Figura 23 - Representação de um termômetro de radiação

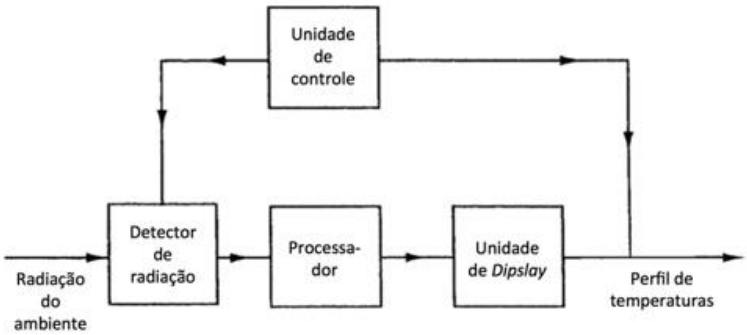


Fonte: Adaptado de Morris (2001)

Outro método significativo baseado em radiação é a termografia. Este método consiste na aplicação de câmeras de imagem térmicas, as quais são dotadas da capacidade de identificar a radiação infravermelha emitida por um corpo. A informação é coletada, processada dando origem a uma imagem com o perfil de temperatura do alvo.

A diferenciação entre os termômetros de radiação e as câmeras térmicas alude à capacidade que estas dispõem de viabilizar as distribuições de temperatura ao longo de uma área em contrapartida aos termômetros que analisam apenas um ponto focado. A figura 24 exibe um diagrama de blocos com os principais elementos presentes em câmeras térmicas e demonstra como é processado o fluxo de informação.

Figura 24 - Diagrama de blocos dos principais componentes de uma câmera térmica

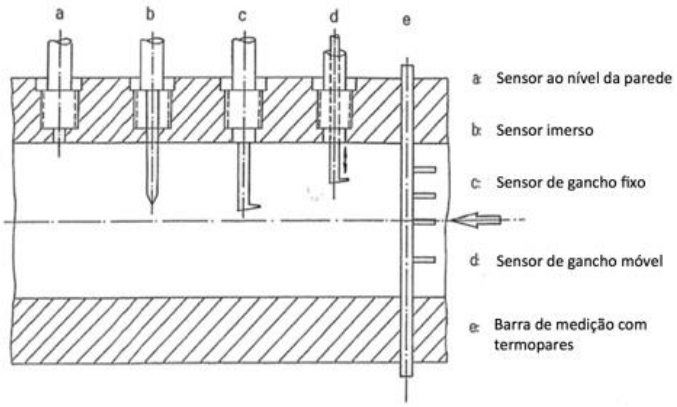


Fonte: Adaptado de Morris (2001)

2.6.3 Aferição de temperatura em extrusoras de polímeros

Nos processos de extrusão, a medição de temperatura do fundido é, em geral, processada pela aplicação de termopares. Há diversas configurações que podem ser adotadas com o intuito de posicionar os sensores, no entanto, cabe ao operador determinar a mais precisa a fim de evitar que se sucedam alterações no fluxo de material durante seu processamento (WHITE; POTENTE, 2002). A figura 25 demonstra as possíveis configurações de posicionamento dos termopares.

Figura 25 - Configurações de posicionamento de termopares



Fonte: Adaptado de White e Pontente (2002)

Segundo White e Potente (2002), em condições de produção, geralmente, dispõem-se os sensores instalados com sua ponta de medição ao nível da parede interna do barril (Figura 25 (a)). Sob esta configuração, a temperatura é medida próxima à parede do barril o que pode gerar incertezas à medição provocadas por mecanismos de dissipação de calor. Porém outras configurações mostram ser mais eficientes, no entanto, podem acarretar instabilidades no escoamento do material em razão da imersão da ponta de sensor no fluxo de material.

Sensores de radiação infravermelha dispõem de método menos invasivo embora sejam empregados com menor frequência. Os dispositivos propiciam alguma informação da temperatura do polímero quando em processamento, no entanto, há dificuldades quanto à profundidade efetiva de atuação e alta dependência da emissividade do polímero, além do alto custo dos equipamentos (Vera-Sorroche et al, 2012).

Abeykoon et al (2012) empreenderam uma investigação acerca de quatro sensores de temperatura, sendo destes, três termopares e um sensor infravermelho. Os termopares foram dispostos com a ponta de medição ao nível da parede do barril. Desta investigação algumas conclusões podem ser elencadas a partir dos resultados alcançados:

- Os termopares apontam baixa precisão e sensibilidade na medição da temperatura do fundido, além de mostrar tempo maior de reação.

- Termopares com bainhas isoladas e semi-isoladas exibem temperaturas inferiores quando comparados ao não isolado em razão da influência da temperatura da parede do barril.
- O sensor infravermelho não demonstra capacidade de representar a temperatura de um ponto específico, porém gera informações térmicas relacionadas a um volume de polímero específico.
- O incremento da velocidade de rotação da rosca ocasionou a redução da temperatura do material fundido quando ocorreu a elevação de 10 para 30rpm e, também, de 30 para 50 rpm, entretanto, não há evidências claras que suportem o real motivo do ocorrido.

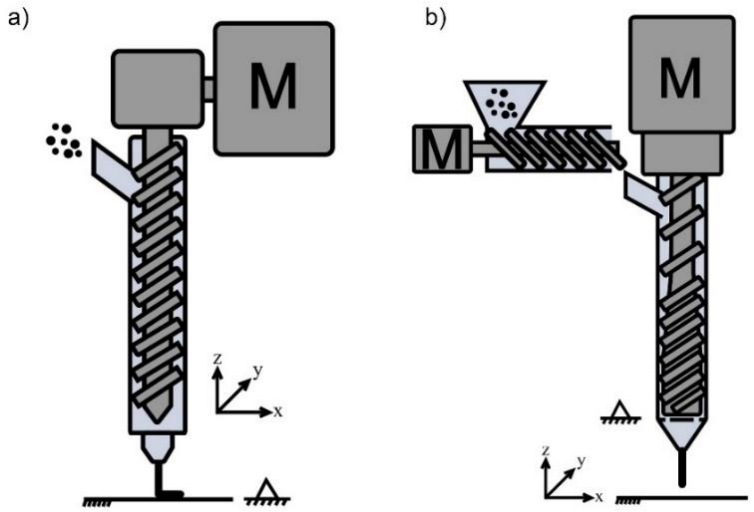
3 Revisão sistemática sobre cabeçotes de extrusão assistidos

Na literatura podem ser encontrados exemplos de cabeçotes pautados no princípio de extrusão por rosca simples para processamento em pequena escala empregando material em pó para geração de objetos tridimensionais. Netto, et al (2021) realizou um levantamento dos principais trabalhos nesta linha de pesquisa, os quais são apresentados a seguir.

Propostas iniciais idealizadas por Bellini (2002) e Reddy, Reddy e Ghosh (2007) de cabeçotes verticais miniaturizados para extrusão de material granulado como alternativa no uso de alimentação por filamento são mostrados na figura 26.

Bellini (2002) apresenta um parafuso de extrusão (em língua inglesa denominada *auger screw*) com passo e profundidade constantes, tendo como função o transporte de material. A rosca de passo constante é inserida em um barril aquecido com matriz de extrusão na extremidade inferior que contém diâmetros variados. O cabeçote de extrusão executa a movimentação nos três eixos cartesianos enquanto a superfície de deposição se mantém fixa.

Figura 26 – Esboços digitais dos cabeçotes de impressão pautados em rosca única, desenvolvidos por (a) Bellini (2002) e (b) Reddy, Reddy e Ghosh (2007).



Fonte: Netto et al. (2021)

O desempenho do sistema foi avaliado, preliminarmente, em relação à temperatura de processamento, geometria do bico e velocidade de deposição empregando materiais cerâmicos com variados granulometrias. Em termos de avaliação da microscopia da estrutura, os autores relatam a identificação de algum grau de aglomeração, bem como aprisionamento de ar (BELLINI, 2002). O equipamento proposto teve o propósito de gerar *scaffolds* com biopolímeros (WANG et al., 2004).

Com o intuito de solucionar os problemas de alimentação descritos por Bellini (2002), Reddy, Reddy e Ghosh (2007) adicionaram a seu cabeçote de extrusão uma unidade de alimentação desacoplada e uma rosca de alimentação com profundidade e passo variáveis, ou seja, com perfil de compressão. De modo a evitar a ocorrência de deflexão na rosca, foi adicionada um barril a esta devido à pressão radial variável.

Em virtude do aumento de massa total, o cabeçote foi mantido fixo enquanto a superfície de deposição se movimenta nas três direções. Os espécimes de testes foram fabricados utilizando alimentação diretamente com pellets de polímeros sob diferentes condições.

Lam et al (2008) propôs um cabeçote para bioimpressão cujo material é composto pela mistura de materiais para geração de um biocompósito em estado, aparentemente, granular. No entanto não são mencionadas informações quanto à rosca de extrusão e componentes do sistema.

Considerando de forma temporal, a partir dos primeiros trabalhos publicados por Bellini (2002) e Reddy, Reddy e Ghosh (2007) novas propostas de cabeçotes de extrusão com aplicação em manufatura aditiva tem sido desenvolvidas focando no aprimoramento do conceito: Silveira et al. (2014 a), Jackson, Wojcik e Miodownik (2018), Singamneni et al. (2018, 2019), Tseng et al. (2018), Zhou et al. (2018), Leng et al. (2019), Alexandre et al. (2020) e Wang et al. (2021). Com exceção do trabalho publicado por Jackson et al. (2018), todos os equipamentos propuseram configurações para sistemas de extrusão apoiados em roscas com perfil de compressão.

Silveira et al. (2014 a), Jackson, Wojcik e Miodownik (2018) e Alexandre et al. (2020) agregaram os cabeçotes de extrusão a sistemas de movimentação cartesiana gerando impressoras 3D *desktop* com conceito de *open manufacturing*. Em contrapartida, Tseng et al. (2018), Singamneni et al. (2018) e Wang et al. (2021) propuseram seus próprios sistemas de movimentação.

O sistema de extrusão com menor diâmetro de rosca (7 mm) foi desenvolvido por Silveira et al. (2014a, 2014b) com demanda inicial para impressão direta (em único passo) de *scaffolds* re-utilizando materiais poliméricos (biocompósitos) em estado de pó de equipamentos industriais fundamentado em técnica aditiva SLS. Em parceria de pesquisa foram formulados biocompósitos para impressão de *scaffolds* para aplicações em engenharia tecidual com Poli (e-caprolactona) / Biossilicato® Biocomposites (DAVILA et al, 2014; DAVILA,t al. 2016; CUNHA et al. 2019)

Os biocompósitos, também, foram explorados por Singamneni *et al* (2018, 2019) fazendo uso de seus equipamentos, porém, neste caso, os materiais foram previamente misturados e cortados em pellets. Neste trabalho, os diâmetros dos bicos de deposição foram aumentados para que não houvesse obstrução durante o processo de deposição.

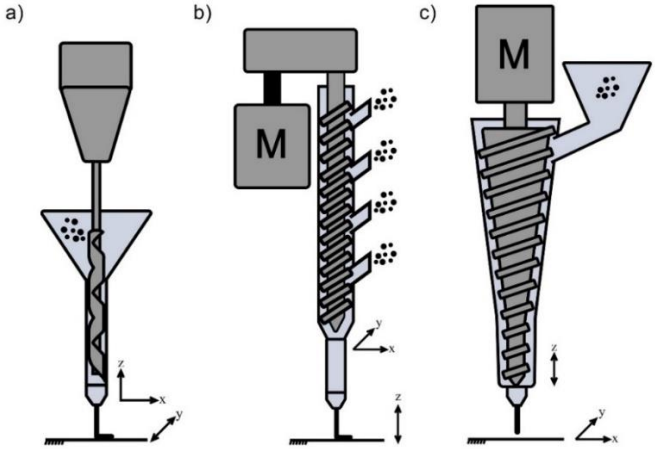
Tseng *et al.* (2018) propuseram um cabeçote de impressão para processamento de *pellets* de polímeros altamente viscosos e adicionaram aquecedores infravermelhos próximos ao bico de deposição para evitar delaminação e deformação durante a impressão. O modelo mais simplificado foi proposto por Jackson et al. (2018), a rosca de extrusão e seu invólucro foram fabricados em resina acrílica por processo aditivo de estereolitografia. O material processado (*pellets* derivados de petróleo), não requer elevadas temperaturas de processamento, e, por conseguinte, o material escolhido foi adequado para fabricação deste sistema de extrusão.

Alexandre *et al.* (2020) substituiu o cabeçote de impressão alimentado por filamentos de uma impressora 3D de baixo custo por um *sistema de rosca* de passo constante *(do-it-yourself)* comercializado por uma empresa recém-fundada. O equipamento foi testado com *pellets* de polímeros virgens e reciclados, além de resíduos plásticos triturados. Wang et al (2021) desenvolveu um cabeçote para processamento de pellets de biopolímero, no entanto, não há evidências de inovações ou informações detalhadas quanto às dimensões do sistema. O aspecto tecnológico desse trabalho foi a opção por um mandril, que permite rotação no eixo X, como superfície de deposição.

Outras modificações ao projeto básico de cabeçotes podem ser observadas na figura 27. Kumar *et al.* (2018) adaptaram uma broca acoplada a um cabeçote rotativo de uma fresadora de controle numérico computadorizado (CNC), concebendo uma solução direta para impressão de matéria-prima em estado de pó apenas carreando

o material sem a ocorrência de mudança de fase. Zhou *et al.* (2018) fizeram uso de uma rosca de seção constante (passo e profundidade constantes) com perfil de transporte granular, porém incluindo quatro entradas para alimentação direta em alturas distintas ao longo do barril, possibilitando a alimentação de variados tipos de materiais e melhor controle do tempo de residência do processo. Por sua vez, Leng et al. (2019) propuseram uma extrusora com geometria cônica para obter melhor plastificação e homogeneização do material em um comprimento menor.

Figura 27 – Representação esquemática das modificações de projeto propostas e implementadas baseadas em extrusão por rosca vertical: propostas por: (a) Kumar et al. (2018) (b) Zhou et al. (2018) e (c) Silveira et al. (2014a) e Leng et al. (2019)



Fonte: Netto *et al.* (2021)

A partir da implementação de seu sistema de extrusão, Kumar et al. (2018a) apresentaram um conjunto de artigos envolvendo processamento de vários materiais, incluindo polímero puro e compósitos sob a forma de pellets (KUMAR et. al., (2018b-e); KUMAR et al.(2019); KUMAR; JAIN (2019).

O uso de uma broca como mecanismo de extrusão de material também foi empregado por Whyman, Arif e Potgieter (2018), o qual adicionou um alimentador de *pellets* independente para evitar acumulo de material no sistema barril-broca. O cabeçote de extrusão foi montado junto a uma plataforma de movimentação cartesiana personalizada. Além dos *pellets* de biopolímeros também foram testadas misturas de polímeros previamente preparadas e cortadas em pellets. Boyle *et al.*

(2019) usaram uma broca para adaptar e construir o equipamento denominado Rich Rap Universal Pellet Extruder (RRUPE) de código aberto, que se destina a reciclar peças fabricadas com polímero que apresentassem defeitos de fabricação. O equipamento proposto por Whyman, Arif e Potgieter (2018), e Boyle et al. (2019) mostrou a possibilidade de produção de objetos 3D, no entanto constataram obstrução de material ao longo da broca e, alimentação insconstante durante a realização dos experimentos de calibração. Kim e Lee (2020), também, desenvolveram um cabeçote de impressão com o emprego de broca semelhante aos anteriores, o qual foi integrado a uma impressora 3D de baixo custo. Os autores empregaram materiais em pellet feitos de matéria-prima cerâmica e agregantes poliméricos para fabricação de corpos de prova e peças a verde (termo empregado para caracterizar peças que requerem processamento adicional a fim de se obter suas propriedades finais) (RANE; STRANO, 2019).

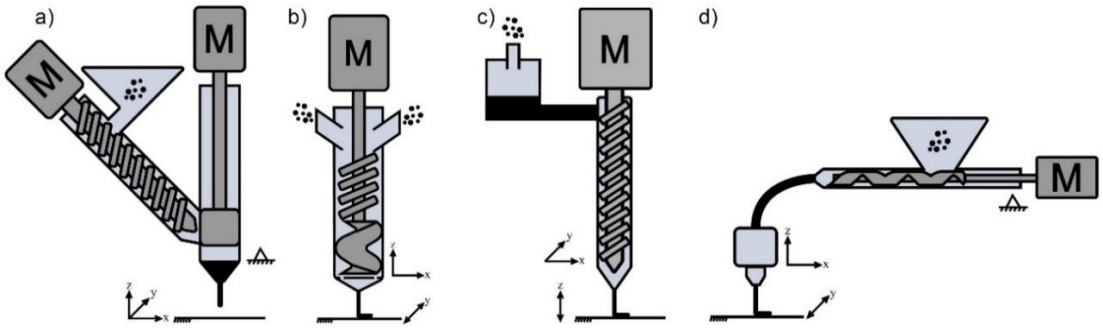
O cabeçote de extrusão desenvolvido por Zhou et al. (2018) foi integrado a uma impressora 3D Touch® (BitsFromBytes, Bristol, Reino Unido) e testado com pellets de polímero para se determinar a velocidade de rotação adequada em relação a alguns parâmetros de processo de impressão 3D. A rosca helicoidal foi fabricada empregando-se o processo de MA de fusão em leito de pó, seguido de polimento manual. Usando a porta de alimentação mais inferior, grânulos de polímeros sensíveis ao calor foram extrudados sem que significativa degradação térmica fosse observada, e um modelo de comparação foi fabricado para avaliação da precisão dimensional do equipamento. A impressão de multimateriais também foi explorada adicionando-se partículas fluorescentes ao material fundido.

Leng et al (2019) expuseram a vantagens da utilização de roscas cônicas no que tange à plastificação de materiais, mas não há qualquer menção quanto às dimensões dos componentes do cabeçote. Os autores confeccionaram, ainda, uma plataforma cartesiana para produção de espécimes tridimensionais feitos com pellets poliméricos sob diferentes condições, mantendo-se fixa a velocidade de rotação da rosca de extrusão.

A Figura 28 mostra uma representação esquemática dos projetos alternativos de cabeçotes de extrusão para impressão 3D identificados pela pesquisa, que envolvem mais de um mecanismo. Annoni, Giberti e Strano (2016) adaptaram uma injetora de pequenas dimensões com uma unidade de injeção vertical assistida por pistão e acoplou um parafuso de extrusão com perfil de transporte inclinado Canessa,

Baruzzo e Fonda (2017) adicionaram uma bomba de cavidade progressiva (também conhecida como bomba Moineau) à extremidade de um parafuso de extrusão com perfil de extrusão para obter melhor controle do fluxo de material. Liu et al. (2020) integraram uma câmara auxiliar de liquefação ao cabeçote de extrusão com função de bombeamento de material previamente fundido para o mecanismo de extrusão. Por fim, Khondoker e Sameoto (2019) desenvolveram um sistema de dois estágios, fracionado em uma unidade de plastificação horizontal fixa conectada a um cabeçote de impressão filamentar comercial.

Figura 28 - Representações esquemáticas dos projetos alternativos dedicados a processamento e impressão de baixa escala: (a) Annoni, Giberti e Strano. (2016), (b) Canessa, Baruzzo e Fonda (2017) c) Liu, Hinduja e Bartolo (2017) e (d) Khondoker e Sameoto (2019)



Fonte: Netto et al. (2021)

Annoni, Giberti e Strano (2016) exploraram a extrusão direta de metais e cerâmicas de matérias-primas por moldagem mediante injeção. Os pellets exibiram elevados teores de partículas sólidas e, por conseguinte demandavam de uma ferramenta de deposição capaz de gerar altos níveis de pressão de extrusão. Em decorrência do elevado peso do sistema, este foi fixado a um equipamento de movimentação do tipo delta feito sob medida. Conquanto tenham sido realizados testes de extrusão para avaliação da influência da porcentagem de ligante e da geometria do bocal, peças tridimensionais não foram produzidas.

Canessa, Baruzzo e Fonda (2017) não disponibilizaram muitas informações acerca do projeto da rosca de extrusão tendo em vista que o projeto focou no desenvolvimento da bomba Moineau para obtenção de controle volumétrico mais adequado da vazão de extrusão. O conceito teve como objetivo minimizar retração do

material permitindo deposição intermitente mesmo com alimentação contínua de material.

O cabeçote de impressão desenvolvido por Liu, Hinduja e Bartolo (2017) foi uma ferramenta de deposição multi-tecnológica exibindo duas unidades acionadas por pistões, uma extrusora com parafuso de extrusão com perfil de transporte e uma unidade de jato de plasma. O equipamento foi utilizado para a fabricação *scaffolds* a partir de pellets de polímeros puros e biocompósitos, relatados em Liu et al. (2018 a;b), Liu, Hinduja e Bártolo (2018) e Liu *et al.* (2017), sendo previamente preparados por processos de mistura manual.

Complementarmente, foram encontradas quatro soluções de equipamentos comerciais que fazem uso do princípio de parafuso de extrusão para fabricação aditiva.

O equipamento denominado 3D Discovery®, comercializada pela RegenHU (Villaz-St-Pierre, Suíça) é uma plataforma de biofabricação multitecnológica, que incorpora até seis cabeçotes de extrusão, incluindo uma unidade de pistão e um cabeçote de extrusão baseado em rosca de perfil de transporte (ANIWAA, 2022). O sistema Pellet Additive Manufacturing® (PAM) é comercializado pela Pollen AM (Ivry-sur-Seine, França) e que contem quatro extrusoras com mini-rosca de perfil de transporte com alimentação por pellets. A impressora 3D M3DIMAKER® com foco em aplicações farmacêuticas, comercializada pela FabRx (Londres, Reino Unido), tem opção de uso de filamentos ou pós. A Impressora 3D ExAM 255®, comercializada pela AIM3D GmbH (Rostock, Alemanha), exibe duas minis extrusoras de rosca com capacidade de processamento com pellets.

Os cabeçotes de impressão 3D Discovery® são montados em um sistema de movimentação cartesiano se movendo no plano x-z, enquanto a superfície de deposição se move no eixo y. A unidade de extrusão é muito semelhante ao equipamento experimental descrito por Liu et al. (2020), na qual os pellets são primeiramente fundidos em uma câmara aquecida e, então, bombeados usando ar para uma rosca de perfil de transporte rotativa. A 3D Discovery® foi empregue para fabricação de *scaffolds* de diferentes biocompósitos, os quais foram previamente formulados por mistura manual do material fundido e, depois, cortados em *pellets.* Segundo os autores, o processamento utilizando a rosca de extrusão foi essencial para melhorar as partículas sólidas no polímero fundido (LIU *et al.*, 2018a, b; LIU *et al.*, 2017; LIU; HINDUJA; BÁRTOLO, 2018).

O equipamento PAM® Série P, por sua vez mostra eu cabeçote de extrusão fixados à estrutura enquanto a superfície de deposição é acoplada a um sistema de movimentação do tipo “delta”. Geoffroy et al. (2019) utilizaram a máquina PAM® para imprimir diretamente matéria-prima viscosas de pellets de polímeros puros e retardadores de chama, previamente preparada por meio de uma extrusora de dupla rosca horizontal. O grau de dispersão dos aditivos foi determinado por mapeamento de raios X, e o desempenho de retardamento de chama obtido com o processo de impressão 3D foi comparado aos resultados obtidos por processo de termocompressão.

O equipamento M3DIMAKER® revela um sistema de movimentação cartesiano com o cabeçote de impressão se movendo em três direções, enquanto a superfície de deposição continua fixa. Goyanes et al. (2019) empregaram este equipamento para produção de *printlets* (comprimidos impressos em 3D), a partir de pós de polímeros carregados com substâncias medicamentosas. Os parâmetros de processo foram mantidos fixos de maneira a avaliar o desempenho dos *printlets* com graus distintos da matriz polimérica. O equipamento possibilitou fabricar medicamentos em uma única etapa com o uso de pequenas quantidades de material, o que evita a degradação térmica dos mesmos, agiliza os testes pré-clínicos e possibilitar a produção de fármacos com dose personalizada manipulando uma gama muito maior de excipientes.

4 Apresentação do projeto e proposta de aprimoramento do projeto

O presente capítulo tem o propósito de retratar suscintamente a motivação e a proposta inicial no tocante ao projeto de pesquisa de um cabeçote vertical monorosca intercambiável aplicado à manufatura aditiva por extrusão.

4.1 Contextualização da pesquisa de desenvolvimento de cabeçote customizados baseado em rosca

O atual projeto se insere na área de manufatura aditiva, especificamente com a finalidade de desenvolvimento de cabeçotes alternativos no processamento de matéria-prima sob diferentes estados no processo de extrusão.

Preliminarmente ao projeto de pesquisa, entre os anos de 2013 a 2014, o Núcleo de Tecnologias Tridimensionais do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) desenvolveu o primeiro protótipo no Brasil do projeto aberto Fab@Home com dois bicos de extrusão juntamente com Inforçatti Neto (2007). Projeto este pautado em estudos publicados e disponibilizados na comunidade aberta do projeto Fab@home por Malone e Lipson (2007), em que fazia uso de um cabeçote de extrusão embasado no processo de injeção de materiais viscosos.

Posteriormente, Inforçatti Neto *et al* (2012 (a)) desenvolveu um segundo cabeçote de extrusão com filamento empregando tecnologia FFF em consequência da expiração da patente de Crump (1992).

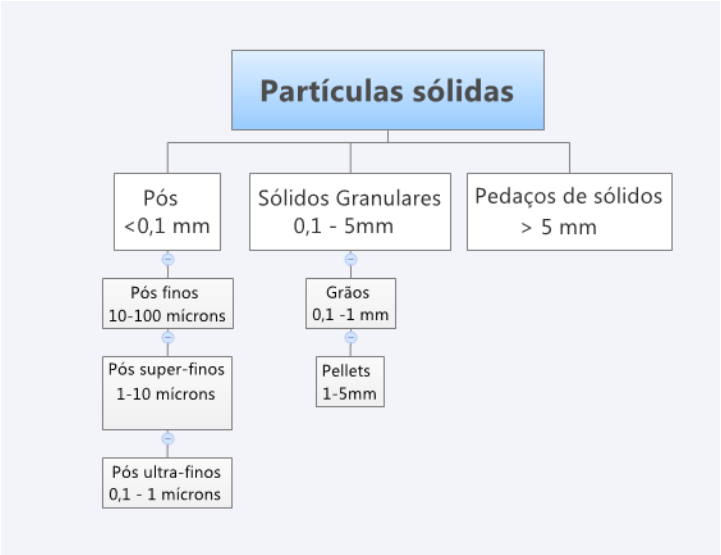
Um terceiro cabeçote (monorosca miniaturizada), descrito nessa tese, completou o conceito de processamento de matéria prima sólida com características diferenciadas, filamentar, viscosa e em estado de pó, pelo processo de extrusão, e também, o conceito de intercambiablidade de cabeçotes em impressora 3D *desktop*.

O desenvolvimento deste terceiro cabeçote foi implementado em parceria com a Escola de Engenharia de São Carlos e o CTI Renato Archer como tema de monografia e dissertação de Freitas (2011, 2014) e, de dissertação de Inforçatti Neto (2013). Os estudos se atentaram ao desenvolvimento das fases informacional,

conceitual e preliminar dos projetos, bem como na fabricação e montagem de um protótipo funcional pautado nas necessidades de se proceder a pesquisas na área de engenharia de materiais, especificamente, para geração de *scaffolds*.

Cabe ressaltar que se incluiu na categoria de matéria-prima sob a forma de partículas sólidas, especificamente pós entre 20 a 100 micrometros, cujo perfil de transformação de fases até a plastificação da matéria-prima é fundamentalmente distinto de materiais processados sob a forma viscosa (pastosa), ou ainda, de sólidos granulares com diâmetro superior a 0,1mm, ou pedaços de sólido, o que não se constitui simplesmente em combinações de ambos os processos. A classificação da literatura de partículas sólidas é mostrada na Figura 29.

Figura 29 - Classificação de partículas



Fonte: Adaptado de RAUWENDAAL (2014)

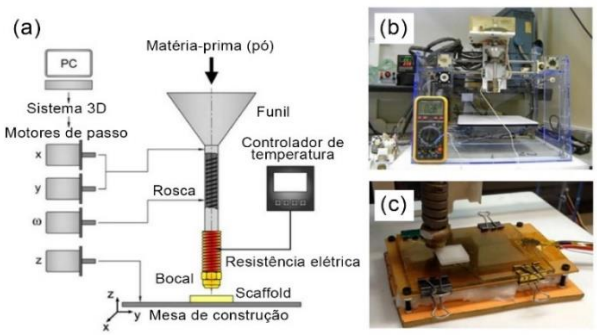
Na etapa informacional as principais demandas identificadas apontam: i) uso do equipamento para pesquisa na área de engenharia tecidual; ii) pré-dimensionamento do equipamento pautado na escolha de materiais para processamento: Poliamida 12 (PA 12) com intuito de reaproveitamento do material descartado no equipamento de manufatura aditiva por SLS (*Selective Laser Sintering*) e o biopolimero Policaprolactona (PCL); iii) uso do equipamento em laboratórios de pesquisa; iv) Dimensões do equipamento de 460 x 410 x 470 mm com volume de

trabalho de 140 x 200 x 250 mm (aproximadamente 800 mm^3); *v)* Massa total entre 25-50 kg (Inforçatti Neto et al, 2012 a).

O desafio do estudo foi conceber o sistema de extrusão vertical miniaturizado apoiado em rosca de seção variável de passo constante, escolhido com o propósito de comprimir o material, por intermédio das restrições dimensionais do envelope disponível para o sistema, considerando-se uma pré-escolha de parâmetros geométricos. Portanto, foi selecionado um motor de passo bipolar com a finalidade de acionamento mecânico, sistema de aquecimento por resistência elétrica e aferição de temperatura por termopar tipo J, produzido a partir de uma liga de Ferro e Constantan possibilitando a operação na faixa de temperatura de -40°C a 750°C. (Inforçatti Netto, 2013)

As Figuras 30 (a) e (b) retratam a plataforma desenvolvida e alocado no CTI e os cabeçotes desenvolvidos por Inforçatti Neto (2007); Inforçatti Neto et al. (2012) e Inforçatti Neto (2013), Silveira, et al (2014 a) e Freitas (2014).

Figura 30 - (a) Protótipo funcional da impressora 3D; (b) cabeçotes de extrusão intercambiáveis



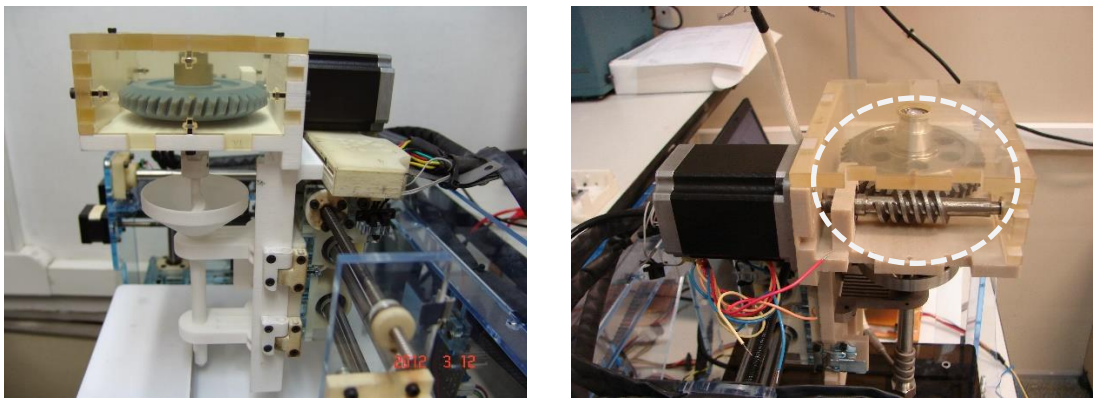
(a)
Fonte: Dávila et al. (2015)

(b)
Fonte: Inforçatti Neto (2013)

Um redutor de velocidades, com configuração cinemática, engrenagem e rosca sem fim, foi selecionado em função de algumas restrições verificadas: elevada redução (1:20), faixa de potência e restrição do envelope de trabalho decorrente do volume total do cabeçote de extrusão. Sua fabricação procedeu-se por intermédio de recursos tecnológicos da própria Divisão de Tecnologias Tridimensionais do CTI. Diante da demanda de uma resistência mecânica proeminente devido ao elevado valor de pressão de contato entre os dentes foi empregue a liga metálica Ti-6Al-4V

(que dispõe da capacidade de transformação alotrópica, com formação de fase β (estrutura cúbica de corpo centrado) acima de 880°C, permanecendo estável até sua fusão e, consequentemente se mostrou adequada para no decurso da fabricação mediante técnica aditiva SLM (*Selective Laser Melting* - fusão em leito de pó) (Freitas, 2014). O sistema de transmissão é apontado na Figura 31.

Figura 31 - (a) Mock-up do cabeçote com auxílio da técnica SLS, para avaliação de tolerâncias e montagem; (b) transmissão engrenagem e sem fim fabricado com técnica SLM



(a) (b)

Fonte: Infoçatti Neto (2013)

A utilização de equipamentos que empregam a técnica de SLM para fabricação aditiva do *mock-up* e do sistema de transmissão disponibilizado pelo CTI apresenta custo elevado. Assim, para o r*etrofitting* do projeto deverá se discutir a respeito do redimensionamento do sistema de redução e de sua fabricação.

O conceito de projeto alternativo concebido para o cabeçote de impressão 3D direta com a propriedade técnica diferenciada dos demais tipos de cabeçotes de extrusão é sua alimentação com matéria prima em pó, podendo este ser uma mistura de materiais poliméricos e aditivos.

4.2 Projeto do cabeçote intercambiável baseado em rosca de compressão: considerações sobre o pré-dimensionamento, fabricação, montagem e testes experimentais

Como exposto anteriormente, à época do início do projeto, não havia uma quantidade significativa de pesquisas e propostas técnicas demandando o

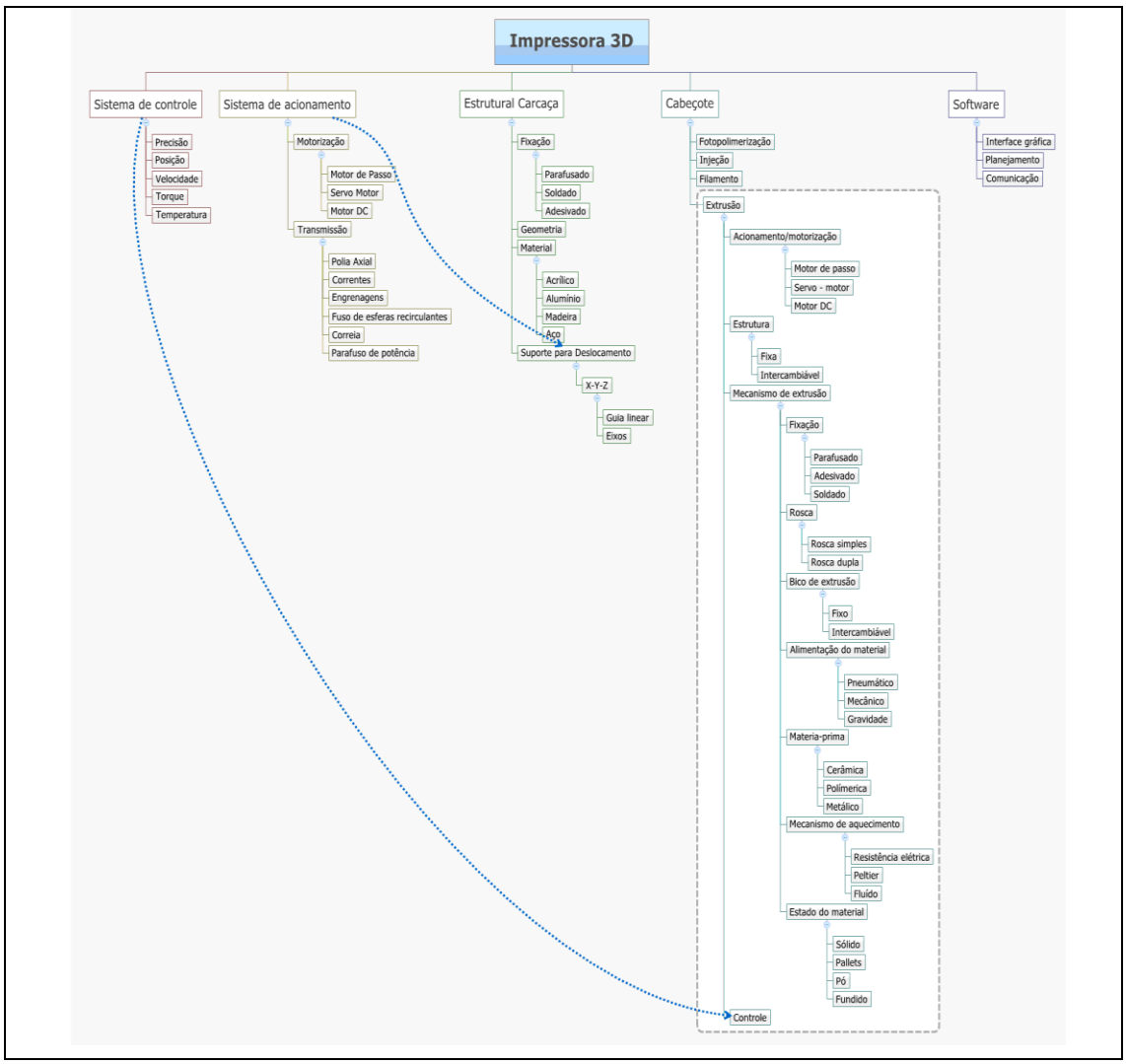
desenvolvimento e implementação de cabeçotes miniaturizados com aplicação de etapa única em manufatura aditiva embasada em rosca com perfil de compressão.

A vista disso, a configuração proposta no projeto de pesquisa em Inforçatti Neto (2013), Freitas (2014) e no estudo abordado nesta tese a respeito de um cabeçote de extrusão vertical miniaturizado pautado no emprego de rosca de compressão tem como principal função de estudo conformar filamentos a partir de matéria-prima sob estado de pó para aplicações em manufatura aditiva considerando-se etapa única de fabricação.

No transcorrer desta seção um relato sucinto será retratado a respeito do desenvolvimento da primeira versão do cabeçote miniaturizado o qual teve como propósito o pré-dimensionamento do par barril-rosca e de seus componentes, detalhados em Freitas (2014) embasado na estrutura funcional da plataforma de impressão 3D, conforme ilustrado na Figura 32.

Cabe ressaltar que inicialmente nesta linha de pesquisa, focada para projeto de cabeçotes customizados para técnica aditiva por extrusão, o projeto do cabeçote miniaturizado por extrusão pautado em rosca foi direcionado robustamente por critérios de projeto mecânico, principalmente, em função das restrições dimensionais e pela escolha de intercambiabilidade.

Figura 32 – Estrutura funcional da impressora 3D experimental com cabeçotes intercambiáveis



Fonte: Freitas (2011)

4.2.1 Pré-dimensionamento do conjunto barril-parafuso de extrusão, sistema de acionamento e sistema de aquecimento

O procedimento adotado para o pré-dimensionamento da monorosca de extrusão que deu origem à primeira versão do cabeçote vertical miniaturizado será abordado de modo conciso a seguir. O desenvolvimento do cabeçote realizado por Inforçatti Neto (2013); Silveira *et al.* (2014); Freitas (2014) tiveram aplicações nos estudos de: Dávila *et al.* (2014); Dávila *et al.* (2015); Chiaroni e Silveira (2019); Barbosa (2018); Cunha et al. (2019), sobre os quais também serão tecidas considerações.

4.2.1.1 Restrições de projeto

Freitas (2011) elencou algumas restrições para definição do equipamento as quais são elencadas em sequência

a) Acionamento: escolha do motor de passo por mostrar precisão mais acurada de fluxo e controle eletrônico do deslocamento do parafuso de extrusão. Esta categoria de motor já havia sido selecionada anteriormente para o acionamento de outros dois tipos de cabeçotes de extrusão (Inforçatti Neto et. al., 2012 a).
b) Volume do Cabeçote: 70 x 70 x 200 mm, que representa o volume para se acoplar os cabeçotes intercambiáveis na impressora experimental Fab@CTI.
c) Peso: Este se mostrou limitado, devido à deflexão das guias de movimentação do cabeçote (na montagem da primeira versão, o cabeçote translada sobre eixo x);
d) Processo: a alimentação descontinuada com a pretensão de evitar aglomeração de material, travamento do parafuso e degradação do polímero.

4.2.1.2 Escolha da geometria da rosca

Aplicando-se os conceitos de teoria de projeto, a função primordial de uma extrusora é plastificar a matéria-prima por meio de uma sequência de transformações do material até sua conformação em uma matriz (no caso da impressora 3D, um bocal com diâmetro calibrado). Em extrusoras o parafuso de extrusão é o componente primário para a ocorrência desse processo.

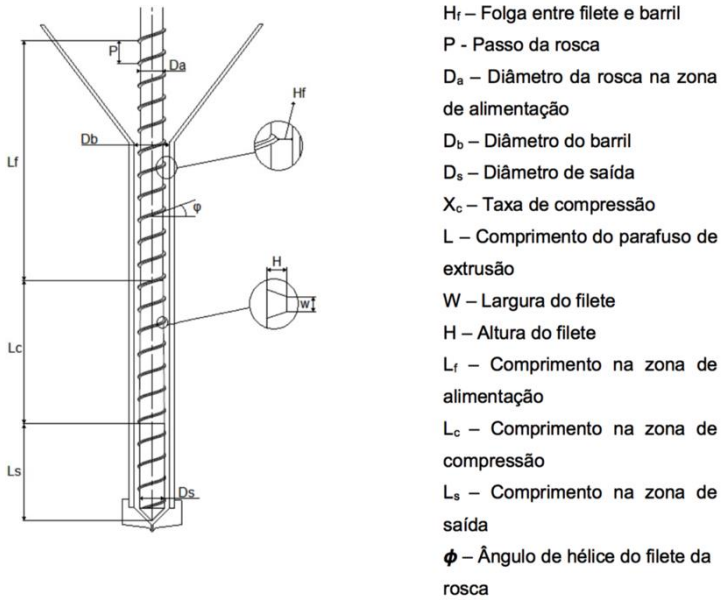
Para roscas simples (monoroscas) com seção transversal variável com passo constante, que fornecem um perfil de compressão, Rauwendaal (2014) e White e Potente (2002) recomendam, a partir da definição do diâmetro da extrusora (diâmetro

máximo na zona de dosagem), algumas relações para a obtenção de suas dimensões básicas, como listadas a seguir:

- O comprimento total (L) é de 20 à 30D;
- O comprimento da zona de alimentação é de 4 à 8D;
- O comprimento da zona de dosagem é de 6 à 10D;
- O número de filetes paralelos pode ser igual a 1;
- O passo da rosca tem o mesmo comprimento que o diâmetro da rosca, o que é conhecido como rosca de perfil quadrado e resulta num ângulo de hélice de 17,66º;
- A largura do filete de rosca é de 0,1D;
- Profundidade do canal da seção de alimentação é de 0,10 a 0,15D;
- A razão de compressão (RC) pode assumir, em geral um valor entre 2 a 4.

A Figura 33 mostra uma representação esquemática contendo as principais dimensões do parafuso de extrusão com seção variável.

Figura 33 - Principais dimensões de uma rosca de extrusão



Fonte: Freitas (2014)

A partir da proporcionalidade proposta, assumindo diâmetro entre 7 e 8 mm para a rosca de extrusão, respeitando a recomendação de comprimento e

considerando a proporção entre o subconjunto do cabeçote com o equipamento, obteve-se as medidas da rosca de extrusão como descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros estimados para o parafuso de extrusão

Parâmetro	Valor
Diâmetro externo da rosca (D)	7,0 mm
Comprimento da rosca de extrusão (L)	138,45 mm
Ângulo de hélice (ϕ)	17,66º
Passo da rosca (constante – perfil quadrado) – (P)	0,7 mm
Comprimento da zona de alimentação (Lf)	71 mm
Comprimento da zona de compressão (Lc)	40 mm*
Comprimento da zona de dosagem (Ls)	24 mm
Folga radial na zona de transporte (hi)	0,70 mm
Folga radial na zona de dosagem (hf)	0,35 mm
Diâmetro do parafuso de extrusão: (zona de alimentação) - Da	6,30 mm
Diâmetro do parafuso de extrusão (zona de dosagem) - Ds	6,90 mm
Comprimento total do parafuso de extrusão:	171,45mm
Material da rosca	Aço SAE 4340 (Nitretado)
Material do barril	Aço SAE 4340
Relação L/D	19,8*
Razão de Compressão (RC) (hi/hf)	2,0

Fonte: Adaptado de Freitas (2014)

Para a estimativa do torque, seleção do motor de passo e do sistema de redução procedeu-se a duas análises experimentais com reometria capilar a fim de estimar as taxas de cisalhamento da Poliamida 12 e PCL.

Definidos os materiais do par parafuso de extrusão e barril e, de suas geometrias, foi possível o cálculo de algumas propriedades físicas valendo-se dos dados de material listados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de projeto para o pré-cálculo do conjunto barril e rosca

Parâmetros de Projeto	Valores adotados
Raio da rosca	$3{,}5.10^{-3}$ m
Aceleração da gravidade	9,81 m/s^2
Módulo de Young	$1{,}1.10^5$ MPa
Densidade do material	4430 kg/m^3

Fonte: Próprio autor

4.2.1.3 Estimativa da taxa de cisalhamento dos materiais poliméricos por meio de ensaio por reometria capilar

Do ponto de vista da engenharia de projeto, um rol de requisitos técnicos principia de maneira semi-empirica o pré-dimensionamento de um equipamento, máquina ou dispositivo.

Neste projeto, após obtidas as definições das condições operacionais do processo aditivo por FFF, dos materiais a serem processados e o estabelecimento da geometria básica da monorosca e considerando-se as restrições dimensionais da plataforma experimental e intercambiabilidade, procederam-se, também, a duas análises com o intuito de estimar as taxas de cisalhamento pela técnica de reometria capilar dos polímeros PA12 e PCL.–Procedimento este que permite a determinação da viscosidade do material quando em condições de processamento, sendo esta uma condição fundamental para estimativa do torque operacional e, portanto, dimensionamento e seleção do motor a ser utilizado.

A poliamida (PA 12) se constitui em um polímero termoplástico com estrutura semicristalina (variando de 30 a 45%) e estreita faixa de fusão (MANRICH, 2013). É um material higroscópico, que absorve umidade. À vista desta condição, sugere-se que, previamente ao processamento da mesma, submetê-la a um ciclo de secagem em estufa, em torno de 60°C por 4 horas. A temperatura de processamento transcorre em valores superiores a 240°C, expressando temperatura de derretimento em banda estreita.

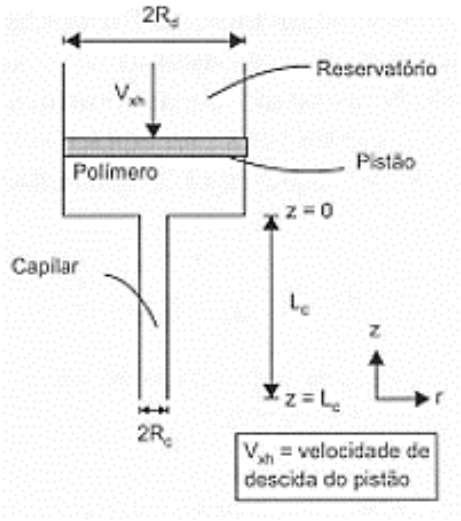
A poliamida se oxida facilmente na presença de ar quente e demonstra baixa viscosidade após atingir a temperatura de fusão. Manrich (2013) recomenda que a taxa de compressão se situe entre 3,0:1 a 4,5:1 para extrusoras comerciais e o L/D

entre 12:1 a 25:1, com zona de compressão reduzida, folga constante e pouco profunda (ordem de 5% do D).

A policaprolactona consiste de um poliéster alifático biodegradável com baixo ponto de fusão (60°C), e temperatura de transição vítrea de -60°C obtido da polimerização da caprolactona.

A reometria capilar foi processada com amostras diferenciadas: uma de Poliamida 12 submetida previamente a reduzida porcentagem do foco do laser do equipamento de SLS, outra de matéria-prima sem uso, e, também, uma amostra de PCL. Em todas as análises, a temperatura empregue para determinar a curva reológica ocorreu a 225°C (Freitas, 2011). A Figura 34 esquematiza o princípio utilizado para reometria capilar.

Figura 34 – Esquemático de um reômetro capilar.



Fonte: Manrich (2013)

Apoiado no comportamento de fluido newtoniano em polímeros sob deformação e considerando duas placas paralelas, em que uma delas se mantém estacionária enquanto a outra se desloca, pode-se obter a viscosidade do fluido (η) pela relação entre a tensão (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) como na equação (2):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (2)$$

Adaptando a equação 11 para a geometria capilar, obtém-se a equação 3 que descreve a tensão de cisalhamento e a equação 4 para detalhar a taxa de cisalhamento.

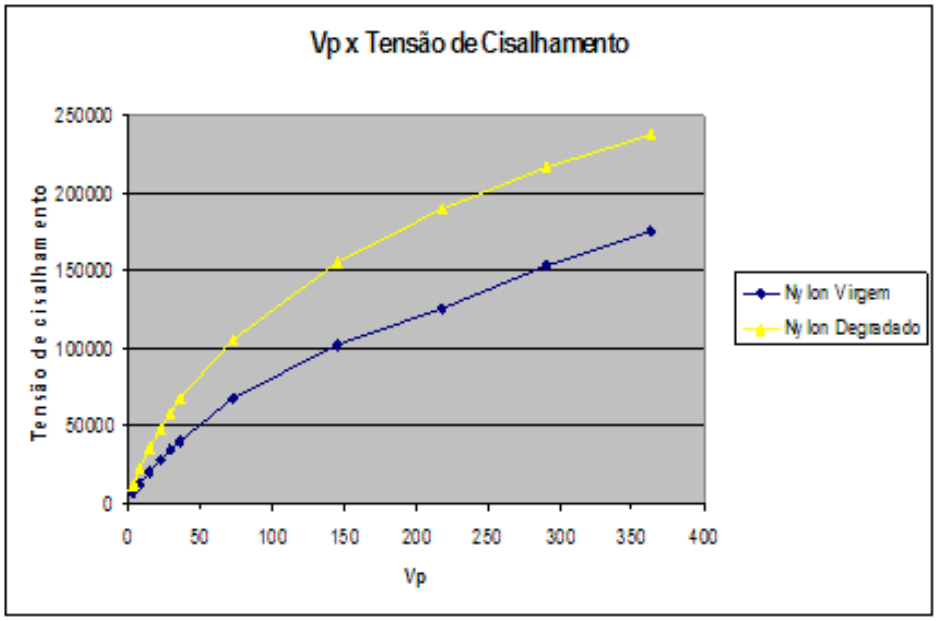
$$\tau = \frac{\Delta P R_c}{2L_c} \tag{3}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R_C^3}, fluidos\ Newtonianos \tag{4}$$

Sendo R_c e L_c, o raio e o comprimento do tubo capilar, respectivamente. Dispondo dos resultados obtidos acerca da relação da pressão vs. vazão para diferentes velocidades e conhecendo-se a geometria do capilar, é possível determinar a relação entre tensão de cisalhamento ($\log(\tau)$) e a taxa de cisalhamento ($\log(\dot{\gamma})$) obtendo-se os valores da viscosidade.

Procedeu-se aos ensaios em 12 velocidades distintas, cujas taxas de cisalhamento variaram entre 10 (1/s) e 10000 (1/s). Os resultados são mostrados nas Figuras 35 (PCL) e 36 (PA 12).

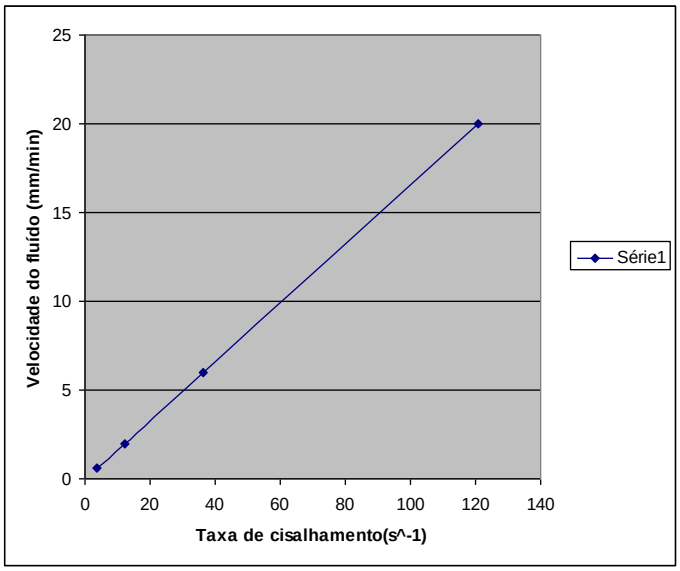
Figura 35 – Curvas experimentais relacionando tensão de cisalhamento x velocidade, para a PA 12 natural e PA 12 utilizada no processo aditivo SLS.



[mm/min]

Fonte: Inforçatti Neto (2013)

Figura 36 – Relação Velocidade do fluído x Taxa de Cisalhamento, para PCL CAPA 6505 da Solvay.



Fonte: Inforçatti Neto (2013)

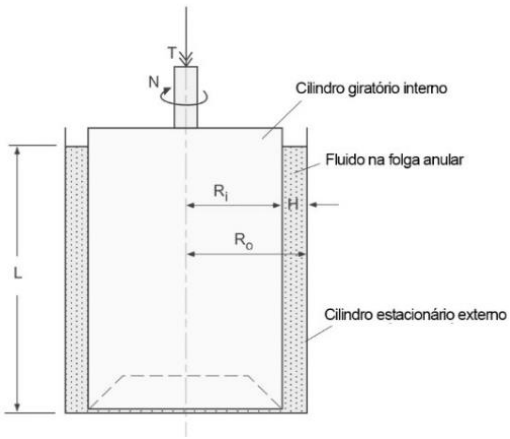
Ao se observar as figuras verifica-se que a tensão de cisalhamento da PA12 natural é significativamente menor do que a poliamida degradada. Provavelmente devido ao histórico termomecânico, a PA 12 natural oferece menor resistência ao cisalhamento, e, portanto, menor energia para acionar o sistema de extrusão.

Enquanto que para o PCL identifica-se relação linear entre a taxa de cisalhamento e a velocidade do fluido.

4.2.1.4 Estimativa do torque estático do parafuso de extrusão para escolha do motor de passo e escolha do motor e sistema de transmissão

A viscosidade de um material é possível de ser determinada experimentalmente mediante diversos métodos. Um desses métodos consiste no arranjo de cilindros concêntricos (efeito Couette), em que o fluido está contido na folga anular entre os cilindros como esquematizado na Figura 37.

Figura 37 – Arranjo de cilindros coaxiais usado, para determinar a viscosidade de um fluido.



Fonte: Traduzido de RAUWENDAAL, 2014

Uma vez que a superfície interna se desloca com relação à externa, o material será submetido a um fluxo de arraste e deverá cisalhar com taxa de cisalhamento correspondente à relação entre a velocidade e a distância normal da folga dada pela equação 5:

$$\dot{\gamma} \cong \frac{v_o - v_i}{R_o - R_i} = \frac{2\pi R_i N}{H} \qquad (5)$$

A Equação 5 é válida apenas se a folga anular (H) apresentar dimensão diminuta com relação ao raio. Por conseguinte, se a geometria e a velocidade de rotação são conhecidas, a taxa de cisalhamento é possível de ser determinada.

A tensão de cisalhamento agindo sobre o fluido é obtida a partir do torque (T) necessário para girar o cilindro interno e a força de cisalhamento (F) atuando sobre o cilindro interno é resultante da tensão multiplicada pela área, demonstrada pela equação 6:

$$F = \frac{T}{R_i} = 2\pi R_i L \tau \qquad (6)$$

De modo que a tensão de cisalhamento é obtida pela equação 7:

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_i^2 L} \qquad (7)$$

Por fim, a equação 8 representa a viscosidade:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{TH}{4\pi^2 R_i^3 LN} \qquad (8)$$

Assim sendo, o torque resistivo considerando a PA 12 natural foi de 0,86 N.m calculado de modo análogo ao princípio de cilindros coaxiais.

Os resultados atingidos por intermédio da reometria capilar para o PA 12 proporcionaram uma tensão de cisalhamento máxima (τ) de $7{,}6.10^4$ Pa em função do diâmetro do bico calibrado de 0,72 mm e velocidade de deposição de 6mm/s.

A fim de selecionar o material que dispõe de maior viscosidade, a partir dos dados da Tabela 4, calculou-se a tensão de cisalhamento, aplicando-se a lei das potências, considerando velocidade de descida do pistão de 8 mm/s. Este valor indicou taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de $2{,}9.10^3$ s^{-1} para o PCL e valor de tensão de

cisalhamento de 3,6x10^{6}Pa (ajustado para equação da lei das potências (exposto no apêndice A), com valores de m=8321 e n=0,759).

Tabela 4 - Valores extraídos da Figura 36, com faixa de valores mais estreitos.

Parâmetro	Valor			
$\dot{\gamma}\,(s^{-1})$	3,6	12,1	36,3	120,9
V_m(mm/min)	0,6	2	6	20

Fonte: Freitas (2014)

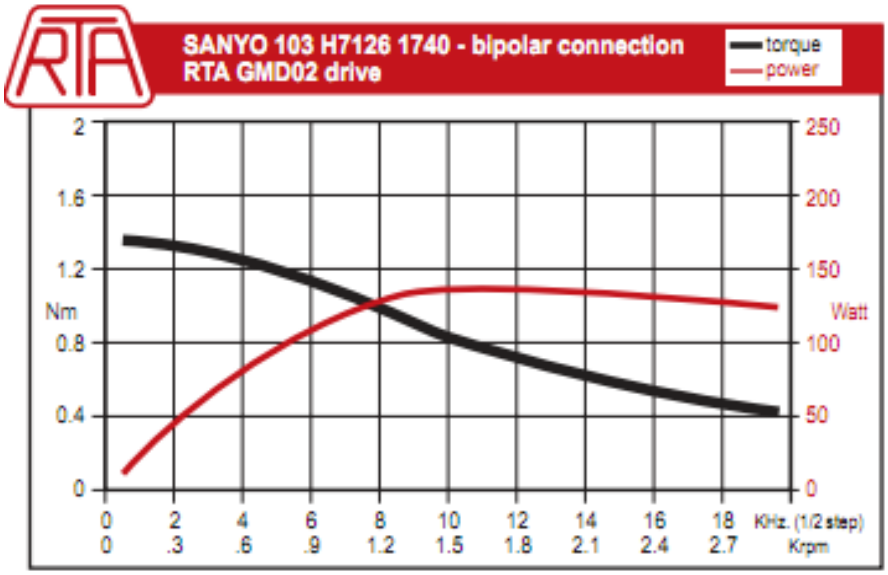
O torque resistivo calculado para o processamento do PCL demonstrou um valor significativamente maior de 17,40 N.m, comparado ao torque resistivo de projeto para a PA 12 (menor do que 1 N.m).

Com um torque de projeto de 17,40 N.m, adicionando um fator operacional, em função dos números de horas de uso/dia em torno de 1,1, o torque de projeto obtido é de 20 N.m.

A escolha pelo uso de motor de passo para acionamento do parafuso de extrusão foi determinada em função da miniaturização dos elementos de processamento do material (parafuso de extrusão e barril), do espaço disponível do sistema de acionamento contido no cabeçote de extrusão

A partir da consulta de motores de passo comerciais, em função do torque fornecido e da velocidade foi escolhido o motor de passo NEMA 23 H 7126 1740, conforme Figura 38.

Figura 38 – Curva de torque do motor de passo NEMA 23, Catálogo de motores de passo Automotion.



Fonte: Freitas (2011)

Analisando as curvas de torque e potência identificou-se que a melhor relação entre estas duas grandezas decorre em rotações de 1200 rpm correspondendo a torque de 1 Nm. Como o torque exigido pelo sistema para funcionamento é de 20 Nm, o sistema de redução a ser aplicado deve ser de 20:1 resultando em velocidade de rotação do parafuso de extrusão de 60 rpm.

Há várias opções geométricas e, por conseguinte, cinemáticas de sistemas de transmissão classificados de modo geral como rígidos ou flexíveis. Em função da restrição de espaço, uma transição significativa de momento torçor compreendida entre o sistema de acionamento e o subsistema de extrusão, e a necessidade de precisão de movimentação, optou-se primariamente por transmissões com engrenagens.

Após análise detalhada dentre as diferentes configurações geométricas, tanto dos pares engrenados quanto dos perfis de dentes, optou-se pela configuração do tipo engrenagem e parafuso sem fim.

Procedeu-se ao dimensionamento do sistema engrenagem parafuso sem fim mediante os critérios de falha por resistência mecânica, tensão superficial e tensão de flexão mostrados na literatura clássica de projeto e engenharia mecânica (NIEMANN, 1971; SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005), tendo sido empregado o mesmo material para fabricação de ambas engrenagens (Ti-6Al-4V) aplicando a técnica

aditiva por *Electron Beam Melting* (EBM), que, apesar de ser um processo aditivo extremamente caro, encontrava-se disponível pelo CTI e por outro lado se tratar de um projeto personalizado de redução.

Na versão atual do cabeçote monorosca, em desenvolvimento, se adotou a recomendação existente na literatura e nas práticas industriais, que, em função das diferenças de carregamentos entre o par engrenado, propõe uso de material mais dúctil para engrenagem, o bronze por exemplo, e aço liga endurecido para a engrenagem tipo parafuso sem fim (JUVINALL; MARSHEK, 2013).

Como procedimento para estabelecer a união entre o eixo de saída do sistema de redução e o parafuso de extrusão se dispôs de um acoplamento flexível que permite pequenas correções de desalinhamento transversal, axial e angular amortecendo e absorvendo pequena fração de vibrações torcionais.

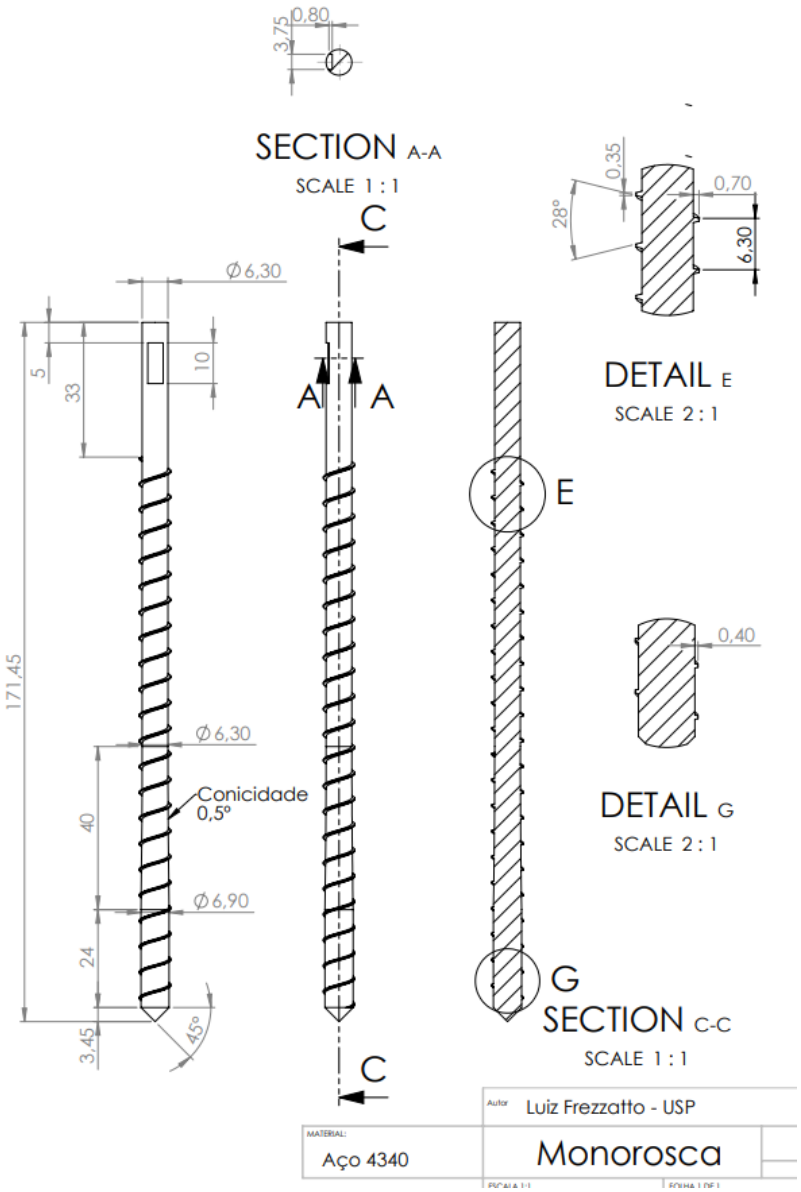
Prosseguindo, em função da esbeltez do parafuso sem-fim, L/D próximo a 20, e dispondo dos resultados pertinentes ao diâmetro da rosca de 7mm, à velocidade de rotação de 60rpm, e ao torque aplicado na rosca de 20Nm, assim como a potência desenvolvida do motor de passo, conduziu ao cálculo da deflexão lateral máxima do parafuso de extrusão, como uma viga engastada,–com seção circular com menor diâmetro, igual a $2{,}37.10^{-6}$ m e tensão de cisalhamento atuante de 386 MPa.

Para parafusos de extrusão Rauwendall (2001) sugere que a flambagem precisa ser considerada em valores de L/D>20.

O dimensionamento dos demais elementos da rosca, como espessura e altura do dente, forma do dente, relação de compressão, forma construtiva da rosca e outros são obtidos mediante modelos numéricos (Freitas, 2014).

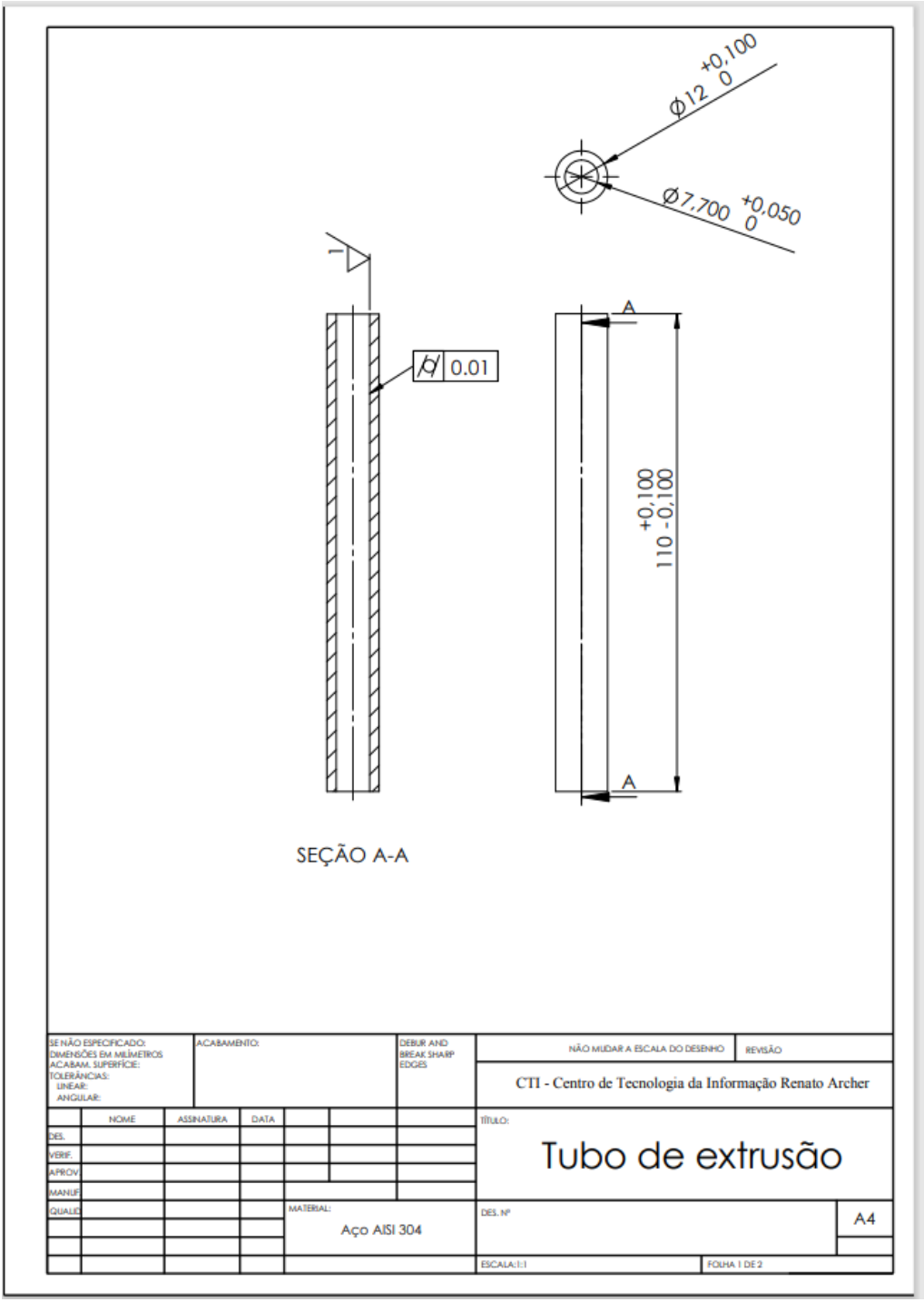
As figura 39 e 40 ilustram os desenhos da rosca de extrusão e do barril.

Figura 39 – Desenho técnico da rosca de extrusão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 40 – Desenho técnico do barril.



Fonte: Próprio autor.

Com relação à velocidade máxima de extrusão do material, considerou-se a velocidade máxima de movimentação do sistema da Fab@CTI de aproximadamente 15 mm/s para um diâmetro de saída de 0,1 mm, aceitável para o projeto (Inforçatti Neto, 2013).

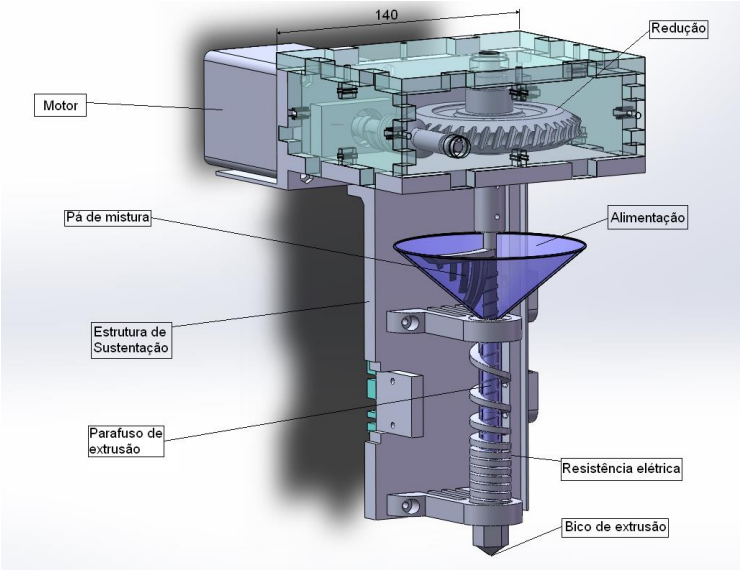
Assim sendo, foram definidos os seguintes valores para os dimensionamentos:

- Torque: 20 N.m;

- Temperatura máxima de operação: 350ºC.

O sistema de aquecimento foi mensurado com o intuito de atingir a capacidade de 350ºC dispondo de resistência encapsulada em espiral de 120W a 220V com termopar tipo J interno e, um segundo termopar tipo J situado externamente. Atendendo aos requisitos de intercambiabilidade, o sistema foi monitorado por um controlador industrial de temperatura externo (Inforçatti Neto, 2013). A figura 41 mostra o modelo tridimensional da primeira versão do sistema indicando os principais componentes.

Figura 41 - Modelo tridimensional do mini cabeçote de extrusão

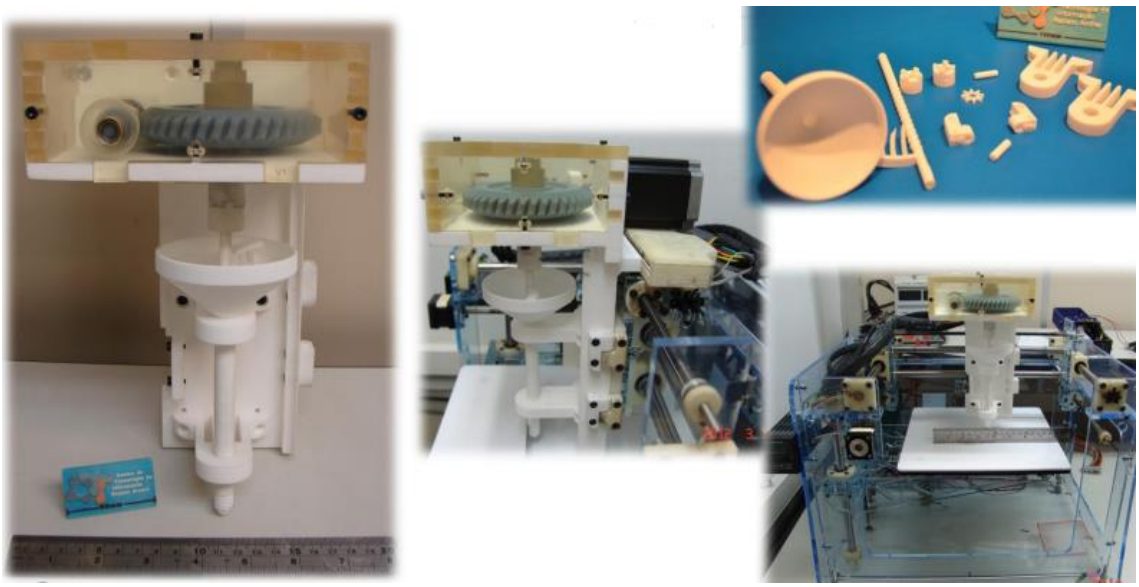


Fonte: Freitas (2011).

4.2.2 *Mock-up* para avaliação das tolerâncias e montagem

Mock-up é um termo empregue no transcorrer do desenvolvimento de produto com o propósito de identificar um protótipo confeccionado em escala ou em tamanho real, e, principalmente, para avaliação do equipamento e sua funcionalidade. Desta maneira, para empreender a análise de integração e viabilidade de montagem do cabeçote, Inforçatti Neto (2013) confeccionou um modelo em escala real como é possível observar na figura 42.

Figura 42 - – Mock-up do cabeçote de extrusão e seu acoplamento no equipamento Fab@CTI.

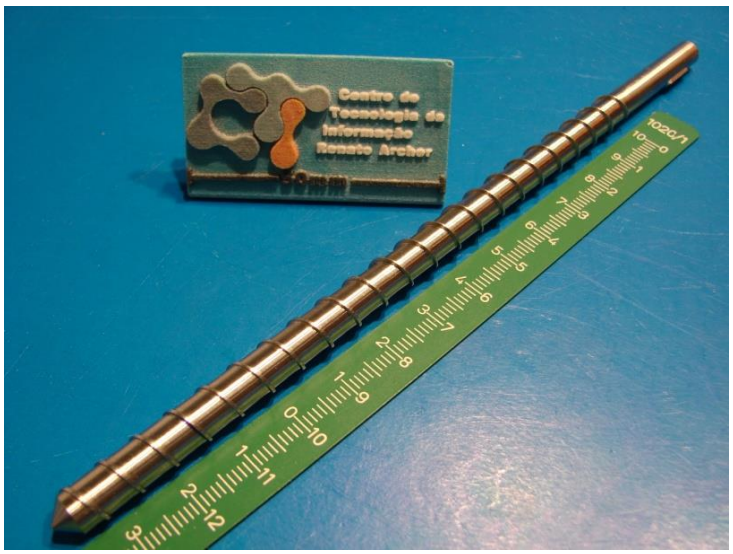


Fonte: Inforçatti Neto (2013).

Procedeu-se, inicialmente, a um teste com *mock-up* com a finalidade de se analisar a viabilidade da montagem e movimentação do sistema, que possibilitasse a identificação de possíveis falhas de projeto como desalinhamento de acoplamentos, posicionamento de rolamentos, soluções para as conexões eletroeletrônicas da plataforma ao cabeçote, entre outras características.

A rosca de extrusão foi confeccionada por processo de usinagem convencional sendo a mesma manufaturada em aço inox 304 (figura 43).

Figura 43 – Mini-rosca extrusora produzida por usinagem em aço inoxidável 304.



Fonte: Inforçatti Neto (2013).

A coroa e parafusos sem fim, componentes do sistema de redução foram manufaturados por SLM como se observa na figura 44.

Figura 44 – Sistema de redução produzido em SLM após pós-processamento e remoção de suporte.

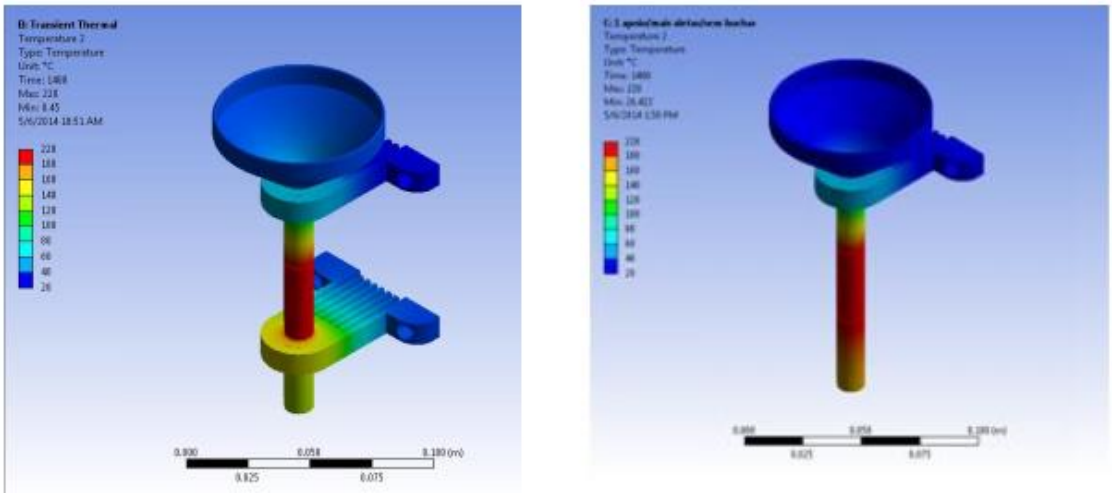
Fonte: Inforçatti Neto (2013).

4.2.3 Modelo teórico experimental do perfil de temperatura do barril

Freitas (2014) e Chiaroni (2018) procederam a análises para validação experimental do cabeçote de extrusão pautando-se na tecnologia FDM. Para tal intuito sucedeu-se a análises térmicas no conjunto barril-rosca de maneira a monitorar a temperatura e dissipação térmica (figura 45), aspectos relevantes para o adequado processamento de material, além da deposição do material em forma de filamento e a geração de geometrias com aplicação de DOE.

O processamento de termoplásticos demanda conhecimentos precisos nas áreas de ciência dos materiais, de tecnologias de processamento de polímeros e de fundamentos de reologia. Segundo Barry et al. (1999) apud Becker et al. (2013), os materiais termoplásticos possuem comportamento decorrente da variação no seu nível de viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Muitas restrições ao fluxo do polímero amolecido podem transcorrer no decurso do preenchimento da cavidade, dando origem a diferentes taxas de cisalhamento entre as moléculas poliméricas, possibilitando variações dinâmicas de viscosidade. Parâmetros distintos interferem na viscosidade e fluxo do material, sendo a temperatura e a pressão dois dos principais. Neste contexto, é fundamental o monitoramento e controle de parâmetros do processo, especificamente, taxa de cisalhamento, pressão e variação da temperatura.

Figura 45 - Perfil de temperatura teórico do barril



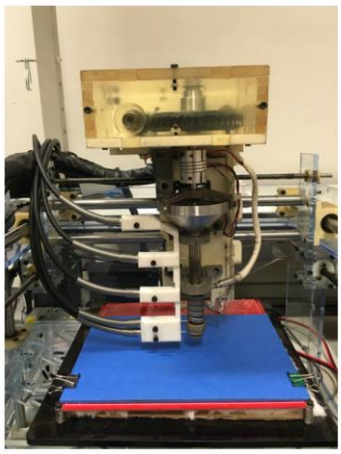
Fonte: Freitas, 2014

Chiaroni (2018) identificou que as características construtivas do sistema não permitiam um bom controle do fluxo de calor, sendo estas a presença de apenas um aquecedor em virtude ao tamanho diminuto do equipamento, além da ausência de sensores para monitoramento da temperatura em diferentes regiões exceto pelo termopar presente na resistência dedicado, exclusivamente, ao monitoramento desta.

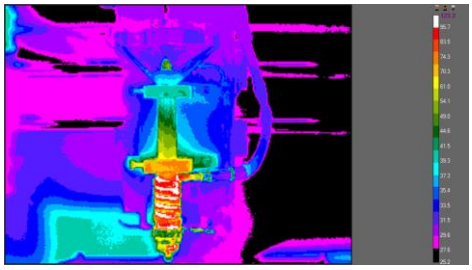
Chiaroni (2018) conduziu um estudo tendo o propósito de uma avaliação teórico-experimental do perfil de temperatura do cabeçote de extrusão. O procedimento consistiu em desenvolver a instrumentação necessária para monitoramento *"in loco"* do perfil de temperatura no sistema de extrusão do cabeçote (Figura 46). Como complemento, foi implementada uma avaliação do perfil de temperatura por intermédio do uso de imagens termográficas, e concomitantemente a criação de um modelo computacional apoiado em análise por elementos finitos no par barril-rosca e aproximação do polímero como uma das condições de contorno. Após a execução dos ensaios experimentais coeficientes de transferência de calor do modelo numérico foram ajustados originando um modelo mais fidedigno do sistema.

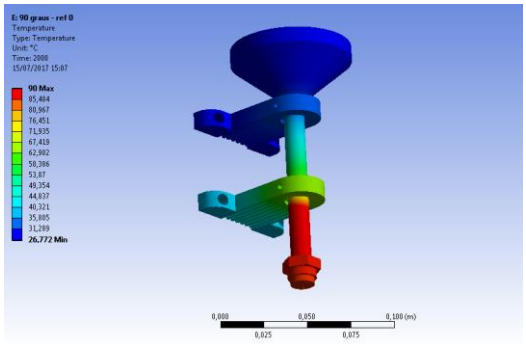
Figura 46 – Sistema de instrumentação térmica e simulação térmica do cabeçote de extrusão. (a)Cabeçote de extrusão com termopares acoplados para análise de temperatura,

(b) imagem termográfica do cabeçote em funcionamento e (c) perfil de temperatura para aquecimento de 90oC



(a)





(b) (c)

. Fonte: Chiaroni (2018).

A análise empreendida por Chiaroni (2018) se mostra de suma importância em decorrência da precisão de controle de temperatura no decurso do processamento de matéria-prima uma vez que diferentes materiais mantêm propriedades térmicas distintas.

5 Materiais e Métodos

Uma exposição concisa acerca dos materiais empregues, especificamente, material polimérico, cabeçote de extrusão, equipamentos para instrumentação, procedimentos executados, métodos e técnicas são contemplados neste capítulo.

A figura 47 expõe um fluxograma do projeto de pesquisa destacando a contribuição desenvolvida no presente estudo.

5.1 Materiais

O material polimérico aplicado consistiu do Polipropileno CP 141, um copolímero heterofásico de propeno e eteno de provimento da empresa Braskem, cujo perfil está listado na tabela *5.*

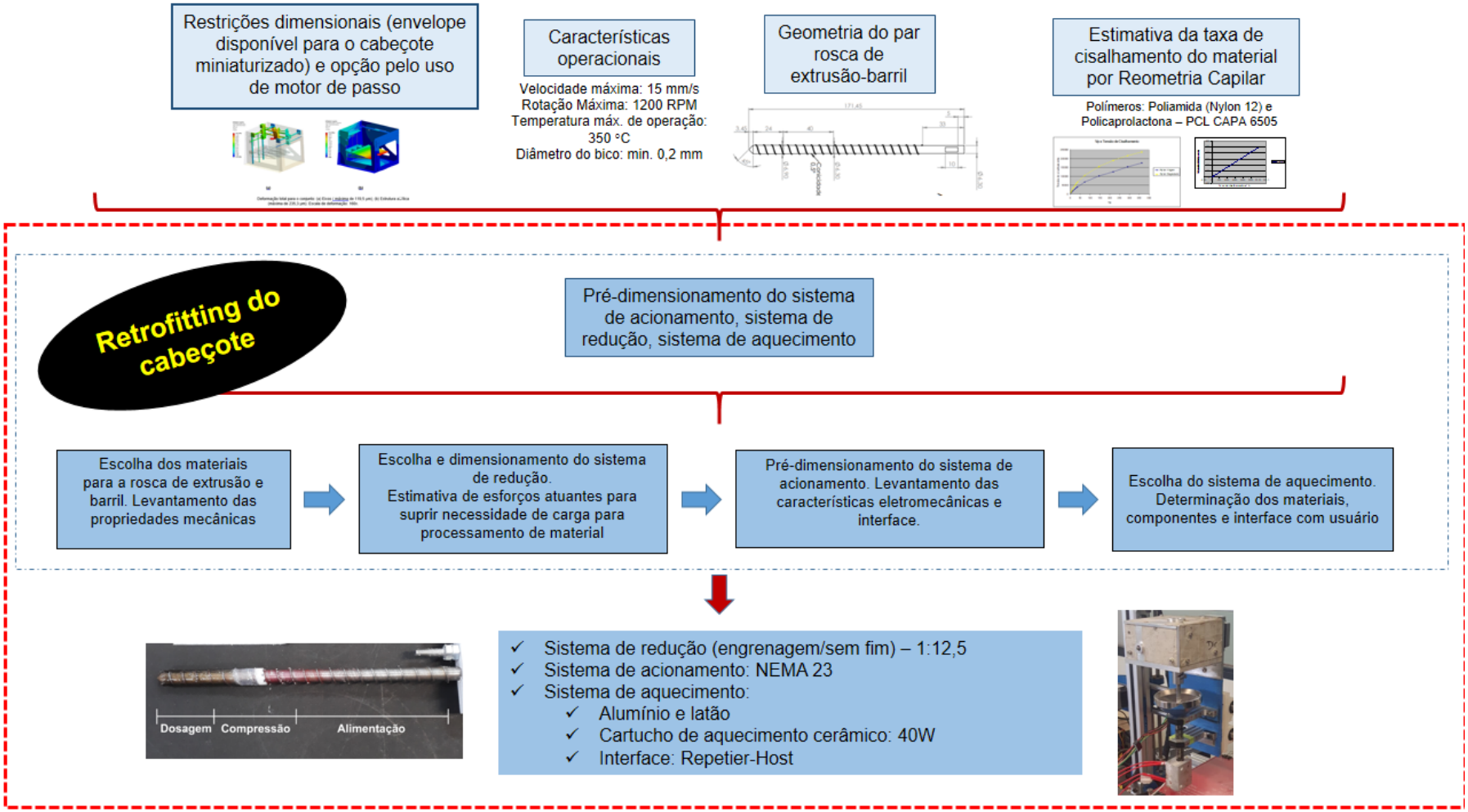
Tabela 5 - Propriedades do PP CP141

Característica	Unidades	Valores
Índice de fluidez (230ºC/2,16kg)	g/10 min	43
Densidade	g/cm^3	0,9
Resistência à tração no escoamento	MPa	26
Temperatura de amolecimento Vicat a 10N	ºC	149

Fonte: Adapatado de Braskem (2018)

O CP141 revela alta produtividade (ciclo rápido), boa processabilidade e resistência ao impacto em baixas temperaturas, além de ótimo balanço rigidez/impacto. E, sua temperatura de transição vítrea e de fusão gira em torno de aproximadamente, -18ºC e 146ºC respectivamente.

Figura 47 – Fluxograma do projeto de pesquisa do cabeçote intercambiável de extrusão por rosca simples.



Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Preparação do material para testes

A preparação do material, PP, para processamento no cabeçote de extrusão, deve se encontrar sob a forma de partículas menores que pellets, preferencialmente com granulometria controlada de modo a evitar variações desmedidas da densidade do material.

À vista disso empreendeu-se a transformação do material, que originalmente se encontrava no formato de pellets. O PP foi fracionado em porções de, aproximadamente 10g, imerso em nitrogênio líquido e moído. Para esta tarefa se fez uso de um moinho da marca IKA modelo A11, até sua transmutação em forma de pó. Este material, posteriormente, foi levado à estufa para secagem a 80 graus por 4 horas e, em seguida, peneirado em tamis de 1000, 710, 600, 300, 180 e 74 µm.

Para a aplicabilidade desejada no cabeçote optou-se pelo emprego do material com granulometria entre 600 e 300 µm devido à altura do filete de rosca de 0,7mm na zona de alimentação e 0,4mm na zona de dosagem.

O copolímero Polipropileno, CP141 (Braskem, Brazil), foi pulverizado em um moinho criogênico Mikro-Bantam, da Micro Powder Systems, após imersão em nitrogênio líquido. Em seguida os pós constituídos por partículas na faixa entre 300 a 600 micrometros foram aplicados.

5.1.2 Caracterizações termoanalíticas do Polipropileno (PP)

O PP puro foi caracterizando utilizando técnicas de espectrometria no infravermelho e de reometria de placas paralelas.

Posteriormente ao processamento do material por extrusão o mesmo foi analisado empregando Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), MEV e Microscopia Ótica.

5.1.2.1 Reometria de placas paralelas

A reometria rotacional com placas paralelas foi empregada com o intuito de analisar o comportamento do polímero amolecido a reduzidas taxas de cisalhamento. Para esta tarefa se utilizou um reômetro ARES-G2, de fabricação da TA Instruments,

equipado com placas de 25 mm de diâmetro separadas em 1 mm. Em seguida, a taxa de cisalhamento foi avaliada no intervalo de 1 s^{-1} a 200 s^{-1} em temperaturas de 180°C, 200 °C e 220 °C em atmosfera de N_2

5.1.2.2 FTIR

As análise de infravermelho foram processadas em um aparelho IRAffinity 1, de fabricação da Shimadzu, cujo sistema óptico compreende a faixa entre 550 a 4000 cm^{-1}. Estas possibilitaram a obtenção de espectros via refletância total atenuada (ATR) em filmes poliméricos obtidos pela prensagem a quente de amostras do PP virgem e do material submetido ao processo de extrusão. No total analisou-se 10 amostras.

5.1.2.3 DSC

As medições foram efetuadas com equipamento DSC Q100 da TA Instruments, usando amostras de 7,05mg de material. Este foi submetido a um ciclo de aquecimento de 10°C/min de 25°C até 400°C. Os procedimentos ocorreram com arraste de N_2 recorrendo a duas panelinhas de alumínio herméticas (uma contendo amostra do material e outra como referência vazia).

5.1.3 Preparo da amostra para MEV:

Processou-se a análise de mistura da rosca mediante PP adicionado manualmente com talco industrial (VI Fiberglass) na proporção de 10% em peso. Amostras do filamento foram coletadas e em seguida fragmentadas pela imersão em nitrogênio líquido. Posteriormente, as mesmas foram revestidas com ouro e submetidas à análise por MEV fazendo uso do equipamento Leo 440 (Zeiss, Alemanha).

Empregou-se MEV com o propósito de analisar, ainda que qualitativamente, a capacidade de distribuição e dispersão do cabeçote.

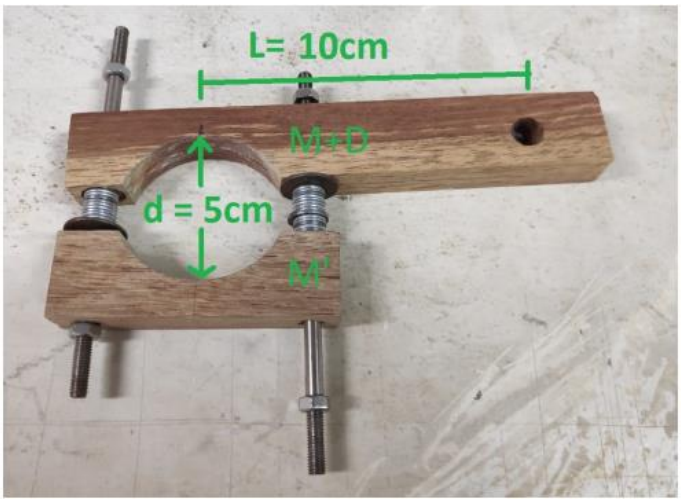
5.2 Análise de vazão

A fim de verificar a capacidade de extrusão do cabeçote foram selecionadas quinze amostras com duração de um minuto submetidas a três níveis distintos de velocidade de rotação e de temperatura, sendo posteriormente, pesadas em uma balança de precisão com o intuito de se obter a vazão do cabeçote nas diferentes configurações supracitadas.

5.3 Freio de Prony

Com o propósito de se proceder a determinação da curva de torque do motor de passo para diferentes valores de rotação recorreu-se ao método do freio de Prony. Este método faz uso de um volante acoplado ao eixo do motor que rotaciona em velocidade constante à medida que se aplica uma força em sentido contrário de modo a freia-lo. Este procedimento conduz ao equilíbrio de forças até que seja interrompido o movimento completamente, obtendo-se, por fim, o torque gerado pelo motor (BRUNETTI, 2012). O sistema, confeccionado por Ito (2020), é mostrado na figura 48.

Figura 48 - Freio de Prony para levantamento da curva de torque

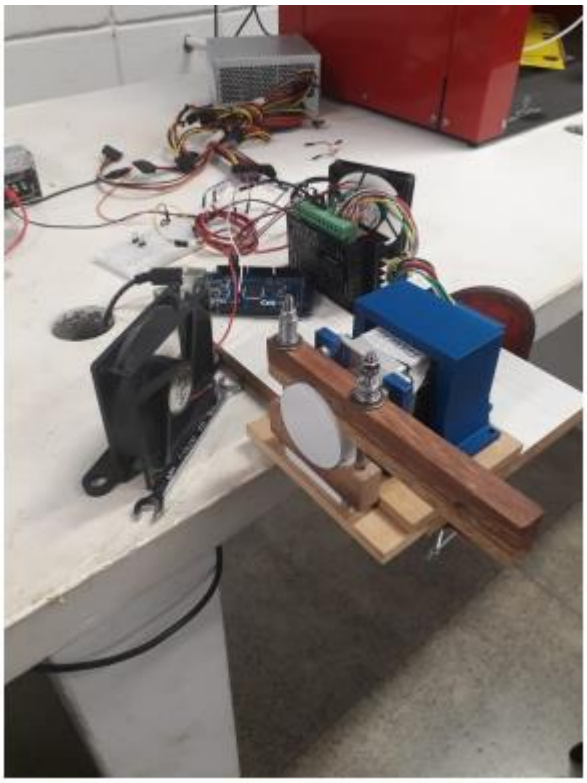


Fonte: Ito (2020)

O procedimento consistiu em dispor dois blocos de madeira para servir como sapatas de freio (M e M'), sendo uma delas confeccionada agregando a alavanca de freio (D). E, o volante sendo instalado no centro destes blocos tem a possibilidade de

rotacionar livremente, sendo realizados ajustes de contato por dois parafusos posicionados nas extremidades do bloco M'. Na extremidade da alavanca, M+D, é aplicada a carga a qual é a responsável por interromper a movimentação do volante. O sistema experimental é ilustrado na figura 49.

Figura 49 - Sistema experimental para levantemento da curva de torque



Fonte: Próprio autor

5.4 Análise térmica

Procedeu-se a análise térmica por intermédio de dois métodos com a finalidade de inspeção do perfil de temperatura ao longo do sistema e de pontos determinados em regiões relevantes.

5.4.1 Termografia

Com o objetivo de observar o gradiente de temperatura do sistema fez-se uso da câmera termográfica da marca FLIR Systems, modelo ThermaCAM T360 com capacidade de medição de temperaturas até 650ºC e precisão de ±2ºC.

O equipamento foi empregado para análise do sistema, simulando condições de operação na identificação do gradiente de temperatura.

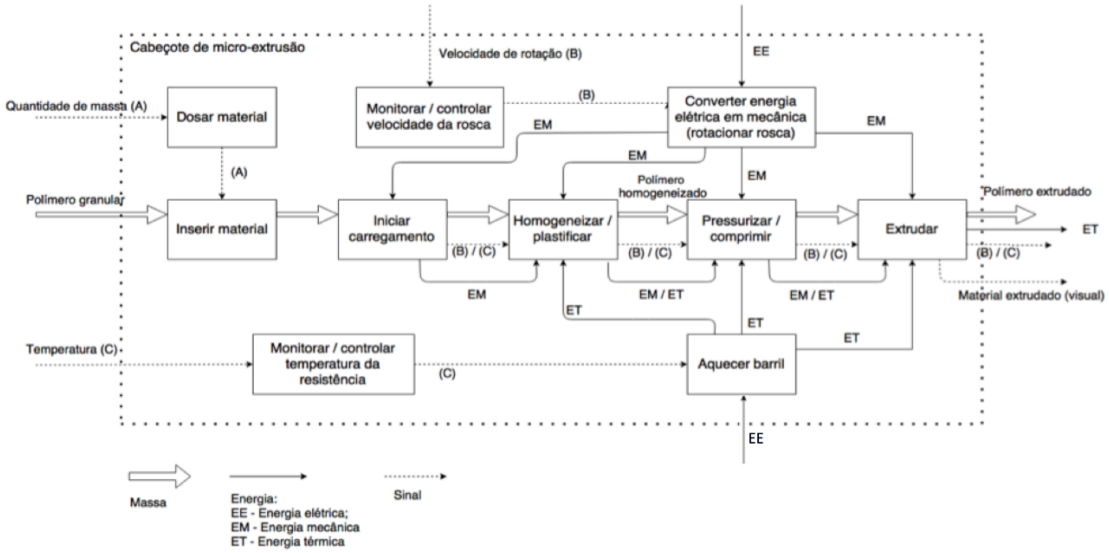
5.4.2 Termistor

Termistores do tipo NTC 100K (*Negative temperature coeficient*) foram empregues a fim de proceder a análise das temperaturas em pontos específicos do cabeçote. Esta ferramenta se mostra extremamente sensível às variações de temperatura e faixa operacional compreendidas entre -40ºC e 270ºC. O emprego destes sensores ocorreu em regiões internas a peças ou locais diminutos onde a câmera térmica não era capaz de realizar medições.

6 Aprimoramento e desenvolvimento do projeto do cabeçote dentro do conceito de *Open Design* e *Open Manufacturing*

A metodologia de projeto permite que, por meio de técnicas específicas, um problema complexo possa ser sistematicamente estudado, incluindo o uso de linguagem semântica que confere funções neutras a cada item que o constitui. O diagrama Matéria-Energia-Informação (MEI) é uma dessas técnicas, cuja estrutura foi "emprestada" da nomenclatura da engenharia de software e tem como objetivo gerar a visualização de um sistema técnico, descrita em funções com linguagem neutra, com entradas e saídas de fluxos de energia, matéria e informação, permitindo maior objetividade em se identificar regiões de aprimoramento (PAHL *et al.*, 2007, ROZENFELD *et al.*, 2006). A Figura 50 mostra o MEI do mini cabeçote de extrusão que facilitou as melhorias técnicas de seus subsistemas.

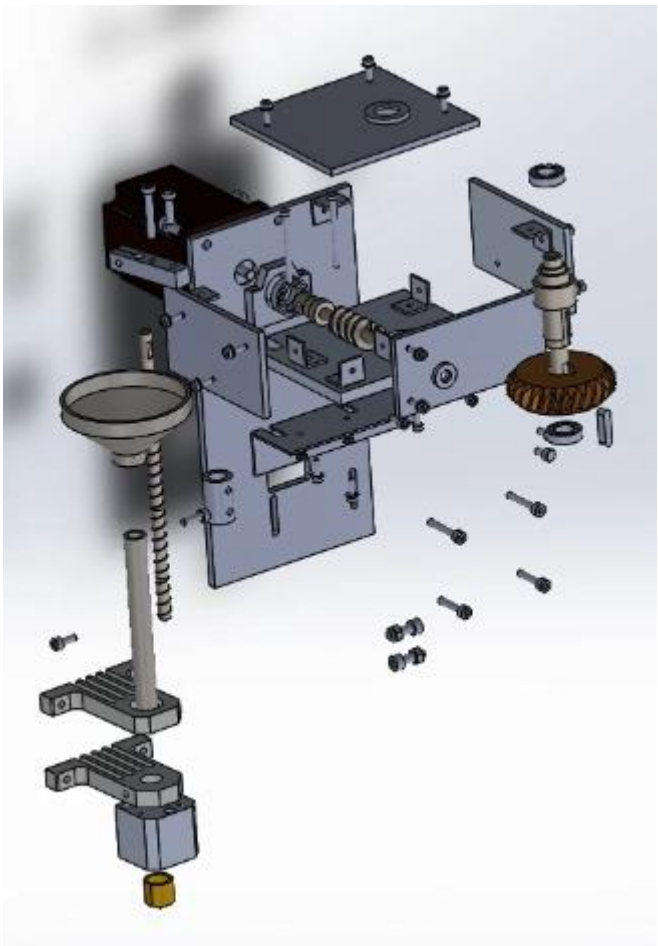
Figura 50 – Diagrama MEI do cabeçote de extrusão.



Fonte: Chiaroni (2018)

O projeto pretendeu, além do retrofiting do equipamento, o aprimoramento em questões de usinabilidade e substituição de componentes. Para tal, o mesmo foi fragmentado em subsistemas para facilitar seu desenvolvimento sendo estes: barril e parafuso de extrusão, sistema de redução, sistema de acionamento e sistema de aquecimento. A figura 51 mostra uma representação computacional em vista explodida do cabeçote.

Figura 51 - Vista explodida do modelo computacional do cabeçote na versão atual



Fonte: Próprio autor

6.1 Subsistema barril-rosca

O pré-dimensionamento do par barril-rosca foi mantido em função dos resultados atingidos nos trabalhos de aplicação realizados em parceria com grupos de pesquisa do Departamento de Engenharia de Materiais da Unicamp (DÁVILA et al, 2015; DÁVILA et. *al* 2016); do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP (BARBOSA, 2018; CUNHA et al. 2019) e dos resultados obtidos em Inforçatti Netto (2013); Silveira *et al. (*2014); Freitas (2014) e Chiaroni e Silveira (2019). É possível, então, expandir o estudo para avaliação preliminar da capacidade de mistura do cabeçote miniaturizado empregando o conceito de projeto customizado.

Para o dimensionamento do parafuso de extrusão adotaram-se alguns dos parâmetros geométricos adotados por Freitas (2011, 2014) enquanto outros foram

adaptados para fabricação por usinagem convencional. Dentre esses parâmetros pode-se destacar o diâmetro do parafuso nas seções de alimentação e extrusão, altura do filete de rosca, relação L/D, comprimento da rosca em cada seção, dentre outros. Os parâmetros referidos foram elencados na tabela 2 e na figura 39 é retratado um desenho técnico com as principais dimensões.

A fabricação das roscas de extrusão foi executada mediante a elaboração de um programa CNC com auxílio da Oficina Mecânica do Instituto de Física de São Carlos (SVOFMEC) – USP, de modo que outras unidades do componente (Figura 52) pudessem ser confeccionados futuramente.

Figura 52 - Roscas de extrusão confeccionadas em equipamento CNC

Fonte: Próprio autor

O parafuso de extrusão foi confeccionado em aço SAE 4340 cujas propriedades mecânicas são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades do aço SAE 4340

Parâmetros	**Valores de referência**
Densidade	7,85 g/cm^3
Tensão de Escoamento	862 MPa
Limite de resistência à tração	1282 MPa
Módulo de Young	200 GPa

Fonte: Adaptado de Matweb (2022)

É passível de verificação algumas condições de resistência do componente aos esforços aos quais estará submetido. Segundo Rauwendaal (2014) a tensão de cisalhamento, rotação crítica e profundidade máxima do canal na zona de alimentação estão entre os mais críticos, sendo estes calculados para a geometria e material escolhidos ao projeto conforme as equações 18, 19 e 20.

- Tensão de cisalhamento

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi R^3} = 290MPa \tag{18}$$

- Profundidade máxima do canal de alimentação

$$H_{max} = \frac{1}{2}D - \left(\frac{2T}{\pi\tau_a}\right)^{\frac{1}{3}} = 0{,}965mm \tag{19}$$

- Rotação crítica

$$N_w = 0{,}88\frac{D}{L^2}\left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = 1784{,}3\text{rpm} \tag{20}$$

Comparando os valores acima calculados com os correspondentes informados na tabela 2 e tabela 3 conclui-se que o componente contém dimensionamento adequado para utilização. Ressalta-se que a velocidade de rotação crítica evidencia valor muito elevado para o emprego no processo de extrusão, sendo assim, não há ameaça de rompimento do componente por conta de rotação.

O barril, peça dentro da qual o material polimérico é processado, foi desenvolvido contemplando as principais dimensões da rosca de extrusão, ou seja, seu comprimento e diâmetro externo. Assim, o mesmo foi projetado com comprimento total de 144 mm, diâmetro interno de 7,7mm e diâmetro do silo (funil) de 65,7mm (figura 53). Com estas dimensões especificadas, há a possibilidade de calcular a

massa de material comportada pelo reservatório e pela região interna do barril sendo estas de aproximadamente, 10g e 1,1g respectivamente.

Figura 53 - Barril e bico extrusor

Fonte: Próprio autor

Cabe ressaltar de que a folga entre o diâmetro interno do barril e o externo da rosca deve ser reduzida de modo a evitar a ocorrência de fluxo de vazamento o qual ocasiona retorno de material entre os filetes da rosca.

O silo e barril foram concebidos de maneira a torná-los modulares sendo, então, acoplados por união roscada o que viabiliza a desmontagem constante e manutenção e, principalmente, a manufatura (Figura 54 (a)).

O cabeçote descrito por Freitas (2011, 2014) e Inforçati Netto (2013) mostra as peças constituintes do conjunto barril unidas por junção soldada (Figura 54 (b)).

Figura 54 - Comparativo entre barris do cabeçote: (a) atual projeto; (b) projeto original.

(a) (b)

Fonte: Próprio autor

Na tabela 7 constam os principais parâmetos do aço inox AISI 304 e os seus valores de referência.

Tabela 7 - Propriedades do aço inox AISI 304

Parâmetros	**Valores de referência**
Densidade	8,00 g/cm^3
Tensão de Escoamento	215 MPa
Limite de resistência à tração	505 MPa
Módulo de Young	193 GPa
Condutividade térmica	16,2 W/mK

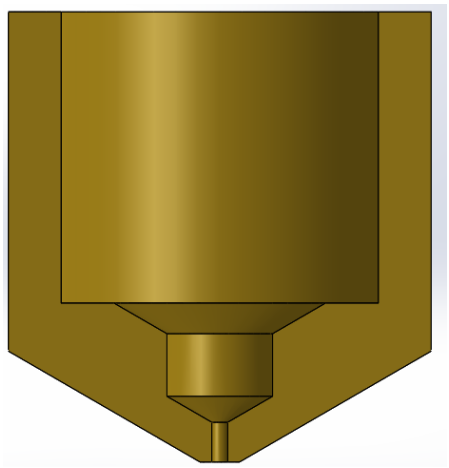
Fonte: Adaptado de Matweb (2022)

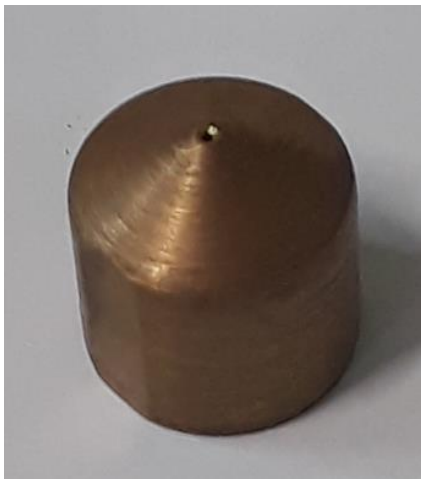
O bico de extrusão foi confeccionado em latão para favorecer a troca de calor e manter o polímero aquecido enquanto este se desloca pelo canal da rosca de extrusão até sua saída. Além disso, internamente, o canal de extrusão tem redução

de diâmetro se processando em etapas de maneira a causar decaimento da pressão e aumentando o fluxo de material (HOPMANN; MICHAELI, 2016).

Na figura 55 são mostradas imagens do bico manufaturado e sua seção em corte evidenciando as regiões escalonadas do diâmetro. Esta abordagem permite ao usuário utilizar bicos com diferentes diâmetro, assim como ocorrem em equipamentos de manufatura aditiva comerciais, oferecendo a possibilidade de fazer uso de materiais com carregamento, por exemplo, cerâmico e metálico com grandezas diversas de grão.

Figura 55 - Bico do cabeçote de extrusão. (a) vista em corte; (b) peça usinada em latão





(a) (b)

Fonte: Próprio autor

6.2 Subsistema de acionamento: levantamento da curva de torque e calibração do motor de passo.

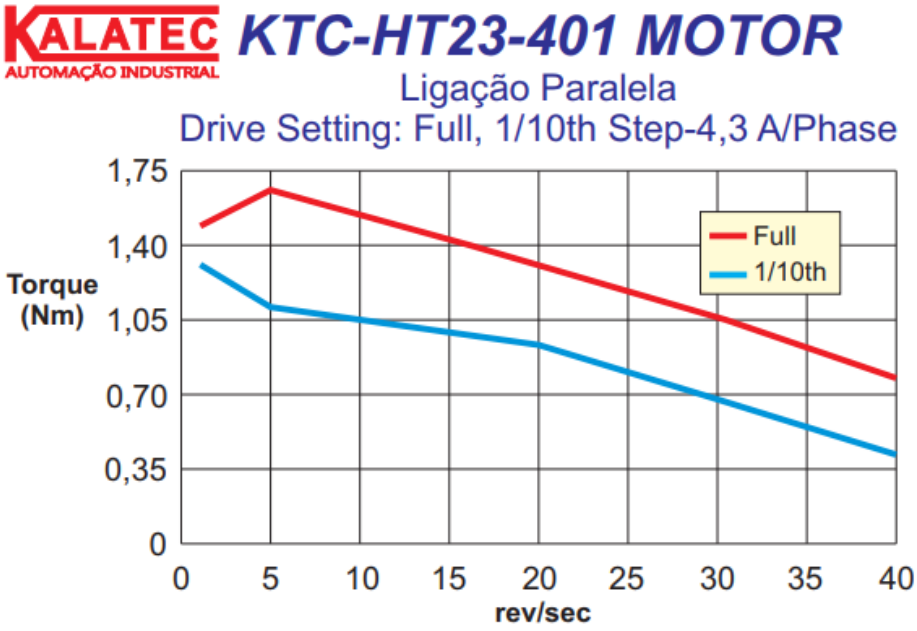
Freitas (2011) concluiu que, para o processamento de Policaprolactona (PCL), o torque necessário no parafuso de extrusão é de 20Nm. Assim, o dimensionamento do sistema de redução e a escolha do motor para acionamento decorre de modo concomitante a fim de atender aos requisitos do sistema.

Um dos principais requisitos do projeto concerne à dimensão disponível no envelope de trabalho do equipamento, visto que o cabeçote em questão é focado para

ser utilizado em plataformas de manufatura aditiva. Sendo assim, o motor deve ser capaz de fornecer valores de torque condizentes às faixas de operação almejadas favorecendo a utilização de componentes de dimensões reduzidas.

Assim, optou-se pelo motor de passo KTC-HT23-401, do tipo NEMA 23, de fornecimento da Kalatec pela capacidade de torque informada em seu *datasheet* como exposto na figura 56 procedendo-se a configuração de conexão das bobinas de forma paralela, sendo esta a que dispõem de maior capacidade de torque dentre as expostas.

Figura 56 - Curva de torque NEMA 23



Fonte: *Kalatec (2019)*

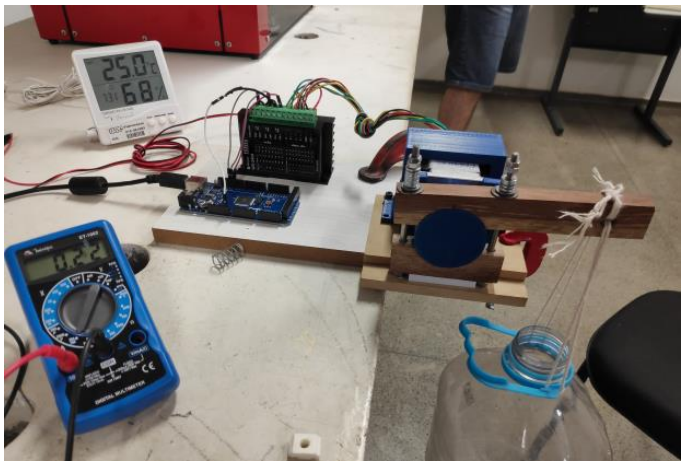
No transcorrer do processo de análise e seleção do motor informações de componentes de outros fabricantes foram analisados, dentre eles a Neomotion. Entretanto, observou-se que o perfil da curva de torque fornecido pela Kalatec não se assemelhava com o de outros fabricantes, assim como aquelas informadas na literatura (ACARNLEY, 2007).

Desta maneira, para verificar a veracidade das informações, se procedeu ao levantamento da curva de torque aplicando o princípio de freio de Prony como exposto por Ito (2020) e descrito no capítulo 4. Os parâmetros de configuração empregados

no teste foram os mesmos indicados pelo fabricante em seu datasheet, ou seja, operação em modo bipolar-paralelo.

O sistema experimental pode ser visualizado na figura 57. Durante a execução do teste, foram estabelecidas as velocidades de rotação do motor e aplicadas cargas de modo lento e gradativo na extremidade da alavanca até que ocorresse perda de sincronia nos passos do motor.

Figura 57 - Experimento para obtenção da curva torque vs. velocidade de rotação



Fonte: ITO, 2020

Água contida em uma garrafa presa à alavanca foi utilizada como carga para frenagem do motor. Após cada teste, a massa de material aplicado foi pesada e o torque correspondente calculado. Os dados obtidos no ensaio (velocidade de rotação, massa e torque do motor) são apresentados na tabela 8.

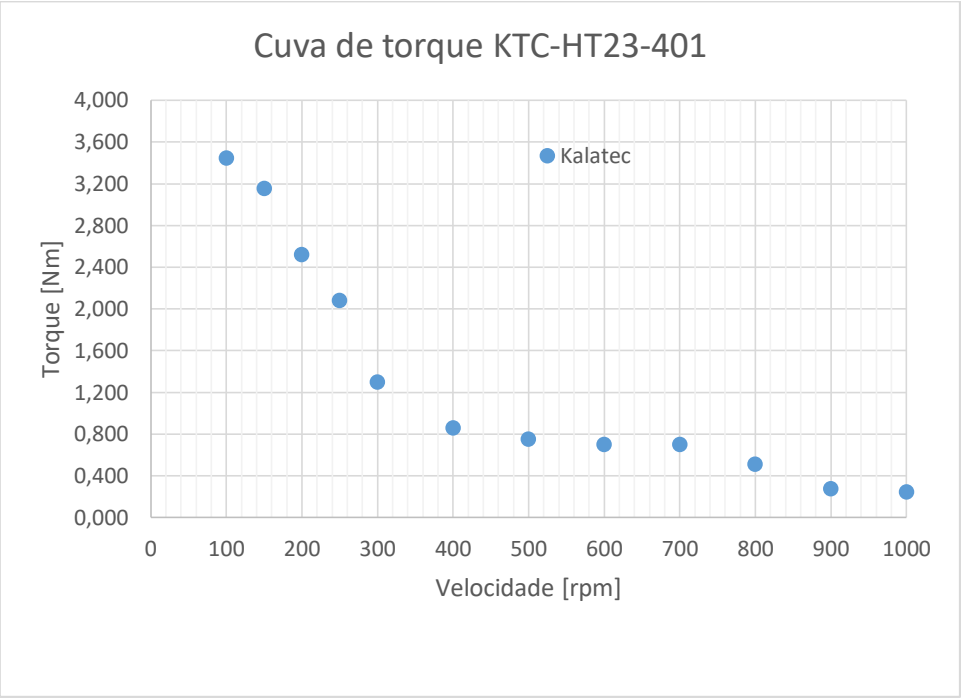
Tabela 8 - Dados experimentais do levantamento da curva de torque

Velocidade [rpm]	Massa [kg]	Torque [Nm]
100	3,513	3,446
150	3,218	3,157
200	2,567	2,518
250	2,119	2,079
300	1,324	1,299
400	0,874	0,857
500	0,766	0,751
600	0,712	0,698
700	0,714	0,700
800	0,519	0,509
900	0,282	0,277
1000	0,249	0,244

Fonte: Próprio autor

A partir dos dados presentes na tabela 8 plotou-se a curva de torque em função da velocidade de rotação do motor (figura 58).

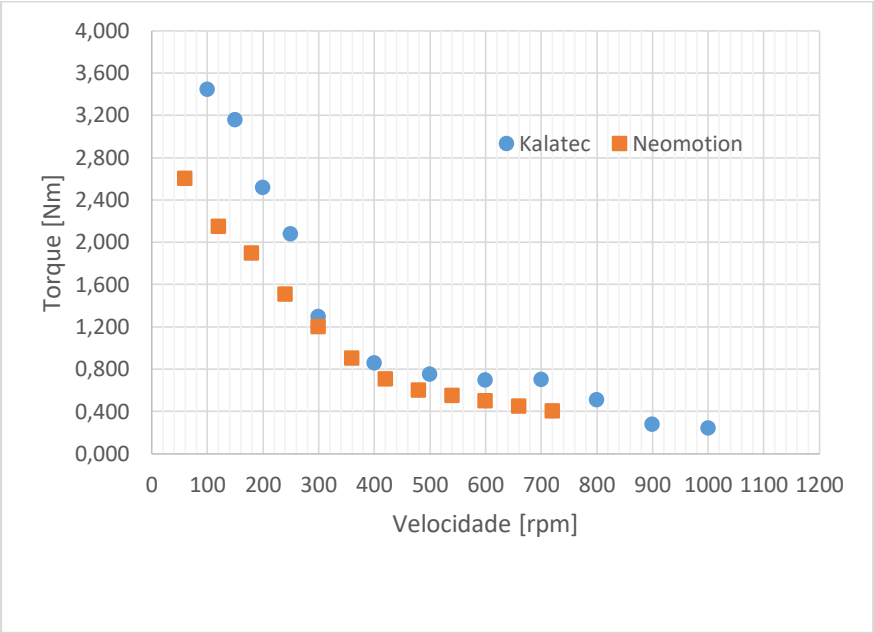
Figura 58 - Curva de torque levantada experimentalmente



Fonte: Próprio autor

Observa-se que o perfil de curva, assim como os valores de torque são muito diferentes quando comparados aos da figura 56. Para efeito comparativo, plotou-se a curva experimental obtida neste estudo com a curva do motor AK23/21F8FN1.8 de fabricação da Neomotion (Figura 59). Pode-se verificar que o perfil de curva dos dois motores se assemelham, ainda que os valores sejam discordantes, o que era previsto por sua semelhança às curvas características expressas na literatura (ACARNELEY, 2007).

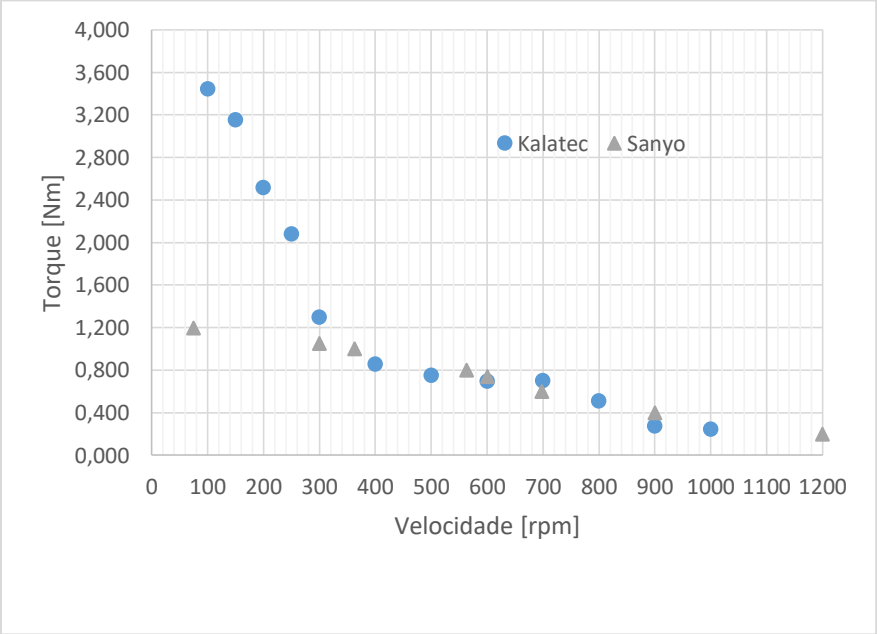
Figura 59 - Comparativo entre curva de torque dos motores de passo



Fonte: Próprio autor

Estabelecendo um comparativo, com o motor empregado por Freitas (2011) (marca Sanyo, modelo 103-H7126-1740), plotou-se as curvas de torque dos dois motores para condições análogas de operação (motor operando em 24V) (Figura 60). Informações a respeito do motor da Sanyo podem ser verificadas no anexo A.

Figura 60 - Comparativo entre curva de torque do motor Kalatec e Sanyo



Fonte: Próprio autor

Nota-se que na faixa entre 300 e 1000 rpm os valores são muito próximos, a maior discrepância ocorre em valores inferiores a 300 rpm. Tais informações oferecem respaldo para a utilização do motor, HT23-401 visto que o mesmo possui capacidade para suprir as necessidades do sistema. Estas considerações estão apoiadas nos trabalhos desenvolvidos anteriormente e previamente apresentados no capítulo 4.

6.3 Subsistema de redução de velocidade

A readequação do sistema de redução seguiu as premissas do projeto priorizando o aprimoramento de manufaturabilidade dispondo de processos de fabricação e materiais convencionais. A primeira versão manufaturada do sistema de redução descrita por Inforçatti Netto (2013) e Freitas (2014) foi confeccionada em liga de titânio (Ti6Al4V) por processo de manufatura aditiva de fusão em leito de pó – SLM (Figura 44).

A condição inicial para determinação do sistema de redução de velocidade do cabeçote foi estabelecida pela velocidade de rotação da rosca imprescindível para o processamento de material. A análise de Freitas (2014) e Chiaroni (2018) permitiram identificar que o sistema opera a velocidades reduzidas, condição primordial para a fabricação de corpos de prova.

Assim, aplicando-se a equação 9, a qual dispõem da relação entre torque e velocidade rotacional, calculou-se a velocidade de rotação necessária para o motor e o torque gerado na rosca de extrusão.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{T_2}{T_1} = Z \qquad (9)$$

Onde o subscrito 1 diz respeito ao motor de passo e 2 à rosca de extrusão

Procedendo a uma análise sucinta de relações de redução variando de 1:1 (acoplamento direto) até 1:20 (descrito em Freitas (2011, 2014) e Inforçatti Neto (2013)) para o incremento de torque, se identificou que na proporção de 1:12,5, determinando torque na rosca de 20Nm, é indispensável que o motor, viabilize, ao

menos 1,6 Nm; ainda, para a rosca rotacionar a 20 rpm e mantendo essa mesma relação de redução, o motor deve desenvolver velocidade de 250 rpm.

Examinando a tabela 8 e a figura 58, identifica-se que na rotação de 250 rpm o torque é de 2,079Nm, valor superior ao necessário, desta maneira, supre a demanda de operação do sistema para a aplicação pretendida.

Por conta do envelope diminuto do cabeçote optou-se pela utilização de sistema de redução do tipo parafuso sem-fim e coroa. Para execução do dimensionamento deste sistema lançou-se mão de roteiros de cálculo apresentados por Provenza (1991 e 1996) e pela norma AGMA 6022-C93 (1993) indicada para este tipo de aplicação.

O procedimento de cálculo deve levar em consideração dados do motor referentes à curva de torque vs. velocidade e sua faixa operacional devido à demanda de velocidade de rotação do sistema após redução na relação de transmissão.

Assim sendo, valendo-se da norma AGMA 6022-C93 que, além de outras informações, mostra a relação entre o ângulo de pressão e o número mínimo de dentes da engrenagem concomitantemente com os dados obtidos de torque do motor, pode-se indicar a redução necessária para a aplicação almejada simultaneamente com os parâmetros para dimensionamento do parafuso sem-fim e coroa.

As principais variáveis dos elementos supracitados são, então, o módulo, o número de dentes do parafuso sem-fim, número de dentes da coroa e o ângulo de hélice, a partir dos quais todas as características físicas são calculadas.

No entanto é indispensável conduzir verificação quanto aos tipos de materiais utilizados, características dinâmicas e esforços mecânicos. O roteiro de cálculo empregado é apresentados no apêndice D juntamente com um fluxograma (Apendice E) das etapas desenvolvidas no mesmo

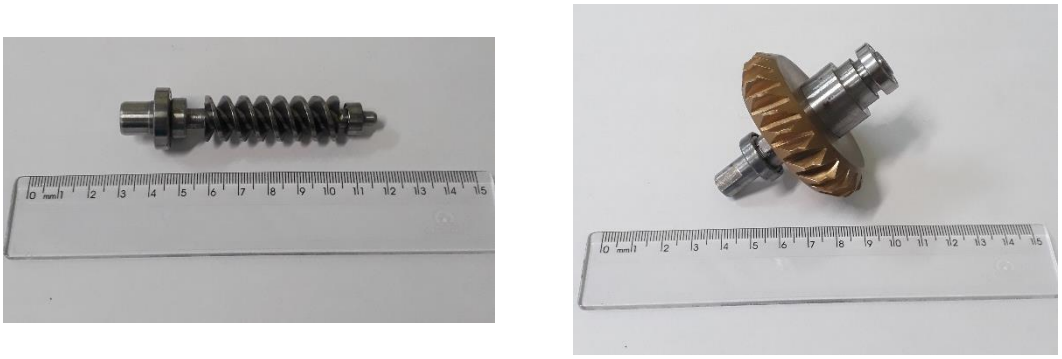
Assim, os principais dados construtivos do par coroa/parafuso sem-fim são apresentados na tabela 9 e as peças podem ser visualizadas na figura 61.

Tabela 9 - Parâmetros construtivos do par coroa/parafuso sem-fim

Parâmetro	Sem-Fim	Coroa
Módulo (m)	2	2
Número de dentes (z)	2	25
Ângulo de hélice (Beta)	20º	20º
Diâmetro primitivo (dp)	11,70 mm	53,21 mm
Diâmetro externo (de)	15,70 mm	57,21 mm
Material	Aço 4340 endurecido	Bronze TM-23

Fonte: Próprio autor

Figura 61 - Componentes do sistema de redução. (a) parafusp sem-fim; (b) coroa



(a) (b)

Fonte: Próprio autor

De acordo com Juvinal e Marshek (2013) na transmissão por engrenagens é desejável que um dos componentes demonstre maior dureza, geralmente o de menor tamanho por seus dentes mostrarem um número maior de ciclos de fadiga além de, apontarem, em geral, menor custo de manufatura.

Optou-se pelo emprego de aço SAE 4340 endurecido para o parafuso sem fim e bronze TM-23 para confecção da coroa devido às suas características como excelente resistência mecânica relacionada à quantidade de estanho em sua composição. Além disso, o material apresenta propriedades anticorrosivas e antifricção sendo indicado para confecção de, por exemplo, válvulas, mancais e coroas.

As principais propriedades mecânicas do bronze TM-23 são elencadas na tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do Bronze TM-23

Propriedade mecânica	Grandeza
Limite de resistência à tração	274,51MPa
Limite de Escoamento	156,86Mpa
Dureza Brinell	75 HB

Fonte: Adaptado de Imperio dos Metais (2022)

A figura 62 mostra o sistema de redução após executada sua montagem.

Figura 62 - Sistema de redução

Fonte: Próprio autor

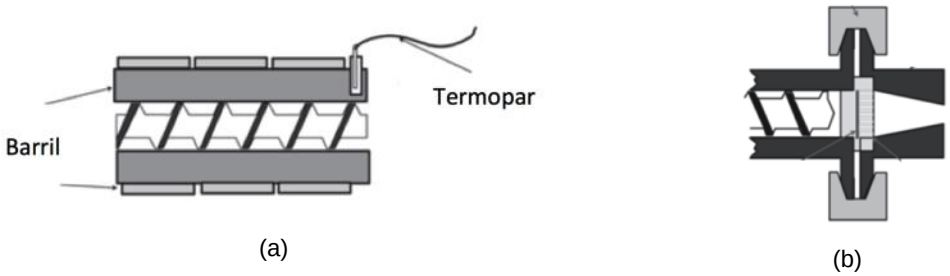
6.4 Subsistema de aquecimento

Como exposto anteriormente, durante o processo de extrusão, o monitoramento da temperatura é imprescindível, principalmente na região de homogeneização, a fim de se garantir a qualidade do material extrudado. A velocidade

de rotação da rosca é um parâmetro que se relaciona com outras funções como, por exemplo, a taxa de cisalhamento. Estes dois parâmetros exercem interferência direta nas propriedades reológicas dos diferentes materiais processados.

Portanto, a região de dosagem, bem como o bico extrusor (figura 63), devem contar com o monitoramento constante de temperatura evitando, assim, que grandes variações desta interfiram no processamento.

Figura 63 - Zonas de interesse para estudo térmico. (a) Zona de homogeneização; (b) matriz (bico)

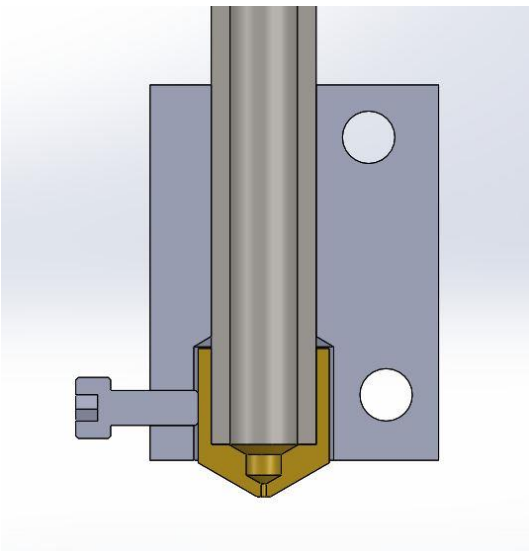


Fonte: Adaptado de Giles Junior, Wagner Junior e III (2005)

O sistema de aquecimento e monitoramento de temperatura foi projetado recorrendo a utilização de componentes comerciais comumente empregados em equipamentos de impressão 3D.

A região do cabeçote em que o aquecimento se faz necessário inclui as zonas de compressão e dosagem da rosca de extrusão, e o bico extrusor do barril. A vista disso, optou-se pela usinagem de um bloco em alumínio o qual envolve o corpo de extrusão do barril correspondente às regiões supracitadas como mostrado na figura 64.

Figura 64 - vista em corte do bloco de aquecimento do cabeçote de extrusão



Fonte: Próprio autor

O bloco de aquecimento é dotado de dois nichos para acondicionamento de cartuchos de aquecimento cerâmico de 40W e dois termistores do tipo NTC 100K, os quais são responsáveis pelo aquecimento e medição de temperatura respectivamente (figura 65 (a) e (b)). Estes componentes exibem tamanho diminuto e faixa operacional até 270ºC.

Figura 65 - (a) Cartucho cerâmico 40W; (b) Termistor NTC 100K

(a) (b)

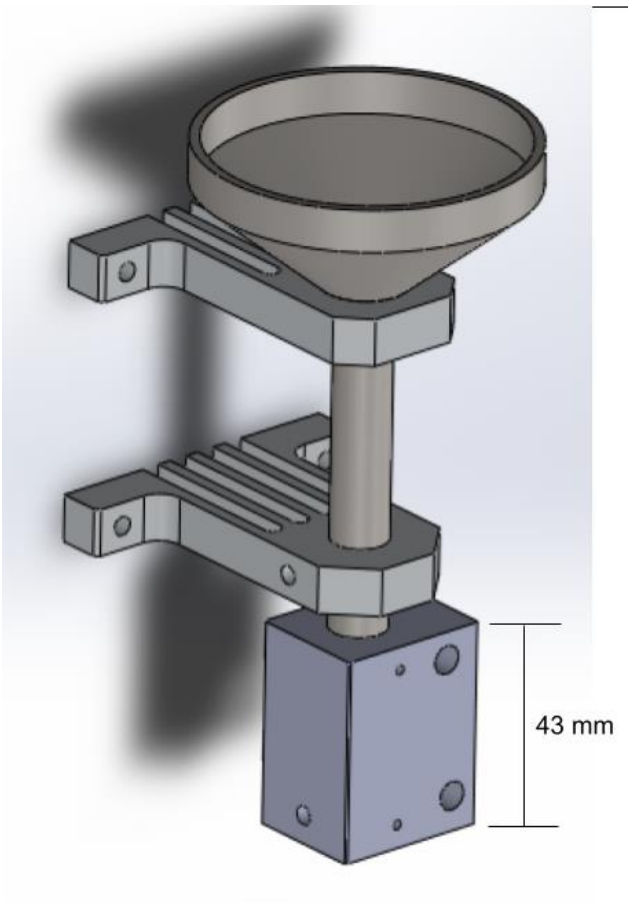
Fonte: Adapatado de (a) Impactocnc (2022) e (b) Filipeflop (2022)

A interface de controle para a utilização deste sistema é processada pelo emprego do software Repetier Host desenvolvido pela Hot-World GmbH & Co. Kg,

sediada na Alemanha (REPETIER, 2022). Neste programa o usuário pode, além de determinar as temperaturas de aquecimento, monitorar as curvas de temperatura para até três termistores e proceder à calibração do sistema PID a fim de evitar grandes oscilações no sistema.

De modo a impedir que o calor gerado na porção inferior da rosca atingisse a zona de alimentação e o silo, duas aletas fabricadas em alumínio, as quais também demonstram função estrutural, foram posicionadas no sistema como pode ser visto na figura 66.

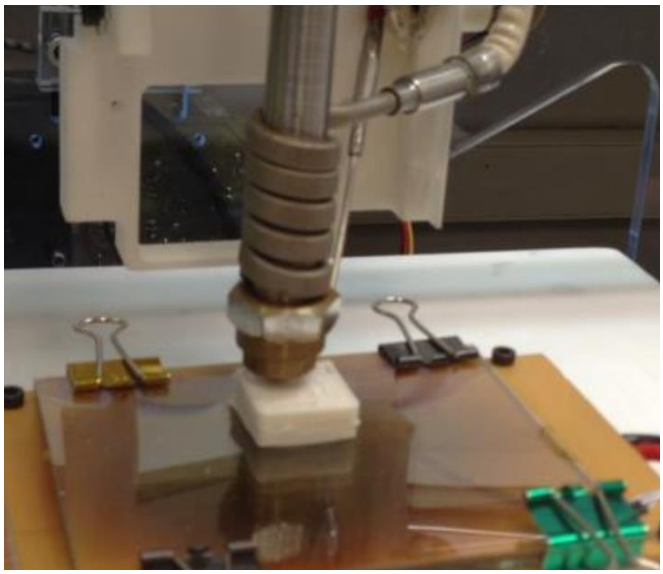
Figura 66 - Representação tridimensional do barril montado com suportes aletados



Fonte: Próprio autor

Como exposto por Chiaroni (2018), o sistema anterior faz uso de uma resistência elétrica microtubular dotada de temopar tipo J interno enrolada ao longo do barril até a região de interface com o bico extrusor como mostrado na figura 67 Entretanto, neste tipo de abordagem não se garante que o contato entre as superfícies intercorra de modo eficiente contribuindo para a troca de calor entre as superfícies.

Figura 67 - Sistema de aquecimento do projeto original (Resistência helicoidal).



Fonte: Inforçatti Neto(2013)

Procedendo a um breve comparativo entre os dois sistema pode-se salientar que a escolha por um bloco de aquecimento, o qual encapsula o barril garantindo mínima folga entre as duas peças contribui para a transferência de calor, evitando perdas para o ambiente. Além de que Freitas (2014) menciona que embora as aletas fossem confeccionadas em liga de titânio Ti6Al4V, material este de difícil manufatura e com condutividade térmica diminuta, estas não representam grande contribuição para dissipação de calor.

Chiaroni (2018) aponta que para que o sistema atingisse 60ºC, a temperatura da resistência elétrica deveria ser configurada no valor de 90ºC. Assim a opção por manter o barril e bico internos ao bloco de aquecimento sugere melhoria no desempenho e minimização de perdas.

Na tabela 11 podem ser visualizadas algumas propriedades térmicas dos componentes do barril, bico extrusor, bloco de aquecimento e aletas (de ambas versões do cabeçote)

Tabela 11 - Propriedades térmicas dos diversos materiais empregados no sistema de aquecimento do cabeçote

Componente e Material	Densidade [kg/m^3]	Condutividade Térmica [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]
Barril e funil Aço inox 304	7750	15,1	480
Suporte aletado (Ti6Al4V)	4430	6,7	526,3
Suporte aletado (Alumínio 5052)	2680	138,1	962,96
Bico Bronze (90% Cu, 10% Sn)	8200	76	435
Bico latão (Liga C 360)	8500	113,04	376,8

Fonte: Adaptado de Termomecanica (2021) e Ggdmetals (2021)

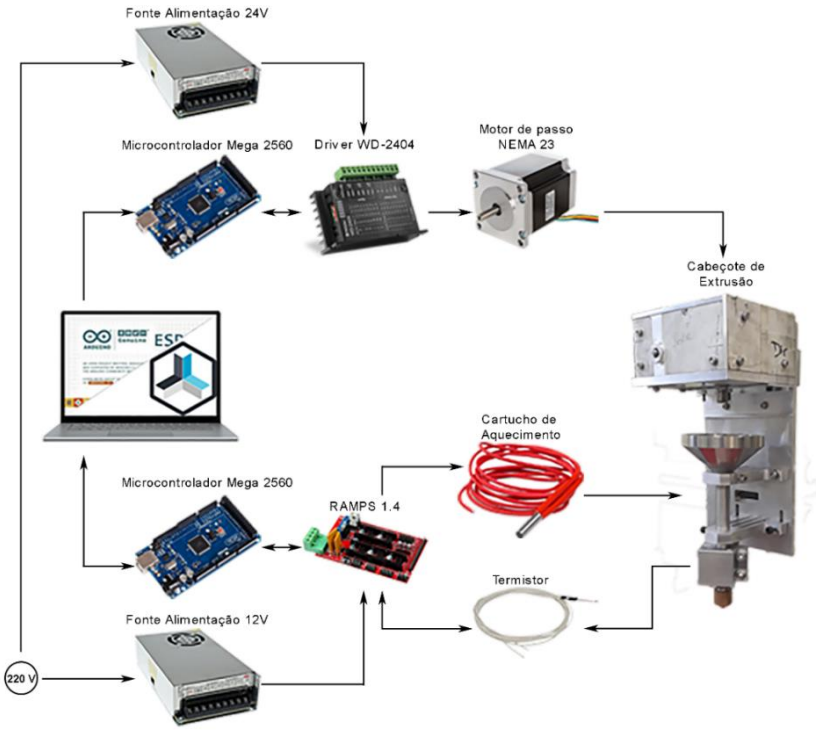
Analisando os dados da tabela 11 pode-se notar que a utilização de alumínio para o bloco de aquecimento e suportes aletados (em comparação à liga de titânio) demonstra maior contribuição no que se refere à distribuição e homogeneização da temperatura.

7 Montagem do protótipo funcional do cabeçote vertical de extrusão

A proposta inicial do projeto de pesquisa a partir do uso de cabeçotes intercambiáveis, apoiado, sobretudo, no emprego de roscas de extrusão cônica com perfil de compressão, foi utilizar componentes comerciais de fácil aquisição. O projeto teve como foco a montagem e manutenção do equipamento, seu aprimoramento técnico e avaliação de seu desempenho. Sendo esta reforçada pelo conceito *"open"* compreendendo desde seu design até o hardware.

Para facilitar o entendimento do sistema, a figura 69 mostra um diagrama de funcionamento do cabeçote apontando todos os elementos presentes e quais se conectam entre si, os quais são apresentados nas seções subsequentes. As setas na figura indicam o sentido no qual o sinal é transmitido.

Figura 68 - Diagrama de funcionamento do sistema



Fonte: Próprio autor

O sistema de acionamento de extrusão do cabeçote monorosca opera de modo desacoplado do sistema de aquecimento, condição esta que exige o uso de duas placas microcontroladoras.

Para controle do acionamento do motor empregou-se a placa microcontroladora Mega 2560 e o driver WD-2404, da fabricante Wotion, indicado para utilização em motores de passo NEMA 23 sendo o controle executado pelo software Arduino IDE com rotina implementada para esta aplicação específica.

O controle e monitoramento do aquecimento do barril, necessário para a ocorrência da plastificação do polímero, foi empreendido pelo emprego da placa Mega 2560, *shield* RepRap Arduino Mega Pololu Shield (RAMPS) 1.4, dotado da capacidade de controlar todo o conjunto eletrônico de impressoras 3D incluso o aquecimento, cartuchos cerâmicos e termistores NTC 100K. Além destes, utilizou-se o firmware Marlin de código aberto e o software Repetier Host para interface com usuário.

7.1 Microcontrolador Mega 2560

A placa Mega2560 utiliza microcontrolador ATmega2560 sendo amplamente empregada no segmento de manufatura aditiva, principalmente no âmbito de impressoras de custo reduzido e naquelas baseadas no projeto Fab@Home (MALONE; LIPSON, 2007). Além do exposto, este componente é amplamente utilizado em projetos de robótica e eletrônica embarcada pela robustez e capacidade de operações para projetos.

Para controle e acionamento do motor NEMA23 emprega-se rotina computacional para determinação da velocidade de rotação juntamente com o software ArduinoIDE (Apendice C).

7.2 Driver WD2404

A utilização de motores de passo é diretamente atrelada ao uso de drivers para o correto controle de corrente elétrica, velocidade e precisão. Neste projeto empregou-se o driver WD-2404 da fabricante Wotion em conformidade aos requisitos de operação indicados pelo fabricante do motor.

Dentre as características deste driver destacam-se: a possibilidade de utilização em motores de 2 e 4 fases, tensão de alimentação entre 9V e 42V, proteção contra sobre tensão, 6 configurações de micropassos e 8 para corrente de saída selecionáveis.

Na atual aplicação o driver foi configurado com corrente elétrica na faixa de 3,5 a 4,0A, ½ micropassos e 400 pulsos por revolução.

A conexão entre a placa mega2560, driver e motor é executada de acordo com o indicado na tabela 12 contendo orientação sobre a seleção de pinos a serem utilizados

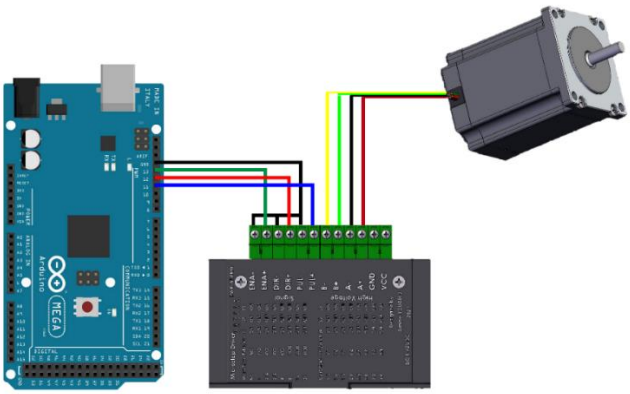
Tabela 12 - Pinos utilizados para conexão entre os componentes eletrônicos

Driver WD2404	Mega2560	NEMA23	Fonte
Ena+, Dir-, Pul-	GND		
Pul+	11		
Dir+	12		
Ena+	13		
A+		Vermelho + Branco/Preto	
A-		Preto + Vermelho/Branco	
B+		Verde + Amarelo/Branco	
B-		Amarelo + Verde/Branco	
GND			COM
Vcc			V+

Fonte: Próprio autor

A figura 68 mostra a ligação entre placa mega2560, driver WD2404 e motor de passo NEMA23.

Figura 69 - Diagrama da ligação entre os componentes do sistema de acionamento



Fonte: Próprio autor

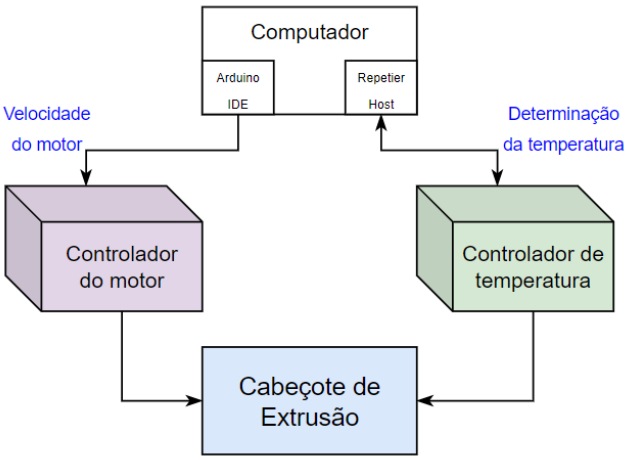
7.3 Módulo RAMPS 1.4 e Firmware Marlin

O RAMPS foi desenvolvido para estabelecer a interface com a placa Mega2560. A RAMPS 1.4 é dotada de conexões para motores de passo, drivers, displays, cartuchos de aquecimento, entre outros componentes empregados em impressoras 3D.

Para correta utilização do shield emprega-se o Firmware open-source Marlin o qual possui as rotinas de utilização, configurações pré-determinadas para os diversos componentes e sistemas de segurança em caso de falha. O Marlin é o *firmware* mais usado por sua capacidade de compatibilidade com diferentes configurações de montagem e movimentação de plataformas de impressão.

Na figura 70 pode-se visualizar um diagrama de blocos com os sistemas que compõe o cabeçote destacados assinalando os parâmetros de cada um destes para funcionamento.

Figura 70 - Diagrama de blocos com a síntese do sistema.



Fonte: Próprio autor

7.4 Breve análise de custo entre versões do cabeçote

Analisando os trabalhos desenvolvidos por Inforçatti Neto (2013), Freitas (2014) e Chiaroni (2018) foi possível identificar os componentes constituintes do sistema do cabeçote no que diz respeito a seus controladores, fonte de energia, drivers, entre

outros. Uma pequena comparação no tocante ao custo entre o modelo do sistema atual e o descrito pelos autores (denominado Fab@CTI) foi verificada a partir dos dados dos principais componentes e valor expressos na tabela 13.

A maioria dos componentes do sistema Fab@CTI são importados; sendo assim, os valores contidos na tabela foram convertidos para reais, desconsiderando-se taxas de importação. Nesta análise, ainda, foram desconsideradas os elementos mecânicos fabricados em ambos os sistemas decorrente da ausência de informações de seus valores, principalmente, nos fabricados por tecnologia de manufatura aditiva.

Tabela 13 - Valores aproximados dos componentes empregados nos cabeçotes (realizado em junho/2022).

Sistema	Componente	Quantidade	Valor Unitário (R$)
Fab@CTI	Driver NDC96	1	1229,30
	Motor de passo Sanyo Denki 103-H7126-1740	1	355,79
	Microcontrolador ARM LPC2148 ARM7TDMI	1	94,06
	Controlador de temperature Watlow Series 965	1	1646,31
Ambos	Fonte Chaveada 360 W 24V 15A	1	185,91
Atual	Placa microcontroladora MEGA 2560	1	189,00
	Shield RAMPS 1.4	1	63,90
	Termistor NTC 100K	1	11,90
	Cartucho de Aquecimento 12V 40W	2	11,95
	Motor de Passo Nema 23 HT23-401	1	167,00
	Fonte chaveada 360W 12V 30A	1	185,91

Fonte: Próprio autor

Constata-se que o sistema Fab@CTI mostra custo total dos componentes eletroeletrônicos de R$ 3.511,37 enquanto o presente sistema tem valor de R$ 827,52, o que corresponde a, aproximadamente, 23% do primeiro protótipo. Esta diferença se mostra relevante, principalmente, quando se refere à manutenção e substituição dos componentes, ou replicabilidade do sistema como um todo.

8 Calibração do protótipo

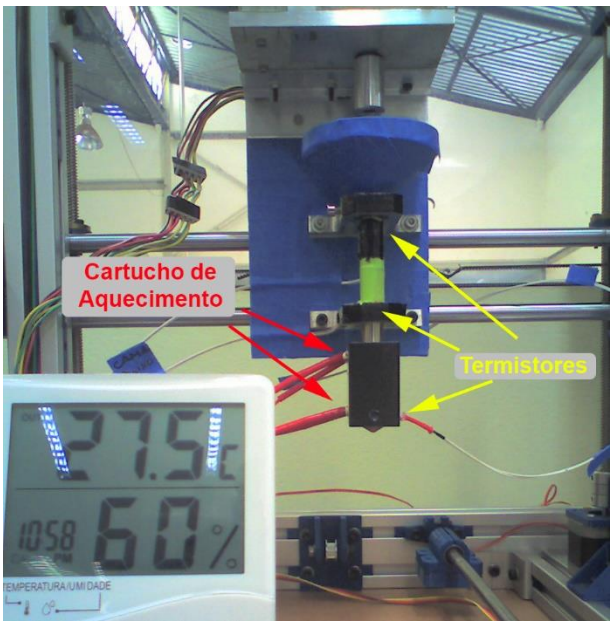
Neste capítulo são demonstrados os resultados procedentes dos processos de calibração e das avaliações preliminares do protótipo funcional do mini cabeçote de extrusão. A priori são relatados os dados alcançados por intermédio da análise térmica do cabeçote e a caracterização do polipropileno, e, em seguida a estes, são discutidos e elucidados os resultados auferidos no processamento de polímero pelo cabeçote.

8.1 Análise Térmica

Como exposto no capítulo 4 procedeu-se a análise térmica respeitando dois vieses um por imagens termográficas e outro pelo emprego de sensores.

Uma vez que os componentes do cabeçote foram fabricados em material metálico, alumínio e aço inox majoritariamente, suas superfícies evidenciam alto potencial de reflexividade. A vista disso e a fim de que as imagens termográficas pudessem ser executadas, as superfícies foram protegidas por fita de mascaramento azul, como pode ser observado na figura 71.

Figura 71 - Montagem experimental para análise térmica do cabeçote



Fonte: Próprio autor

Com o intuito de se obter resultados mais fidedignos, as superfícies a serem analisadas foram pintadas na cor preto fosco com tinta resistente a altas temperaturas Observa-se na figura que a região entre o bloco de aquecimento e a primeira aleta não está protegida, o fato decorre por questões de montagem estrutural. E, por outro lado já se antevê que possíveis análises a serem efetuadas nesta região não estarão retratando com fidedignidade os dados desejados.

O acionamento do aquecimento do sistema foi empreendido empregando-se o software Repetier Host o qual implementa o controle de temperatura pela acionamento dos cartuchos de aquecimento com resposta aferida por termistores.

O procedimento consistiu, inicialmente, em calibrar o sistema com o intuito de averiguar o tempo necessário para obtenção da temperatura alvo, sendo ela determinada em 200ºC. A interface gráfica do programa permitiu identificar que esta foi obtida em torno de 3 minutos após seu acionamento, entretanto, verificou-se que, ainda, ocorria oscilação significativa em torno da mesma exigindo que a fonte de alimentação ligasse e desligasse em intervalos periódicos, o que poderia configurar um problema em questões de durabilidade de componentes e na estabilidade do sistema.

De maneira a contornar esta situação se procedeu ao *auto-tuning* para ajuste do controlador PID identificando por valores das constantes proporcional, integrativa e derivativa de 80,65, 6,99 e 300 respectivamente. Esta configuração exerce ao sistema fornecimento permanente de potência para os cartuchos de aquecimento, por outro lado, evita que haja oscilação em torno da temperatura alvo proporcionando estabilidade térmica ao sistema.

Após a calibração inicial, procederam-se às análises térmicas do cabeçote de extrusão. Para verificar se os dados obtidos pelas imagens termográficas representariam valores próximos, ou exatos, aos do sistema, foram empregados 3 termistores anexados ao cabeçote como observado na figura 71. Para esta investigação, a temperatura de aquecimento foi configurada em 100ºC e o sistema mantido em regime por 15 minutos.

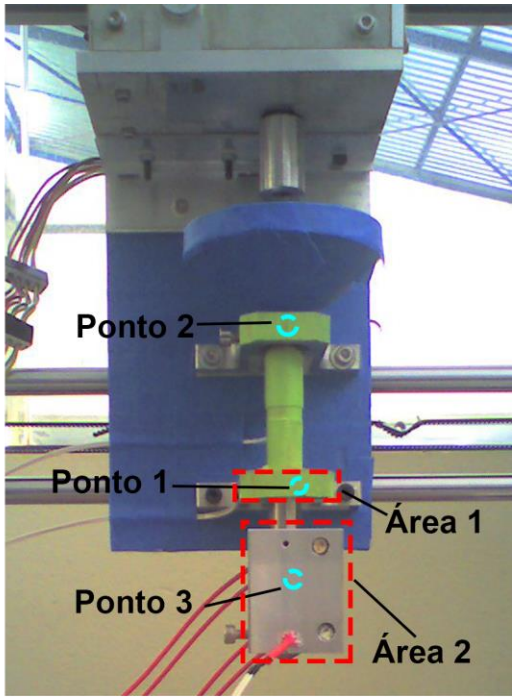
Procedeu-se a análise de 3 pontos e 2 regiões sendo os valores de temperatura mensurados em cada local indicado na tabela 14 e na figura 72 para a imagem termográfica e termistor.

Tabela 14 - Valores de temperature (ºC) medidos no cabeçote por dois diferentes equipamentos

Equipamento	Área 1	Área 2	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Termistor	49,74	100	49,74	34,58	100
Câmera	50,5	100	49,9	37,0	99,4
Variação [%]	1,53	0	0,32	7	-0,6

Fonte: Próprio autor

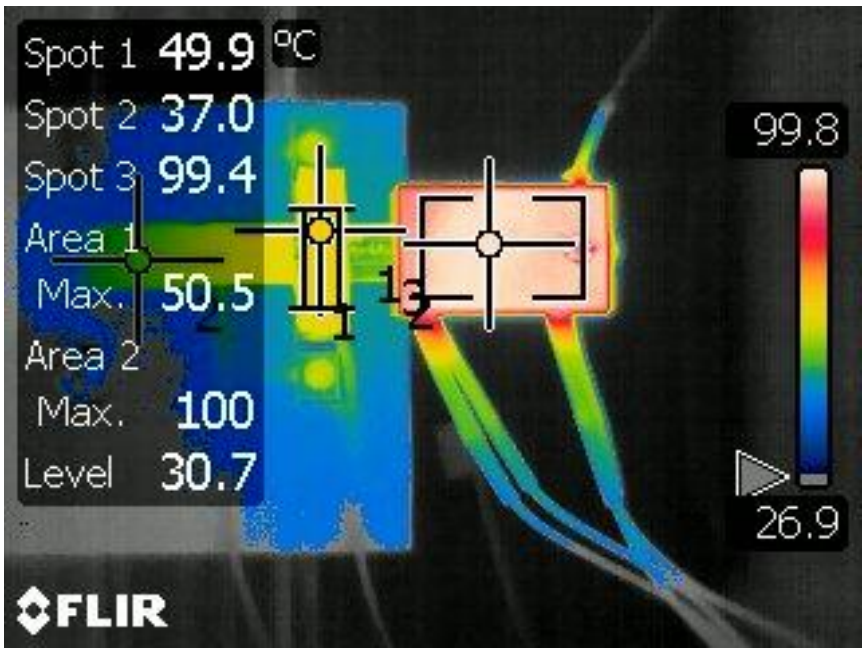
Figura 72 - Pontos e regiões de interesse para medição de temperatura



Fonte: Próprio autor

Na figura 73 pode-se constatar que a temperatura no bloco de aquecimento (área 2) atingiu o valor desejado com o termistor estabelecendo o mesmo valor. Na área 2, ainda, foi posicionado um ponto de análise (ponto 3) o qual registrou 99,4oC. Além destes foi analisada uma região com um ponto (área 1 e ponto 1) na primeira aleta, a qual demarca o limite entre as regiões de compressão e de dosagem com variação de medição entre os dois métodos na ordem de 1,53% e 0,32% utilizando o dado do termistor como parâmetro de medição.

Figura 73 - Imagem térmica do cabeçote para condição de 100ºC

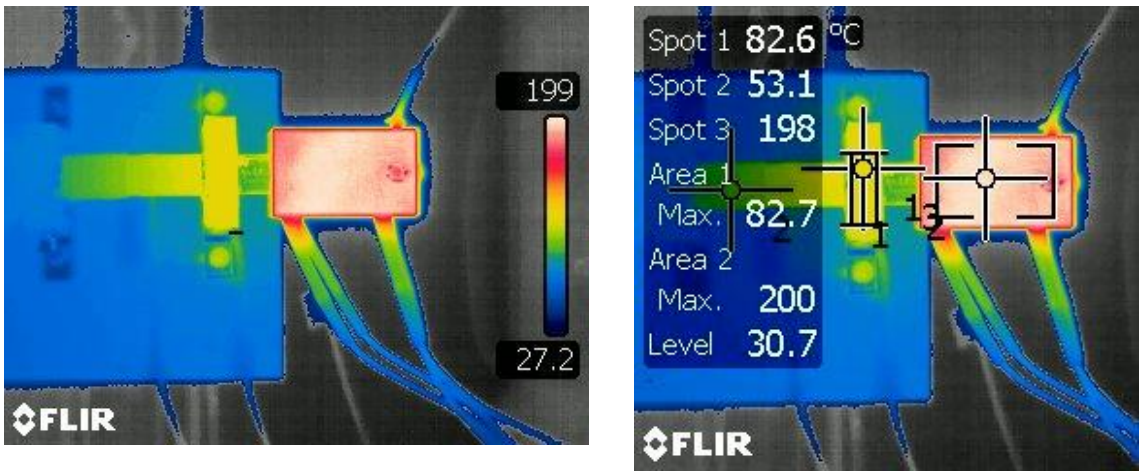


Fonte: Próprio autor

Foi observado que houve maior discrepância dos resultados no ponto 2, localizado abaixo da segunda aleta no segmento superior do barril. Esta discrepância pode estar relacionada com a distância do ponto analisado que não estava em foco principal na câmera.

Pelos dados apresentados pode-se detectar que a análise termográfica produz resultados muito próximos ao termistor, sendo este um sensor que encontra-se em contato direto com o material analisado. Assim, o sistema foi configurado para a temperatura de 200ºC (uma das temperaturas de processamento almejadas no estudo) e, mantida por 30 minutos, com o intuito de análise do cabeçote quando estivesse em condições de operação (figura 74).

Figura 74 -Imagem térmica do sistema após transcorridos 30 minutos



Fonte: Próprio autor

Observar-se, ainda, que a temperatura mensurada no bloco de aquecimento é de 200ºC enquanto a primeira aleta, localizada 20mm acima do bloco de aquecimento, se encontrava em 82,7ºC mostrando que a dissipação de calor neste elemento decorre conforme desejado. Além de evitar que a região correspondente à zona de alimentação da rosca aquecesse excessivamente, o que poderia ocasionar a plastificação do polímero ali existente.

Ainda, o bloco de aquecimento, o qual compreende as zonas de compressão e dosagem do material na rosca de extrusão, manteve temperatura homogênea em sua totalidade, sendo assim, o polímero possui um pequeno comprimento de rosca para sofrer plastificação.

Na figura 74 se observa que as regiões acima da primeira aleta encontrando-se em baixa temperatura evidencia que o calor flui até ela, porém acarreta grande parte de dissipação térmica. Entretanto a região entre o bloco de aquecimento e a aleta mostra temperatura bem abaixo de 200ºC. Este fato pode ser atribuído à região por não ter sido submetida à preparação superficial para a operação de medição por técnica termográfica e, em consequência apontou resultados incoerentes aos esperados, fato já previsto anteriormente.

8.2 Caracterização do PP

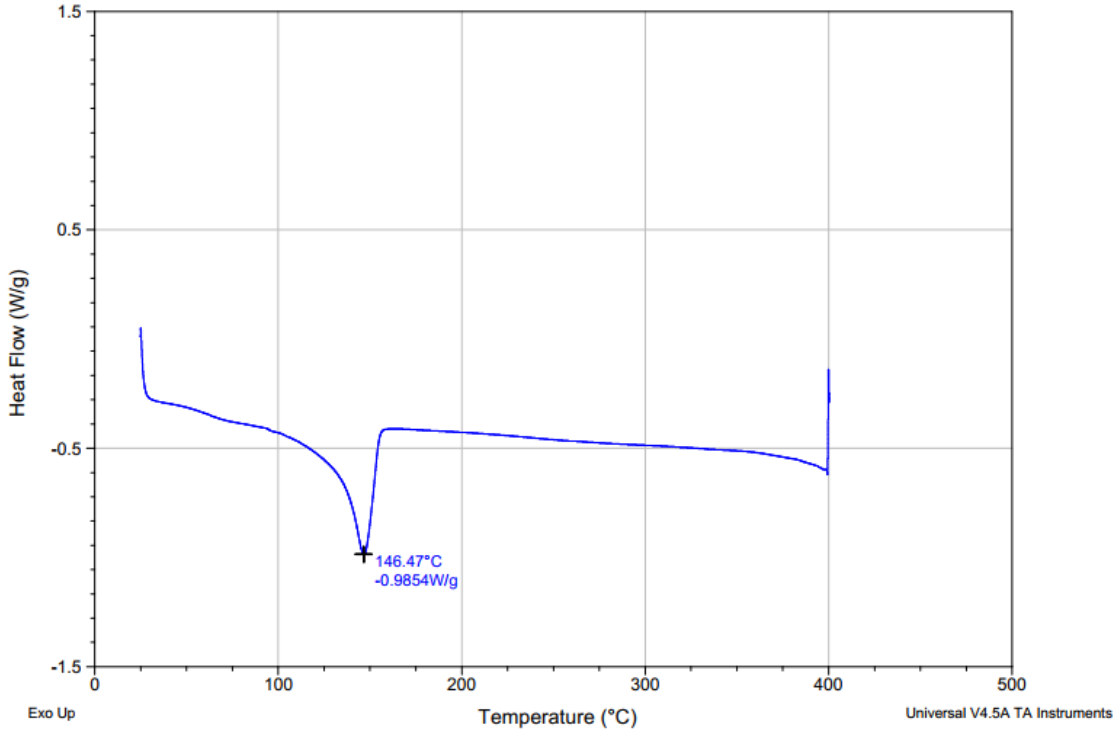
Analisou-se o polipropileno virgem sob três diferentes métodos visando a identificação de suas propriedades térmicas e reológicas as quais são aplicadas nos testes e resultados deste estudo. Assim, o material foi ensaiado empregando-se as técnicas de DSC, reometria de placas paralelas e FTIR. Cada uma destas investigações são descritas nas sessões que se seguem:

8.2.1 Análise das propriedades térmicas do polipropileno por DSC

Procedeu-se a análise do material por DSC com o intuito de determinar sua temperatura de fusão para planejamento das temperaturas de ensaio das amostras.

Na curva obtida pela análise de DSC verificou-se que o material apontou temperatura de fusão (Tm) de 146,47ºC (figura 75).

Figura 75 - Curva de DSC do PP CP141



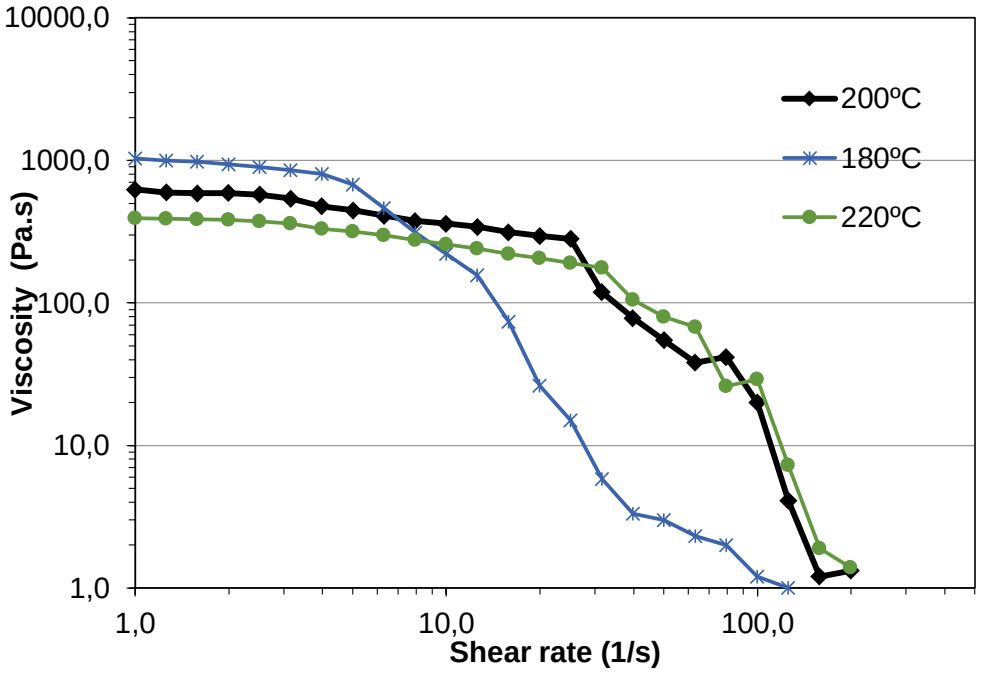
Fonte: Próprio autor

8.2.2 Reometria de placas paralelas

A caracterização por reometria de placas paralelas foi empreendida variando-se a taxa de cisalhamento gradativamente. Desse modo obteve-se a curva de viscosidade do material para as distintas condições de temperatura.

Na figura 76 pode-se observar a dependência da viscosidade do polímero em função de sua taxa de cisalhamento em escala logarítmica empreendida.

Figura 76 - Curva de viscosidade vs taxa de cisalhamento do PP



Fonte: Próprio autor

Por intermédio das curvas, mostradas em escala logarítmica, é possível constatar o comportamento polimérico permitindo identificar o patamar newtoniano em baixas taxas de viscosidade; e logo em seguida, observar o decréscimo da viscosidade sendo este comportamento polimérico especifico na região da lei das potências.

A análise da figura 76 possibilita identificar que à temperatura de 180ºC resulta em redução da viscosidade para taxas de cisalhamento menores, enquanto para as temperaturas de 200ºC e 220ºC advém o decréscimo em valores muito próximos em maiores taxas de cisalhamento.

Analisando as curvas na região do patamar newtoniano onde a viscosidade se mostra com comportamento constante constata-se que o incremento de temperatura favorece o escoamento do material, demonstrado pelo menor valor da viscosidade às diferentes taxas de cisalhamento.

8.2.3 FTIR

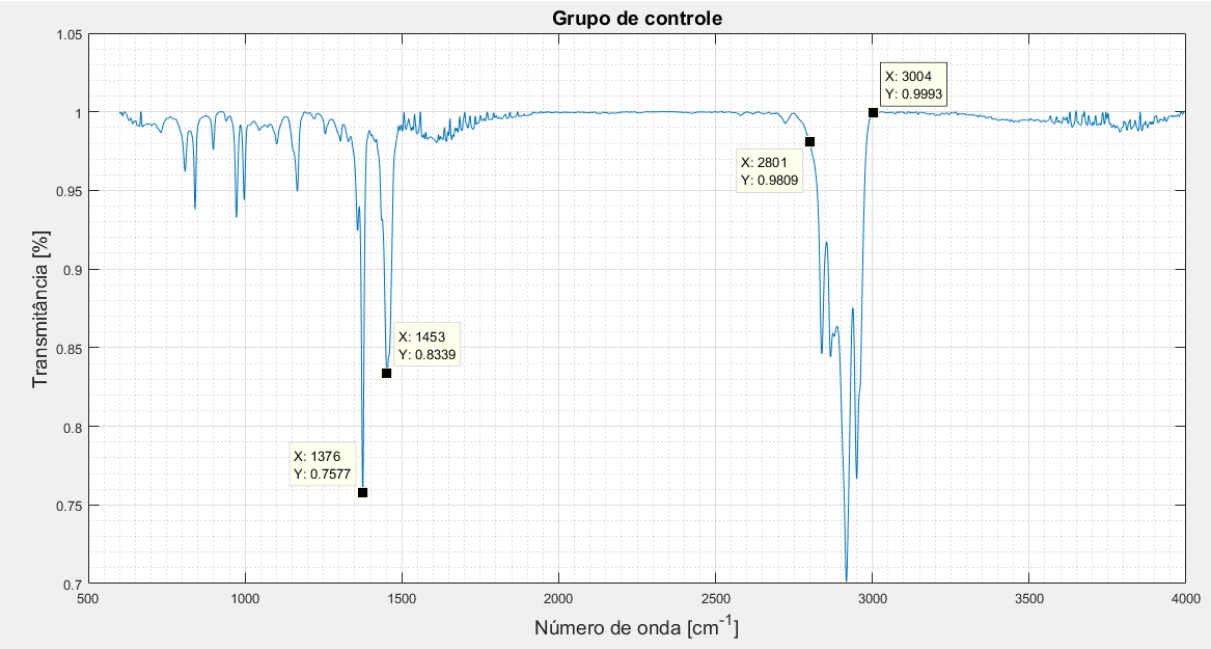
O FTIR excita as moléculas em uma faixa de frequências na qual os grupos funcionais vibram em maior intensidade quando sua frequência é atingida, sendo caracterizada por picos na curva.

A técnica é apoiada na interação da matéria com a radiação eletromagnética. Nesta técnica o material é submetido a um espectro de frequências em que as vibrações normais moleculares são excitadas, sendo elas do tipo estiramento de ligação, deformação angular e torção. Assim, em um espectro vibracional, as bandas fundamentais correspondentes aos grupos funcionais se caracterizam por picos nas curvas.

O polipropileno foi examinado por FTIR tendo como intuito a análise do material antes de ser processado e após o processamento em 9 configurações distintas submetidas a alterações de velocidade de rotação e temperatura de processamento.

A análise do PP antes do processamento (grupo de controle) apontou as bandas de absorção característica deste polímero em 1375 cm^{-1} e 1450 cm^{-1} devido à deformação do CH3 e entre 2850 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} e ao estiramento do C-H (figura 77).

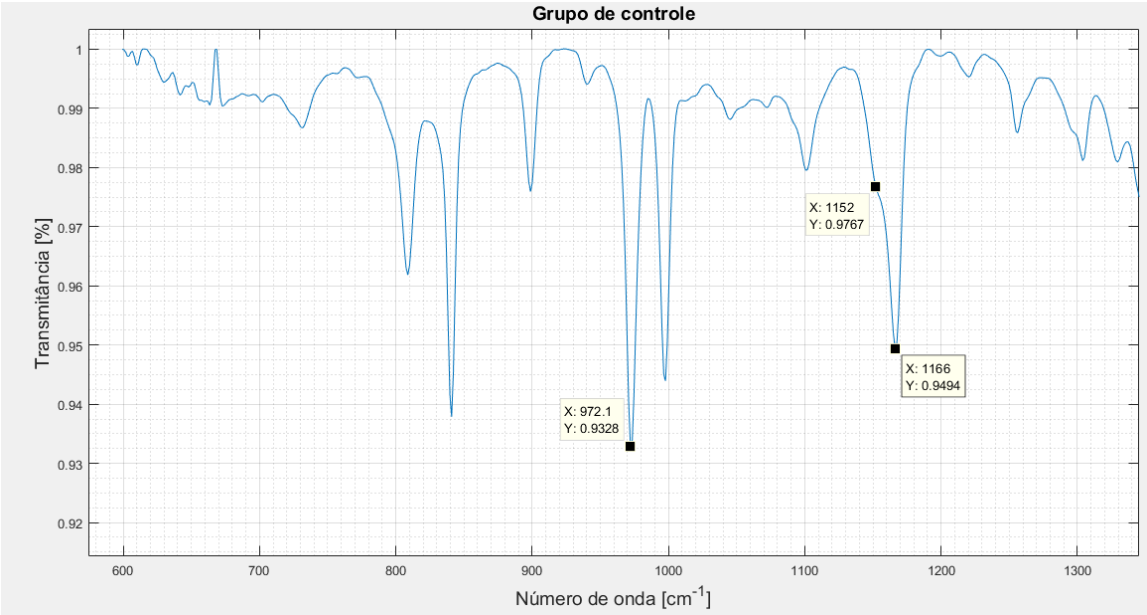
Figura 77 - Espectro infravermelho do PP virgem



Fonte: Próprio autor

Cabe lembrar que o material empregado é um copolímero de Polipropileno com eteno, assim, de acordo com Spectra Analysis (2022) o polipropileno gera bandas características em 1155cm^{-1} e 974cm^{-1}, além disso polipropilenos isotáticos produzem uma banda forte em 1168cm^{-}1 como pode ser observado em na figura 78.

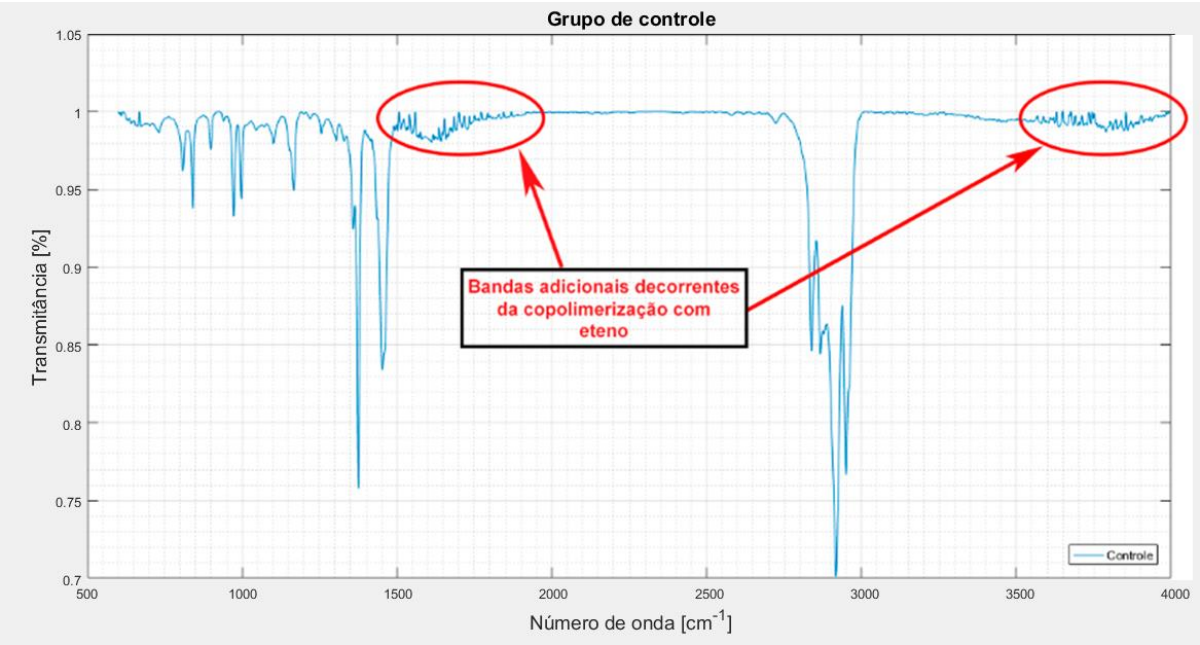
Figura 78 - Vista em detalhe do espectro infravermelho do PP virgem (600 a 1400cm^{-1})



Fonte: Próprio autor

Segundo Pereira (2012), a copolimerização do propeno com eteno gera grupos funcionais adicionais que podem ser constatados na análise por FTIR. Essas bandas são viáveis de aparecer replicadas com maior ou menor intensidade em decorrência dos efeitos da vibração. Na amostra de controle analisada é possível verificar a ocorrência dos efeitos citados (figura 79).

Figura 79 - Indicação das bandas adicionais oriundas da copolimerirazão do PP CP141



Fonte: Próprio autor

8.3 Saca rosca

Uma testagem inicial foi feita no que tange ao acionamento do motor com sistema sem carga polimérica ou aquecimento com o propósito de inspeção de movimentação do sistema de redução bem como avaliação da rotação do parafuso de extrusão no interior do barril de maneira a garantir que não houvesse interferências entre os componentes. Esta inspeção, também, foi empreendida de modo a realizar o *burn-out* do sistema para acomodação dos componentes e identificação de folgas, que possivelmente viessem a prejudicar seu funcionamento.

Findados os testes iniciais, procedeu-se a testes de deslocamento de material em temperatura ambiente. Por intermédio destes buscou-se verificar o transporte de material desde a região superior do barril até a matriz onde ocorreria sua extrusão, para tanto foi empregue silicone de grau médico. Finalizado este experimento o sistema foi desmontado com o propósito de verificar o comportamento do material ao longo da rosca, sendo este mostrado na figura 80.

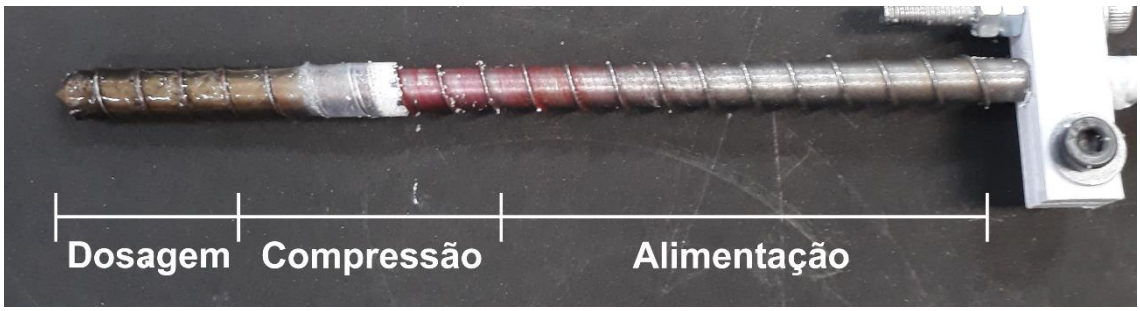
Figura 80 - Verificação do preenchimento do parafuso de extrusão

Fonte: Próprio autor

Observa-se que o material viscoso encontra-se presente em todas as zonas da rosca de extrusão apresentando variação de preenchimento dos filetes nas diferentes regiões da mesma.

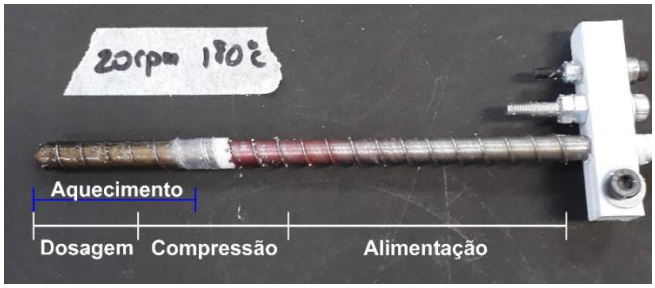
Procedeu-se, ainda, a uma análise mais elaborada com o sistema em aquecimento e no processamento de PP. Submetendo-o a temperaturas de 180ºC e 220ºC, sendo estas consideradas os extremos do espectro de análise pretendido no estudo, e rotações de 20rpm, 40 rpm e 60 rpm. Para cada condição de operação processou-se o material por cerca de 5 a 10 minutos após iniciada a extrusão e, posteriormente, desmontou-se o sistema com o objetivo de observar as zonas do parafuso e de seus preenchimentos, procedimento este semelhante ao executado anteriormente. A figura 81 mostra as três zonas fundamentais da rosca e, nas figuras 82, 83 e 84 são mostrados os preenchimentos a que foram submetidas nas diferentes condições operacionais.

Figura 81 - Identificação das zonas do parafuso de extrusão



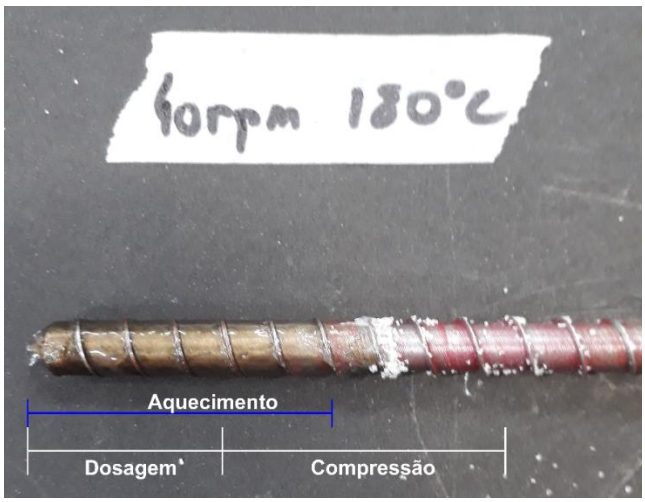
Fonte: Próprio autor

Figura 82 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 20rpm e 180ºC



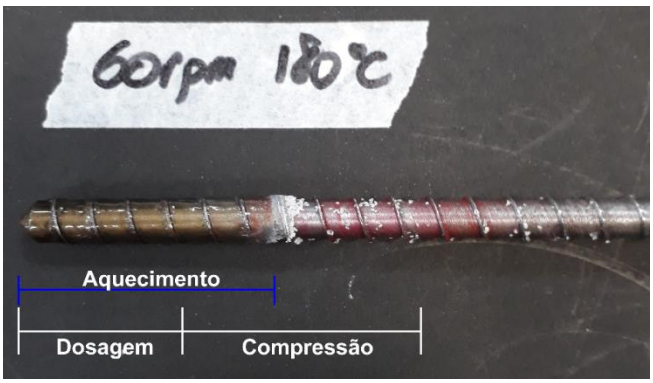
Fonte: Prórpio autor

Figura 83 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 40rpm e 180ºC



Fonte: Próprio autor

Figura 84 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 60rpm e 180ºC



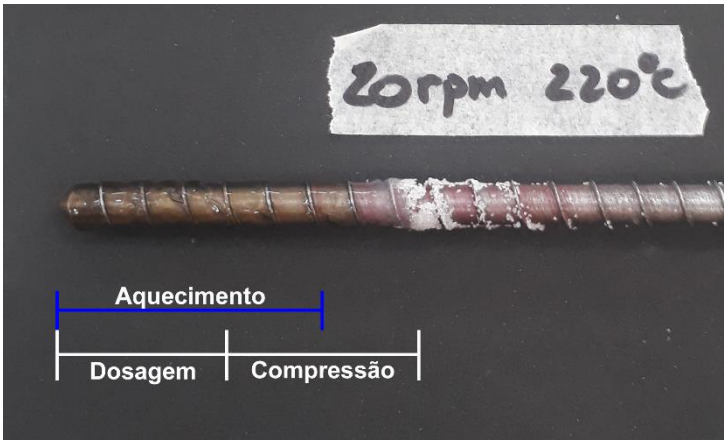
Fonte: Próprio autor

Verificou-se que à temperatura de 180ºC a plastificação de material aconteceu pouco acima do início da zona de aquecimento nas diferentes velocidades de processamento, indicando que a velocidade da rotação pouco influenciou na geração de calor por mecanismos internos do material. Assim, pode-se inferir que o calor transferido para regiões superiores do barril (zona de alimentação e funil) não foi suficiente para principiar o amolecimento do polímero como um dos requisitos pretendido do projeto.

A análise das figuras indica, ainda, que a transformação nas diferentes situações ocorreu no interior da zona de compressão, mais precisamente em sua segunda metade mais próximo à zona de dosagem.

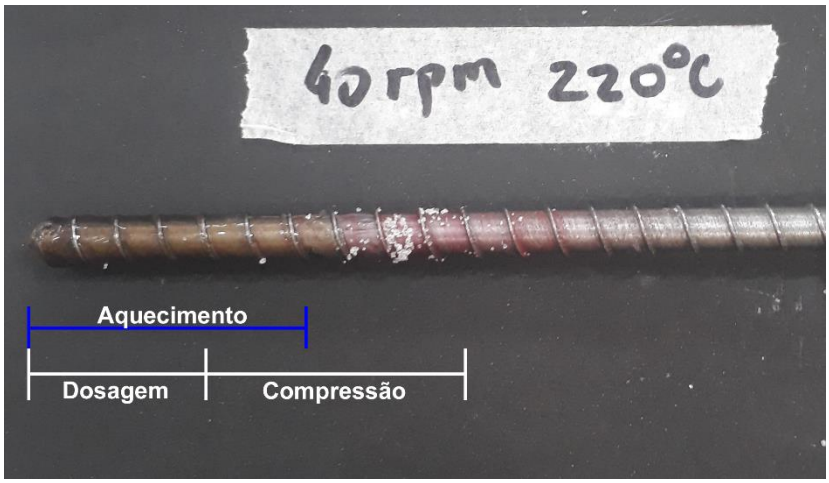
As figuras 85, 86 e 87 mostram os resultados à temperatura de 220ºC

Figura 85 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 20rpm e 220ºC



Fonte: Próprio autor

Figura 86 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 40rpm e 220ºC



Fonte: Próprio autor

Figura 87 - Preenchimento do prafuso de extrusão a 60rpm e 220ºC

Fonte: Próprio autor

Assim como observado anteriormente à temperatura de 180ºC, a transformação do material ocorreu na zona de compressão, no entanto, à temperaturas mais altas, o fenômeno aconteceu em região mais afastada do final da zona de aquecimento demonstrando o efeito da variação de temperatura sobre o polímero. Ainda, velocidades de rotação superiores ocasionaram a plastificação em ponto mais próximo à zona de dosagem por permitir que o material experimentasse o efeito do calor gerado por um tempo menor, conforme como se constata ao se comparar as figuras 85 e 87.

Pautado nas discussões tratadas e em imagens obtidas é possível concluir que uma zona de aquecimento ampla, abrangendo a maior parte da zona de compressão do parafuso pode contribuir no processamento de material, provocando sua transformação em menor tempo, no entanto este efeito pode, também, ocasionar degradação do material.

8.4 Análise de vazão

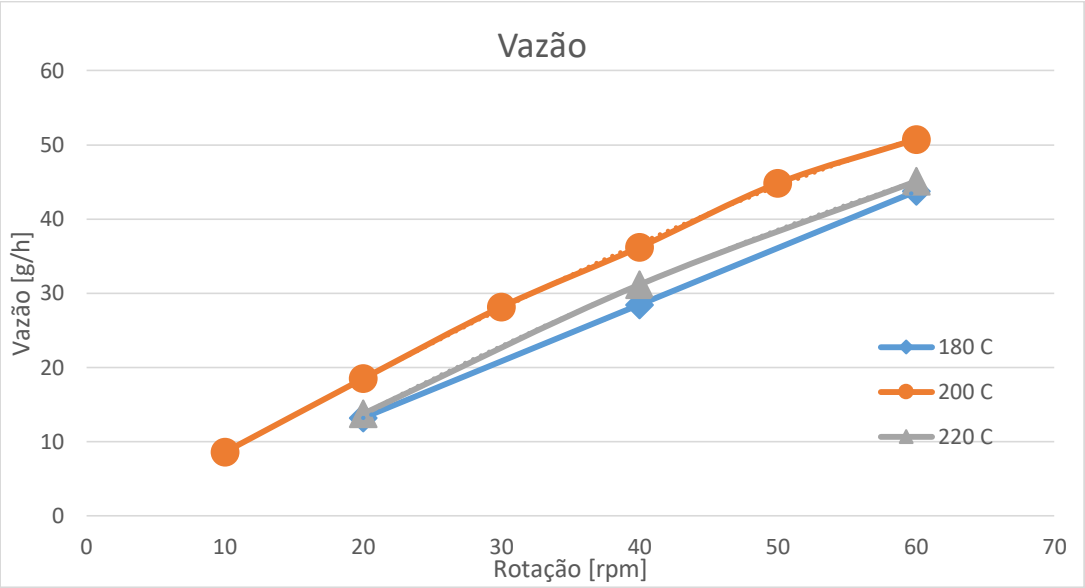
Durante o processo de calibração do equipamento, amostras de material foram coletadas para verificação da vazão em função da velocidade de rotação da rosca de extrusão. Para isto, o sistema foi totalmente inundado com polímero em pó e, cronometrado o tempo necessário para principiar a extrusão do material, em seguida aguardou-se que o sistema, a priori, atingisse o regime. As amostras foram coletadas a cada 1 minuto sendo, posteriormente, pesadas para cálculo da média dos valores. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 15 e figura 88.

Tabela 15 - Vazão (g/h) para diferentes temperaturas em diferentes velocidades de rotação

	10 rpm	20 rpm	30 rpm	40 rpm	50 rpm	60 rpm
180 ºC	N/A	13,224	N/A	28,476	N/A	43,743
200 ºC	8,604	18,504	28,158	36,228	44,838	50,748
220 ºC	N/A	13,764	N/A	31,176	N/A	45,092

Fonte: Próprio autor

Figura 88 - Curva de vazão de material [g/h] x rotação [rpm]



Fonte: Próprio autor

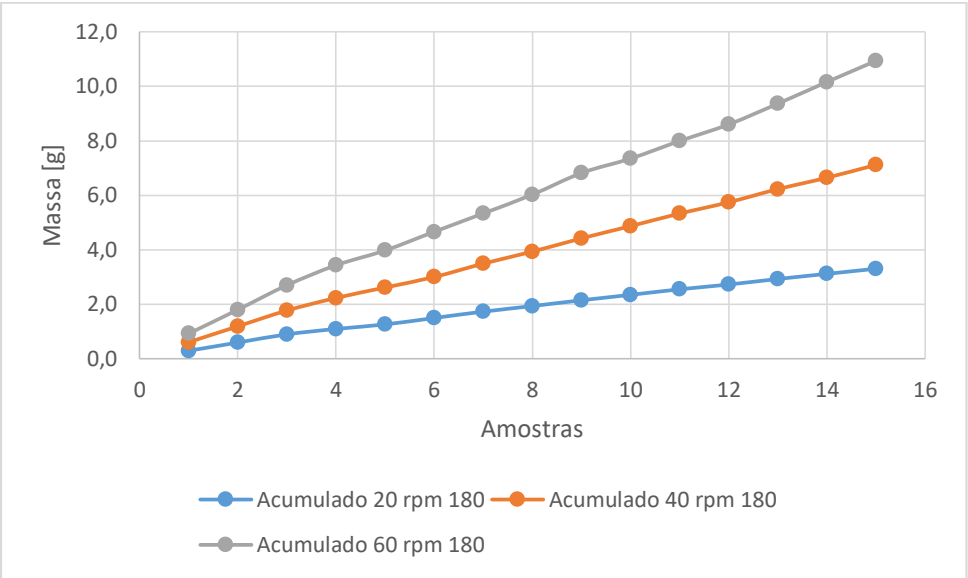
Pode-se notar que os valores para a faixa de temperatura de 200ºC são superiores aos das demais temperaturas, podendo esta condição ser atribuída à pressão gerada pelo fluxo de contra pressão à temperatura mais baixa e ao cisalhamento do material à temperatura mais elevada. Constata-se, ainda, que com o incremento da rotação da rosca, a amplitude de variação dos valores tende a diminuir indicando a ocorrências de um possível patamar no qual os valores de vazão tendem a se estagnar.

Como exposto por Rauwendaal (2014) e Manrinch (2005) é possível inferir que para rotações superiores às utilizadas neste estudo, o fluxo de material irá decrescer em função do incremento da pressão interna.

8.4.1 Curvas de acumulados de massa.

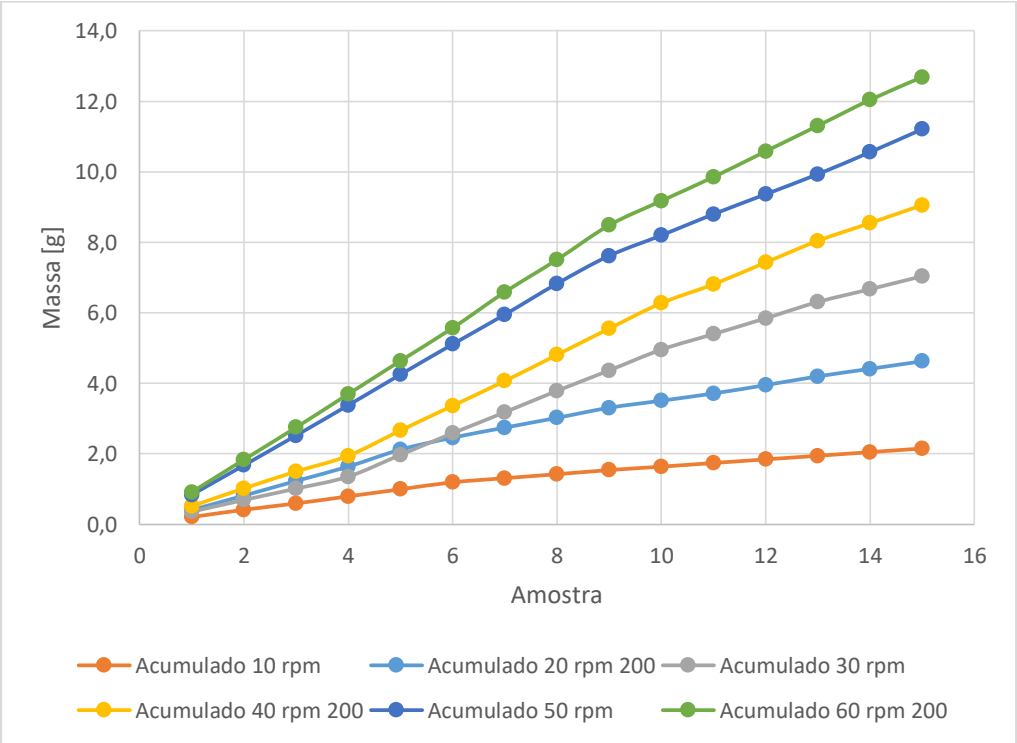
Além da análise de vazão média nas diferentes rotações, procedeu-se a outra análise do material acumulado. Sob este procedimento a massa das amostras coletadas previamente foram adicionadas de forma incremental e subsequente gerando curvas, tendo estas por finalidade demonstrar o perfil comportamental do fluxo do sistema. As figuras 89, 90 e 91 retratam as curvas conforme as diversas rotações; correspondendo a cada uma das temperaturas distintas.

Figura 89 - Curva de acumulado de massa [g] a 180ºC



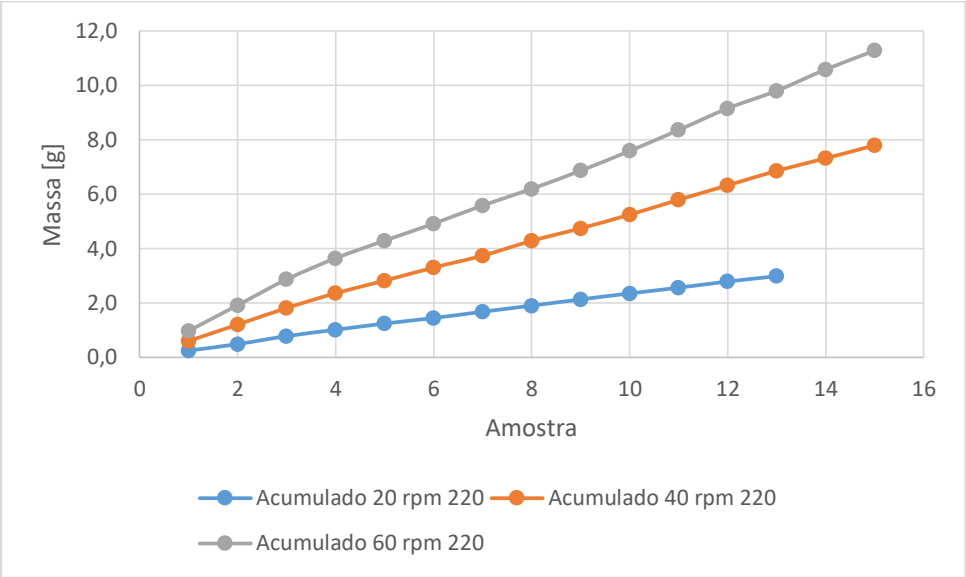
Fonte: Próprio autor

Figura 90 - Curva de acumulado de massa [g] a 200ºC



Fonte: Próprio autor

Figura 91 - - Curva de acumulado de massa [g] a 220ºC



Fonte: Próprio autor

A priori observa-se, como o esperado, que rotações mais elevadas resultam em maior quantidade de material, entretanto, se pressupôs que o perfil das curvas retratasse comportamento de progressão linear, pautando-se na hipótese do sistema se encontrar em regime permanente de processamento com vazão constante. No entanto notam-se variações nas massas das amostras como podem ser constatadas no Apêndice B.

Algumas hipóteses para a explicação deste comportamento podem ser elencadas tais como, por exemplo, o sistema não haver atingido regime permanente ocasionando variações na vazão de material; a variação no tamanho dos grânulos utilizados (entre 600 e 300 µm) causa diferentes densidades durante o processamento afetando a compactação e preenchimento dos filetes de rosca; variações de pressão no transcorrer do processamento podem afetar o fluxo de contra-pressão alterando a vazão de material; e, uma outra hipótese, recai no aspecto da medição discreta de massa na qual não se pode garantir que para cada amostra o tempo de coleta foi exatamente o mesmo .

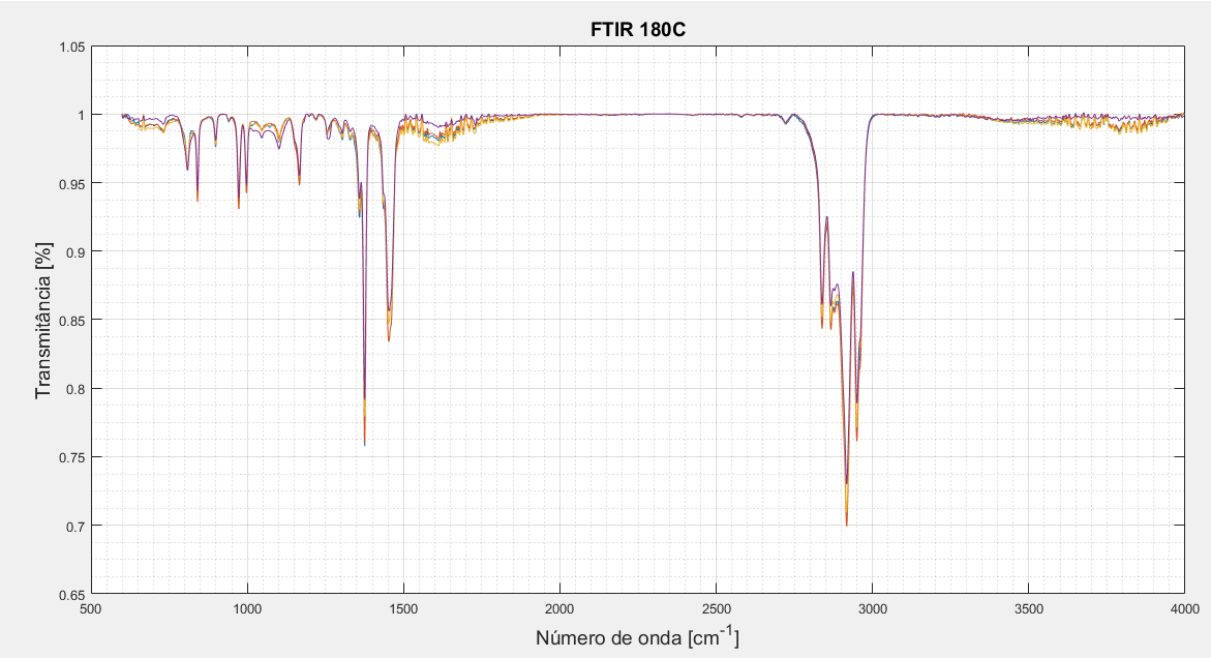
8.5 FTIR Material processado

Na seção 7.2.3 foram apresentados os dados de análise por FTIR do PP em seu estado puro antes de processado, nesta seção serão relatados os resultados dos testes realizados com o material após o mesmo ser submetido ao processo de extrusão.

Esta investigação teve por propósito identificar possíveis ocorrência de alterações na curva de FTIR, o que poderia indicar a excitação de outros grupos funcionais inexistentes anteriormente como, por exemplo, grupos carbonila (C=O) que caracterizaria degradação do material.

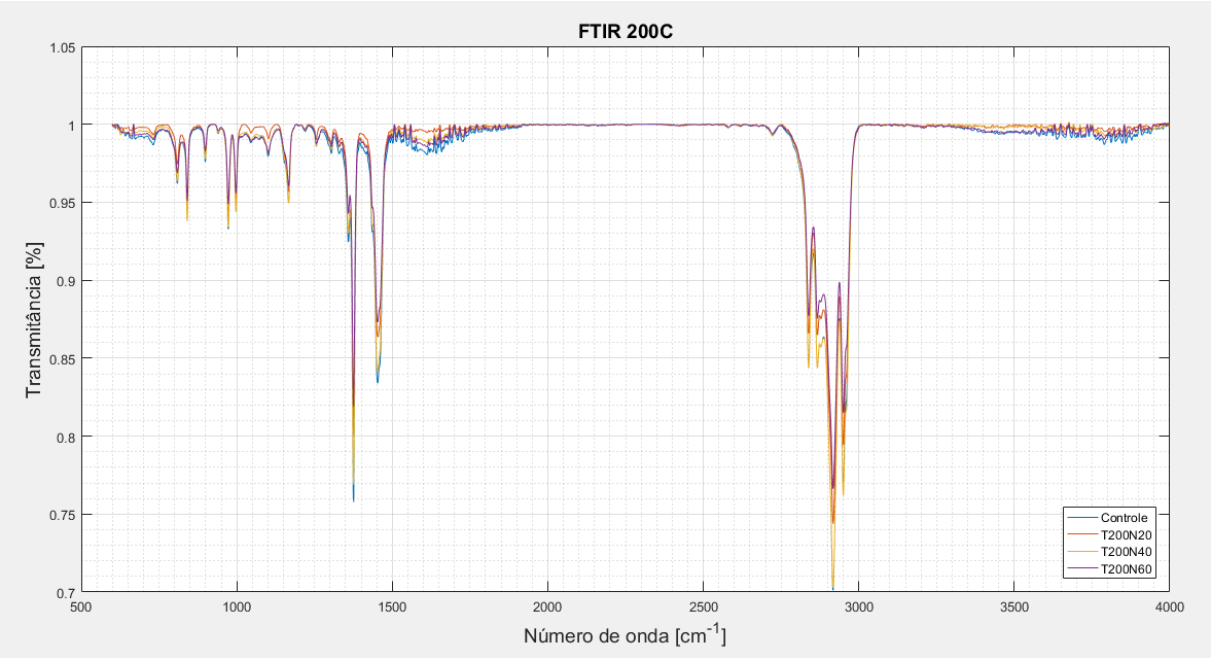
Gráficos dos testes são mostrados nas figuras 92, 93 e 94, agrupando-os por temperatura de processamento; para cada figura apresentam-se 4 curvas representando o grupo de controle e o material processado às velocidades de 20, 40 e 60 rpm.

Figura 92 - Espectro de análise do PP processado a 180ºC



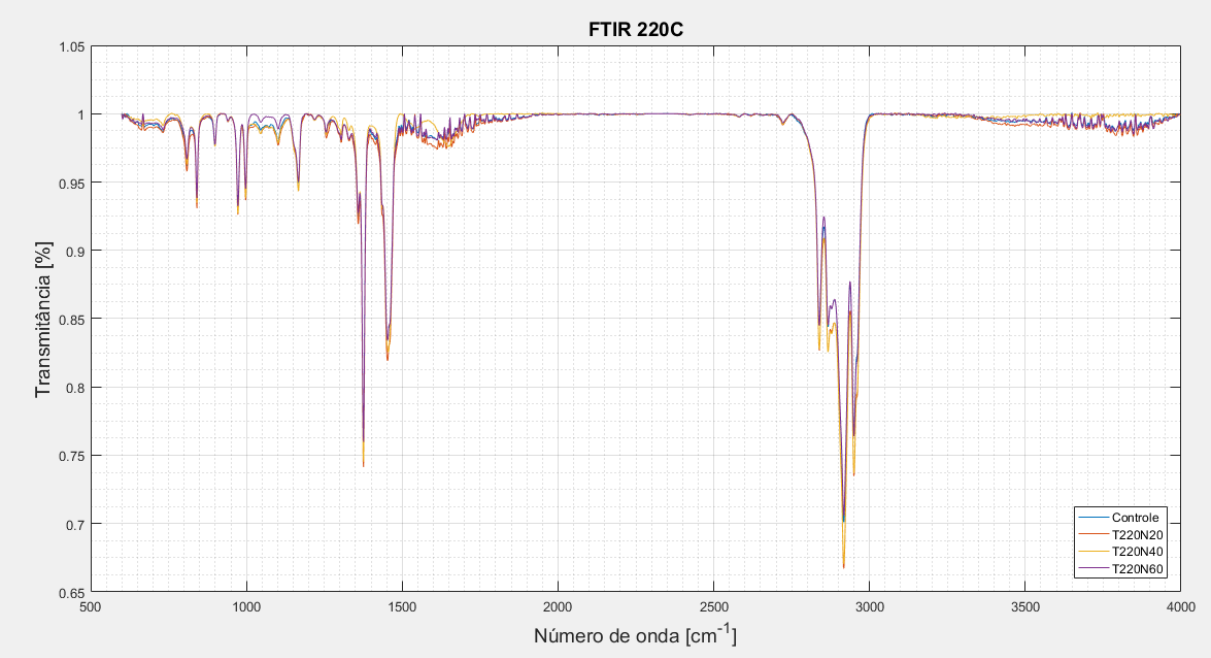
Fonte: Próprio autor

Figura 93 - Espectro de análise do PP processado a 200ºC



Fonte: Próprio autor

Figura 94 - Espectro de análise do PP processado a 220ºC



Fonte: Próprio autor

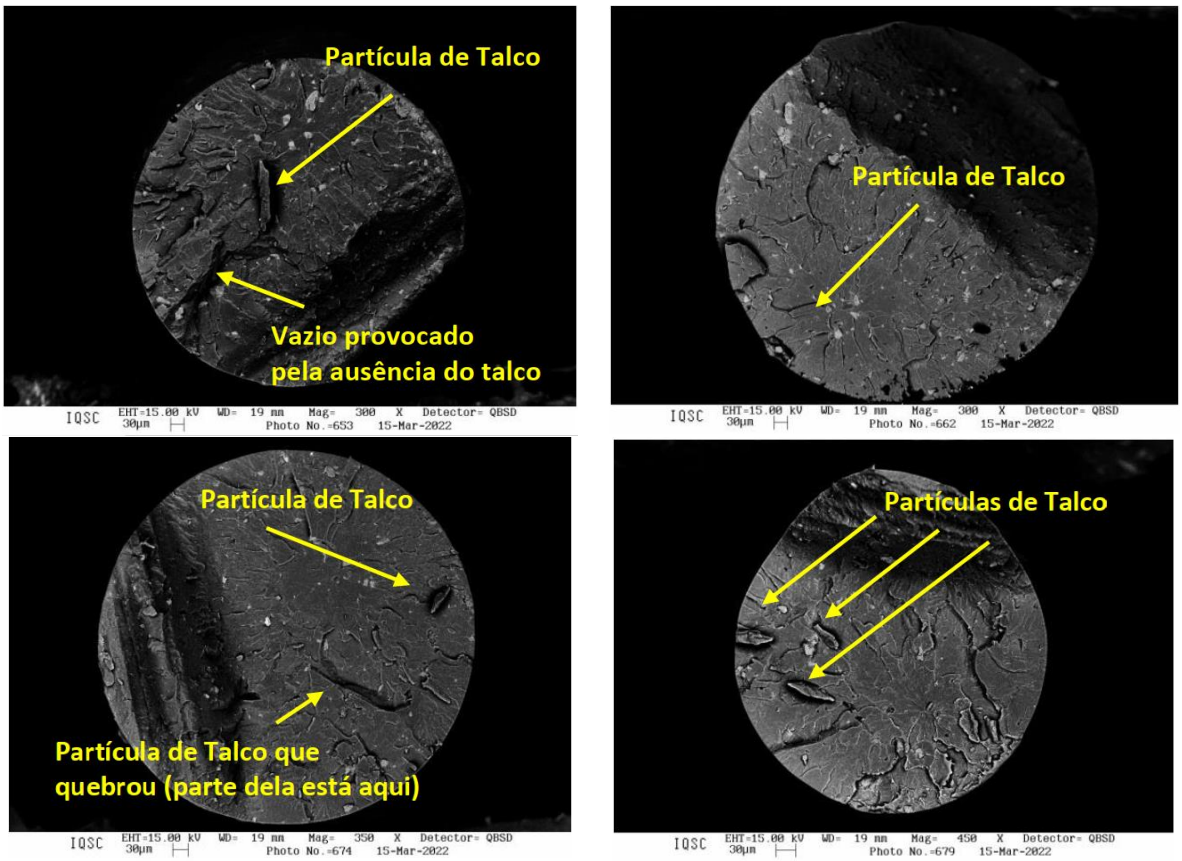
Observa-se nas curvas presentes nas figuras que as amostras processadas em diferentes temperaturas e velocidades apontam perfis sobrepostos à amostra controle sem que seja notada a presença de picos de carbonila (usualmente observados entre as faixas de 1600 cm-1 e 1800 cm-1). Assim sendo, depreende-se que não houve

degradação do material, demonstrando que o tempo de exposição do mesmo às temperaturas de processamento não se mostrou demasiadamente elevado.

8.6 MEV

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi efetuada para as condições de rotação de 20rpm, 40rpm e 60rpm às temperaturas de 180ºC, 200ºC e 220ºC. O material processado contava com carga de talco industrial na proporção de 10%, este foi carregado no cabeçote principiando o processo de extrusão. Coletou-se o material extrudado após o sistema entrar em regime obtendo em torno de 2 metros de PP na forma de filamento. Para que fosse possível empreender-se a análise, o material foi fraturado em 3 a 4 pontos diferentes ao longo do comprimento do filamento após imersão em nitrogênio líquido por cerca de 15 minutos. Alguns dos resultados são apresentados nas figura 95.

Figura 95 - Micrografia do PP com aditivo de talco (10%)



Fonte: Próprio autor

De acordo com as micrografias acima, as partículas de talco, um filossilicato, exibem baixa interação com a matriz de PP. Assim, essas folhas mostram diminuta adesão com a matriz de PP, resultando nos vazios observados nas imagens.

Caso as análises micrográficas tivessem sido realizadas na segunda superfície de fratura da micrografia situada na posição esquerda e superior, seria possível observar a presença de uma partícula de talco no local correspondente ao vazio (ou porosidade), na qual, por sua vez, apresentaria uma partícula de talco no local onde se observa um vazio nesta. Estes aspectos demonstram evidência de baixa interação entre a matriz polimérica e o talco resultando no escorregamento do polímero na superfície da partícula de talco, fenômeno semelhante ao "*pull out*" de fibras em compósitos.

9 Considerações finais e trabalhos futuros

Em face do cenário contemporâneo apoiado nos avanços tecnológicos e nas transformações operadas na indústria de manufatura apontando a crescente demanda pela otimização de bens de produção para o mercado. Respaldado sob este contexto se desenrolou a presente pesquisa, arrolando como objetivos primordiais o projeto de um cabeçote de extrusão vertical pautado em projeto e manufatura abertos, reprojeto dos sistemas de transmissão e aquisição de temperatura, melhorias no processo de fabricação e montagem do sistema, calibração e avaliação preliminar do protótipo funcional por meio de estimativas entre a relação da velocidade de rotação e vazão de material. Neste capítulo serão tecidas considerações finais contemplando os resultados alcançados.

No transcorrer do estudo diversas ações foram definidas com o propósito de analisar e entender a condução do processo de extrusão, além de identificar se as condições operadas satisfaziam os anseios e necessidades pretendidas.

O desenvolvimento do projeto do cabeçote pautando-se no conceito de “open-manufacturing” foi conduzido tendo em vista a utilização de componentes comerciais amplamente disseminados e empregados em equipamentos de manufatura aditiva focando, principalmente, na facilidade de fabricação e manutenção. O emprego de materiais convencionais e de baixo valor agragado para usinagem dos componentes mecânicos (engrenagens, barril, rosca e trocadores de calor) reforça o empenho despendido no que diz respeito à possibilidade de difusão para uso do equipamento em ambientes de pesquisa.

A adoção de um procedimento de cálculo bem estruturado para dimensionamento do sistema~~s~~ de redução de velocidade, lançando mão de diversas normas e boas práticas de engenharia se mostrou de suma importância, principalmente no que concerne à necessidade de obtenção de um equipamento de pequenas dimensões. Ainda, como demonstrado, o processo de cálculo transcorreu de maneira interativa, tendo o mesmo abrangido diversas etapas de verificação para diferentes características. Assim, a adoção de rotinas de cálculo nas quais pode-se alterar dados e/ou características geométricas, de materiais, tribológicas e

cinemáticas, facilitou a obtenção de soluções aplicáveis às almejadas contemplando a possibilidade de manutenção e substituição de componentes.

Cabe ressaltar que a escolha precisa de um motor para acionamento da movimentação da redução e, consequentemente, da rosca de extrusão é crucial já que este deverá prover o torque necessário a fim de suprir as necessidades e solicitações mecânicas que o materiais em processamento impões ao sistema.

A predileção pelo emprego de materiais convencionais e de fácil acesso para usinagem diversamente aos de aplicação em manufatura aditiva, especialmente pós metálicos, para a confecção dos componentes se mostrou como uma solução acessível e de baixo custo, sobretudo no que concerne à produção, replicabilidade e manutenção de componentes. Além destes atributos, ainda é relevante salientar o aprimoramento da condutividade térmica do sistema proporcionando distribuição mais homogênea da temperatura.

Considerando que o equipamento empregue neste estudo demonstra vieses para aplicação em laboratório e centro de pesquisas no processamento de quantidades diminutas de polímeros na presença ou ausência de carga aditiva, algumas destas podendo possuir características abrasivas, ou ainda, exigir maiores necessidades de esforços mecânicos para o processamento. Assim sendo, o uso de materiais mais acessíveis se mostram de suma importância.

Como outra premissa do projeto, a utilização de dispositivos e sensores comerciais indicados para equipamentos de manufatura aditiva foi explorada buscando empregar, também, recursos computacionais *open-source* já amplamente difundidos e de fácil empregabilidade.

No que concerne às calibrações e testes no cabeçote, estes demonstraram que o sistema evidencia bom funcionamento e capacidade de processar material polimérico. Além disso, o sistema manifesta capacidade de aquecimento até 270ºC e velocidade de rotação, testada, de 70 rpm, possibilitando a diversificação dos materiais passíveis de empregabilidade.

Como o cabeçote refere-se a um equipamento de extrusão compacto de dimensões reduzidas adaptado para uso em manufatura aditiva, o monitoramento de sua temperatura se mostra relevante uma vez que o mesmo não dispõe de espaço e

tempo considerável para que se processe a dispersão de calor excedente. Outra condição a ser atendida diz respeito à transformação do pó, não é desejável que o fenômeno transcorra nas regiões iniciais da rosca de extrusão nem que este experimente os efeitos do calor por tempo demasiado acarretando uma possível degradação e, consequentemente perda das propriedades mecânicas e reológicas.

Como pôde ser constatado na demonstração dos resultados de processamento nos testes de calibração, o polipropileno não revelou indícios de degradação mantendo, portanto, suas propriedades inalteradas.

Os testes de processamento de material explorando a relação entre velocidade de rotação e taxa de extrusão demostraram que o cabeçote apresenta comportamento similar aos equipamentos de extrusão horizontal, caracterizado pela relação linear entre as duas grandezas, salientando de que o funcionamento se dá por inundação, característica necessária para misturas distributivas. Os dados obtidos experimentalmente são passíveis de comparação do sistema miniaturizado com extrusoras horizontais de polímero demostrando seu potencial de aplicabilidade.

Ao investigar o material após seu processamento, especificamente, o remanescente no interior do sistema mostrou que a transformação do polímero ocorreu próximo ao local de aquecimento. Assim sendo poderia se pressupor que, possivelmente, o aquecimento de uma região mais extensa conduziria a mais benefícios, ampliando o tempo necessário para que a plastificação se suceda de modo mais homogêneo.

9.1 Trabalhos futuros

A complexidade do projeto desenvolvido neste estudo demanda o empreendimento de novas investigações, as quais contemplem a otimização do sistema garantindo maior confiabilidade, além de favorecer sua capacidade de processamento contínuo. Em face do exposto algumas sugestões são arroladas para futuras pesquisas na área apontando necessidades e oportunidades de aprimoramento do sistema.

- Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de temperatura ao longo do barril principalmente ao que concerne às regiões de compressão e dosagem da rosca.
- Sistema de controle em malha fechada de velocidade de rotação do sistema com foco no torque atendendo as mudanças e transformações que possivelmente possam ocorrer no material durante o processamento.
- Aprimoramento no sistema de alimentação tornando-o autoalimentável considerando que na atualidade o processo é conduzido manualmente.
- Análise extensiva do tempo de residência variando-se parâmetros de temperatura e rotação empregando multiplicidade de materiais, e alternâncias no comprimento da região de aquecimento buscando melhorias na homogeneidade do extrudado.
- Monitoramento da pressão gerada internamente ao sistema, constituindo esta uma informação relevante concernente ao fluxo de contrapressão limitante da capacidade de extrusão, além de exercer esforços na rosca de extrusão.
- Desenvolvimento de um software com o propósito de integração de acionamento, monitoramento e controle dos processos de rotação e torque, aquecimento, análise de pressão e taxa de extrusão de material objetivando maior consistência do processo com um todo.
- Análise da capacidade dispersiva do cabeçote de extrusão.
- Incorporação do cabeçote de extrusão por rosca única a uma plataforma de movimentação seguida de análise dos parâmetros de processo e operação inerentes à técnica de manufatura aditiva por fabricação de filamento fundido.
- Análise e monitoramento de controle de fluxo de extrusão para aplicações em MA.
- Revisão da geometria da rosca de extrusão com simulações unidimensionais para estimativa de pressão na matriz.
- Melhorias para o processo de fabricação da rosca de extrusão inserindo elemento do tipo “maddock” conferindo maior capacidade de compressão e mistura ao sistema.

Referências

3DPARTS. **Fused Deposition Modelling (FDM)**. 2019. Disponível em: http://www.3dparts.co.uk/how-it-works/. Acesso em: 20 mar. 2019.

ABEYKOON, Chamil et al. A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion. **Sensors And Actuators** A: Physical, [S.L.], v. 182, p. 16-27, ago. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.04.026.

ABEYKOON, Chamil et al. Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion: effects of process settings, screw geometry and material. **Applied Mathematical Modelling**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 1224-1236, fev. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.08.004.

ABEYKOON, Chamil et al. Investigation of the process energy demand in polymer extrusion: a brief review and an experimental study. **Applied Energy**, [S.L.], v. 136, p. 726-737, dez. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.024.

ACARNLEY, Paul. **Stepping motors**: a guide to theory and practice. 4. ed. London: Iet, 2007.

AL-HAWARI, T.; AL-BO'OL, S.; MOMANI, A.. Selection of Temperature Measuring Sensors Using the Analytic Hierarchy Process. **Jordan Journal Of Mechanical And Industrial Engineering**, v. 5, n. 5, p. 451-459, out. 2011. Disponível em: http://jjmie.hu.edu.jo/files/v5n5/v5n5.pdf. Acesso em: 21 jul. 2022.

ALAFAGHANI, Ala’aldin et al. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a design-for-manufacturing approach. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 10, p. 791-803, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079. Acesso em: 18 mar. 2019.

ALEXANDRE, Arthur et al. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: comparison to fused filament fabrication on open-source desktop three-dimensional printers. **3D Printing And Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 237-247, 1 out. 2020. Mary Ann Liebert Inc. http://dx.doi.org/10.1089/3dp.2019.0195.

AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. **ANSI/AGMA 6022-C93**: Design Manual for Cylindrical Wormgearing. Alexandria: American Gear Manufacturers Association, 1993. 44 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792-12A**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken: Astm International, 2009. 2 p.

ANIWAA. **Https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/regenhu-3ddiscovery**/. Disponível em: https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/regenhu-3ddiscovery/. Acesso em: 29 set. 2022.

ANNONI, Massimiliano; GIBERTI, Hermes; STRANO, Matteo. Feasibility Study of an Extrusion-based Direct Metal Additive Manufacturing Technique. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 5, p. 916-927, 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.079.

BARBOSA, Talita Villa. **Fabricação de scaffolds de polímero reforçado para aplicação na bioengenharia tecidual**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-14022019-084241/fr.php. Acesso em: 21 mar. 2019.

BARRA, Guilherme Mariz de Oliveira. **PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS**. 2021. Disponível em: https://emc5744.barra.prof.ufsc.br/parte%202%20revisada.pdf. Acesso em: 15 dez. 2021.

BECKER, Lidomar et al. Instrumentação de moldes, sensors e simulação de temperature no processo de injeção de termoplástico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Penedo, Itatiaia. **Anais do 7o. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Rio de Janeiro: Abcm, 2013. p. 00-00.

BELLINI, Anna. **Fused Deposition of Ceramics**: a comprehensive experimental, analytical and computacional study of material behavior, fabrication p. 2002. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Materials Engineering, Drexel University, Philadelphia, 2002. Disponível em: http://hdl.handle.net/1860/22. Acesso em: 20 mar. 2019.

BELLINI, Anna; SHOR, Lauren; GUCERI, Selcuk I.. New developments in fused deposition modeling of ceramics. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 214-220, set. 2005. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1108/13552540510612901. Acesso em: 18 mar. 2019.

BOURELL, David et al. Materials for additive manufacturing. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 66, n. 2, p. 659-681, jun. 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009. Acesso em: 18 mar. 2019.

BOYLE, Bret M. et al. 3D printing using powder melt extrusion. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 29, p. 100811, out. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2019.100811.

BRASKEM. **Polipropileno CP 141**: folha de dados. 5. ed. 2018. Disponível em: https://www.braskem.com.br/cms/Principal/ModuloProduto/DownloadFolhaDados?idFolha=EA6K5Q8cTqk=&idIdioma=YrItVniimrc=&idTipo=YrItVniimrc=&idProduto=6xWx1IO6+WE=&pasta=T46EDfq+gkM=&guid=e5c0b19f-be54-4610-9658-6b013b9144b4. Acesso em: 09 maio 2022.

BRETAS, Rosario E. S.; D'ÁVILA, Marcos A.. **Reologia de polímeros fundidos**. 2. ed. São Carlos: Edufscar, 2005. 257 p.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna** - Volume 1. São Paulo: Blucher, 2012.

CANESSA, Enrique; BARUZZO, Marco; FONDA, Carlo. Study of Moineau-based pumps for the volumetric extrusion of pellets. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 17, p. 143-150, out. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.015.

CASAVOLA, Caterina et al. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminat. **Materials & Design**, [S.L.], v. 90, p. 453-458, jan. 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009. Acesso em: 18 mar. 2019.

CHENG, Xiao Min et al. The Design of Screw Extrusion Mechanism Based on Melted Extrusion Modeling. **Applied Mechanics And Materials**, [S.L.], v. 44-47, n. 00, p. 1455-1459, 2011. Trans Tech Publications. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.44-47.1455. Disponível em: https://www.scientific.net/AMM.44-47.1455. Acesso em: 20 mar. 2019.

CHIARONI, A. B.; SILVEIRA, Z. C.. Experimental and numerical evaluation of the temperature profile of a modular extrusion head applied to an experimental 3D printer. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 103, n. 9-12, p. 4385-4398, 22 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03859-z.

CHIARONI, Alexandre Bof. **Avaliação teórico-experimental do perfil de temperatura de um cabeçote de extrusão aplicado a uma impressora 3D experimental**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica – Sem, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Acesso em: 18 mar. 2019.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S.. **Rapid Prototyping**: principles and applications. 2. ed. Singapore: World Scientific, 2003. 445 p.

CHUNG, Chan I.. **Extrusion of Polymers**: theory and practice. 3. ed. Munich: Hanser, 2020.

COOPER, Kenneth. **Rapid Prototyping Technology**: selection and application. New York: Marcek Drekker, Inc, 2001. 248 p.

CRUMP, S. Scott. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. Titular: Uspto. US n. 5121329. Depósito: 30 out. 1989. Concessão: 9 jun. 1992.

CUNHA, Daniel Aparecido Lopes Vieira da et al. Fabrication and Characterization of Scaffolds of Poly(?-caprolactone)/Biosilicate® Biocomposites Prepared by Generative Manufacturing Process. **International Journal Of Biomaterials**, [S.L.], v. 2019, p. 1-11, 3 fev. 2019. Hindawi Limited. http://dx.doi.org/10.1155/2019/2131467.

DÁVILA, J. L. et al. Fabrication of PCL/?-TCP scaffolds by 3D mini-screw extrusion printing. **Journal Of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 133, n. 15, p. 0000-0000, 30 out. 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1002/app.43031. Acesso em: 18 mar. 2019.

DÁVILA, J. L. et al. Software to generate 3-D continuous printing paths for the fabrication of tissue engineering scaffol. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 84, n. 5-8, p. 1671-1677, maio 2016. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7866-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-015-7866-8. Acesso em: 20 mar. 2019.

DÁVILA, José Luis et al. Extrusão 3D, a partir de pó, para fabricação de scaffolds de policaprolactona (PCL) para aplicações em engenharia de tecido ósseo. In: 8TH CONGRESO LATINOAMERICANO DE ÓRGANOS ARTIFICIALES, BIOMATERIALES E INGENIERÍA DE TEJIDOS, 8., 2014, Rosário. **Anais do 8 COLAOB 2014**. Rosário, 2014. p. 01-24.

DENG, Jing et al. Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. **Applied Energy**, [S.L.], v. 113, p. 1775-1785, jan. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.084. Acesso em: 18 mar. 2019.

DOEBELIN, Ernest O.. **Measurement Systems**: application and design. 4. ed. New York: McGraw Hill, 1990.

FILIPEFLOP (comp.). **Termistor NTC 100K com Cabo**. Disponível em: https://www.filipeflop.com/produto/termistor-ntc-100k-com-cabo/. Acesso em: 08 jul. 2022.

FIORIO, R. (2011) **Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contend POSS via extrusão.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FORD, Simon; DESPEISSE, Melanie. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal Of Cleaner Production**, p. 1573-1587. 10 maio 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150. Acesso em: 13 mar. 2019.

FREITAS, Matheus Stoshy de. **Análise paramétrica e validação experimental de um cabeçote de extrusão baseado em rosca, para impre**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos – Eesc Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Acesso em: 18 mar. 2019.

FREITAS, Matheus Stoshy de. **Projeto conceitual e preliminar de uma rosca de extrusão para uma impressora 3-D de pequeno porte**. 2011. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Acesso em: 18 mar. 2019.

GAO, Wei et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, [S.L.], v. 69, p. 65-89, dez. 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001. Acesso em: 18 mar. 2019.

GARDAN, Julien. Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. **Virtual And Physical Prototyping**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1-18, out. 2018. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2018.1518016. Acesso em: 18 mar. 2019.

GEOFFROY, Laura et al. Additive manufacturing of fire?retardant ethylene?vinyl acetate. **Polymers For Advanced Technologies**, [S.L.], v. 30, n. 7, p. 1878-1890, 17 abr. 2019. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/pat.4620.

GGDMETALS. **Alumínio**. Disponível em: https://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/aluminio.pdf. Acesso em: 02 dez. 2021.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015. 498 p.

GILES JUNIOR, Harold F.; WAGNER JUNIOR, John R.; III, Eldridge M. Mount. **Extrusion**: the definitive processing guide and handbook. Norwich: William Andrew, 2005.

GIOUMOUXOUZIS, Christos I.; KARAVASILI, Christina; FATOUROS, Dimitrios G.. Recent advances in pharmaceutical dosage forms and devices using additive manufacturing technologies. **Drug Discovery Today**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 636-643, fev. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.drudis.2018.11.019.

GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin *et al*. Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: a review and future perspectives. **Materials**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 840, 18 maio 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma11050840.

GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ, Carmen M.; SARABIA-VALLEJOS, Mauricio A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, Juan. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: materials, methodologies, and biomedical applications. **Progress In Polymer Science**, [S.L.], v. 94, p. 57-116, jul. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.

GOYANES, Alvaro; ALLAHHAM, Nour; TRENFIELD, Sarah J.; STOYANOV, Edmont; GAISFORD, Simon; BASIT, Abdul W.. Direct powder extrusion 3D printing: fabrication of drug products using a novel single-step process. **International Journal Of Pharmaceutics**, [S.L.], v. 567, p. 118471, ago. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118471.

HOPMANN, Christian; MICHAELI, Walter. **Extrusion Dies for Plastics and Rubber**: design and engineering computations. 4. ed. Munich: Hanser Publishers, 2016.

HU, S. Jack. Evolving Paradigms of Manufacturing: from mass production to mass customization and personalization. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 7, p. 3-8, 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002. Acesso em: 21 mar. 2019.

IMPACTOCNC (org.). **Cartucho Aquecedor Cerâmico 40W - 12v (6 x 20mm)**. Disponível em: https://www.impactocnc.com/cartucho-aquecedor-ceramico-40w-12v. Acesso em: 05 abr. 2022.

IMPERIO DOS METAIS (São Paulo) (comp.). **Buchas de Bronze TM-23**. Disponível em: https://www.imperiodosmetais.com.br/buchas-de-bronze-tm-23. Acesso em: 06 maio 2022.

INFORÇATTI NETO, Paulo et al. Development of an extrusion head for biopolymers handling and application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN AND PROCESSES FOR MEDICAL DEVICES PROMED, 1., 2012, Padenghe Sul Garda. **Proceedings of the first International Conference on Design and Process for Medical**. Padenghe Sul Garda: 2012. p. 49-52.

INFORÇATTI NETO, Paulo. **Adaptação e Construção de uma Máquina para Prototipagem Rápida de Projeto Aberto para Fins de Pesqui**. 2007. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Faculdade Independente do Nordeste, Vitória da Conquista, 2007. Acesso em: 18 mar. 2019.

INFORÇATTI NETO, Paulo. **Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão com rosca para impressoras t**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION/AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ISO/ASTM52900-15**: Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. West Conshohocken: Iso/Astm International, 2015. 9 p. Disponível em: 10.1520/ISOASTM52900-15. Acesso em: 18 mar. 2019.

ITO, Matheus Massaru. **Calibração de sistema de acionamento, para um cabeçote intercambiável de extrusão vertical baseado em monorosca**. 2020. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

JACKSON, Richard J.; WOJCIK, Adam; MIODOWNIK, Mark. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties. **Materials & Design**, [S.L.], v. 160, p. 468-474, dez. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.030.

JEREZ-MESA, R. et al. Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. **Mechatronics**, [S.L.], v. 36, p. 119-126, jun. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.04.007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957415816300289. Acesso em: 21 jul. 2022.

JONES, Rhys et al. RepRap – the replicating rapid prototyper. **Robotica**, [S.L.], v. 29, n. 01, p. 177-191, jan. 2011. Cambridge University Press (CUP). http://dx.doi.org/10.1017/s026357471000069x. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/reprap-the-replicating-rapid-prototyper/597. Acesso em: 20 mar. 2019.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M.. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 518 p.

KALATEC. MOTOR DE PASSO KTC-HT23 / NEMA 23, 2019. Disponível em: https://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Motor_Passo_Nema_HT232.pdf. Acesso em: 20 mar. 2019.

KHONDOKER, Mohammad Abu Hasan; SAMEOTO, Dan. Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers. **Progress In Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 197-209, 29 jun. 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s40964-019-00088-4.

KIM, Hyungjin; LEE, Sangkyu. Printability and physical properties of iron slag powder composites using material extrusion-based 3D printing. **Journal Of Iron And Steel Research International**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 111-121, 13 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s42243-020-00475-0.

KOHLGRUBER, Klemens. **Co-Rotating Twin-Screw Extruders**: fundamentals, technology, and applications. Munich: Carl Hanser, 2008.

KUMAR, Narendra et al. 3D printing of flexible parts using EVA material. **Materials Physics And Mechanics**, [S.L.], v. 2, n. 37, p. 124-132, dez. 2018. . http://dx.doi.org/10.18720/MPM.3722018_3.

KUMAR, Narendra et al. Experimental investigations on suitability of polypropylene (PP) and ethylene vinyl acetate (EVA) in additive manufacturing. **Materials Today**: Proceedings, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 4118-4127, 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.672.

KUMAR, Narendra et al. Extrusion-based additive manufacturing process for producing flexible parts. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 1-12, 19 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s40430-018-1068-x.

KUMAR, Narendra et al. Investigation on the effects of process parameters in CNC assisted pellet based fused layer modeling process. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 35, p. 428-436, out. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.029.

KUMAR, Narendra et al. Investigations on the melt flow behaviour of aluminium filled ABS polymer composite for the extrusion-based additive manufacturing process. **International Journal Of Materials And Product Technology**, [S.L.], v. 59, n. 3, p. 194, 2019. Inderscience Publishers. http://dx.doi.org/10.1504/ijmpt.2019.102931.

KUMAR, Narendra et al. The effect of process parameters on tensile behavior of 3D printed flexible parts of ethylene vinyl. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 35, p. 317-326, out. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.013.

KUMAR, Narendra; JAIN, Prashant Kumar. Analysing the influence of raster angle, layer thickness and infill rate on the compressive behaviou**. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C**: Journal of Mechanical Engineering Science, [S.L.], v. 235, n. 10, p. 1731-1740, 27 nov. 2019. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0954406219889076.

LAM, C.X.F. et al. Mechanical and in vitro evaluations of composite PLDLLA/TCP scaffolds for bone engineering. **Virtual And Physical Prototyping**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 193-197, dez. 2008. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/17452750802551298.

LENG, Jie et al. The development of a conical screw-based extrusion deposition system and its application in fused de. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 409-417, 13 nov. 2019. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/rpj-05-2019-0139.

LIU, F. et al. A plasma-assisted bioextrusion system for tissue engineering. **Cirp Annals**, [S.L.], v. 67, n. 1, p. 229-232, 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.077.

LIU, Fengyuan et al. Process-Driven Microstructure Control in Melt-Extrusion-Based 3D Printing for Tailorable Mechanical Properties in a Polycaprolactone Filament. **Macromolecular Materials And Engineering**, [S.L.], v. 303, n. 8, p. 1800173, 29 maio 2018. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/mame.201800173.

LIU, Fengyuan et al. Structural Evolution of PCL during Melt Extrusion 3D Printing. **Macromolecular Materials And Engineering**, [S.L.], v. 303, n. 2, p. 1700494, 27 dez. 2017. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/mame.201700494.

LIU, Fengyuan; HINDUJA, Sri; BARTOLO, Paulo. Design, Fabrication and Initial Evaluation of a Novel Hybrid System for Tissue Engineering Applications. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 65, p. 213-218, 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.030.

LIU, Fengyuan; HINDUJA, Srichand; BÁRTOLO, Paulo. User interface tool for a novel plasma-assisted bio-additive extrusion system. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 368-378, 12 mar. 2018. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/rpj-07-2016-0115.

LIU, Tengfei et al. High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites. **Composites Part A**: Applied Science and Manufacturing, [S.L.], v. 130, p. 105770, mar. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105770.

MALONE, Evan; LIPSON, Hod. Fab@Home: the personal desktop fabricator kit. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 245-255, 7 ago. 2007. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1108/13552540710776197. Acesso em: 18 mar. 2019.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

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

MATWEB (comp.). **304 Stainless Steel**. Disponível em: https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da. Acesso em: 02 fev. 2022.

MATWEB (comp.). **AISI 4340 Steel, annealed, 25 mm round**. Disponível em: https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fd1b43a97a8a44129b32b9de0d7d6c1a. Acesso em: 02 fev. 2022.

MICHAELI, Walter. **Extrusion dies for plastic and rubber**. 3. ed. Munich: Hanser Publishers, 2003.

MORRIS, Alan S.. **Measurement and Instrumentation Principles**. New York: Elsevier, 2001. 512 p.

MORRISON, Faith A.. **Understanding Rheology**. New York: Oxford University Press, 2001. 545 p.

NETTO, Joaquim Manoel Justino et al. Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review. **The International Journal Of Advanced**

Manufacturing Technology, [S.L.], n. 115, p. 2711-2727, 1 jun. 2021. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07365-z.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquinas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1971. 3 v.

NORTHROP, Robert B.. **Introduction to Instrumentation and Measurements**. 2. ed. Tayler & Francis, 2005.

NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L. et al. Special Materials Used in FDM Rapid Prototyping Technology Application. In: 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS, 16., 2012, Lisboa, Portugal. **Anais [...]** . Ieee, 2012. v. 0000, p. 73-76. Disponível em: 10.1109/INES.2012.6249805. Acesso em: 18 mar. 2019.

OH, Yosep; ZHOU, Chi; BEHDAD, Sara. Part decomposition and assembly-based (Re) design for additive manufacturing: a review. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 22, p. 230-242, ago. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417304359. Acesso em: 18 mar. 2019.

OSSWALD, Tim A.; HERNÁNDEZ-ORTIZ, Juan P.. **Polymer Processing**: modeling and simulation. Munich: Hanser Publishers, 2006.

PAHL, Gerhard et al. **Engineering Design**: a systematic approach. 3. ed. London: Springer, 2007. 617 p.

PANDA, Biranchi N. et al. Performance evaluation of warping characteristic of fused deposition modelling process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 88, n. 5-8, p. 1799-1811, fev. 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8914-8. Acesso em: 18 mar. 2019.

PEREIRA, Simone Fontana. **Efeitos da Incorporação de Resíduos de Espuma Rígida de Poliuretano em Compostos Poliméricos a Base de Polipropileno**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/896. Acesso em: 19 jul. 2022.

PEREZ, Angel R. Torrado; ROBERSON, David A.; WICKER, Ryan B.. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. **Journal Of Failure Analysis And Prevention**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 343-353, 20 mar. 2014. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9.

Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-014-9803-9. Acesso em: 20 mar. 2019.

PHAM, D.T; GAULT, R.S. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [S.L.], v. 38, n. 10-11, p. 1257-1287, out. 1998. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(97)00137-5. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597001375/pdfft?md5=0ccbd2d1cf3c9f4506a5b2. Acesso em: 20 mar. 2019.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de Máquinas**. 46. ed. São Paulo: Editora F. Provenza, 1991.

PROVENZA, Francesco. **Projetista de Máquinas**. 71. ed. São Paulo: Editora F. Provenza, 1996.

RAGAERT, Kim; CARDON, Ludwig; DEGRIECK, Joris. Flexible PCL tube scaffolds by winding of micro-extruded filaments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED RESEARCH IN VIRTUAL AND RAPID PROTOTYPING, 5., 2011, Leiria. **Innovative developments in virtual and physical prototyping**. Boca Ranton: Crc Press, 2012. p. 99-103. Disponível em: https://biblio.ugent.be/publication/1906395. Acesso em: 21 mar. 2019.

RANE, Kedarnath; STRANO, Matteo. A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. **Advances In Manufacturing**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 155-173, 22 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s40436-019-00253-6.

RAUWENDAAL, Crris. **Polymer extrusion**. 5. ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2014. 950 p.

REDDY, B. V.; REDDY, N. V.; GHOSH, A.. Fused deposition modelling using direct extrusion. **Virtual And Physical Prototyping**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 51-60, mar. 2007. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/17452750701336486.

REPETIER (Germany) (org.). **About us**. Disponível em: https://www.repetier.com/. Acesso em: 01 fev. 2022.

RIBEIRO, Gustavo; SILVEIRA, Zilda. Structural and modal analysis of a desktop 3-D printer considering an interchangeable mini screw ext. **High Value Manufacturing**: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, [S.L.], p. 525-530, 16 set. 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/289484273_Structural_and_modal_analysis_of_a_desktop_3-D_pr. Acesso em: 20 mar. 2019.

ROBERSON, David *et al*. Expanding the applicability of FDM-type technologies through materials development. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 137-143, 16 mar. 2015. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/rpj-12-2014-0165.

ROCHA, Carmen R. et al. Novel ABS-based binary and ternary polymer blends for material extrusion 3D printing. **Journal Of Materials Research**, [S.L.], v. 29, n. 17, p. 1859-1866, 28 jul. 2014. Cambridge University Press (CUP). http://dx.doi.org/10.1557/jmr.2014.158. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/novel-absbased-binary-. Acesso em: 20 mar. 2019.

ROZENFELD, Henrique et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006. 576 p.

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard Gordon. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.

SIDAMBE, Alfred. Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review. **Materials**, [S.L.], v. 7, n. 12, p. 8168-8188, 19 dez. 2014. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma7128168. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/8168. Acesso em: 20 mar. 2019.

SILVEIRA, Zilda Castro et al. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Depo. **Key Engineering Materials**, [S.L.], v. 572, n. 00, p. 151-154, set. 2013. Trans Tech Publications. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.572.151. Disponível em: https://www.scientific.net/KEM.572.151. Acesso em: 20 mar. 2019.

SILVEIRA, Zilda de Castro et al. **CABEÇOTE VERTICAL DE EXTRUSÃO PARA IMPRESSORAS 3D E PROCESSO DE EXTRUSÃO POR ROSCA UTILIZANDO O REFERIDO CABEÇOTE**. Depositante: Instituto Nacional da Propriedade Industrial. INPI n. BR 102014005143-0 B1. Depósito: 06 mar. 2014. Concessão: 1 jun. 2021.

SILVEIRA, Zilda de Castro et al. Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusio. **International Journal Of Rapid Manufacturing**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 49-60, 29 maio 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1504/ijrapidm.2014.062037. Acesso em: 19 mar. 2019.

SINGAMNENI, Sarat et al. Biopolymer Alternatives in Pellet Form for 3D Printing by Extrusion. **3D Printing And Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 217-226, ago. 2019. Mary Ann Liebert Inc. http://dx.doi.org/10.1089/3dp.2018.0152.

SINGAMNENI, Sarat et al. Extrusion 3D Printing of Polybutyrate-Adipate-Terephthalate-Polymer Composites in the Pellet Form. **Polymers**, [S.L.], v. 10, n. 8, p. 922, 17 ago. 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/polym10080922.

SINGH, Sunpreet; RAMAKRISHNA, Seeram; SINGH, Rupinder. Material issues in additive manufacturing: a review. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 25, p. 185-200, jan. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661251630161X. Acesso em: 20 mar. 2019.

SPECTRA ANALYSIS. **Full Scan GPC-IR Characterization of Polyolefin Copolymers & Blends**. Disponível em: https://spectra-analysis.com/wp-content/uploads/2019/06/AppNote034-GPC-IR-Characterization-of-Polyolefin-Copolymers-Blends-1.pdf. Acesso em: 05 mar. 2022.

STEVENS, M. J.; COVAS, J. A.. **Extruder Principles and Operation**. 2. ed. Springer-Science+Business Media, 1995. 494 p.

TEQUIPMENT. **FLIR T360 Thermal Imaging Infrared Camera**. Disponível em: https://www.tequipment.net/FlirT360.html. Acesso em: 05 ago. 2022.

TERMOMECANICA. **Latão Corte Livre Americano**. Disponível em: https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Lat%C3%A3o%20Corte%20Livre%20Americano.pdf. Acesso em: 02 dez. 2021.

THOMPSON, Mary Kathryn et al. Design for Additive Manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. **Cirp Annals**, [S.L.], v. 65, n. 2, p. 737-760, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004. Acesso em: 18 mar. 2019.

TORRADO, Angel R. *et al*. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 6, p. 16-29, abr. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001.

TSENG, Jian-Wei et al. Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK. **Materials & Design**, [S.L.], v. 140, n. 00, p. 209-221, fev. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.032. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517310638?via%3Dihub. Acesso em: 20 mar. 2019.

TURNER, Brian N.; GOLD, Scott A.. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, an. **Rapid Prototyping Journal**. p. 250-261. 21 mar. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1108/ RPJ-02-2013-0017. Acesso em: 13 mar. 2019.

TURNER, Brian N.; STRONG, Robert; GOLD, Scott A.. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**. p. 192-204. 20 mar. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012. Acesso em: 13 mar. 2019.

VENKATARAMAN, N. et al. Feedstock material property – process relationships in fused deposition of ceramics (FDC). **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 244-253, dez. 2000. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/13552540010373344. Disponível em: https://doi.org/10.1108/13552540010373344. Acesso em: 20 mar. 2019.

VERA-SORROCHE, Javier et al. Thermal optimisation of polymer extrusion using in-process monitoring techniques. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 53, n. 2, p. 405-413, maio 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112002566?via%3Dihub. Acesso em: 21 jul. 2022.

VOLPATO, N. *et al*. Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 81, n. 9-12, p. 1519-1531, 26 maio 2015. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7300-2.

VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura Aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3d. São Paulo: Edgar Blücher, 2017. 400 p.

WAHLSTER, W. et al. **Towards the Internet of Services**: the theseus research program. New York: Springer International Publishing, 2014. 494 p.

WANG, Chengjin et al. Design, Characterization, and 3D Printing of Cardiovascular Stents with Zero Poisson's Ratio in Longitudinal Deformation. **Engineering**, [S.L.], v. 7, n. 7, p. 979-990, jul. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2020.02.013.

WANG, F. et al. Precision extruding deposition and characterization of cellular poly???caprolactone tissue scaffolds. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 42-49, 1 fev. 2004. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/13552540410512525.

WHITE, James L.; POTENTE, Helmut. **Screw Extrusion**: science and technology (progress in polymer processing). [S.l]: Hanser Pub, 2002. 463 p.

WHYMAN, Sean; ARIF, Khalid Mahmood; POTGIETER, Johan. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 96, n. 9-12, p. 3417-3428, 6 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1843-y.

WOHLERS, Terry. **Wohlers Report 2017**: 3d printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins: Wohlers Associates, 2017. 344 p.

ZHOU, Zuoxin et al. Additive manufacturing of heat-sensitive polymer melt using a pellet-fed material extrusion. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 24, n. 00, p. 552-559, dez. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.040. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418303683?via%3Dihub. Acesso em: 20 mar. 2019.

APÊNDICE A - Reologia aplicada ao processo de extrusão

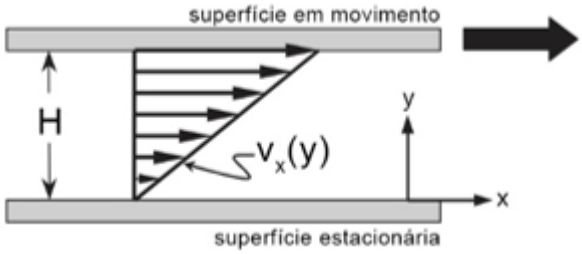
Distintamente de sólidos elásticos, os líquidos puramente viscosos apresentam tendência a se deformarem continuamente quando submetidos à ação de tensão e, consequentemente não se recuperarem em sua totalidade após esta ser removida. O comportamento reológico dos fluidos pode ser determinado pela relação entre tensão e taxa de deformação, também conhecida como viscosidade, uma vez que a relação entre tensão e deformação varia temporalmente. (STEVENS; COVAS, 1995; KOHLGRUBER, 2008).

A deformação elongacional de um fluido, transcorre quando se varia a velocidade na direção do fluxo e, está associada à viscosidade elongacional o que permite ser comparada ao módulo de elasticidade em tensão direta de materiais sólidos. Procedendo-se a uma comparação análoga a do módulo de elasticidade cisalhante dos sólidos, constata-se a deformação em cisalhamento ocasionada pela variação da velocidade em direção perpendicular ao fluxo associa-se–a uma viscosidade cisalhante (STEVENS; COVAS, 1995).

De grande importância no processo de extrusão, os fluxos elongacionais que se processam em regiões nas quais decorrem bruscas mudanças de geometria, sendo estas as responsáveis pela quebra efetiva de aglomerados e dipersão de partículas. No entanto, a medição da viscosidade elongacional é dificultosa, sendo, portanto, o comportamento reológico dos polímeros fundidos frequentemente descritos em função de fluxos de cisalhamento (BRETAS; DÁVILA, 2005).

A movimentação do fluido na superfície da rosca em relação ao barril durante o processo de extrusão gera fluxo cisalhante simples. A figura A1 ilustra o processo.

Figura A1 - Fluxo de cisalhamento entre placas paralelas



Fonte: Morrison (2001)

A variação da deformação de cisalhamento temporalmente ou a variação do perfil de velocidades em direção perpendicular ao fluxo definem a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) como expresso na equação A1 (BRETAS; D'ÁVILA, 2005)

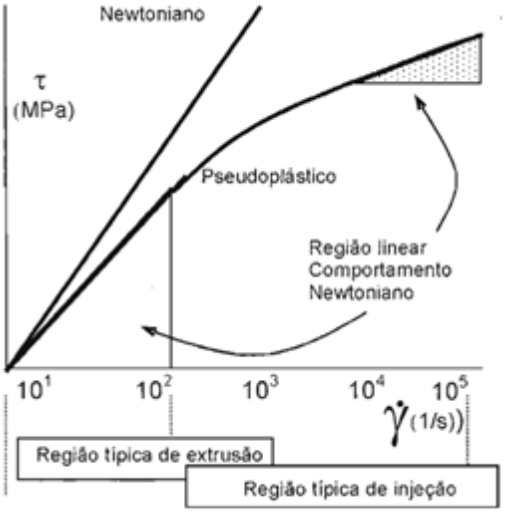
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma_{xy}}{dt} = \frac{dv_x}{dy} \tag{A1}$$

De acordo com Bretas e Dávila (2005), em fluidos Newtonianos, a tensão produzida associa-se com a taxa de cisalhamento por intermédio da viscosidade (η) constante (equação A2) sendo esta a representação da resistência do material ao fluxo.

$$\tau_{xy} = \eta\dot{\gamma}_{xy} \tag{A2}$$

Morrison (2001), Bretas e Dávila (2005) enunciam que em baixas taxas de cisalhamento, a viscosidade dos polímeros fundidos mostra-se inicialmente constante, entretanto, a partir de um determinado valor crítico, o incremento da taxa de cisalhamento promove orientação das moléculas poliméricas reduzindo sua resistência ao fluxo. Este fenômeno configura o comportamento não Newtoniano do tipo pseudoplástico. No entanto, em valores de cisalhamento muito elevados, o material passa a se comportar novamente como fluido Newtoniano (figura A2).

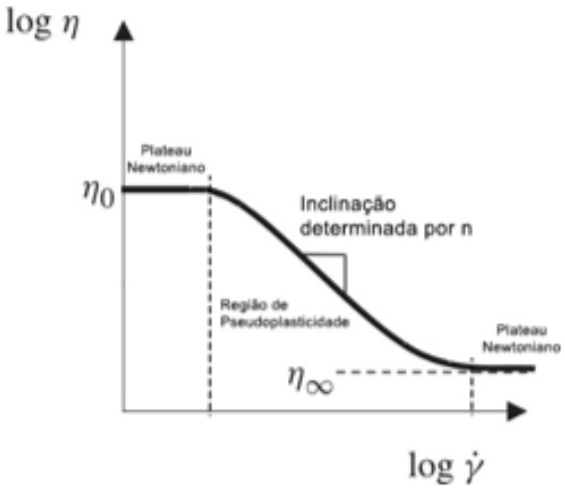
Figura A2 - Comportamento de polímeros sob deformação



Fonte: Manrich, 2005

O comportamento viscoso de polímeros fundidos pode ser demonstrado como uma curva de viscosidade versus taxa de cisalhamento (figura A3) evidenciando as três regiões citadas anteriormente (BRETAS; DÁVILA, 2005).

Figura A3 - Curva de viscosidade versus taxa de cisalhamento



Fonte: Morrison (2001)

É possível modelar matematicamente a relação entre a variação da viscosidade (η) dos polímeros fundidos e a taxa de cisalhamento (γ̇) por meio da Lei das Potências

como expresso na equação A3, em que denomina-se k como fator de consistência e, n o índice da Lei das potências. O valor de n é menor que 1 e tende a zero à medida que ocorre aumento da pseudoplasticidade do polímeo (KOHLGRUBER, 2008; BRETAS; DÁVILA, 2005; RAUWENDAAL, 2014).

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \tag{A3}$$

A tensão de cisalhamento na região de comportamento pseudoplástico pode ser calculado, de acordo com a Lei das potências, por intermédio da aplicação das concomitantes das equações A2 e A3, como mostrado na equação 5 (BRETAS; DÁVILA, 2005)

$$\tau_{xy} = k\dot{\gamma}_{xy}{}^{n} \tag{A4}$$

Há a possibilidade, ainda, de expressar a Lei das potências em termos de parâmetros recíprocos para o índice e fator de consistência. Nesta nova notação, define-se m e φ como expoente de fluxo e fator de fluidez, respectivamente, relacionando-os com os parâmetros n e k conforme equações A5 e A6 (MICHAELI, 2003)

$$k = \varphi^{-1/m} \tag{A5}$$

$$n = 1/m \tag{A6}$$

Ainda que simples, a Lei das Potências mostra-se limitada apenas a regiões nas quais a taxa de cisalhamento são moderadas, nem sempre refletindo as condições de processamento em que os polímeros são submetidos. Outro ponto relevante a se destacar alude ao fato da não consideração do efeito da temperatura na viscosidade (BRETAS; DÁVILA, 2005).

Com o propósito de contornar os fatos supracitados, é possível recorrer ao modelo de Carreau-Yasuda, expresso na equação A7, a fim de determinar a viscosidade em baixas, médias e elevadas taxas de cisalhamento (OSSWALD; HERNÁNDEZ-ORTIZ, 2006)

$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{(n-1)/a} \quad \text{(A7)}$$

Conforme este modelo, η_0 se refere à viscosidade em taxa de cisalhamento zero; η_∞ alude à viscosidade em taxa de cisalhamento infinita; λ uma constante de tempo; a é um parâmetro adimensional que descreve a região de transição entre o primeiro plateau Newtoniano e a região de pseudoplasticidade; e, n é o índice da Lei das Potências (OSSWALD; HERNÁNDEZ-ORTIZ, 2006; BRETAS; DÁVILA, 2005).

Segundo Osswald e Hernandez Ortiz (2006), a viscosidade em taxas de cisalhamento infinita pode ser ignorada e a equação anterior ser adaptada para incluir o parâmetro a_T, o qual expressa a dependência da temperatura como mostrado na equação A8

$$a_T = exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad \text{(A8)}$$

Assim sendo, o modelo de Carreau-Yasuda modificado (equação A9) revela ser de particular valia para calcular a viscosidade de polímeros em processos de extrusão onde as taxas de cisalhamento desenvolvidas mostram-se, geralmente, de baixas a moderadas.

$$\eta = \eta_0 a_T [1 + (\lambda a_T \dot{\gamma})^a]^{(n-1)/a} \quad \text{(A9)}$$

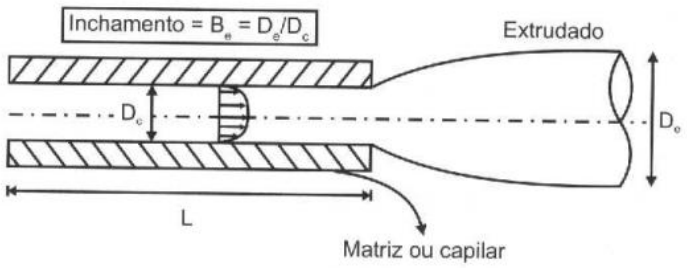
Viscoelasticidade dos polímeros

A viscoelasticidade é compreendida pela resposta à deformação, contemplando simultaneamente, comportamento viscoso e elástico. A seleção do material para determinada aplicação sucede-se pela precisa compreensão do polímero sob fluxo (MANRICH, 2005).

Dentre os efeitos viscoelásticos considerados na extrusão de polímeros termoplásticos destacam-se o inchamento do extrudado, fratura do fundido e pele de cação.

O inchamento do extrudado decorre quando o fluxo de polímero em uma matriz sofre deformação tendo suas cadeias poliméricas orientadas na mesma direção do fluxo, simultaneamente, o fluido tenta recuperar-se da deformação elástica a ele imposta. No entanto, uma parcela desta deformação apenas se recupera fora dos canais da matriz causando o incremento da espessura do material extrudado (BRETAS; DÁVILA, 2005; MANRICH, 2005). A figura A4 ilustra a ocorrência do fenômeno previamente descrito.

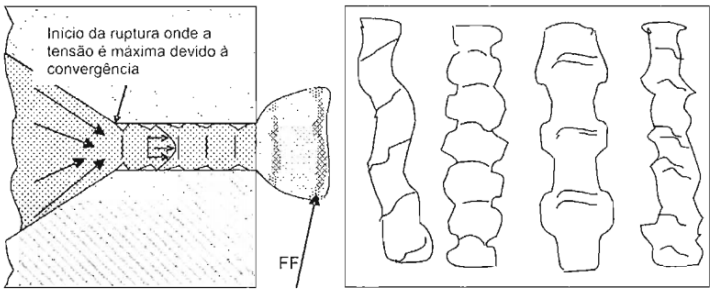
Figura A4 – Inchamento do extrudado.



Fonte: Bretas e Dávila (2005)

A fratura do fundido se processa nos casos em que há redução da espessura do canal por onde o material a ser extrudado está a fluir. No ponto de estricção ocorre elevação da energia e, consequentemente, aumento da tensão de cisalhamento (BRETAS; DÁVILA, 2005). Caso a energia apresente valores muito elevados a deformação viscoelástica não se processa em tempo hábil provocando uma deformação distinta na forma de fratura (MANRICH, 2005). Este fenômeno é elucidado na figura A5.

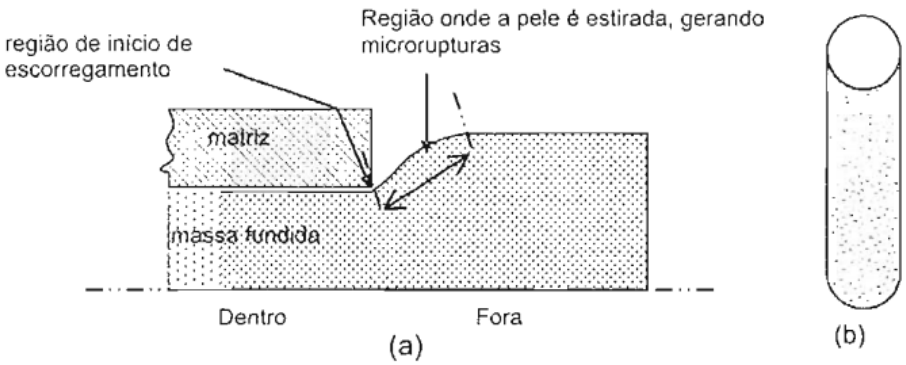
Figura A5 – Fratura do fundido



Fonte: Manrich (2005)

Outra categoria de efeito viscoelástico considerado é o denominado pele de cação. Este é caracterizado por irregularidades superficiais e falta de lisura no perfil extrudado, esta irregularidade decorre pela ausência de adesão da massa fundida às paredes da matriz, sobrevindo, principalmente, na saída (Figura A6).

Figura A6 – Pele de cação (a)formação na saída da matriz, (b) perfil apresentando rugosidade



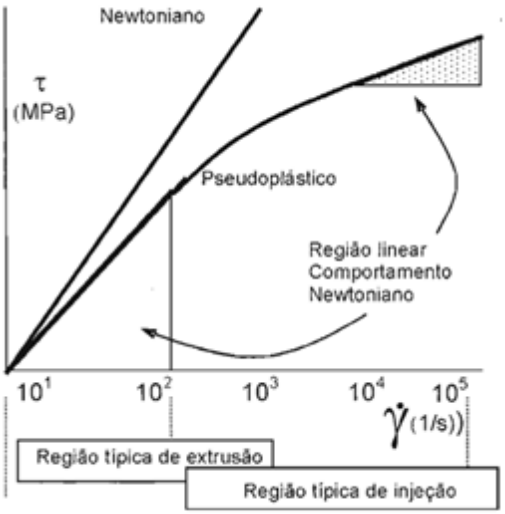
. Fonte: Manrich (2005)

Considerações sobre escoamento de polímeros fundidos

Ao se submeter polímeros a tensões normais (σ) ou tangenciais (τ), estas geram deformações elongacionais (ε) ou cisalhantes (γ), respectivamente, ou, então, uma combinação de ambas caso as tensões se mostrem simultaneamente. A taxa na qual se verifica a deformação elongacional e cisalhantes são definidas como $\dot{\varepsilon}$ e $\dot{\gamma}$, e a viscosidade, definida como fator de proporcionalidade entre a tensão e a taxa de deformação, representada por λ ou η (MANRICH, 2005).

A figura A7 representa o comportamento de polímeros sob deformação. Nesta ilustração se observa que, para materiais com comportamento newtoniano a viscosidade é constante para diferentes taxas de cisalhamento. Em contrapartida, polímeros com comportamento pseudoplásticos tem sua viscosidade reduzida com o aumento da tensão, entretanto apresentam-se como fluidos newtonianos em baixas taxas de deformação (MANRICH, 2005).

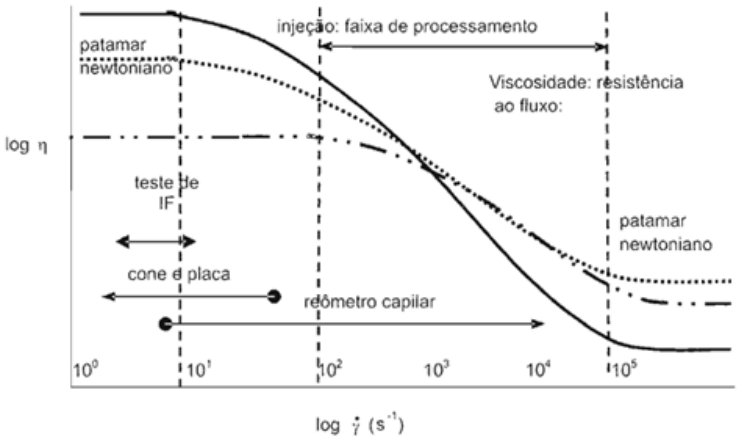
Figura A7 - Comportamento de polímeros sob deformação



Fonte: Manrich, 2005

Como mencionado anteriormente, a viscosidade está associada com a taxa de deformação do material. Assim, é possível defini-la, também, como a resistência ao fluxo ou à deformação da substância a qual é relevante na determinação da velocidade de seu processamento (MANRICH, 2005). A figura A8 mostra a relação de dependência entre viscosidade e taxa de cisalhamento.

Figura A8 – Curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento



Fonte: Manrich (2005)

Medidas da Propriedades reológicas.

Há diversas técnicas experimentais que possibilitam sua aplicação no estudo das propriedades reológicas de polímeros fundidos, de modo a permitir estabelecer a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento.

Dentre as técnicas aplicadas, as mais frequentes concerne para aquelas pautadas em aplicações mecânicas de tensões ou taxas de cisalhamento como, por exemplo, a reometria capilar, a de placas paralelas, a de cone-placa e reometria de cilindros concêntricos. (BRETAS; DÁVILA, 2005; MANRICH, 2005).

Nesta seção é feita uma breve explanação acerca das técnicas supracitadas.

Reometria capilar

Reometria capilar consiste na técnica mais frequentemente adotada. Esta permite medir a vazão de material em um tubo, em função da pressão aplicada sobre ele. Nesta faz-se uso de um capilar de maneira a minimizar os efeitos advindos do aquecimento, dos efeitos inerciais e do gradiente de temperatura.

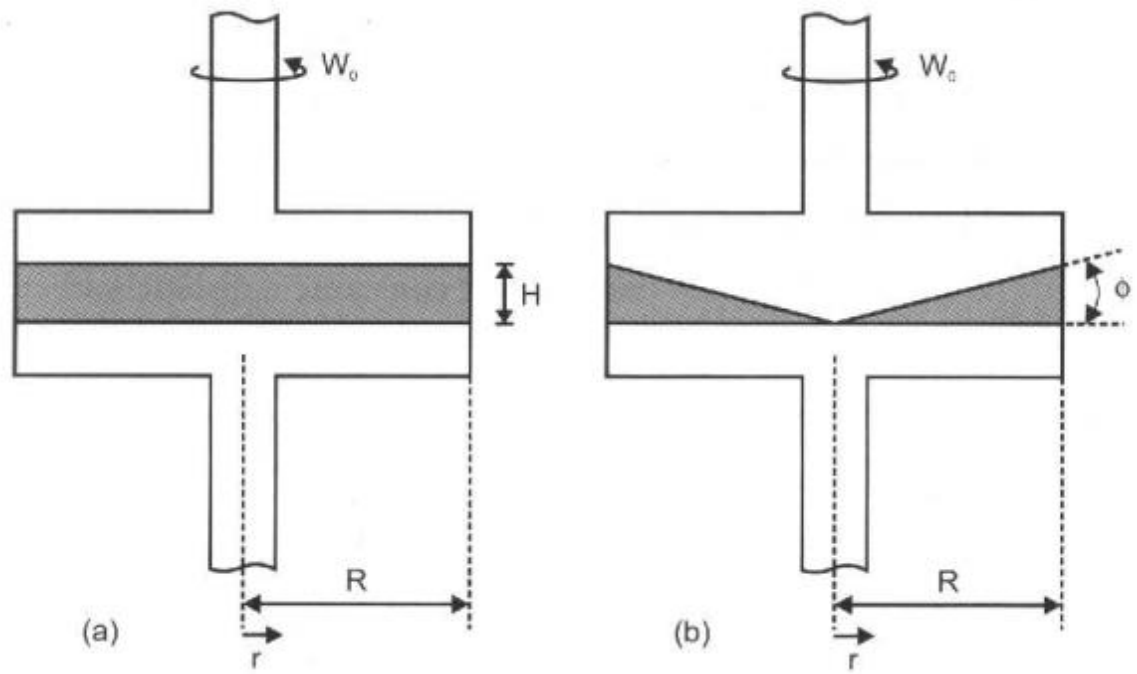
Ela revela ser a técnica mais indicada em procedimentos que empregam polímeros com taxas de cisalhamento entre médias a elevadas (acima de 10 s^{-1}), sobretudo para avaliação da viscosidade quando o material encontra-se em processamento. Caso haja a demanda para identificação do patamar Newtoniano outras técnicas, como a reometria de placas paralelas mostram-se ser de grande valia.

No entanto, diversos outros processos operam com taxas de cisalhamento com valores variados, como a extrusão (10^2 s^{-1} a 10^3 s^{-1}) e o recobrimento de fios (10^4 s^{-1} a 10^6 s^{-1})

Reometria de placas paralelas e cone-placa

As técnicas categorizadas como reometria de placas paralelas e cone-placa são processadas por intermédio da aplicação de um fluxo de arraste ao material provocado pela rotação de uma placa à medida que a segunda placa mantém-se estática (Figura A9). Faz-se uso destas técnicas quando se pretende medir a viscosidade de materiais com taxas de cisalhamento abaixo de $100s^{-1}$ (MANRICH, 2005; BRETAS; DÁVILA, 2005)

Figura A9 - Geometria de reômetros de: (a) placas paralelas; (b) cone e placa



Fonte: Bretas e Dávila (2005)

A aplicação de reômetros rotacionais torna-se mais adequada quando utilizadas pequenas quantidades de materiais. Entretanto, em consequência de seu emprego a temperatura da amostra ensaiada se eleva sobrevindo a diminuição de sua viscosidade, portanto, é imprescindível o controle contínuo de temperatura no transcorrer das medições. Além disso, quando impostas altas velocidades angulares, estas podem ocasionar instabilidades alterando o torque medido (MORRISON, 2001 RAUWENDAAL, 2014).

APENDICE B – Dados obtidos com relação velocidade de rotação e vazão.

Amostras de polipropileno para análise de vazão

180ºC @ 20rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,2953		
2	0,3011	0,2982	0,004101
3	0,302	0,2995	0,003636
4	0,1988	0,2743	0,050421
5	0,1648	0,2524	0,065611
6	0,2362	0,2497	0,059055
7	0,2333	0,2474	0,054265
8	0,2048	0,2420	0,052444
9	0,2131	0,2388	0,049997
10	0,1981	0,2348	0,048865
11	0,2039	0,2319	0,047281
12	0,1757	0,2273	0,047916
13	0,2035	0,2254	0,046346
14	0,1876	0,2227	0,045662
15	0,1877	0,2204	0,044921

180ºC @ 40 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,6091		
2	0,5835	0,5963	0,018102
3	0,5798	0,5908	0,015956
4	0,4612	0,5584	0,066097
5	0,3832	0,5234	0,097034
6	0,3859	0,5005	0,103352
7	0,4912	0,4991	0,094412
8	0,4411	0,4919	0,089784
9	0,486	0,4912	0,084008
10	0,4485	0,4870	0,080347
11	0,4616	0,4846	0,076607
12	0,4143	0,4788	0,075812
13	0,482	0,4790	0,07259
14	0,4191	0,4748	0,071558
15	0,4724	0,4746	0,068957

180ºC @ 60 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,9246		
2	0,8761	0,90035	0,034295
3	0,8986	0,899767	0,024271
4	0,7344	0,858425	0,085025
5	0,5442	0,79558	0,158649
6	0,6847	0,7771	0,148945
7	0,6741	0,762386	0,141431
8	0,6892	0,753238	0,133472
9	0,7932	0,757678	0,12556
10	0,5299	0,7349	0,138571
11	0,6444	0,726673	0,134262
12	0,6101	0,716958	0,132363
13	0,7604	0,7203	0,127299
14	0,7965	0,725743	0,123989
15	0,7753	0,729047	0,120162

200ºC @ 10 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,2070		
2	0,2056	0,2063	0,0009899
3	0,1801	0,1976	0,0151428
4	0,2006	0,1983	0,0124567
5	0,2011	0,1989	0,010859
6	0,1972	0,1986	0,0097367
7	0,1177	0,1870	0,031843
8	0,1124	0,1777	0,0395672
9	0,1172	0,1710	0,0421513
10	0,0974	0,1636	0,0460527
11	0,1036	0,1582	0,0472902
12	0,1025	0,1535	0,047868
13	0,1013	0,1495	0,0480653
14	0,1052	0,1464	0,0476743
15	0,1022	0,1434	0,0473333

200ºC @ 20 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,4078		
2	0,4072	0,4075	0,000424
3	0,4155	0,4102	0,004629
4	0,4079	0,4096	0,003945
5	0,481	0,4239	0,032113
6	0,3401	0,4099	0,044664
7	0,2842	0,3920	0,062611
8	0,2771	0,3776	0,070776
9	0,2862	0,3674	0,072878
10	0,2005	0,3508	0,08665
11	0,2055	0,3375	0,093141
12	0,2363	0,3291	0,093493
13	0,2482	0,3229	0,092282
14	0,2137	0,3151	0,093341
15	0,2146	0,3084	0,093612

200ºC @ 30 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,3575		
2	0,3339	0,3457	0,016688
3	0,3221	0,3378	0,018025
4	0,3408	0,3386	0,014792
5	0,617	0,3943	0,125173
6	0,6128	0,4307	0,143159
7	0,5954	0,4542	0,144757
8	0,6075	0,4734	0,144562
9	0,5789	0,4851	0,139726
10	0,5902	0,4956	0,135862
11	0,4407	0,4906	0,129949
12	0,4489	0,4871	0,124486
13	0,4621	0,4852	0,119388
14	0,3626	0,4765	0,119294
15	0,3697	0,4693	0,118213

200ºC @ 40 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,5154		
2	0,5047	0,5101	0,007566
3	0,4772	0,4991	0,019706
4	0,4488	0,4865	0,029856
5	0,7165	0,5325	0,106048
6	0,7017	0,5607	0,117334
7	0,7017	0,5809	0,119634
8	0,7415	0,6009	0,124472
9	0,7457	0,6170	0,126036
10	0,7211	0,6274	0,123302
11	0,5359	0,6191	0,120186
12	0,6197	0,6192	0,114593
13	0,6129	0,6187	0,109728
14	0,5038	0,6105	0,109803
15	0,5099	0,6038	0,108949

200ºC @ 50 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,838		
2	0,8366	0,8373	0,00099
3	0,846	0,8402	0,005071
4	0,8584	0,84475	0,009998
5	0,8712	0,85004	0,014659
6	0,8588	0,8515	0,01359
7	0,8418	0,850114	0,012937
8	0,8767	0,853438	0,015225
9	0,7903	0,846422	0,025412
10	0,5796	0,81974	0,087712
11	0,6023	0,799973	0,105935
12	0,5644	0,780342	0,121765
13	0,5698	0,764146	0,130387
14	0,6241	0,754143	0,130744
15	0,6519	0,747327	0,128724

200ºC @ 60 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,914		
2	0,9207	0,91735	0,004738
3	0,9144	0,916367	0,003758
4	0,946	0,923775	0,015131
5	0,9425	0,92752	0,015551
6	0,9328	0,9284	0,014075
7	1,0178	0,941171	0,036151
8	0,9194	0,93845	0,034343
9	0,977	0,942733	0,034599
10	0,6908	0,91754	0,086088
11	0,678	0,895764	0,109024
12	0,7287	0,881842	0,114593
13	0,7251	0,869785	0,118013
14	0,734	0,860086	0,11905
15	0,6471	0,845887	0,127219

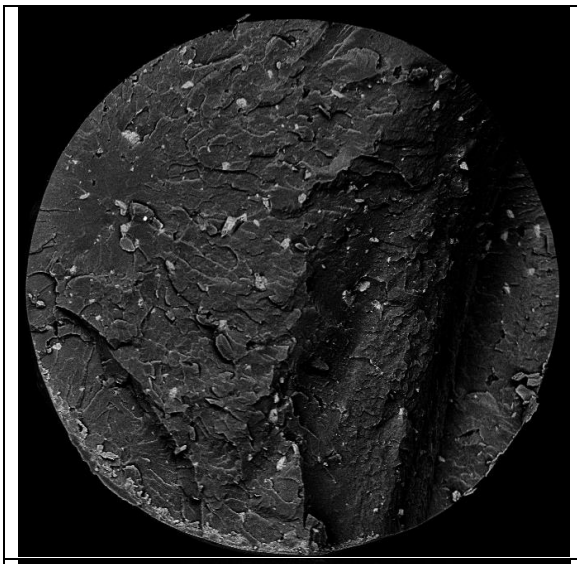
220ºC @ 20 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,2485		
2	0,2389	0,2437	0,006788
3	0,2934	0,2603	0,029093
4	0,2332	0,2535	0,027339
5	0,2296	0,2487	0,025977
6	0,201	0,2408	0,030321
7	0,233	0,2397	0,027835
8	0,2232	0,2376	0,026419
9	0,2295	0,2367	0,024859
10	0,2193	0,2350	0,024075
11	0,2108	0,2328	0,023973
12	0,2267	0,2323	0,022924
13	0,1945	0,2294	0,024319

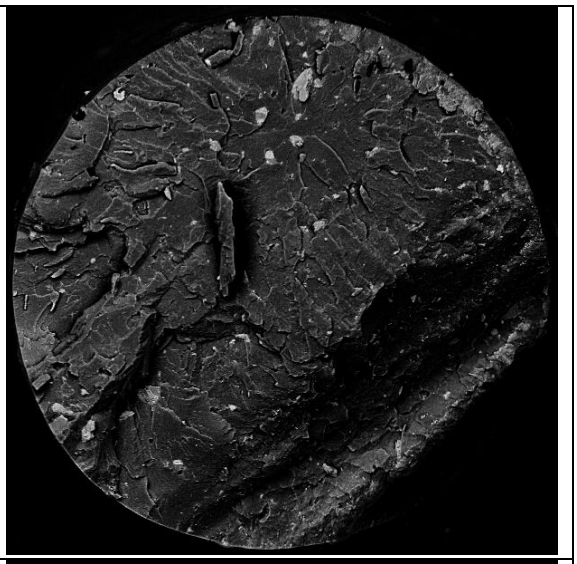
220ºC @ 40 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,602		
2	0,603	0,6025	0,000707
3	0,6081	0,6044	0,003272
4	0,5446	0,5894	0,030002
5	0,4614	0,5638	0,062874
6	0,4822	0,5502	0,065367
7	0,4366	0,5340	0,073517
8	0,5446	0,5353	0,068167
9	0,46	0,5269	0,068529
10	0,502	0,5245	0,065089
11	0,5479	0,5266	0,062152
12	0,5284	0,5267	0,059262
13	0,5353	0,5274	0,056789
14	0,4579	0,5224	0,057636
15	0,4794	0,5196	0,056639

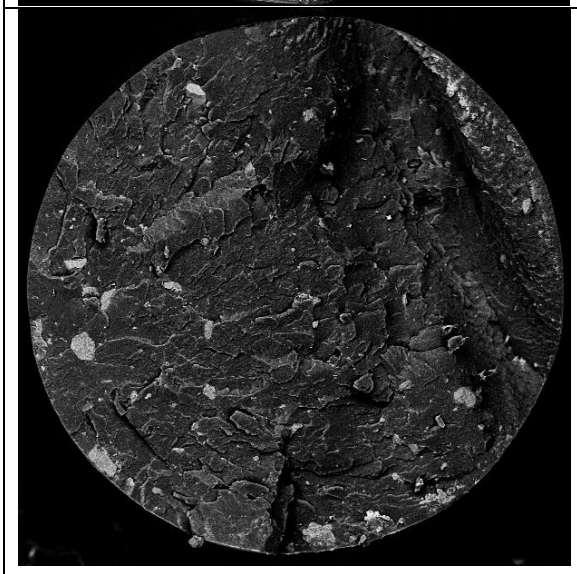
220ºC @ 60 rpm			
Amostra	Massa (g)	Média (g)	Desvio Padrão
1	0,9719		
2	0,945	0,95845	0,019021
3	0,9482	0,955033	0,014694
4	0,7769	0,9105	0,089871
5	0,647	0,8578	0,141223
6	0,6254	0,819067	0,157977
7	0,6667	0,7973	0,155287
8	0,6108	0,773988	0,158167
9	0,6701	0,762444	0,15195
10	0,7231	0,75851	0,143799
11	0,7703	0,759582	0,136466
12	0,7937	0,762425	0,130488
13	0,6481	0,753631	0,128894
14	0,7825	0,755693	0,124077
15	0,6934	0,75154	0,120641

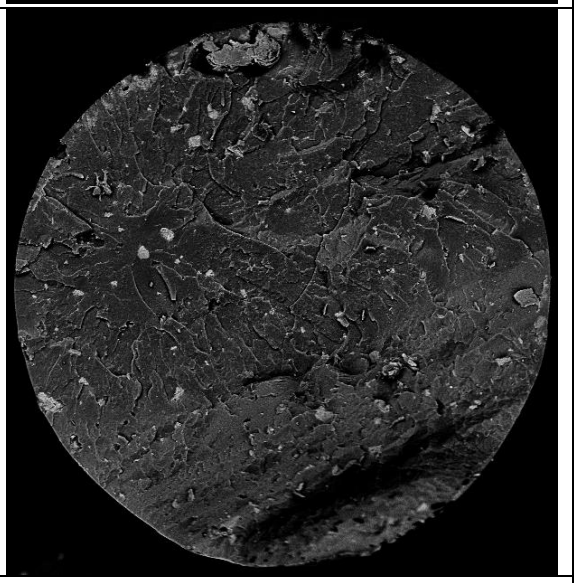
APENDICE C – Análises de micrografias de mistura**.**

20 rpm 180 C

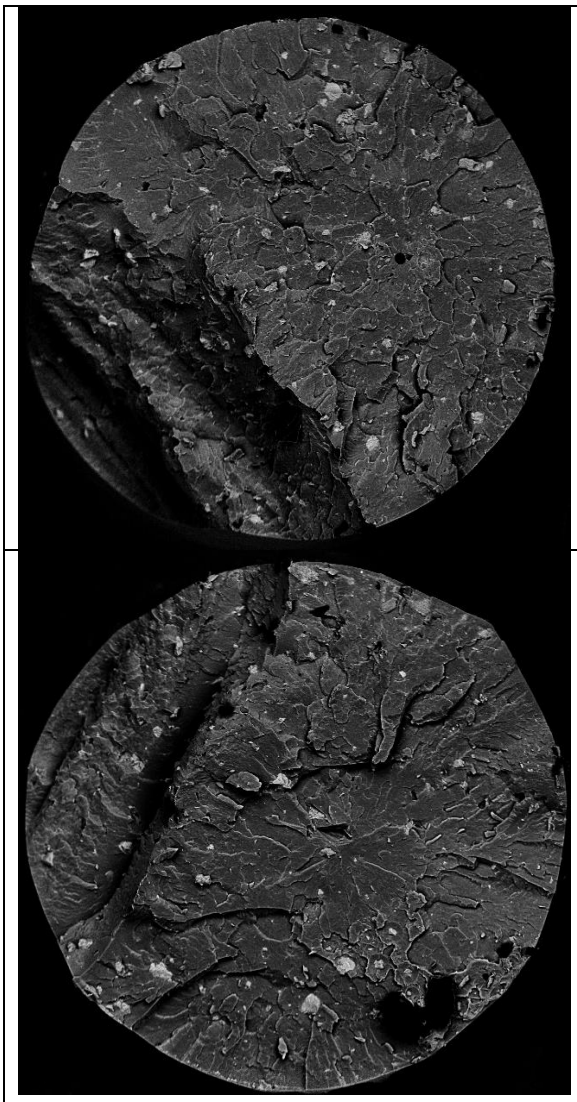


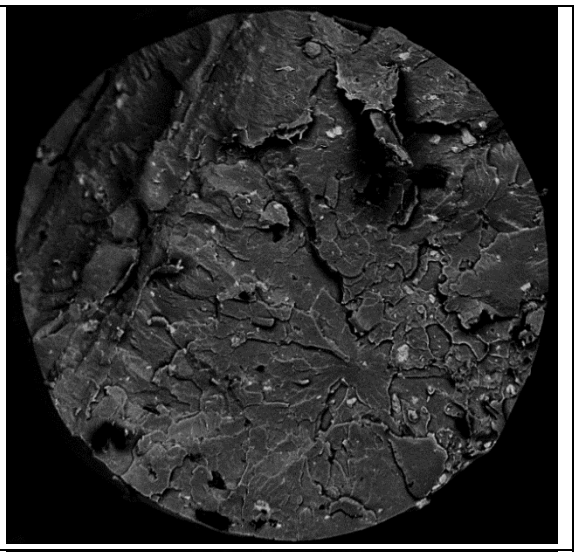


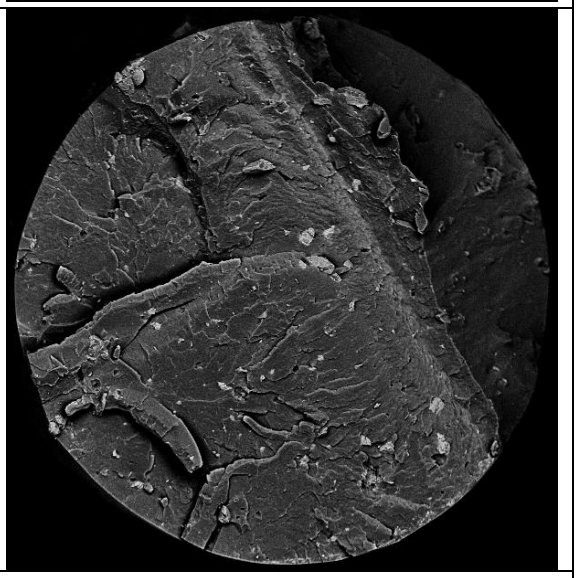




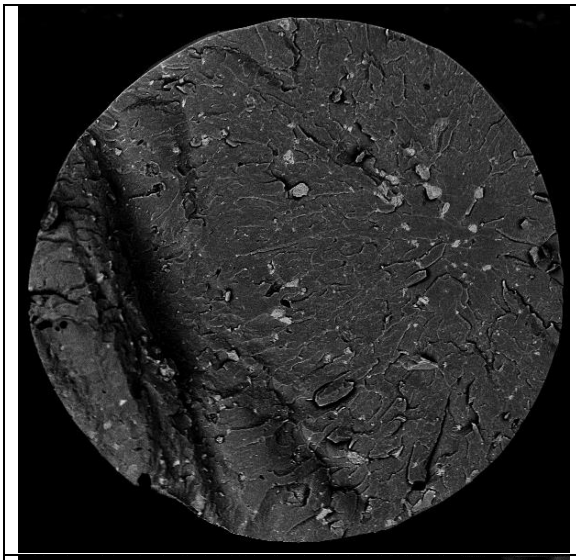
40 rpm 180 C

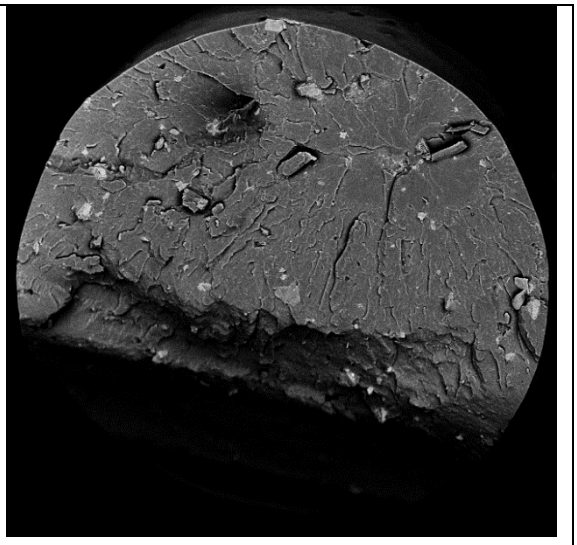


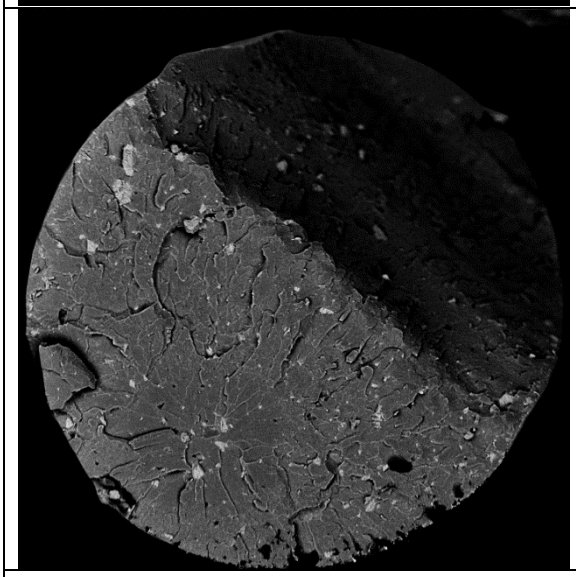


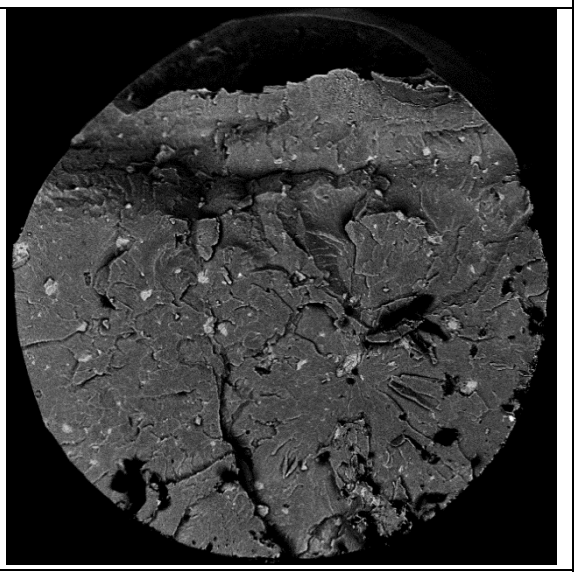


60 rpm 180 C

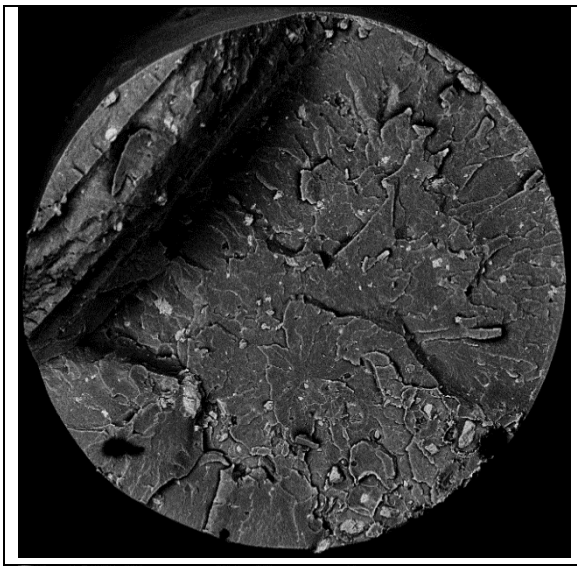


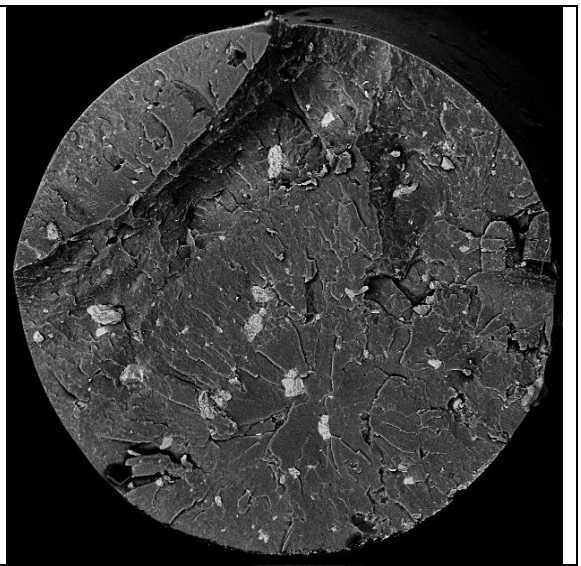


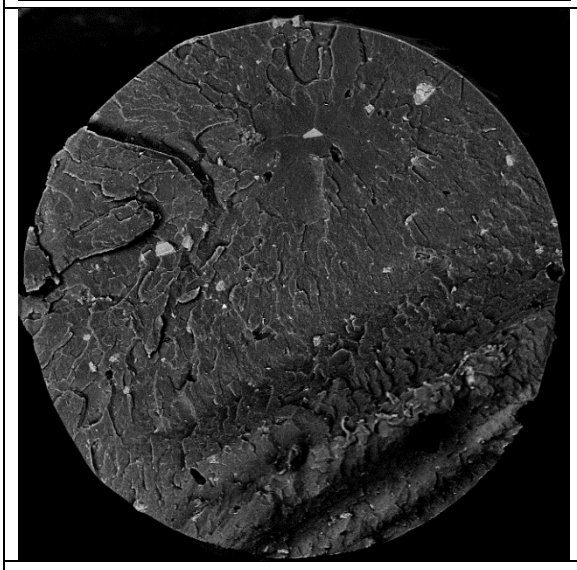


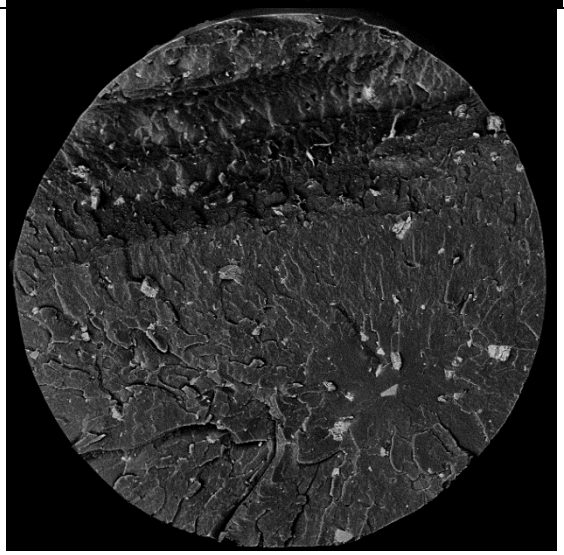


20 rpm 200 C

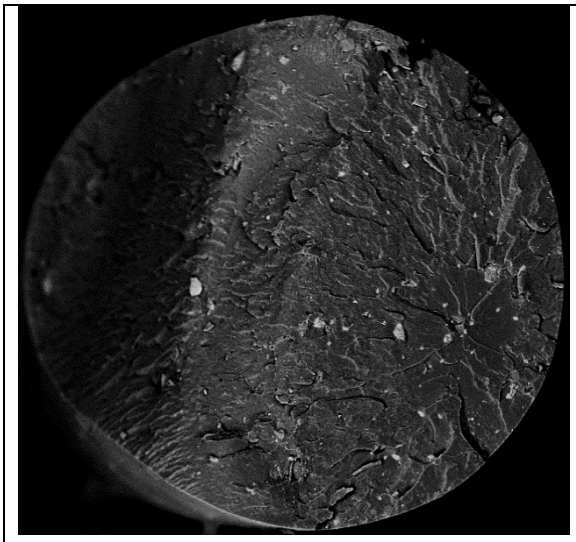


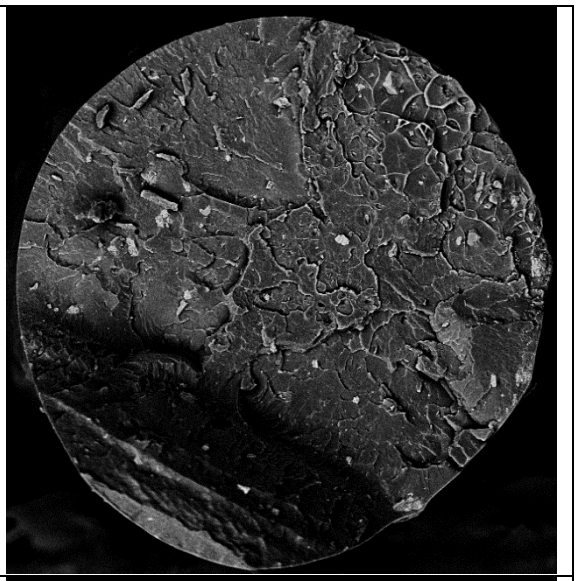


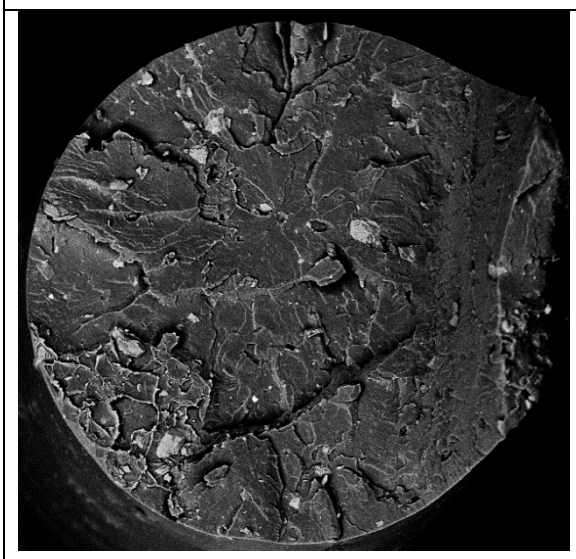


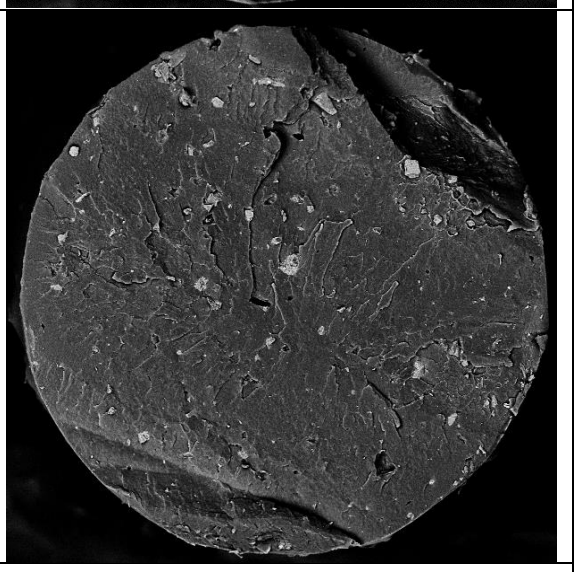


40 rpm 200 C

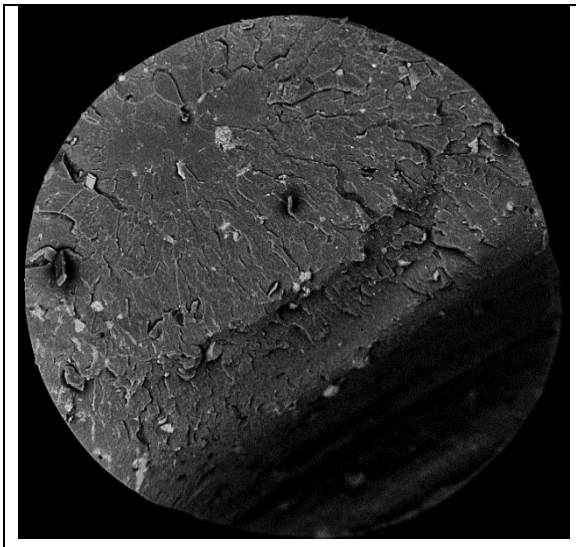


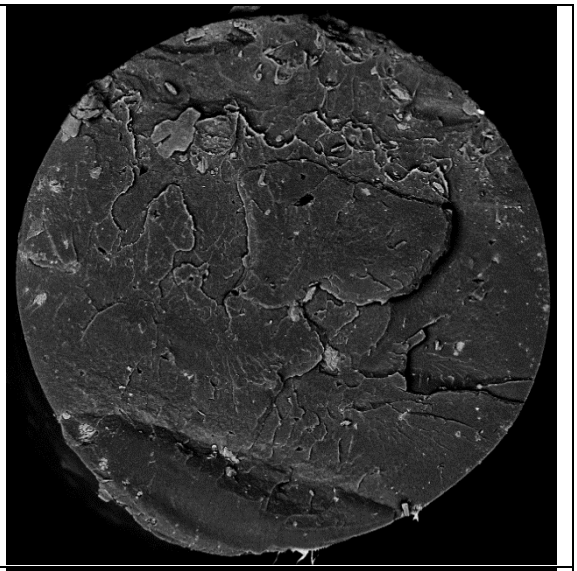


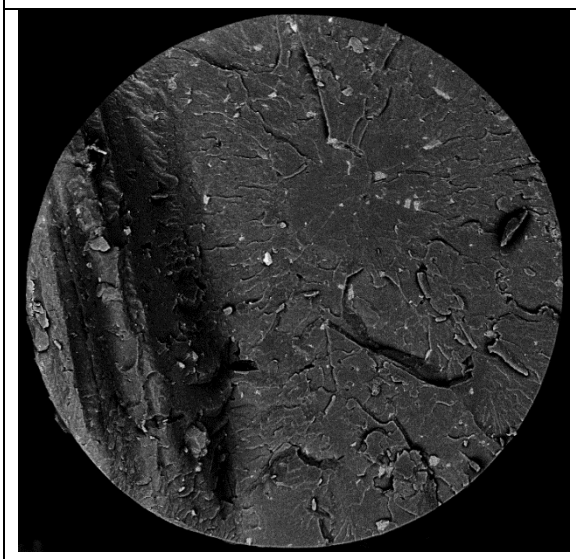


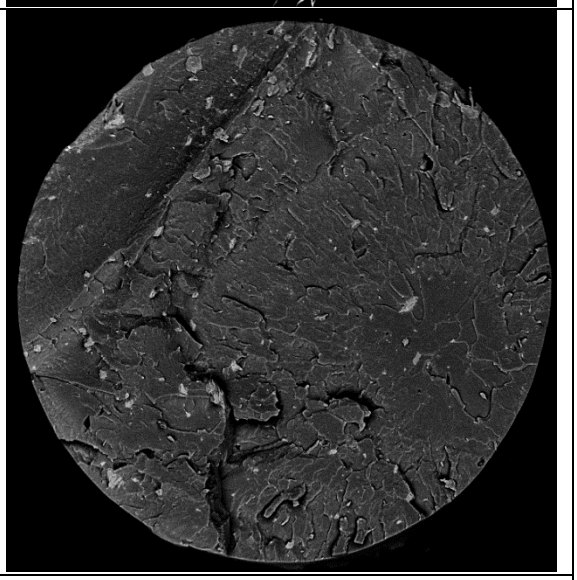


60 rpm 200 C

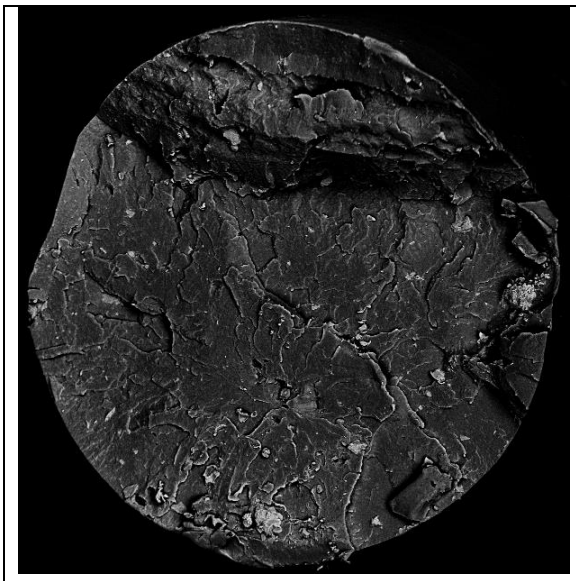


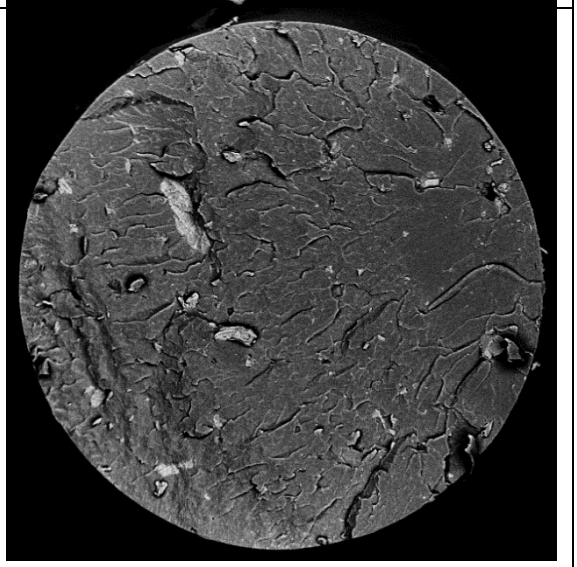




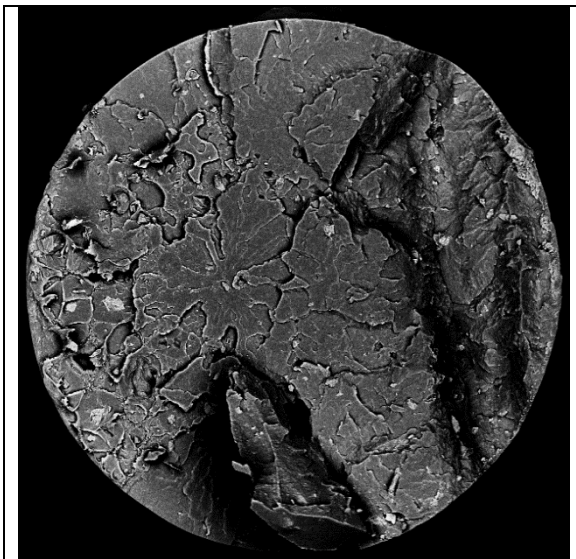


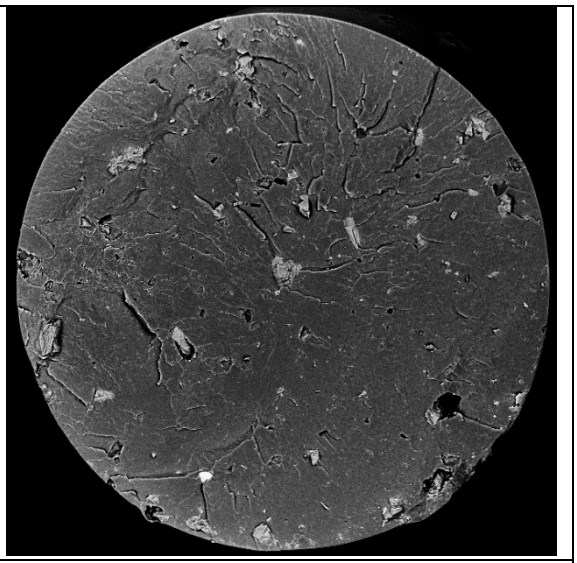
20 rpm 220 C

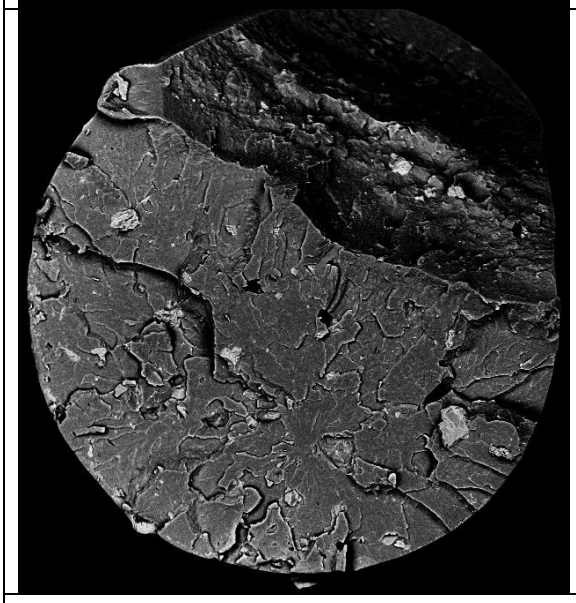




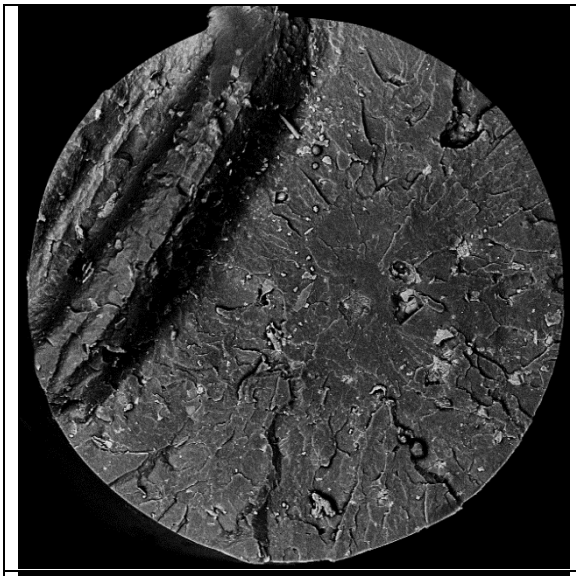
40 rpm 220 C

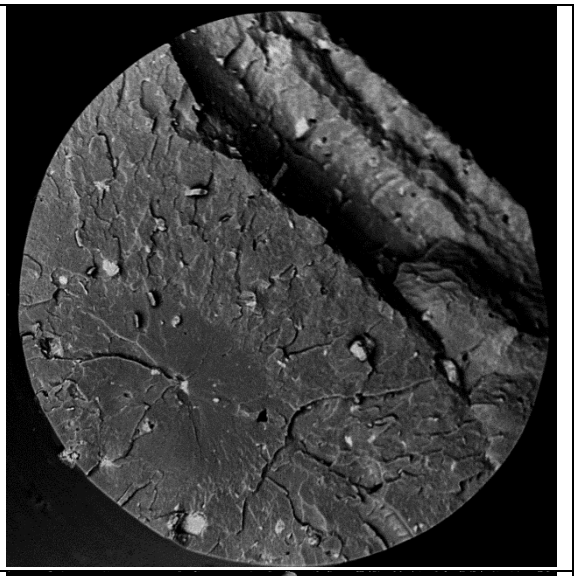


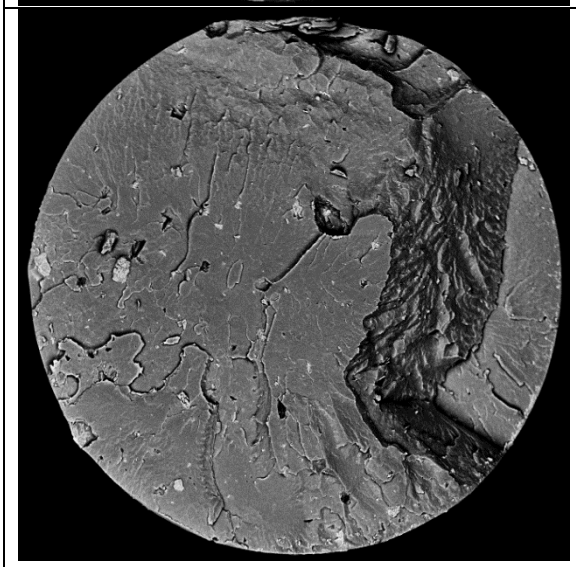




60 rpm 220 C







APENDICE D – Código NEMA 23

```
// Teste Back EMF Arduino_Leonardo
#include "PWM.h"

// Portas para Stepper Motor
int DIR = 12;
int STEP = 11;
int EN = 13;

// Variaveis globais auxiliares
int32_t freq = 0;
float aux = 0;  //
float rpm = 200;  //
String cmd_string;
int HORARIO = HIGH;
int ANTI_HORARIO = LOW;



void ramp(int32_t freq)
{
  if(aux < freq)  //Aceleração
  {
    for(int32_t  i=aux ; i<=freq ; i+=6.66)
    {
      SetPinFrequencySafe(STEP,i);
      pwmWrite(STEP,128);
      Serial.print("RPM = ");
      Serial.println(i*60/400);
      delay(200); //Alterar este valor para alterar tempo de aceleração (maior = mais devagar)
    }
```

```
  }
  if(aux > freq)  //Desaceleração
  {
    for(int32_t i = aux ; i>=freq ; i-=6.66)
    {
      SetPinFrequencySafe(STEP,i);
      pwmWrite(STEP,128);
      Serial.print("RPM = ");
      Serial.println(i*60/400);
      delay(10); //Alterar este valor para alterar tempo de aceleração (maior = mais devagar)
    }
  }
  aux = freq;
}

void setup() {

  InitTimersSafe();

  //SET das portas do Driver DRV8825
  pinMode(EN,OUTPUT);
  pinMode(DIR,OUTPUT);
  pinMode(STEP,OUTPUT);

  //Definindo os niveis logicos das portas do Driver
  digitalWrite(EN,LOW);

  digitalWrite(DIR, HORARIO);   //Direção do motor: HORARIO ou ANTI_HORARIO, mudar este valor
nesta linha de código

  Serial.begin(9600);
```

```
  Serial.println("Inicializando...");

//  for(freq=0 ; freq<=1 ; freq+=1) //Descomentar para fazer o motor já começar rodando //também alterar valor inicial da variavel "freq"
//  {
//    SetPinFrequencySafe(STEP,freq);
//    pwmWrite(STEP,128);
//    delay(5);
//  }

  Serial.println("Pronto.");
}

void loop() {
  // Verifica e aguarda algum input na Serial
  if(Serial.available() > 0)
  {
    cmd_string = Serial.readString();

    if(cmd_string.toInt() > 0)
    {
      //Reativa o motor caso voce já tenha digitado 0 antes
      digitalWrite(EN,LOW);
      // Conversão de valor RPM para frequenica para o Driver
      freq = cmd_string.toFloat()*400/60;

      // Rotina de rampa de aceleração ou desaceleração do motor
      ramp(freq);
    }
    if(cmd_string.toInt() == 0)
    {
```

```
    // Conversão de valor RPM para frequenica para o Driver
    freq = cmd_string.toFloat()*400/60;

    // Rotina de rampa de aceleração ou desaceleração do motor
    ramp(freq);

    //Caso digite 0 ele para o motor em seguida
    digitalWrite(EN, HIGH);
   }
  }

  rpm = freq*60/400 + 1;
  cmd_string = ' ';

//  SetPinFrequencySafe(STEP,freq);
//  pwmWrite(STEP,128);

  Serial.print("RPM_Motor = ");
  Serial.println(rpm);

  delay(5);
}
```

APENDICE E – Pré-dimensionamento e seleção do sistema de transmissão

Para o dimensionamento do par coroa e parafuso sem-fim diversos dados devem ser considerados tais como o material a ser processado, as características do motor e as forças que atuarão no sistema.

De maneira a facilitar o entendimento do processo de projeto do sistema de redução empregado um fluxograma é apresentado com as principais informações necessárias para sua elaboração como pode ser verificado no apêndice F

Dados do material a ser processado

A caracterização do material permite identificar a velocidade de rotação e torque necessários para o processamento por extrusão deste.

Dados do Motor

A escolha do motor recai nas necessidades do processamento do material. Para o motor, é necessário identificar a faixa operacional juntamente com o torque.

Neste aspecto pode-se determinar a relação de redução de velocidade e aumento de torque, e vice-versa pela relação indicada.

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{T_1}{T_2} \qquad \text{(E1)}$$

Geometria do sistema de redução.

Ainda, com a relação de redução pode-se determinar um número mínimo de dentes em uma coroa pela relação

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{Z_1}{Z_2} \qquad \text{(E2)}$$

Onde Z_1 é o número de filetes de rosca em um parafuso sem fim e Z_2 o número de dentes na coroa.

De posse destes dados utiliza-se a norma ANSI/AGMA 6022-C93 – *Design Manual for Cylindrical Wormgearing* a qual sugere o ângulo de pressão a ser utilizado para o número de dentes mínimo na coroa conforme tabela E1 realizando possíveis alterações.

Tabela E1 – Número mínimo de dentes sugerido para coroas sem-fim

Para ângulos de pressão de:	Número mínimo de dentes da coroa
14,5	40
17,5	27
20	21
22,5	17
25	14
27,5	12
30	10

Fonte: Adaptado de AGMA (1993)

Em seguida é necessário determinar como um dos parâmetros iniciais o passo do sem-fim. Segundo Juvinal (pg 379) os valores do passo axial do sem-fim ou passo circular da coroa frequentemente utilizados são, em polegadas, ¼, 5/16, 3/8, ½, 5/8, ¾, 1, 1 ¼, 1 ½, e 2.

Obtém-se o valor do módulo da engrenagem pela relação expressa na equação.

$$m = \frac{p}{\pi} \qquad \text{(E3)}$$

O módulo também expressa a relação entre o diâmetro primitivo da engrenagem e do número de dentes.

Com estes dados obtidos pode-se calcular os demais dados geométricos necessários para a confecção do sem-fim e engrenagem sem-fim como indicado na tabela E2.

Tabela E2 – Equacionamento do dimensionamento das engrenagens

Descrição	Sem-fim (1)	Coroa (2)
Módulo axial (ma)	$\frac{m}{\cos\beta}$	$\frac{m}{sen\beta}$
Módulo circunferencial (mc)	$\frac{m}{sen\beta}$	$\frac{m}{\cos\beta}$
Passo normal (Pn)	$m\pi$	$m\pi$
Passo axila (Pa)	$ma_1\pi$	$ma_2\pi$
Passo circunferencial (Pc)	$mc_1\pi$	$mc_2\pi$
Passo da hélice (Ph)	Pa_1z_1	Pa_2z_2
Diâmetro primitivo (dp)	mc_1z_1	mc_2z_2
Diâmetro externo (de)	dp_1+2m	dp_2+2m
Diâmetro interno (di)	$dp_1-2{,}334m$	$dp_2-2{,}334m$
Adendo (a)	m	m
Dedendo (b)	$1{,}167m$	$1{,}167m$
Altura do dente (h)	$a+b$	$a+b$
Folga do pé do dente (e)	$0{,}167m$	$0{,}167m$
Espessura circunferencial do dente (s)	$\frac{Pn}{2}$	$\frac{Pn}{2}$
Diâmetro máximo da coroa (D)		dp_2+3m
Largura da coroa (l2)		$6m \le l_2 \le 8m$
Comprimento do sem-fim (l1)	$2ma_1(1+\sqrt{z_2})$	
Semi-ângulo do dente (THETA)	Tabela D3	Tabela D3
Ângulo de pressão (BETA)	Tabela D3	Tabela D3
Ângulo de chanfro da coroa (ALPHA)	$60^\circ \le \alpha \le 90^\circ$	
Distância entre centros (I)	$\frac{dp_1+dp_2}{2}$	
Raio externo da garganta (Re)		$I-\frac{di_2}{2}$
Raio interno da garganta (Ri)		$I-\frac{de_2}{2}$

Fonte: Adaptado de Provenza (1991)

Tabela E3 – Semiângulo do dente e ângulo de pressão

θ	≤12º	12º ÷ 20º	20º ÷ 25º	>25º
β	14º 30’	20º	22º 30’	25º

Fonte: Adaptado de Provenza (1991)

Após determinados os dados geométricos procedeu-se ao estudo de velocidades e esforços no sem-fim e coroa.

Forças atuantes e tensões no sistema de redução

O cálculo dinâmico é realizado em 5 etapas, sendo estas:

I. Dados construtivos
II. Velocidade
III. Forças e momentos
IV. Dimensionamento dos eixos e cargas nos apoios
V. Dimensionamento
VI. Cálculo da chaveta

I. DADOS CONSTRUTIVOS

A determinação dos dados construtivos envolve a escolha dos tipos de mancais a serem utilizados, os materiais que estarão em contato e sua lubrificação.

Tabela E4 – Fator de correção por tipo de mancal

ρ	0,02 a 0,05	Para mancais de rolamentos
	0,08 a 1,00	Para mancais de escorregamento

Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

Tabela E5 – Materiais em contato do par de engrenagens

Materiais em contato	μ	φ
Aço/aço, mal lubrificado	0,12	7°
Aço/bronze, mal lubrificado	0,05	3°
Aço/bronze, bem lubrificado	0,02	1,5°

Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

Para utilização posterior nas demais etapas de cálculo é necessário relacionar os dados da tabela E5 com o semi-ângulo do dente como indicado nas equações que se seguem

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos\theta} \tag{E4}$$

$$\varphi' = \arctan \mu' \tag{E5}$$

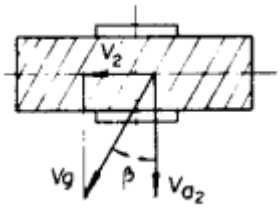
O rendimento da rosca com seus mancais é obtido por:

$$\eta = \frac{\tan\beta}{\tan(\beta + \varphi')} \cdot \frac{1}{1+\rho} \tag{E6}$$

II. Cálculo de velocidade

Coroa e rosca sem-fim são engrenagens helicoidais com eixos reversos, em geral à 90 graus.

Figura E1 – Velocidades atuantes na engrenagem



Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

As velocidades do elementos é calculada como mostrado nas equações:

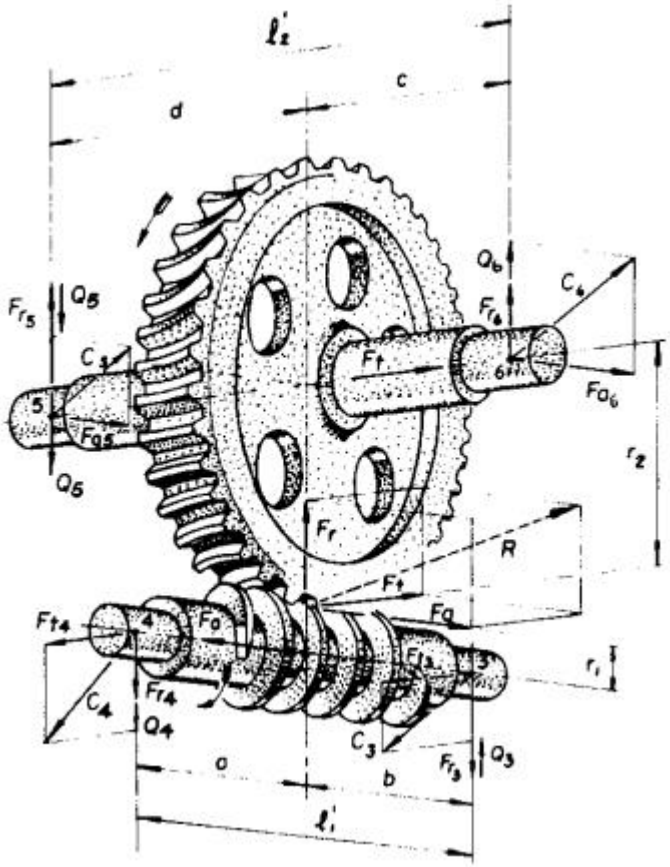
$$Va_2 = V_1 = \frac{\pi d p_1 \omega_1}{60} \tag{E7}$$

$$V_2 = Va_1 = \frac{\pi d p_2 \omega_2}{60} \tag{E8}$$

$$V_g = \frac{V_1}{\cos\beta} = \frac{V_2}{sen\beta} \qquad \text{(E9)}$$

III. Cálculo de forças e momentos

Figura E2 – Forças e momentos atuantes sobre as engrenagens



Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

Os esforços atuantes sobre o par de engrenagens é calculado conforme as equações que se seguem:

$$N_2 = \eta N_1 \cdot 1{,}01387 \qquad \text{(E10)}$$

$$Fa_1 = \frac{75N_2}{Va_1\eta} \qquad \text{(E11)}$$

$$Ft_2 = \frac{75N_2}{V_2} \qquad \text{(E12)}$$

$$Mt_1 = \frac{71620 \cdot 1{,}013872 \cdot N_1}{\omega_1} \quad \text{(E13)}$$

$$Mt_2 = \frac{71620 \cdot N_2}{\omega_2} \quad \text{(E14)}$$

$$Ft = \frac{2Mt_1}{dp_1} \quad \text{(E15)}$$

$$Fa = \frac{Ft}{\tan(\beta + \varphi')} \quad \text{(E16)}$$

$$Fa = \frac{Ft}{\tan(\beta + \varphi')} \quad \text{(E17)}$$

$$Fr = Fr \cdot \frac{\tan\theta}{sen\beta + \mu' \cos\beta} \quad \text{(E18)}$$

$$R' = \sqrt{Ft^2 + Fa^2} \quad \text{(E19)}$$

IV. Dimensionamento dos eixos e cargas nos apoios

O valor do momento torçor aplicado à coroa é calculado conforme equação

$$Mt_2 = \frac{Fa \cdot dp_2}{2} \quad \text{(E20)}$$

V. Dimensionamento

Tensão admissível no dente de contato:

$$\sigma_i = \frac{0{,}75 \cdot Mt_{2máx}}{dp_1 dp_2 m} \leq \overline{\sigma} \quad \text{(E21)}$$

O valor do momento torçor máximo é dado por:

$$Mt_{máx} = 1{,}5 \cdot M_t \quad \text{(E22)}$$

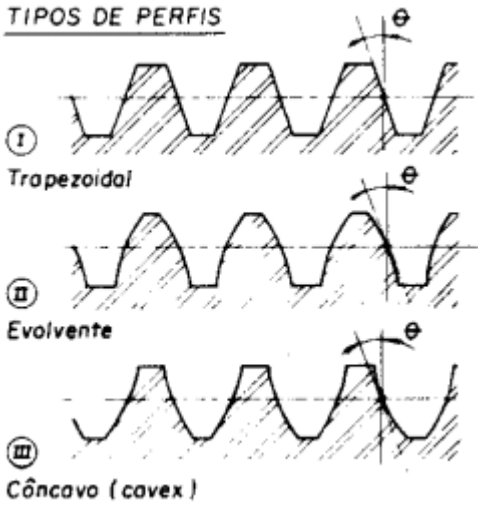
O valor de $\overline{\sigma}$ é relacionado ao material empregado na manufatura da coroa e ao perfil dos dentes como mostrado na tabela D6

Tabela E6 – Valores de $\bar{\sigma}$ em função do material da coroa e perfil do dente

Material da coroa	Perfil do dente		
	I	II	III
Bronze	2,40	3,00	4,00
Ligas de alumínio	1,15	1,43	1,90
Ligas de Al-Si, ligas de Zn, ferro sinterizado	0,76	0,95	1,27
Ferro fundido	1,045	1,3	1,73

Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

Figura E3 - Tipos de perfil de dentes para engrenagens



Fonte: Adaptado de Provenza (1996)

Deve-se realizar verificação do valor do módulo, podendo este ser calculado pela equação

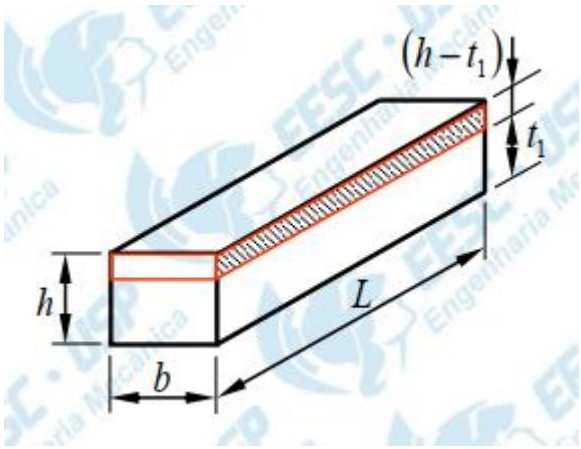
$$m \geq \frac{0{,}75 \cdot Mt_{2máx}}{dp_1 \cdot dp_2 \cdot \bar{\sigma}} \qquad \text{(E23)}$$

VI. Cálculo da chaveta

A união entre a coroa e o eixo que gira a rosca de extrusão é realizada por chaveta. É necessário que este elemento seja dimensionado no que concerne às suas dimensões geométricas e verificar se os esforços aos quais esta estará submetida são suportados por seu material constituinte.

As equações utilizadas são como expostas por Niemann (1991)

Figura E4 - Dimensões da chaveta



Os valores do comprimento mínimo da chaveta, força, esmagamento de eixo e esmagamento do cubo são calculados com as equações:

$$L_{min} = \frac{2M_t}{(h - t_1)dP_{adm}i} \quad \text{(E24)}$$

$$U = \frac{2M_t}{d} \quad \text{(E25)}$$

$$P_{cubo} = \frac{U}{(h - t_1)L} \leq P_{adm} \quad \text{(E26)}$$

$$P_{eixo} = \frac{U}{t_1 L} \leq P_{adm} \quad \text{(E27)}$$

Para os cálculos assumiu-se tensão admissível de 65 Mpa, diâmetro (d) de 15mm, altura da chaveta (h) de 5mm e altura inserida no eixo (t_1) de 2,5mm. Assim, os valores obtidos nos cálculos são expostos na tabela E7.

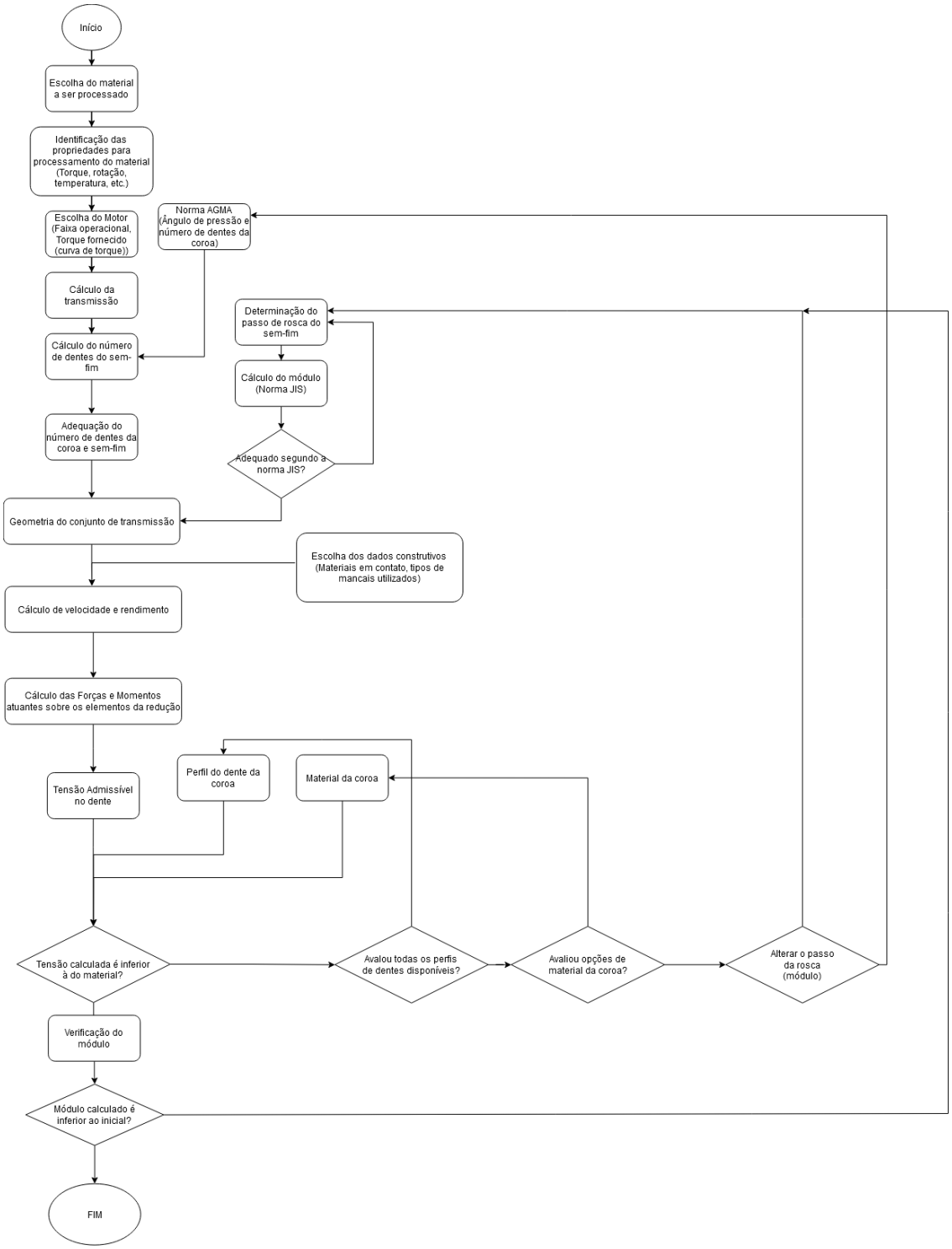
Tabela E7 - Valores calculados para chaveta

Grandeza	Valores
L_{min}	16,41mm
U	2667 N
P_{Cubo}	62,75 MPa
P_{Eixo}	62,75 MPa

Fonte: Próprio autor

Como base no exposto verificou-se que as dimensões e material utilizado são capazes de suportar os esforços submetidos à chaveta com comprimento utilizado de 22mm.

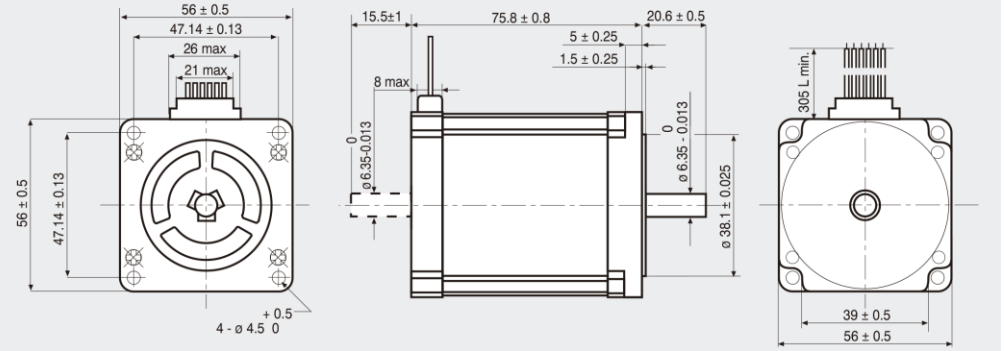
APENDICE F - FLUXOGRAMA



103-H7126-1740

SANYO DENKI
SANMOTION

Dimensions (Unit:mm)

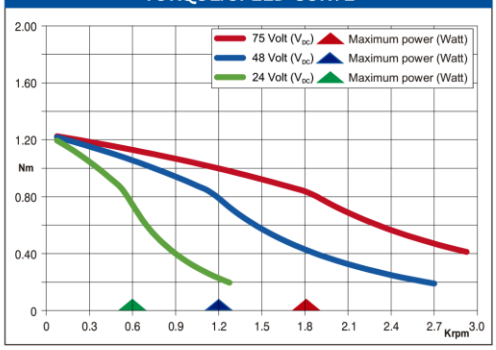


FEATURES

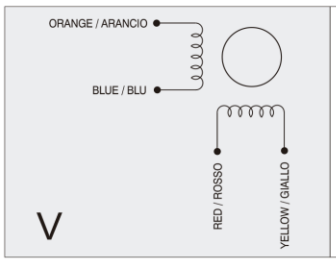
MODEL		103-H7126-1740 (103-H7126-1710)
BASIC STEP ANGLE		1.8° ± 0.09°
BIPOLAR CURRENT	(Amp)	4.0
UNIPOLAR CURRENT	(Amp)	
RESISTANCE	(Ohm)	0.48
INDUCTANCE	(mH)	2.2
BIPOLAR HOLDING TORQUE	(Ncm)	165
UNIPOLAR HOLDING TORQUE	(Ncm)	
ROTOR INERTIA	(Kgm ^{2} x 10 $^{-7}$)	360
THEORETICAL ACCELERATION	(rad x sec.$^{-2}$)	45800
BACK E.M.F.	(V/Krpm)	31
MASS	(Kg)	1
LEADS CODE		V

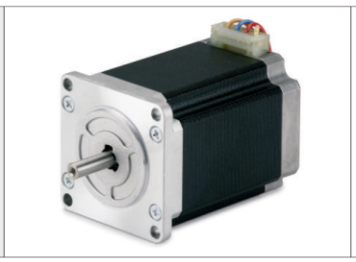
Codes between brackets refer to double shaft models.
Le sigle fra parentesi si riferiscono ai modelli bialbero.

TORQUE/SPEED CURVE



R.T.A. s.r.l. PAVIA (ITALY) SANYO DENKI CO.,Ltd (JAPAN)





EIMC - 10 - 14

Suggested R.T.A. driver: CSD/CSD J/A-CSD Series, NDC/A-NDC Series, ADW Series, HGD Series, PLUS Series.

R.T.A. s.r.l.
Via E. Mattei - Fraz. Divisa
27020 MARCIGNAGO (PV) ITALY
Tel. +39.0382.929.855 - Fax +39.0382.929.150
www.rta.it

R.T.A. Deutschland GmbH
Bublitzer Straße 34
40599 DÜSSELDORF (Germany)
Tel. +49.211.749.668.60 - Fax +49.211.749.668.66
www.rta-deutschland.de

R.T.A. IBERICA-Motion Control Systems S.L.
C/Generalitat 22, 1° 3°
08850 GAVA - BARCELONA (Spain)
Tel. +34.936.388.805 - Fax +34.936.334.595
www.rta-iberica.es