UNIVERSIDADE COMUNITÁRIA DA REGIÃO DE CHAPECÓ – UNOCHAPECÓ

ÁREA DE CIÊNCIAS EXATAS E AMBIENTAIS – ACEA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO CFD E VALIDAÇÃO DE UMA UNIDADE DE CALIBRAÇÃO DE
FILAMENTO PARA O PROCESSO FDM

LUIZ CARLOS MORANDIN JUNIOR

CHAPECÓ, MAIO DE 2019.

LUIZ CARLOS MORANDIN JUNIOR

**SIMULAÇÃO CFD E VALIDAÇÃO DE UMA UNIDADE DE CALIBRAÇÃO DE
FILAMENTO PARA O PROCESSO FDM**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Universidade Comunitária da Região de
Chapecó como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.Sc. André Luiz Grando
Santos.

Co-Orientadora: Prof^ª. M.Sc. Rubieli Carla
Frezza Zeferino.

CHAPECÓ, MAIO DE 2019.

**SIMULAÇÃO CFD E VALIDAÇÃO DE UMA UNIDADE DE CALIBRAÇÃO DE
FILAMENTO PARA PROCESSO FDM**

LUIZ CARLOS MORANDIN JUNIOR

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA

Banca Examinadora:

Prof. Me. André Luiz Grando Santos
(Orientador)

Prof. Dr. Éverton Rafael Breitenbach
(Membro da Banca)

Prof. Dr. Márcio Antônio Fiori
(Membro da Banca)

Prof. Dr. Éverton Rafael Breitenbach
(Professor de Projeto de Pesquisa 2)

Chapecó, 31 de maio de 2019.

Dedico este trabalho à minha mãe Joceane
Tosini Morandin, minha eterna fonte de
inspiração. Gratidão pelo conselhos e
ensinamentos ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por terem me concedido a incrível oportunidade de realizar um dos meus maiores sonhos, a graduação. Especialmente agradeço a minha mãe Joiceane Tosini Morandin, por todos os ensinamentos, por estar sempre presente e disposta a me acompanhar. Você foi e continua sendo a minha maior inspiração. Também agradeço meu pai Luiz Carlos Morandin, pelo apoio e incentivo a sempre seguir em frente.

À minha irmã Gisiéli Carla Morandin, minha amiga, parceira e conselheira, pela proteção, carinho e auxílio durante a minha jornada.

Ao grande amigo e companheiro Augusto Felipe Testa, pela amizade e todos os ensinamentos. Assim como pelos diálogos, conselhos e pela grande participação no desenvolvimento da modelagem computacional. Conte comigo em todos os momentos.

Aos técnicos do laboratório, por contribuírem com satisfação no auxílio do desenvolvimento deste projeto.

Ao professor e orientador André Luiz Grando Santos, por ter acreditado neste projeto, assim como pela confiança depositada em mim. Agradeço também por todos os conselhos, auxílios e ensinamentos que contribuíram decisivamente para a execução deste trabalho.

Ao professor Everton Rafael Breitenbach, por ter disponibilizado o uso da extrusora para a realização deste trabalho. Assim como, pela dedicação, ajuda no procedimento experimental e por todas as dúvidas esclarecidas ao longo deste trabalho.

A professora e co-orientadora Rubieli Carla Frezza Zeferino, por ministrar as disciplinas de Mecânica dos Fluidos e Transferência de calor com imensa dedicação. Agradeço também, por todas as dúvidas esclarecidas e pela confiança atribuída.

Ao amigo Gustavo Thomas técnico do laboratório de manufatura, por todo o auxílio durante a fase de manufatura do projeto e por todas as dúvidas esclarecidas.

Ao Pronto 3D da Unochapecó, por disponibilizar os equipamentos necessários.

A Unochapecó pelos materiais disponibilizados na biblioteca e toda a estrutura de suporte, assim como todo o corpo docente do curso de Engenharia Mecânica, pela prestatividade e auxílio durante todos os momentos. Graças a todo o meio acadêmico, que hoje posso vislumbrar o mundo com diferentes olhos.

A DKS Gráfica pela flexibilidade e pelo incentivo durante minha graduação.

Somente os que ousam falhar grandemente
podem alcançar a grandeza.
Robert F. Kennedy

RESUMO

Há algum tempo, a manufatura aditiva vem desempenhando um papel muito importante no desenvolvimento da tecnologia de processos. Máquinas FDM (*Fused Deposition Modeling*), conhecidas no Brasil como máquinas de modelagem por fusão e deposição, produzem peças com polímeros como o ABS e o PLA, com deposição de material fundido em camadas, formando assim o objeto tridimensional. Com esse tipo de equipamento, facilitando a produção de um protótipo polimérico, economizando material e consequentemente custos na fabricação. A matéria prima utilizada por máquinas FDM, é chamada de filamento polimérico, e nos dias de hoje ainda possui um valor de mercado relativamente alto. O grande desafio na produção do filamento polimérico, se dá devido ao diâmetro reduzido e a necessidade de grande precisão dimensional na seção transversal do filamento, assim como garantir a ausência de falhas ao longo do comprimento. A obtenção do filamento polimérico é efetuada pelo método de extrusão, um método muito conhecido na fabricação de perfis. Para garantir a precisão dimensional da extrusão do filamento polimérico, neste trabalho é realizado a simulação computacional e construção de um calibrador a vácuo, de grande importância na extrusão de perfis tubulares. Um importante objetivo no projeto é a implementação de um sistema capaz de garantir uma baixa variação de temperaturas na seção de calibração. A modelagem 3D foi realizada utilizando o software *SolidWorks*, e a simulação CFD foi realizada a partir da ferramenta de simulação *Flow Simulation* também da plataforma *SolidWorks*.

Palavras-chave: CFD; *Flow Simulation*; FDM; Filamento; Extrusão.

ABSTRACT

Additive manufacturing is making a very important contribution for the advancement of process technology. The FDM (Fused Deposition Modeling) machines can produce polymeric parts with ABS or PLA, the part is made by deposition of melt polymer in sections, turning the hole 3D part. With the additive manufacturing it is so easy to make the production of a prototype or a small serial production, saving a lot of money and waste material. Therefore, with those machines you can predict some mistakes in the product before you produce the hole lot. The raw material used by the FDM machines, are called as polymeric wire, and it is until today so much expensive to buy, because of the high precision to make and the exclusion of superficial failures. Extrusion is the process to produce polymeric wire, and this process is so much recognized by making tubes, pipes and profiles. To achieve the dimensional precision and to exclude the superficial failures, this paper uses a vacuum calibrator to arrive the dimensional precision, and the simulation uses the CFD (Computational Fluid Dynamics) as a key to solve the temperature profile along the calibrator. The 3D project was made using the computation software SolidWorks, and the simulation was made by the CFD tool called Flow Simulation, an application of SolidWorks too.

Keywords: CFD; Flow Simulation; FDM; Polymeric Wire; Extrusion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de um monômero de etileno.....	19
Figura 2 – Representação esquemática do processo de polimerização de adição.....	20
Figura 3 – Tipos de cadeias presentes em polímeros.....	21
Figura 4 – Estrutura semicristalina identificando cadeias cristalinas e amorfas.....	22
Figura 5 – Temperatura <i>versus</i> volume específico no processo de cristalização dinâmica.....	24
Figura 6 – Representação das resinas mais consumidas no Brasil em 2017.....	25
Figura 7 – Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para o PEBD.....	29
Figura 8 – Processo de manufatura de um produto polimérico.....	30
Figura 9 – Linha de extrusão de perfis poliméricos.....	31
Figura 10 – Representação de uma unidade básica de extrusão.....	32
Figura 11 – Representação de uma rosca única para extrusão.....	33
Figura 12 – Resultado do experimento (Técnica Maddock).....	34
Figura 13 – Matriz de extrusão de tubos.....	36
Figura 14 – Efeito de inchamento do perfil extrudado.....	39
Figura 15 – Representação de uma unidade de calibração.....	41
Figura 16 – Variáveis que podem afetar uma unidade de calibração.....	43
Figura 17 – Calibrador por atrito.....	45
Figura 18 – Calibrador externo com ar comprimido.....	46
Figura 19 – Calibrador externo a vácuo.....	47
Figura 20 – Áreas de abrangência da mecânica dos fluídos computacional.....	50
Figura 21 – Impressora 3D Cloner DH+.....	54
Figura 22 – Extrusora.....	55
Figura 23 – Método utilizado para a realização do estudo.....	55
Figura 24 – Fluxograma de simulação.....	57
Figura 25 – Domínio e subdomínios da simulação.....	58
Figura 26 – Condições de contorno.....	59
Figura 27 – Peça utilizada como modelo de impressão.....	63
Figura 28 – Calibrador modelo C.....	65
Figura 29 – Diagrama do perfil de temperatura no calibrador “C”.....	67

Figura 30 – Refinamento da malha no calibrador “C”.....	68
Figura 31 – Perfil de temperaturas na região fluída do calibrador “C”.....	68
Figura 32 – Temperatura na região de calibração.....	69
Figura 33 – Seção transversal do polímero durante o processo de calibração e refrigeração.....	70
Figura 34 – Montagem do corpo do calibrador com a câmara de vácuo.....	71
Figura 35 – Furação de 1,75mm.....	71
Figura 36 – Montagem da unidade de calibração.....	72
Figura 37 – Unidade de calibração acoplada à extrusora.....	73
Figura 38 – Material polimérico (pellet) antes (a) e depois (b) da compressão.....	74
Figura 39 – Comparação entre os filamentos calibrados.....	74
Figura 40 – Filamento emaranhado na seção de alimentação do equipamento FDM.....	76
Figura 41 – Baixa deposição ocasionada pelo emaranhamento do filamento.....	77
Figura 42 – Efeito da alta temperatura no método FDM.....	77
Figura 43 – Comparação entre impressões em diferentes filamentos.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas do PLA e constantes para o modelo Cross WLF.....	60
Tabela 2 – Propriedades físicas da água.....	60
Tabela 3 – Propriedades físicas do Aço Inoxidável AISI 304.....	61
Tabela 4 – Condições gerais da simulação.....	61
Tabela 5 – Características do modelo comparativo.....	63
Tabela 6 – Lista de materiais do calibrador C.....	66
Tabela 7 – Dados de entrada no procedimento experimental.....	72
Tabela 8 – Propriedades de poliésteres biodegradáveis e polímeros convencionais.....	76
Tabela 9 – Orçamento dos materiais.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processamento dos plásticos.....	30
Quadro 2 – Características na construção de uma matriz de extrusão.....	38
Quadro 3 – Causas da elasticidade na extrusão.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviatura/Símbolo	Descrição
3D	Três Dimensões
ABS	(<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>) Acrilonitrila Butadieno Estireno
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
CFD	(<i>Computational Fluid Dynamics</i>) Fluidodinâmica Computacional
CAD	(<i>Computer Aided Design</i>) Desenho Assistido por Computador
FDM	(<i>Fused Deposition Modeling</i>) Modelagem por Fusão e Deposição
MA	Manufatura Aditiva
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
N	Grau de Polimerização
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PLA	Poliácido Láctico
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Polivinila
PS	Poliestireno
TC	Temperatura de Cristalização
TG	Temperatura de Transição Vítrea
TM	Temperatura de Fusão
TPU	Poliuretano Térmoplástico
η	Viscosidade
η_0	Viscosidade a Taxa de Cisalhamento Zero
η_∞	Viscosidade a Taxa de Cisalhamento Infinita
γ	Taxa de Cisalhamento
$\dot{\gamma}a$	Taxa de Cisalhamento Aparente
$\dot{\eta}a$	Viscosidade Aparente
$\dot{Q}$	Vazão Volumétrica
R	Raio do Canal
τ	Tensão de Cisalhamento
M	Índice de Consistência
n	Índice da Lei das Potências
λ	Tempo de Relaxação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	MATERIAIS POLIMÉRICOS	18
2.1.1	Cadeia molecular	18
2.1.2	Cristalinidade	21
2.1.3	Efeito da cristalinidade em materiais poliméricos	22
2.1.4	Efeito da temperatura nos materiais poliméricos	23
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS	24
2.2.1	Termofixos	25
2.2.2	Termoplásticos	26
2.3	PLA (POLI (ÁCIDO LÁCTICO))	26
2.3.1	Ecoflex®	27
2.4	REOLOGIA	27
2.4.1	Fluídos não Newtonianos	27
2.4.2	Fluídos viscoelásticos	28
2.4.3	Taxa de cisalhamento aparente	28
2.4.4	Viscosidade aparente	29
2.5	PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS	29
2.6	EXTRUSÃO	31
2.6.1	Unidade de extrusão rosca única	35
2.6.2	Matriz de extrusão	36
2.6.3	Tópicos principais no projeto de uma matriz de extrusão	37
2.6.4	Materiais para fabricação de uma matriz	40
2.7	UNIDADE DE CALIBRAÇÃO	40
2.7.1	Tipos de calibradores	44
2.7.2	Refrigeração	47
2.7.3	Vácuo	48
2.7.4	Tensões residuais	48
2.7.5	Materiais para fabricação de uma unidade de calibração	49
2.8	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	49
2.8.1	CFD e a redução de custos na fabricação de matrizes de extrusão	50
2.8.2	<i>Solver</i>	50
2.9	MODELOS QUE DESCREVEM O ESCOAMENTO	51
2.9.1	Lei das Potências	51
2.9.2	Modelo Cross LWF	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53

3.1	MATERIAIS POLIMÉRICOS	53
3.2	SOFTWARES	53
3.3	EQUIPAMENTO FDM.....	53
3.4	EXTRUSORA	54
3.5	METODOLOGIA.....	55
3.5.1	Revisão do processo de extrusão	55
3.5.2	Calibração de perfis poliméricos.....	56
3.5.3	Concepção dos modelos 3D.....	56
3.5.4	Seleção do modelo 3D.....	56
3.5.5	Simulação	57
3.5.6	Construção	62
3.5.7	Validação experimental.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	SELEÇÃO DO CALIBRADOR	64
4.1.1	Calibrador A	64
4.1.2	Calibrador B	64
4.1.3	Calibrador C	64
4.2	SIMULAÇÃO CFD.....	66
4.3	CONSTRUÇÃO DO CALIBRADOR C	70
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	72
4.5	FDM (<i>FUSED DEPOSITION MODELING</i>)	76
4.6	ORÇAMENTO.....	79
5	CONCLUSÕES.....	80
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
8	ANEXOS	86
	ANEXO A – MODELO CAD DO CALIBRADOR A.	86
	ANEXO B – DETALHAMENTO DO CALIBRADOR A.....	86
	ANEXO C – VISTA EM CORTE DO CALIBRADOR A.....	87
	ANEXO D – PROJETO CAD CALIBRADOR B.....	87
	ANEXO E – DETALHAMENTO DO CALIBRADOR B.....	87
	ANEXO F – VISTA EM CORTE DO CALIBRADOR B.	88
	ANEXO G – PROJETO CAD CALIBRADOR C.	89
	ANEXO H – PROJETO 3D CALIBRADOR C (VISTA EXPLODIDA).	89
	ANEXO I – PROJETO 3D CALIBRADOR C (VISTAS LATERAIS).	89
	ANEXO J – MONTAGEM CALIBRADOR C	90
	ANEXO K – PROJETO CALIBRADOR (CORPO CALIBRADOR)	91
	ANEXO L – PROJETO CALIBRADOR (RESISTÊNCIA)	92
	ANEXO M – PROJETO CALIBRADOR (SERPENTINA)	93
	ANEXO N – PROJETO CALIBRADOR (TAMPA).....	94
	ANEXO O – PROJETO CALIBRADOR (CÂMARA).....	95

1 INTRODUÇÃO

Polímero, do Grego poli, mais de um, e mero, partes. São materiais compostos de várias partes, constituindo longas cadeias poliméricas microscópicas. Os materiais poliméricos são atualmente muito procurados devido à versatilidade, visando a substituição de outros materiais com características de produção e processamento geralmente inferiores. Aliando a baixa densidade e as baixas temperaturas de processamento, os materiais poliméricos substituem facilmente a madeira, vidros, cerâmica e em alguns casos até mesmo os metais. Entretanto, o que torna os materiais poliméricos tão versáteis, é a vasta gama de possíveis combinações entre as classes disponíveis, e as possíveis alterações nos parâmetros de processamento. (OSSWALD, T. A.; MENGES, G., 2012)

Segundo a Abiplast 2017, um dos processos de grande utilização no processamento de materiais poliméricos é a extrusão. Um processo basicamente responsável por aquecer o material, até o estado fundido, obrigando a passagem por um molde na forma do produto final, resultando em chapas, filmes, tubos ou perfis. Aproximadamente 58% dos materiais poliméricos processados no Brasil provém do processo de extrusão, sendo constituído nessa classe uma parcela de 2%, proveniente dos filamentos. A classe filamentos é constituída por linhas de pesca, cerdas, cabos, cordas, telas e também o filamento para impressão 3D.

Há algum tempo, a manufatura de um protótipo era uma tarefa árdua, sendo muitas vezes inviável para a produção de pequenos lotes. Atualmente, o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), conhecido como moldagem por fusão e deposição, é uma alternativa para produção de protótipos, e em muitos casos até mesmo o produto final, muitas vezes dispensando o acabamento superficial. A habilidade de estruturação variada presente no processo FDM, devido ao modo de deposição do material, possibilita distintas aplicações. (SU, A.; AL'AREF, S. J., 2018)

As máquinas de MA (Manufatura Aditiva), segundo Gebhardt e Hötter (2016) que contam com a tecnologia FDM, utilizam filamentos termoplásticos como matéria-prima. Durante o processo, o filamento passa através de um bico de aquecimento, que é utilizado não somente para a transferência de calor, e sim para a deposição do material polimérico sobre a mesa de deposição. Máquinas que utilizam essa tecnologia, tem a capacidade de fabricar peças com matéria-prima de origem polimérica, como o PLA (Poliácido Láctico) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

O processo de extrusão é o processo utilizado para a obtenção do filamento polimérico utilizado como matéria prima em equipamentos FDM. No processo de extrusão podem ser também fabricados tubos, cabos, filmes, folhas e perfis. Portanto, para a fabricação se faz necessário o uso de um componente muito importante, a matriz de extrusão. No processo de extrusão de plásticos, a matriz é o componente onde é extraído o produto pré-pronto ou em alguns casos pronto. A proposta principal da matriz é transformar o plástico fundido em um corpo com a forma desejada. Para isso, após a matriz, podem ser utilizados equipamentos de refrigeração, cristalização e calibração, garantindo ao produto final precisão dimensional e qualidade. (KAINTH, S., 2018)

Os sistemas de calibração para o processo de extrusão de materiais de origem polimérica, são dispositivos aplicados com objetivo de garantir a precisão dimensional. São capazes de calibrar desde perfis simples até perfis com elevado grau de complexidade. (CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. 2012)

O calibrador a vácuo é o mais utilizado quando se exige um bom contato entre a superfície interna do calibrador e a superfície externa do polímero, como o requerido no processo de obtenção de filamentos para FDM (RAUWENDAAL, C., 2014)

Conforme Klein e Fradet (2010), CFD é uma alternativa muito atraente na redução de custos, pois possibilita prever possíveis objeções no projeto. Isso se aplica também aos calibradores.

Devido à dificuldade de fabricação de um perfil polimérico com dimensões constantes, surge a proposta de realização deste presente trabalho, visando o estudo da viabilidade de construção de um dispositivo calibrador de perfis poliméricos. A análise do conceito proposto para um calibrador de filamentos é efetuada através da simulação computacional, e é validada através da construção de um protótipo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva se destaca na fabricação de peças e protótipos desde a década de 80. Primeiramente o processo de produção em camadas era chamado de prototipagem rápida, viável somente na produção de protótipos, em razão do tempo de processamento. Nos dias atuais, a prototipagem rápida é conhecida como MA, onde o tempo de fabricação foi melhorado, e é possível fabricar peças com grande variedade de materiais, como metais, cerâmicas e principalmente polímeros. A grande vantagem da manufatura aditiva é a conversão fiel do projeto virtual em uma peça com geometria complexa. O processo FDM apresenta algumas

características particulares, como a obtenção da geometria desejada, utilizando um projeto modelado em computador. As propriedades do material são modificadas durante o processo de manufatura, juntamente com a liberdade de orientação das cadeias poliméricas. (GEBHARDT, A; HÖTTER J., 2016)

A grande motivação deste trabalho se dá devido à grande dificuldade na extrusão de filamentos, tubos e perfis em extrusoras de pequeno porte. A dificuldade é proveniente do controle de defeitos característicos no processo de extrusão.

Os materiais extrudados frequentemente possuem uma grande parcela de tensões residuais acumuladas em sua estrutura. Desta forma, o dimensionamento correto de uma unidade de calibração de perfis poliméricos, pode reduzir ou controlar a formação de tensões residuais no processo de cristalização. Desta forma, justifica-se o projeto de uma unidade de calibração de filamentos para, assim, garantir as dimensões finais do perfil extrudado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma unidade de calibração que atenda o diâmetro de projeto, assim como, as propriedades mecânicas necessárias para a MA com a tecnologia FDM.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar revisão bibliográfica detalhada sobre os materiais poliméricos, processo de extrusão e as variáveis relevantes;
- ✓ Desenvolver concepções de calibradores com diferentes características;
- ✓ Avaliar as concepções comparando os resultados das simulações preliminares com os requisitos impostos ao projeto do sistema;
- ✓ Simular a unidade de calibração que melhor atenda aos requisitos de projeto, com auxílio de software computacional;
- ✓ Construir o sistema de calibração e validar experimentalmente a eficiência do sistema, dentro de critérios estabelecidos como requisitos do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

De acordo com Osswald e Menges (2012), polímero, do Grego poli, mais de um, e mero, partes. São materiais compostos de várias partes, constituindo longas cadeias poliméricas microscópicas.

Podemos encontrar materiais poliméricos sintéticos ou naturais. Entretanto, esses materiais são denominados polímeros, desde que possuam algumas propriedades específicas, como alto peso molecular e sejam dotados de estruturas internas repetitivas, formadas por cadeiras de meros. Os materiais poliméricos de engenharia são quase absolutamente sintéticos, sendo possível uma elevada gama de materiais com diferentes características, podendo ser utilizado muitas vezes mais de um material para uma mesma aplicação. (MANRICH, S., 2013)

Segundo Larson, E. R. (2015), os materiais poliméricos são compostos de diversos meros. Partindo da estrutura microscópica, as moléculas poliméricas são compostas de átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio entre outros. O conjunto de átomos ligados é chamado de monômero, que quando ligados com outros monômeros, estes podendo ser iguais ou um conjunto de diferentes monômeros, formam longas cadeias. As cadeias poliméricas podem ser encontradas em dois estados, totalmente desorganizadas ou em com alguns padrões de organização, chamadas de cadeias amorfas ou estruturas semicristalinas, respectivamente. Por fim, o conjunto de cadeias, chamadas de grandes moléculas, dão origem aos conhecidos materiais poliméricos.

As estruturas macromoleculares formam os materiais poliméricos, podendo ser geradas de maneira natural ou sintética. Alguns exemplos de polímeros formados a partir de estruturas macromoleculares naturais são a madeira, o algodão e a borracha natural que provém do látex extraído da Seringueira. Por outro lado, existe a classe de polímeros orgânicos, chamados de sintéticos e formados pelos processos de polimerização. (OSSWALD, T. A.; MENGES G., 2012)

2.1.1 Cadeia molecular

As cadeias moleculares segundo Canevarolo (2006) são formadas pela repetição de

meros, e ligadas por ligações primárias fortes. Ligações do tipo primária, são denominadas intramoleculares, por ocorrerem no interior de uma molécula. Já as ligações entre cadeias são chamadas de ligações intermoleculares, podendo ser do tipo ligações de Van der Waals ou ponte de hidrogênio, e são chamadas de ligações secundárias.

O processo de polimerização de adição consiste na adição de monômeros, conforme o processo é realizado, as duplas ligações entre os átomos presentes no monômero são quebradas, ocorrendo a ligação desses átomos a outros, formando longas cadeias. Abaixo na Figura 1 pode ser visualizado um monômero de etileno antes do processo de polimerização, sendo um exemplo simples para compreensão do processo de polimerização de adição. (OSSWALD, T. A.; MENGES G., 2012)

Segundo Brydson (2016), durante a polimerização de adição, uma molécula de baixo peso molecular, denominada monômero conforme retratada na Figura 1, é induzida ao rompimento de uma dupla ligação, resultando em átomos capazes de se juntar com outros presentes em moléculas similares. Nesse caso, um conjunto de monômeros é convertido em uma cadeia de polímero. Esse método é utilizado na maioria dos materiais termoplásticos, como o polietileno (um polímero de etileno) e poliestireno (um polímero de estireno).

Figura 1 – Representação esquemática de um monômero de etileno.

Fonte: Adaptado pelo autor de OSSWALD, T. A.; MENGES G. 2012.

De acordo com Crawford (1998) é chamado de polimerização o processo de junção dos átomos de um par de monômeros, formando longas cadeias moleculares, e o número de unidades de repetição N é determinado como o grau de polimerização de uma grande molécula, que também é responsável por determinar o peso molecular do polímero. Para a formação do nome da maioria dos materiais poliméricos, é utilizado o prefixo *poli-*, seguido do nome do monômero. Por exemplo, para o poliestireno, o monômero utilizado na polimerização da

molécula de poliestireno é o estireno, e poli o prefixo.

A propagação da cadeia ocorre quando um monômero é adicionado em uma cadeia, conforme a Figura 2, e o novo monômero cria um espaço ativo, aguardando uma nova ligação. Para a finalização do processo de propagação, um radical é neutralizado.

Figura 2 – Representação esquemática do processo de polimerização de adição.

Fonte: Adaptado pelo autor de MCKEEN, L. W. 2014.

Forças intramoleculares, são do tipo covalentes, sendo capazes de determinar a organização dos meros, o tipo da configuração da cadeia e também a estrutura química. Alguns fatores mecânicos também são influenciados pelas forças intramoleculares, como a rigidez da cadeia polimérica. As forças intermoleculares determinam a maioria das propriedades físicas do polímero, como, a temperatura de fusão cristalina (em caso de termoplásticos semicristalinos), a solubilidade, escoamento viscoelástico e a permeabilidade do material. Ressaltando que quanto maiores as forças intermoleculares, maiores são as forças de atração entre as moléculas. (CANEVAROLO, S. V., 2006)

As cadeias poliméricas podem ser encontradas em diversas configurações. As cadeias podem ser encontradas sem nenhuma ramificação, denominados polímeros lineares. Como podem também apresentar ramificações com complexidade variada, denominados polímeros ramificados. Existe ainda uma terceira classe com ramificações ainda mais complexa, exibindo ligações cruzadas, dando origem aos polímeros reticulados.

Cada tipo de cadeia impacta diretamente nas propriedades do polímero, especialmente sobre a fusibilidade e solubilidade do material. Em cadeias poliméricas com ramos laterais, existe uma dificuldade de aproximação entre as cadeias, acarretando em uma diminuição nas propriedades mecânicas, atuando como plastificantes na estrutura do polímero. Já no caso de polímeros que exibem ligações cruzadas, o deslizamento entre as cadeias é impedido, aumentando a resistência mecânica, mas em contrapartida tornando o polímero insolúvel e infusível. (MANO, E. B.; MENDES L. C., 1999)

Semenov e Nyrkova (2012) retratam que a estrutura molecular mais simples existente em homopolímeros é a cadeia linear. Mas ainda assim, polímeros podem formar estruturas muito mais complexas do que as cadeias lineares. A estrutura polimérica típica envolve cadeias ramificadas. Em alguns polímeros, as cadeias lineares e ramificadas podem se unir e formar uma rede polimérica, que quando ligadas formam um objeto macroscópico.

É possível a visualização dos tipos de cadeias presentes em materiais poliméricos na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de cadeias presentes em polímeros.

Fonte: Adaptado pelo autor de CAMPBELL, G. A.; SPALDING, M. A. 2013 e SEMENOV, A.; NYRKOVA, I. 2012.

2.1.2 Cristalinidade

A configuração das cadeias poliméricas tem forte influência nas propriedades mecânicas dos materiais poliméricos. Os polímeros termoplásticos por exemplo, podem possuir a estrutura molecular de duas formas, amorfa ou semicristalina. Quando amorfos, as moléculas dos polímeros termoplásticos solidificam sem nenhum grau de organização, dando origem à grandes cadeias sem nenhuma estrutura cristalina. As estruturas semicristalinas por outro lado, possuem em suas cadeias alguns cristais com estrutura molecular organizada, ligados a cadeias amorfas. (CAMPBELL, G. A.; SPALDING, M. A., 2013)

Segundo Kumar e Gupta (2003) quando solidificados, os polímeros tendem à formação de algumas regiões de maior ordenação das cadeias, formando cristalitos, e são chamados de polímeros semicristalinos. Os polímeros que não formam nenhum cristalito, são então chamados de polímeros amorfos. Uma observação que deve se ter em mente se tratando de polímeros, é que nenhum material polimérico é totalmente cristalino, e a cristalização é dada pelo percentual de cristalinidade.

Um esquema da estrutura molecular em um material semicristalino pode ser visualizado na Figura 4, onde são representados cristais com alinhamento longitudinal, ligados a cadeias amorfas.

Figura 4 – Estrutura semicristalina identificando cadeias cristalinas e amorfas.

Fonte: Adaptado pelo autor de CAMPBELL, G. A.; SPALDING, M. A. 2013.

2.1.3 Efeito da cristalinidade em materiais poliméricos

Segundo Osswald e Menges (2012) os termoplásticos semicristalinos possuem uma microestrutura mais ordenada que os termoplásticos amorfos. A estrutura cristalina em semicristalinos, conta com a presença de esferulitos, que são zonas cristalinas lamelares de alta organização molecular, ligadas diretamente à outras zonas amorfas. O tamanho dos esferulitos é muito maior que o comprimento de onda da luz visível, tornando os materiais semicristalinos translúcidos.

As cadeias moleculares possuem um maior grau de acondicionamento em uma unidade de área, em zonas cristalinas. Consequentemente existe um maior contato entre as longas distâncias de cristais, e as forças de atração secundárias são mais fortes do que em zonas amorfas, acarretando em um polímero que possui uma resistência e rigidez superior a um completamente amorfo. Isso significa que a cristalinidade afeta diretamente nas propriedades mecânicas do material polimérico. Um exemplo disso ocorre com o polipropileno, quando semicristalino possui uma alta dureza, rigidez plástica e alta resistência, já quando amorfo, é macio e pegajoso. (BRAZEL, C. S.; ROSEN, S. L., 2012)

2.1.4 Efeito da temperatura nos materiais poliméricos

Todo material termoplástico naturalmente possui um ponto de fusão, geralmente sendo baixo em relação aos demais materiais de engenharia, como os metais, vidros e cerâmicas, consequentemente não possuindo a mesma performance quando submetidos à altas temperaturas. (LARSON, E. R., 2015)

A temperatura de Transição Vítrea (T_g), do inglês *glass*, é caracterizada pela separação de regiões com propriedades abruptamente diferentes. Abaixo da T_g o material polimérico é frágil, duro, quebradiço e apresenta característica de sólido elástico, isso ocorre devido à baixa mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em tensões devido ao alongamento das cadeias. Conforme a temperatura é aumentada acima da T_g , as regiões amorfas do polímero lentamente adquirem mobilidade e as cadeias poliméricas se movem entre as outras de uma maneira reversível, apresentando regiões elásticas maleáveis. Na região acima da T_g , o módulo de elasticidade é diretamente proporcional à temperatura. Em aplicações estruturais é de grande importância que a temperatura de transição vítrea se encontre acima da temperatura de utilização, por outro lado, quando a flexibilidade é requerida, a T_g deve se encontrar abaixo da temperatura de utilização. (KUMAR, A; GUPTA, R. K., 2003)

Segundo Osswald e Menges (2012), a temperatura de fusão cristalina (T_m) é a maior temperatura onde estruturas cristalinas podem existir. Acima da T_m , o polímero se comporta como líquido viscoso ou viscoelástico, que pode ser identificado dependendo do peso molecular e do tempo associado a presente deformação.

A temperatura de fusão cristalina (T_m) para Canevarolo (2006), é o ponto onde o sistema vence as forças intermoleculares secundárias que existe entre as cadeias cristalinas presentes nos materiais semicristalinos. Quando ultrapassada a T_m , o material muda do estado borrachoso para o estado viscoso. Essa mudança se trata de uma mudança de primeira ordem, impactando diretamente no volume específico e entalpia. Conforme ocorre o aumento da temperatura, é ocasionado o aumento do volume, devido à expansão térmica. Também deve se ter em mente que a T_m não é um simples valor, e sim uma faixa de temperatura onde todos os cristais serão fundidos.

Quando se tratando de materiais poliméricos semicristalinos, uma outra temperatura deve ser observada com atenção, a temperatura de cristalização (T_c). Durante a etapa de resfriamento no processamento de um semicristalino, o material atinge uma temperatura suficientemente baixa, onde é iniciado o processo de organização molecular das cadeias, resultando na formação de estruturas cristalinas, chamada de cristalitos na microestrutura.

Conforme ocorre a organização entre as cadeias cristalinas, o material está sendo cristalizado. Isso pode ocorrer de duas formas particulares, uma isotérmica onde o material permanece no valor da T_c até que ocorra a cristalização completa. E outra forma, chamada de cristalização dinâmica, onde a temperatura é reduzida em taxa constante abaixo da T_c , ocorrendo a cristalização em uma faixa de temperatura. (CANEVAROLO, S., 2006)

A Figura 5 representa graficamente a cristalização dinâmica, podendo se observar que a cristalização ocorre em uma faixa de temperatura, localizada entre o ponto de inflexão da curva, onde está localizada a T_c .

Figura 5 – Gráfico da temperatura *versus* volume específico no processo de cristalização dinâmica.

Fonte: Adaptado pelo autor de CANEVAROLO, S. V. 2006.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS

Materiais poliméricos podem ser classificados de diferentes maneiras, levando em conta suas características mecânicas, reologia ou mesmo a orientação molecular. A maneira mais antiga e popular é a classificação devido a reação do material ao aquecimento e resfriamento, que por sua vez, dá origem a dois grandes grupos, os materiais termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos quando submetidos à um gradiente de temperatura e pressão se tornam viscoelásticos e podem ser moldados de diferentes formas. Quando posteriormente resfriados, dão origem ao produto desejado. Já os termofixos por sua vez, após serem submetidos ao aquecimento, e moldados, sofrem reações químicas no resfriamento, resultando em ligações cruzadas, os impossibilitando de voltar novamente a fluir, sendo o processo chamado de

irreversível. (ROSEN, S. L., 1993)

Os materiais termoplásticos e termofixos segundo Larson (2015) juntos representam uma nova e única classe, os plásticos. Mesmo possuindo muitas diferenças, eles exibem um comportamento muito similar em uso, são ambos feitos de moléculas poliméricas e podem ser moldados.

Segundo os marcadores registrados pela revista Perfil de Abiplast (2017), conforme a Figura 6 é evidente o crescimento da utilização de resinas poliméricas no Brasil. Sendo o polipropileno o termoplástico mais consumido com 21,6%, próximo ao PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e o PVC (Policloreto de Vinila), ambos com 16,6%.

Figura 6 – Representação das resinas mais consumidas no Brasil em 2017.

Fonte: Adaptado pelo autor de ABIPLAST, 2017.

2.2.1 Termofixos

Diferente do comportamento dos termoplásticos, os termofixos ao serem submetidos ao aquecimento, não fluem em uma determinada faixa de temperatura, mas sim se aquecidos suficientemente a degradação do material acontece. A diferença do comportamento dos termofixos, se dá devido as diferenças entre a estrutura química das duas classes. Os termoplásticos possuem cadeias lineares, que quando aquecidos, acima da temperatura de fusão cristalina ou acima da temperatura de transição vítrea para os amorfos, as ligações químicas se tornam mais fracas e o material fica livre para fluir. Já por outro lado, os termofixos possuem

cadeias cruzadas, os impossibilitando de fluir até as ligações covalentes fortes serem quebradas. (PASCAULT, J. P.; WILLIAMS, R.J.J, 2018)

Os materiais termoplásticos e algumas famílias de elastômeros, possuem internamente, ligações cruzadas entre as cadeias moleculares. Devido as ligações cruzadas, esses materiais se tornam resistentes ao calor após a solidificação, impactando em materiais infusíveis. (OSSWALD, T. A.; MENGES G., 2012)

2.2.2 Termoplásticos

Termoplástico é a classificação utilizada para os materiais poliméricos que quando sob ação de calor e pressão, podem ser facilmente moldados e transformados, e sob resfriamento são capazes de se tornar rígidos, sendo que o processo pode ser repetido várias vezes sem ocorrer degradação, tornando os termoplásticos recicláveis por muitos ciclos. A organização molecular dos termoplásticos pode ser semicristalina ou amorfa, podendo ser encontrados em cada uma das morfologias mencionadas em cada processamento. A decomposição e degradação polimérica devem ser observadas no momento do processamento dos termoplásticos, sempre observando os gradientes de temperatura e a recirculação nos moldes. (ROSATO, 2004)

Conforme Brazel e Rosen (2012) alguns polímeros quando aquecidos se tornam maleáveis e sob tensão fluem. Quando em estado de refrigeração, ocorre a reversibilidade ao estado sólido ou borrachoso. Os polímeros que exibem essas características são denominados termoplásticos. Um comportamento similar aos termoplásticos pode ser observado no processo de aquecimento e resfriamento do gelo. Alguns dos termoplásticos mais importantes são o polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e o poliestireno (PS), provenientes dos monômeros de etileno, propeno e estireno. Comumente é possível o contato com termoplásticos, estando presentes na maioria das aplicações diárias, como o polietileno, presente em sacolas plásticas e garrafas de detergente. O polipropileno também é muito encontrado em tubos, sacolas plásticas e caixas de armazenamento. Na construção civil pode ser observado com grande frequência o PVC, presente em tubulações e forros.

2.3 PLA (Poli (ácido láctico))

O PLA (Poli (ácido láctico)) é um polímero biodegradável semicristalino muito utilizado. Pode ser aplicado na substituição de materiais convencionais na indústria, ou até mesmo em aplicações em medicina. É um polímero termoplástico, com alta resistência

mecânica, e pode ser fabricado com matéria de fonte renovável. Possui facilidade de processamento, e é empregado principalmente na produção de peças por moldagem, extrusão e MA. (FARAH, S; ANDERSON, D. G.; LANGER, R., 2016)

2.3.1 Ecoflex®

O Ecoflex®, é um copolímero poliéster biodegradável aliado com a facilidade de processamento. É pertencente à família dos poliésteres biodegradáveis. Foi desenvolvido para processamento de filmes flexíveis, com intuito de produzir embalagens biodegradáveis. (YAMAMOTO, M. *et al.* 2002).

2.4 REOLOGIA

A Reologia é uma ciência atribuída no estudo da deformação dos materiais com a existência de forças aplicadas. Vastamente utilizada no estudo de soluções poliméricas e no estado fundido dos plásticos. Entretanto, a reologia é também apropriada no estudo da deformação de materiais presentes na forma sólida, como metais e borracha. (DEALY, J. M.; WISSBRUN, K. F., 1999)

2.4.1 Fluidos não Newtonianos

Durante o escoamento do polímero fundido, ocorre a presença de atrito entre as camadas do material, isso representa a limitação do fluxo de um polímero. No caso dos fluidos Newtonianos, a razão entre a tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento é constante em uma temperatura determinada.

Entretanto, quando se retrata um fluido não Newtoniano, a viscosidade aparente (razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) não é linear a uma determinada temperatura, mas depende das condições de escoamento, como: a geometria do escoamento e taxa de cisalhamento. (CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J.F., 2008)

Os fluidos podem ser divididos em três categorias:

- ✓ Fluidos considerados puramente viscosos ou Newtonianos, onde a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é denominada, dependendo apenas do valor da tensão de cisalhamento no mesmo ponto e instante; (CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J.F., 2008)

- ✓ Flúídos dependentes do tempo (*time-dependent fluids*), são fluidos complexos onde a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento dependem também da duração da tensão e da história cinemática; (CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J.F., 2008)
- ✓ Fluidos viscoelásticos, apresentam as características de flúídos e a elasticidade dos sólidos. Os mesmos apresentam uma faixa de recuperação elástica após a deformação. (CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J.F., 2008)

2.4.2 Flúídos viscoelásticos

Os flúídos viscoelásticos exibem uma combinação entre o comportamento de um flúído puramente viscoso, e o comportamento de um material puramente elástico.

Lidando com um fluido puramente viscoso, quando ocorre uma deformação, toda a energia exercida é dissipada. Entretanto, em um material puramente elástico, a energia exercida na deformação é totalmente recuperada.

Os polímeros exibem o comportamento viscoelástico. Quando no estado fundido, primeiramente apresentam a característica viscosa, mas quando uma tensão é aplicada, é possível visualizar a presença da recuperação elástica (RAUWENDAAL, C., 2014).

2.4.3 Taxa de cisalhamento aparente

A taxa de cisalhamento aparente para um escoamento de flúído por um canal interno é definida pela Equação 1.

$$\dot{\gamma}a = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot R^3} \quad (1)$$

Onde:

$\dot{\gamma}a$ – Taxa de cisalhamento aparente;

$\dot{Q}$ – Vazão volumétrica;

R – Raio do canal.

Essa relação é adotada para o estado de equilíbrio, distante dos efeitos de entrada e saída, escoamento incompressível e simetria com a linha de centro (RAO, N. S., 2014).

2.4.4 Viscosidade aparente

A viscosidade aparente de um fluido é definida pela Equação 2.

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

Onde:

$\dot{\eta}a$ – Viscosidade aparente;

$\dot{\gamma}a$ – Taxa de cisalhamento aparente;

τ – Tensão de cisalhamento.

A Figura 7 retrata a variação da viscosidade aparente como função da taxa de cisalhamento e da temperatura no PEBD (Polietileno de Baixa Densidade) (RAO, N. S., 2014).

Figura 7 – Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para o PEBD.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAO, N. S., 2014.

2.5 PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS

O processamento dos polímeros segue de forma geral um processo padrão, o princípio básico é fundir o material polimérico, com adição de calor e pressão. Portanto, quando o material está fundido, é forçado a escoar por uma matriz, no caso de extrusão uma matriz

contínua com a forma da seção transversal do produto final, já no caso da moldagem por injeção, uma matriz com a forma do produto acabado. O princípio de manufatura de uma peça polimérica pode ser visualizado na Figura 8. (RAO, N. S. 2014)

Figura 8 – Processo de manufatura de um produto polimérico.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAO, N. S. 2014.

Middleman (1977) diz que existe uma diversidade entre indústrias associadas com materiais poliméricos. Uma parcela das indústrias está preocupada com a produção dos polímeros pelos processos de polimerização, obtendo a matéria prima chamada de *pellets*. A maior parcela é caracterizada pelas indústrias interessadas na conversão física dos materiais poliméricos em produtos finais, como no processo de extrusão, um perfil, ou no processo de moldagem por injeção, a carcaça de um telefone. Existe ainda dentro dos dois tipos de indústrias, uma diversidade muito grande, devido a quantidade de propriedades que podem ser obtidas e a variedade de processos de conversão de polímeros em artigos comerciais.

O processamento dos plásticos pode envolver uma ou uma série de operações até a obtenção do produto final. Alguns dos processos mais conhecidos são retratados no Quadro 1.

Quadro 1 – Processamento dos plásticos.

Processo	Transformação
Operações de Moldagem	Envolve a transformação do plástico em forma de <i>pellet</i> ou em pó em um produto final, utilizando os processos de extrusão, moldagem por injeção, compressão ou rotomoldagem
Remoção de Material	Operação secundária, ocorrendo após a operação de moldagem. Envolve o corte, desbaste e estampagem.
Operação de União	A união de duas ou mais partes é obtida através da colagem ou soldagem.

Fonte: Adaptado pelo autor de OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ÓRIZ, J. P. 2006.

Osswald e Hernandez-Óriz (2006) retratam que a maioria dos produtos poliméricos são processados por operações de moldagem, devido principalmente a garantia dos processos e da precisão dimensional obtida, em escala micrométrica. O material geralmente é moldado até o corpo final, em temperaturas entre a temperatura ambiente e 350°C, utilizando moldes para a obtenção da forma desejada. Um molde de injeção, em geral, é uma ferramenta com custo elevado, devido principalmente à dificuldade de fabricação, mas o custo é rapidamente justificado com a produção seriada, sendo possível a fabricação de um milhão à um bilhão de unidades sem muitos danos ao molde.

2.6 EXTRUSÃO

Uma linha de extrusão de perfis termoplásticos é composta por uma unidade de extrusão, uma matriz com as dimensões do perfil desejado, um sistema de refrigeração e calibração, uma esteira e por fim um sistema de corte. Um exemplo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Linha de extrusão de perfis poliméricos.

Fonte: Adaptado pelo autor de CARNEIRO, O. S.; NOBREGA, J. M., 2012.

A unidade de extrusão é responsável por fundir, homogeneizar e empurrar o polímero para a matriz. A matriz de uma extrusora possui as dimensões da seção transversal do produto desejado. Já o sistema de calibração é necessário para garantir a precisão dimensional e refrigerar o material extrudado. Os demais sistemas, denominados de esteira e sistema de corte, são responsáveis por tracionar o perfil em uma velocidade linear prevista e cortar o perfil em segmentos, respectivamente. (CARNEIRO, O. S.; NOBREGA, J. M., 2012)

O processo de extrusão tem um papel relevante na produção de perfis poliméricos com seções longitudinais constantes e seções transversais de variadas formas. Conforme o passar do tempo, é observado o crescimento da demanda de perfis com seção transversal com maior número de detalhes, envolvendo uma gama de dimensões e formas. Por consequência disso, a

reologia e os parâmetros de processamento devem ser criteriosamente analisados, visando a obtenção de um produto final com excelente acabamento e funcionalidade. Desta forma, um novo produto representa um novo desafio para a engenharia de processamento, envolvendo tecnologia, vantagens econômicas e questões ambientais. (DEBBAUT, B.; MARCHAL, T., 2008)

De acordo com Agassant *et al.* (2017) a extrusão de polímeros é fortemente considerada o processo mais importante na moldagem de polímeros, sendo que representa a produção de diversos produtos acabados e semiacabados, como filmes, tubos, perfis, cabos, filamentos e revestimentos.

Na indústria um dos equipamentos para extrusão mais comuns são as plastificadoras de rosca única, representadas pela Figura 10, que quando acopladas à uma matriz de extrusão são chamadas de extrusoras. A extrusão também pode ser feita com máquinas com mais de uma rosca, equipamentos que não são foco deste trabalho, mas que podem ser utilizadas em muitos processos, como injeção, extrusão de filmes, tubos e revestimento de cabos. As funções de uma unidade de extrusão são listadas em ordem abaixo: (OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ÓRIZ, J. P., 2006)

- ✓ Transportar os *pellets* da alimentação para o canal da rosca;
- ✓ Compactar a matéria sólida e conduzir em estado fundido pelo interior do barril;
- ✓ Misturar o polímero, formando uma mistura homogênea;
- ✓ Dosar o fundido pelo molde.

Figura 10 – Representação de uma unidade básica de extrusão.

Fonte: Adaptado pelo autor de OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ÓRIZ, J. P. 2006.

Uma unidade de extrusão é constituída conforme a Figura 10. Descrevendo brevemente cada umas das partes:

- ✓ Alimentação: local onde são depositados os *pellets*, alimentando a unidade de extrusão;
- ✓ Pellets: matéria prima polimérica no estado sólido, com temperatura abaixo da T_m ;
- ✓ Barril: tubo cilíndrico responsável por abrigar a rosca e o material fundido;
- ✓ Rosca: ferramenta responsável pela compressão e transporte da matéria-prima;
- ✓ Matriz: componente responsável pela forma final do perfil;
- ✓ Perfil: produto final do processo de extrusão, podendo ser obtido de várias formas, com a variação na matriz.

Basicamente uma unidade de extrusão possui três zonas, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Representação de uma rosca única para extrusão.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAUWENDAAL, C. 2014.

- ✓ Zona de alimentação: possui a função de alimentar o vazio entre a rosca e o barril, efetuar o pré-aquecimento da matéria prima em forma de *pellet* e conduzir o material até a zona de compressão. Ainda deve se ter cuidado com o dimensionamento desta zona, sendo que caso ocorra a alimentação insuficiente, o material presente na zona de compressão pode acabar degradando, e caso a alimentação seja excessiva, então pode ocorrer o trancamento. Conforme o material excede a temperatura de fusão, ocorre a formação de uma espécie de filme na superfície interior do barril, a partir deste ponto inicia a zona de plastificação, que não coincide com a zona de compressão; (CRAWFORD, R. J., 1998)
- ✓ Zona de compressão: a zona de compressão ou transição é designada como o local onde o material polimérico funde. O comprimento desta zona é função direta das propriedades da matéria prima, assim como a geometria da rosca e as condições de processamento. Durante a compressão, devido ao movimento da rosca direcionando o polímero para a zona de dosagem, a poça de material fundido se movimenta de tal forma que a porção de matéria sólida diminui e a zona fundida aumenta; (OSSWALD, T. A.; MENGES, G., 2012)
- ✓ Zona de dosagem: conforme o material se movimenta, ocorre o aquecimento devido as resistências térmicas no entorno do barril e decorrente ao atrito entre as paredes da rosca e do barril. Conforme o material excede a temperatura de fusão, ocorre a formação de uma

espécie de filme na superfície interior do barril. A partir do momento onde toda a matéria sólida se transforma em matéria fundida, a zona de plastificação atinge o fim, e se inicia a zona de dosagem, onde o material flui para a matriz. Conforme ocorre a extrusão do polímero pela matriz, o mesmo adota o formato do canal da matriz; (RAUWENDAAL, C., 2014)

De acordo com Tadmor (2006), uma técnica chamada Maddock é utilizada para a obtenção do perfil do canal anular presente entre a rosca e o barril em uma unidade de extrusão. O primeiro passo é refrigerar abruptamente o barril e a rosca de uma unidade de extrusão operando em regime permanente, desta forma o polímero presente no canal anular é solidificado. Após retirada a rosca do interior do barril, e efetuada a retirada do canal polimérico solidificado conforme a Figura 12 (a), o canal é cortado em pequenas parcelas a cada passo de rosca, desde o início da zona de alimentação até o final da zona de dosagem, obtendo a seção perpendicular de cada passo da rosca, conforme a Figura 12 (b). Desta forma é possível visualizar claramente o canal polimérico, representando as zonas importantes da rosca, e também retratando o desenvolvimento da poça de material polimérico fundido a cada passo da rosca, onde durante a zona de compressão é possível visualizar a coexistência da fase sólida, representada pela cor branca, e a fase fundida do material polimérico, representada pela cor cinza, lado a lado.

Figura 12 – Resultado do experimento (Técnica Maddock).

Fonte: Adaptado pelo autor de TADMOR, Z; GOGOS, C. G. 2006.

De acordo com Rauwendaal (2014), durante o processo de extrusão, um gradiente de pressão é necessário para submeter o polímero fundido à passagem pelo orifício de saída do molde. Deve ser claro que essa pressão é causada pelo molde e não pela unidade de extrusão, que deve atuar de forma correta para exercer uma pressão suficientemente grande para que ocorra a passagem do material pelo orifício do molde. Isto é, a pressão no molde é determinada pelas dimensões dos canais do molde, a temperatura do material, a taxa de fluxo e as propriedades reológicas, como a viscosidade do material.

2.6.1 Unidade de extrusão rosca única

A tecnologia empregada na construção de unidade de extrusão é muito ampla e possui muitas variáveis. Existem de forma geral, três tipos de extrusoras, o modelo mais utilizado é a extrusora de rosca, que pode ser construído com mais de uma rosca. Justificado pela maior utilização, como referência ao decorrer deste trabalho será retratado o modelo de extrusora de rosca única quando se refere à unidade de extrusão. Os outros dois outros modelos são chamados de extrusora de êmbolo e extrusora de discos, que são variações do processo de extrusão, mas baseadas no mesmo princípio. (BAIRD, D. G.; COLLIAS, D. I., 2014)

Uma unidade de extrusão de rosca única é basicamente formada por uma alimentação, um barril e uma única rosca. O material é alimentado pela tremonha, pelo efeito da gravidade é direcionado diretamente para o canal anular formado entre a rosca e o barril. Alguns materiais possuem uma maior dificuldade para fluir, podendo ocasionar problemas na alimentação. Como o barril é estático e a rosca rotacional com uma velocidade angular definida, resulta em forças de atrito no material polimérico, tanto na superfície interna do barril, quanto na superfície externa da rosca. Entretanto, devido às forças de atrito o material é transportado longitudinalmente pelo canal anular. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Um dos parâmetros essenciais em unidades de extrusão que utilizam o princípio de bombeamento, é a interação entre a parede da rosca rotativa e a parede estacionária do barril, evitando o retorno do material polimérico, e de outra forma mantendo um acoplamento sem interferência. Para que ocorra de forma adequada o transporte do material polimérico, o atrito deve ser baixo na superfície externa da rosca, e alto na superfície interna do barril. Se este critério não é satisfeito, não ocorre a transferência do material no eixo axial (direção de saída). O fluxo de polímero fundido na saída da unidade de extrusão também pode ser afetado pelo coeficiente de atrito interno do material, chamado de viscosidade. Isso ocorre na saída, onde particularmente ocorre uma alta resistência de fluxo para fora da matriz. Como o material

fundido é processado sobre pressão, existe uma perda de vazão devido a decorrência de retorno pelos canais da rosca, sob efeito de pressão de retorno. (ROSATO, D. V., 1998)

Ainda Rosato (1998) destaca que a quantidade de material que é extrudado para fora da rosca, em descarga livre (sem matriz) é aproximadamente a metade do volume de um canal da rosca por revolução. Isto ocorre devido ao material fundido aderir à superfície externa da rosca e as paredes do barril. Em decorrência disso, a velocidade média de descarga pode ser estimada pela média entre a velocidade na parede do barril e da superfície da rosca.

2.6.2 Matriz de extrusão

Uma das partes mais importantes da uma unidade de extrusão é a matriz, isso devido a função de dar forma à seção transversal do extrudado. As demais partes constituintes da unidade de extrusão, possuem as suas particularidades, mas o objetivo conjunto é conduzir o material polimérico fundido na pressão e consistência almejada pelo projetista, até a matriz de extrusão. A Figura 13 representa uma matriz de extrusão de tubos, característica pela complexidade no projeto, isso devido ao formato vazado do perfil tubular. (KAINTH, S. 2018)

Figura 13 – Matriz de extrusão de tubos.

Fonte: Adaptado pelo autor de KAINTH, S. 2018.

A matriz de extrusão é a ferramenta responsável por dar a forma final no extrudado desejado. Esta ferramenta possui uma grande complexibilidade no projeto, devido principalmente as características dos materiais poliméricos fundidos. (OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ÓRIZ, J. P. 2006)

Pode-se encontrar matrizes para diferentes tipos de perfis e corpos, como:

- ✓ Filmes e folhas;
- ✓ Tubos;
- ✓ Filamentos;
- ✓ Perfis maciços;
- ✓ Perfis abertos;
- ✓ Revestimento de cabos.

A matriz e a unidade de calibração fazem parte dos principais componentes no processo de extrusão. Especificamente o conjunto destas ferramentas é responsável pela morfologia e consequentemente pelas propriedades físicas e mecânicas do produto final. O conjunto também é responsável por determinar a máxima taxa de operação da unidade de extrusão. (CARNEIRO, O. S.; NOBREGA, J. M., 2012)

Os dois principais objetivos no processo de extrusão são a produção de altas taxas de material extrudado, assim como uma boa qualidade do produto final. Esses dois objetivos impactam diretamente um no outro, sendo que muitas vezes é possível a obtenção de taxas menores de um produto, visando uma melhor morfologia e acabamento superficial do produto. A matriz de extrusão, juntamente com a unidade de calibração desempenham um papel fundamental na otimização das dimensões e morfologia do material extrudado, mas por outro lado, a taxa de produção é impactada diretamente pelas mesmas características. Entretanto, a natureza viscoelástica característica dos materiais poliméricos, interfere na qualidade do produto, muitas vezes a elasticidade leva a defeitos pontuais no extrudado. Para diminuir este efeito a matriz de extrusão deve ser projetada cuidadosamente. (CARNEIRO, O. S.; NOBREGA, J. M., 2012)

Para a obtenção de um produto final com as dimensões finais desejadas, deve se ter em mente que se trata de uma tarefa árdua, exigindo conhecimento das características do material, reologia, transferência de calor e também um grande conhecimento do processo de extrusão. Mesmo com o constante avanço da simulação computacional, e da resolução de complexos problemas de transferência de calor, construir uma matriz de extrusão é mais uma arte do que ciência. (KOSTIC, M. M.; REIFSCHNEIDER, L. G., 2006)

2.6.3 Tópicos principais no projeto de uma matriz de extrusão

Uma matriz de extrusão, deve assegurar que o perfil extrudado possua as dimensões da seção transversal desejadas, contribua positivamente na morfologia do polímero, regulando a

orientação molecular e evitando cantos vivos com fluxo morto. Deve também possuir baixa rugosidade para manter um fluxo constante e bom acabamento superficial no polímero extrudado. (WAGNER, J. R. J.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. J., 2014)

Ainda para a construção de uma matriz de extrusão adequada, é necessário observar alguns pontos, conforme listados no Quadro 2.

Quadro 2 – Características na construção de uma matriz de extrusão.

Fácil manutenção.
Vedação eficiente em todos os orifícios.
Fácil conexão com a unidade de extrusão.
Material de construção resistente a deformação sob pressão.
Caso aquecido, correto e suficiente suprimento elétrico.
Versatilidade para utilizar a matriz em mais de um tipo de material.
Baixo custo de fabricação.

Fonte: Adaptado pelo autor de WAGNER, J. R. J.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. J. 2014.

Como uma forma de controle, no projeto de uma matriz de extrusão é necessário desenvolver um dispositivo de controle de fluxo no interior da matriz, garantindo o balanço do fluxo. Existem duas características presentes nos materiais poliméricos fundidos, que ocasionam dificuldades no projeto de uma matriz de extrusão, o comportamento viscoelástico (promovendo o inchamento no perfil) e a pseudoplasticidade que é a característica de redução da viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Durante o projeto de uma matriz de extrusão as propriedades elásticas do polímero fundido devem ser levadas em conta, devido as consequências da viscoelasticidade em uma matriz de extrusão. Alguns dos efeitos estão listados no Quadro 3. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

Quadro 3 – Causas da elasticidade na extrusão.

Processo.
Perda de pressão nas estricções dos canais de escoamento.
Ocorrência de vórtices.
Inchamento do extrudado após a saída da matriz de extrusão, ocasionando em uma diferença entre o perfil e a saída do molde.
Diferença no diâmetro e redução no comprimento conforme aumento do diâmetro da parede em moldagem por sopra.

Fonte: Adaptado pelo autor de HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016.

O inchamento do extrudado assim que deixa as paredes da matriz de extrusão é um fenômeno conhecido. Esse fenômeno é devido a elasticidade do polímero fundido, após o extrudado deixar a matriz de extrusão ocorre a restituição elástica da conformação à qual o polímero havia sido submetido no interior do barril. Os polímeros de forma geral, possuem uma característica chamada de “memória de deformação” onde pode ser observado que uma tensão pode ser recuperada mesmo em uma grande extensão após a ocorrência da deformação, isso também ocorre devido à natureza viscoelástica dos polímeros. Como a restituição elástica é uma variável dependente do tempo, quando se trata de matrizes com grandes extensões, o inchamento é menor do que se tratando de matrizes com extensões menores. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Entretanto, o inchamento após a matriz de extrusão não ocorre somente em fluídos com natureza viscoelástica como os polímeros, mas ocorre também em fluídos puramente viscosos. Mas deve se ter em mente que o mecanismo de formação do fenômeno de inchamento não é o mesmo, no caso dos fluídos puramente viscosos é causado pelo rearranjo do perfil de velocidade na saída do molde, alterando de um perfil parabólico no interior do molde, para um perfil reto conforme a Figura 14. Como alguns produtos são produzidos para um encaixe perfeito com uma outra geometria, é preciso uma maior atenção neste quesito, sendo que o inchamento não ocorre uniformemente. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Figura 14 – Efeito de inchamento do perfil extrudado.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAUWENDAAL, C. 2014.

2.6.4 Materiais para fabricação de uma matriz

De acordo com Hopmann e Michaeli (2016), para a construção de uma matriz de extrusão, os materiais devem ser selecionados para atender alguns requisitos de projeto listados abaixo:

- ✓ Possuir resistência a temperatura, desgaste e altas pressões;
- ✓ Possuir dureza suficiente para que não ocorra deformação;
- ✓ Possuir acabamento superficial polido, evitando defeitos no extrudado;
- ✓ Responder adequadamente ao tratamento térmico realizado no aquecimento e resfriamento durante o processo;
- ✓ Mínima tendência a expansão durante o aquecimento;
- ✓ Ser resistente à corrosão;
- ✓ Ser adequado aos tratamentos superficiais de cromagem ou nitretação;
- ✓ Boa condutividade térmica.

Para atingir as condições de projeto listadas acima, algumas classes de aços podem ser utilizadas, algumas destas classes atendem melhor algumas condições do que outras. Portanto as classes de materiais são: (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

- ✓ Aços cementados;
- ✓ Aços nitretados;
- ✓ Aços endurecíveis;
- ✓ Aços inoxidáveis.

2.7 UNIDADE DE CALIBRAÇÃO

A extrusão de materiais poliméricos termoplásticos, é um processo de fabricação de perfis, de modo que, a seção transversal do material extrudado é constante. Desta forma é possível a extrusão de filmes, folhas, tubos, perfis simples e perfis complexos. Durante o processo de extrusão, é possível identificar 3 etapas básicas, primeiro ocorre a transformação de fase no material, onde o polímero é fundido, em seguida o material é forçado a passar pela forma da matriz de extrusão, que é denominada a ferramenta responsável por dar forma ao extrudado, a etapa final consiste na calibração e refrigeração do material até uma temperatura média abaixo da faixa de cristalização. Os processos de extrusão, geralmente de perfis de natureza complexa, usualmente utilizam unidades de calibração e refrigeração do tipo seca,

onde o polímero não entra em contato direto com o fluido refrigerante. Uma alternativa para otimização do processo de calibração é a utilização de mais de uma unidade de calibração, com comprimento reduzido. (CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M.; MOTA, A. R.; SILVA, C. 2013)

Durante o processo completo de extrusão de perfis utilizando uma unidade de calibração, e durante o processo de extrusão de tubos, frequentemente nos deparamos com calibradores, devido à grande necessidade de manter constantes as dimensões do perfil. Calibradores são utilizados de forma geral, quando existe uma exigência de precisão dimensional, e também no caso de o material extrudado não possuir força adequada para manter as dimensões do molde. Quando a precisão dimensional não é um fator de grande importância, um calibrador é desnecessário, e é utilizado apenas um suporte abaixo da linha de extrusão. Uma das características positivas de um calibrador é a transferência de calor obtida devido ao contato do polímero com as paredes de alta condutividade térmica, resultando na retirada de calor do extrudado. Desta forma, a transferência de calor é muito explorada em unidades de calibração, devido ao acréscimo de dutos com passagem de água ou ar, visando o aumento da troca térmica. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Uma representação básica de uma unidade de calibração seca pode ser visualizada na Figura 15, com destaque nos canais de refrigeração à água e canais de calibração a vácuo.

Figura 15 – Representação de uma unidade de calibração.

Fonte: Adaptado pelo autor de SHEEHY, P.; TANGUY, P. A. 1994.

Atualmente devido à grande busca por precisão dimensional e alto nível de acabamento, consequentemente a maioria dos perfis plásticos são calibrados. Os sistemas de transferência

de calor nos calibradores são muito importantes para denominar as principais características morfológicas do produto final. Portanto, basicamente existem dois métodos de transferência de calor que podem ser aplicados em calibradores, os calibradores secos e os calibradores úmidos. Os calibradores secos são dotados de tubulações de refrigerante (geralmente água) no interior da estrutura, não possuindo contato com o polímero, desta forma, a transferência de calor ocorre por condução, sendo o calor trocado do polímero para a superfície interna do calibrador, e da superfície interna para a tubulação de refrigerante. A troca de calor em calibradores à seco é afetada pela resistência térmica do material do calibrador. Por outro lado, quando se trata de uma unidade de calibração úmida, o mecanismo de transferência de calor é a convecção, sendo que o polímero é submetido a um contato direto com o refrigerante no estado fluído, efetuando uma troca térmica muito superior. É de grande importância que a troca térmica não seja realizada de forma abrupta, podendo ocasionar rigidez excessiva no polímero. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

Principalmente devido à natureza viscoelástica dos materiais poliméricos, ocorre o inchamento do perfil assim que deixa a saída da matriz. Portanto podem ocorrer alguns desvios nas condições de operação e também dificuldades no balanço de fluxo. Esse conjunto de fatores contribui negativamente com a produção de perfis com seção transversal contínua. Para a correção desses desvios, se faz necessária a utilização de uma unidade de refrigeração e calibração, atuando com forças externas no perfil extrudado para a correção das dimensões finais, e também atuando com uma troca gradual de calor, refrigerando o perfil uniformemente. (RIBAU, A. M. et al. 2013)

Sistemas de calibração para o processo de extrusão de materiais de origem polimérica, são aplicados somente em alguns casos, como na extrusão de folhas, devido à um ajuste da distância entre cilindros calibradores, e também no caso de tubos, perfis vazados e outras geometrias complexas ou que necessitam de grande precisão dimensional. (CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. 2012)

Calibradores a vácuo são utilizados quando se exige um bom contato entre a superfície interna do calibrador e a superfície externa do polímero. Uma alternativa ao uso do vácuo, é um sistema de ar comprimido, mas é geralmente dispensado devido a maior dificuldade de manter a pressão constante. (RAUWENDAAL, C., 2014)

De acordo com Carneiro e Nóbrega, (2012) conforme a Figura 16, alguns parâmetros devem ser levados em consideração para que ocorra uma transferência de calor adequada no sistema de calibração.

Figura 16 – Variáveis que podem afetar uma unidade de calibração.

Fonte: Adaptado pelo autor de CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. 2012.

Os parâmetros que influenciam a transferência de calor em uma unidade de calibração são:

- ✓ Geometria do Sistema: um sistema de calibração pode possuir mais de um calibrador, a geometria do sistema envolve a quantidade de calibradores, o comprimento de calibração, o avanço em relação a saída da matriz de extrusão e a distância entre os calibradores. Outra condição importante é a tubulação de resfriamento, quantidade de cavidades, diâmetro de cada cavidade, disposição dos canais e a distância entre a superfície do polímero e os canais de refrigeração. O objetivo principal é uma refrigeração homogênea;
- ✓ Condições de refrigeração: as condições de refrigeração envolvem primeiramente o contato direto ou indireto entre o polímero e o fluido refrigerante. As condições de entrada do polímero e do fluido refrigerante, a vazão volumétrica de fluxo e a direção do fluxo. Visando a maior eficácia da unidade de refrigeração, o fluido refrigerante deve entrar em baixas temperaturas, mas sempre evitando refrigeração abrupta no polímero e grandes gradientes de temperatura. A vazão volumétrica de refrigerante deve ser alta o suficiente para evitar o superaquecimento do fluido;
- ✓ Vácuo: o número de orifícios de vácuo, localização e a intensidade do vácuo aplicado também é um fator a ser controlado. São parâmetros que definem o contato entre a superfície do perfil polimérico com a superfície interna do calibrador e, por conseguinte as forças de atrito;
- ✓ Condições de Extrusão: vazão mássica, temperatura de entrada no calibrador e a

temperatura média da seção transversal do perfil na saída do calibrador. Essas são condições iniciais para a determinação do comprimento de refrigeração requerido. O perfil deve ser resfriado sempre de maneira mais uniforme o possível, minimizando a rigidez e tensões residuais;

- ✓ **Propriedades do Material do Calibrador:** condutividade térmica, rugosidade da superfície de contato. Essas características impactam no aumento da eficiência de refrigeração. Altas condutividades térmicas, em conjunto com baixa rugosidade representam uma menor resistência a condução térmica;
- ✓ **Propriedades Termofísicas do Polímero:** contração e coeficiente de difusividade térmica. Para aumentar a eficiência térmica, é necessário que seja observado a contração das dimensões do perfil com as dimensões do calibrador;
- ✓ **Geometria do Perfil:** a seção transversal do polímero deve ser observada com cuidado, evitando diâmetros muito reduzidos, cantos vivos, grandes vazios e a localização dos vazios. O projeto do perfil deve ser efetuado visando o fluxo balanceado na saída do molde, e taxa de refrigeração similar em todas as regiões da seção transversal do perfil.

Uma unidade de calibração pode ser constituída de apenas por um calibrador, como pode ser constituída por uma linha de calibradores em série. Conforme o perfil percorre o comprimento do calibrador, a temperatura decresce e por consequência ocorre o aumento das forças de atrito, muitas vezes devido à dificuldade de retirar o perfil da unidade de calibração, o comprimento do calibrador é limitado pela tensão admissível pelo polímero. Também é de suma importância, a permanência do material polimérico no interior do calibrador, até que obtenha resistência e estabilidade adequada para suportar as forças externas, sem que ocorra variação nas dimensões. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

2.7.1 Tipos de calibradores

O tipo da unidade de calibração utilizada durante o processo de pós extrusão, deve ser escolhido de acordo com o perfil a ser extrudado, a complexidade da seção transversal, a morfologia esperada e o tipo de material a ser extrudado. Entretanto uma classificação adequada para a escolha da unidade de calibração ideal, leva em conta também a refrigeração do perfil ao longo do comprimento do sistema. No caso de sistemas de calibração a seco, a transferência de calor ocorre por condução entre o polímero e a superfície interna do calibrador. Por outro lado, quando se trata de um sistema de calibração úmido, a transferência de calor ocorre por

convecção, podendo ser natural ou forçada, lembrando que na convecção forçada o coeficiente convectivo é consideravelmente superior. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

2.7.1.1 Calibrador refrigerado à água

Quando se refere a extrusão de perfis simples, com uma tolerância dimensional considerável, pode-se utilizar um calibrador refrigerado à água, um sistema de calibração simples com um sistema de tubulação de água para a refrigeração do extrudado. Assim como ocorre em todos os sistemas de calibração, a velocidade máxima de calibração depende muito da complexibilidade da geometria da seção transversal do perfil. O fluxo de água deve ser contracorrente, contribuindo com a maior eficácia do sistema de refrigeração. A água pode ser resfriada com um sistema de convecção de ar forçado. Após a saída do calibrador, o perfil pode ser refrigerado à ar, evitando possíveis deformações pós calibração. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

Uma ilustração do calibrador refrigerado à água pode ser vista na Figura 17:

Figura 17 – Calibrador por atrito.

Fonte: Adaptado pelo autor de HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016.

2.7.1.2 Calibrador Externo com Ar Comprimido

Os calibradores do tipo externo à ar comprimido, são equipamentos especiais para a fabricação de perfis tubulares. Portanto as dimensões externas do perfil são determinadas pela unidade de calibração. As dimensões da superfície interna do perfil, são calibradas pela pressão interna proveniente da injeção de ar comprimido no interior do perfil. Para manter a pressão interna, é acrescentado um *plug* flutuante, no interior do perfil extrudado, garantindo a vedação,

assim como as dimensões finais desejadas. O *plug* flutuante é fabricado de metal, e possui anéis de vedação em sua superfície externa. A tensão máxima com que o extrudado é retirado do calibrador é determinada levando em consideração as dimensões do *plug* flutuante, evitando o estiramento excessivo das cadeias poliméricas. O sistema de refrigeração empregado neste tipo de unidade de calibração, é por canais de escoamento de água no interior do calibrador. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

Uma ilustração de um calibrador externo com ar comprimido é retratada na Figura 18:

Figura 18 – Calibrador externo com ar comprimido.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAUWENDAAL, C., 2014.

2.7.1.3 Calibrador externo a vácuo

O calibrador externo a vácuo é um dos modelos mais empregados na extrusão de perfis com seção transversal complexa, ou que possuam a presença de cavidades. Em processos industriais, em que se deseja alta precisão dimensional, sensores identificam a presença de material polimérico acumulado entre a matriz e o calibrador, fazendo um ajuste automático da tensão de estiramento do polímero. Após o processo de calibração, o perfil percorre continuamente por uma banheira de água, visando o resfriamento rápido com a alta transferência de calor pelo contato direto entre a água e o extrudado. (RAUWENDAAL, C., 2014)

Unidades de calibração a vácuo, são classificadas como calibradores secos, onde não existe o contato entre o polímero e o fluido refrigerante. Os canais de vácuo são de extrema importância para que ocorra o contato necessário entre o perfil polimérico e a superfície interna do calibrador. Durante o processo de calibração, o polímero é tracionado contra as paredes do calibrador, tomando a forma da superfície interna do calibrador. A refrigeração é composta por

uma tubulação de água posicionada no interior do calibrador. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

A Figura 19 representa uma ilustração do sistema de calibração externa a vácuo.

Figura 19 – Calibrador externo a vácuo.

Fonte: Adaptado pelo autor de RAUWENDAAL, C., 2014.

2.7.2 Refrigeração

Existem diversas formas de resfriar um perfil durante a etapa de cristalização, no processo de extrusão. Para a fabricação de folhas ou filmes planos o resfriamento ocorre por condução, devido ao contato do extrudado com cilindros resfriados responsáveis pela tensão do perfil. Por outro lado, durante o processo de extrusão de filmes tubulares (sacolas), a transferência de calor é efetuada por convecção forçada, devido aos anéis de refrigeração à ar. Outros processos de refrigeração também são empregados, para a grande maioria dos produtos extrudados, o resfriamento é efetuado por condução devido ao contato direto com água, ou em casos especiais, fluídos refrigerantes. Já quando se tratamos de perfis vazados, como tubos, ou quando se trata de um perfil que exige uma grande precisão dimensional, se faz necessária a utilização de uma unidade de calibração, geralmente a vácuo, desta forma, é utilizada a transferência de calor por condução indireta. Entretanto, independentemente do tipo de resfriamento, a transferência de calor empregada para a solução é aplicada apenas a variação do tipo de troca térmica (condução ou convecção) e a variação das condições de fronteira. (CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. 2012)

No caso dos calibradores secos, onde a superfície interna do calibrador está em contato direto com o perfil extrudado, é dimensionada com o diâmetro final da seção transversal do perfil. A transferência de calor neste caso, ocorre basicamente pela condução térmica entre o polímero e as paredes internas do calibrador, onde o calor é trocado com os canais de

refrigeração e posteriormente com o ambiente externo. De forma sucinta, neste caso a transferência de calor é afetada pelas resistências de contato entre o calibrador e os canais de refrigeração. Devido às forças de atrito presentes no contato entre o polímero e a superfície interna do calibrador, são necessárias forças externas de tração no perfil polimérico. A tração aplicada deve ser mensurada de acordo com a tensão máxima suportada pelo perfil, dependendo das características do polímero, da seção transversal e a distribuição de temperatura. (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

2.7.3 Vácuo

O Sistema de vácuo, como já mencionado acima tem a função de aproximar a superfície externa do perfil à superfície interna do calibrador, para obter a dimensão desejada no momento do resfriamento. Quando em contato com a superfície interna do calibrador, o perfil polimérico tende a trocar calor de uma forma mais efetiva com o sólido, assim resfriando o polímero na dimensão desejada. É de grande importância que os canais de vácuo possuam o menor comprimento possível, com o intuito de diminuir a perda de carga e obter a maior eficiência. A contrapressão gerada pelo sistema de vácuo também deve ser constante, evitando divergências nas condições de processamento. As dimensões dos canais de vácuo, assim como o posicionamento e a contrapressão necessária, são tarefas baseadas na experiência do projetista e nas condições de processamento. (CONRAD, U. 2003)

2.7.4 Tensões residuais

Algumas tensões residuais são geradas na calibração de perfis. São provenientes de duas origens. Primeiramente, tensões residuais não conseguem relaxar a tempo, antes da ocorrência da solidificação do perfil polimérico, tendo como origem a formação na matriz de extrusão devido à contração do canal, ou até mesmo pelo mecanismo de tração do perfil, usado para tracionar o polímero para fora da unidade de calibração. As tensões residuais também podem ocorrer devido à heterogeneidade do perfil de temperatura no momento da calibração, resultando na contração heterogênea do material polimérico, e são conhecidas como tensões residuais térmicas.

As tensões residuais que ocorrem devido às forças de tração no perfil, afetam diretamente a resistência do polímero ao impacto, isso devido à orientação das cadeias poliméricas em um único sentido. Já as tensões residuais térmicas possuem a característica de

diferentes contrações no perfil, podendo haver a ocorrência de variações nas dimensões externas. (CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. 2012)

2.7.5 Materiais para fabricação de uma unidade de calibração

Basicamente não existem grandes limitações para os materiais de construção de uma unidade de calibração, seguindo basicamente as mesmas classes de materiais para construção de uma matriz de extrusão mencionadas no item 2.6.4, que de acordo com Hopmann e Michaeli (2016), os materiais devem ser selecionados para atender alguns requisitos de projeto listados abaixo:

- ✓ Possuir resistência a temperatura, desgaste e altas pressões;
- ✓ Possuir dureza suficiente para que não ocorra deformação;
- ✓ Possuir acabamento superficial polido, evitando defeitos no extrudado;
- ✓ Responder adequadamente ao tratamento térmico realizado no aquecimento e resfriamento durante o processo;
- ✓ Mínima tendência a expansão durante o aquecimento;
- ✓ Ser resistente à corrosão;
- ✓ Ser adequado aos tratamentos superficiais de cromagem ou nitretação;
- ✓ Boa condutividade térmica.

Para atingir as condições de projeto listadas acima, algumas classes de aços podem ser utilizadas, algumas destas classes atendem melhor algumas condições do que outros. Entretanto as classes de materiais são: (HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. 2016)

- ✓ Aços Cementados;
- ✓ Aços Nitretados;
- ✓ Aços Endurecíveis;
- ✓ Aços Inoxidáveis.

2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

A Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma metodologia derivada da Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor, vastamente utilizada para a solução de problemas de engenharia, como o emprego de um novo equipamento ou até mesmo, no aperfeiçoamento de um equipamento já existente.

CFD é o estudo do comportamento da dinâmica dos fluídos. Para que se resolva as equações matemáticas que governam as características físicas da fluidodinâmica, é necessário o emprego de programas de alto nível, realizando assim as simulações numéricas. A Figura 20 retrata a dependência multidisciplinar do estudo CFD, aliando a Engenharia com a Matemática e a Ciência da Computação. (TU, J.; YEOH, G.; LIU, C., 2013)

Figura 20 – Áreas de abrangência da mecânica dos fluídos computacional.

Fonte: Adaptado pelo autor de TU, J.; YEOH, G.; LIU, C., 2013.

2.8.1 CFD e a redução de custos na fabricação de matrizes de extrusão

Um dos fatores que influenciam a decisão final na construção de uma matriz de extrusão, é o custo de fabricação. Grande parcela dos custos na fabricação são provenientes das sucessivas tentativas e erros. O CFD é uma alternativa muito atraente na redução de custos, utilizando a simulação computacional para prever possíveis objeções no projeto. A modelagem e ajustes de uma única matriz é realizada comumente em duas semanas, com o auxílio de uma ferramenta CFD, esse tempo pode ser reduzido para uma média de dois dias. Isso impacta positivamente na eficiência e confiabilidade da produção, assim como, ocasiona o decréscimo de perdas de produtividade e matéria prima. (KLEIN, P; FRADET, F., 2010)

2.8.2 Solver

O *solver* é empregado com objetivo de coletar as informações fornecidas no pré-processamento, e transformá-las em uma linguagem computacional. Isso possibilita a solução

das equações fundamentais da fluidodinâmica, utilizando métodos numéricos iterativos. Entretanto, existem três grandes métodos empregados na solução numérica: o Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Métodos dos Volumes Finitos (MVF). (VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., 2007)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) implementado em um software CAD, é capaz de descrever uma geometria com muita precisão. O estudo de um escoamento de fluídos é descrito com uma série de equações diferenciais parciais (equações de Navier-Stokes), o MEF é utilizado para a obtenção de soluções numéricas aproximados destas equações (LAFLEUR, P. G.; VERGNES, B., 2014).

Entretanto, para a obtenção da solução, são necessários alguns passos:

- ✓ Análise matemática do problema;
- ✓ Implementação;
- ✓ Concepção da malha no domínio de estudo;
- ✓ Determinação do tipo dos elementos;
- ✓ Introdução das condições de contorno relevantes à solução do problema.

2.9 MODELOS QUE DESCREVEM O ESCOAMENTO

Existem diversos modelos que descrevem o escoamento dos polímeros. Cada modelo varia de acordo com a complexibilidade da resposta que oferece. Recentemente, muitos progressos foram atingidos na acurácia de teorias moleculares para a deformação do escoamento de fluídos (RODRIGUEZ, F. et al., 2015).

2.9.1 Lei das Potências

A Lei das Potências é considerado o modelo mais simples que descreve, a região viscoelática no gráfico que representa a viscosidade *versus* tensão de cisalhamento. Entretanto, a lei das potências negligencia a presença do platô Newtoniano em baixas taxas de cisalhamento. O modelo da Lei das Potências é descrito conforme a Equação (3) (OSSWALD, T. A.; MENGES, G., 2012):

$$\eta = m. \gamma^{n-1} \quad (3)$$

Onde:

η – Viscosidade;

m – Índice de consistência;

n – Índice da Lei das Potências.

γ – Taxa de cisalhamento;

2.9.2 Modelo Cross LWF

O modelo de escoamento Cross-WLF é um modelo dependente dos efeitos da variação da temperatura, assim como, a taxa de cisalhamento para determinação da densidade aparente. Considera também, a região de pseudoplasticidade e a região do platô Newtoniano.

Neste modelo, a região de pseudoplasticidade do fluido é modelada por uma equação geral nomeada de equação de Cross, dada da seguinte Equação (4) (CARVALHO, C. et al., 2009):

$$\frac{\eta_{\dot{\gamma}} - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (4)$$

Onde:

η_0 – Viscosidade a taxa de cisalhamento zero;

η_{∞} - Viscosidade a taxa de cisalhamento infinita;

λ – Tempo de relaxação;

$\dot{\gamma}$ – Taxa de cisalhamento;

n – Índice da Lei das Potências.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Existem muitos materiais que podem ser utilizados na manufatura aditiva, aproximadamente são 240 tipos de polímeros. Para critério de seleção, primeiramente é recomendado identificar o método utilizado, assim como, alguns fatores como a mínima espessura do projeto, altura da camada, textura e custo. De forma geral, quando estamos trabalhando com o método de FDM, existem dois materiais que possuem destaque, eles são listados: (IZDEBSKA, J.; THOMAS, S. 2016)

- ✓ ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*): traduzido para o português como Acrilonitrila Butadieno Estireno. É um material padrão utilizado em plásticos com boa resistência mecânica, possuindo resistência à tração de aproximadamente 35MPa. Uma das limitações do ABS é que necessita de uma máquina de impressão 3D com mesa aquecida;
- ✓ PLA (*Poly-lactic Acid Bioplastic*): conhecido no Brasil como Políácido Láctico. Esse bioplastico possui uma interessante característica de poder controlar a degradação.

3.2 SOFTWARES

Para a modelagem tridimensional do calibrador, foi utilizado o software de CAD (*Computer Aided Design*), traduzido como desenho auxiliado por computador, *SolidWorks*. Durante as simulações foi utilizada a plataforma *Flow Simulation*, responsável pela simulação de modelos tridimensionais pela técnica de CFD. Auxiliando a comparação dos dados foi empregado o software *Microsoft Excel*.

3.3 EQUIPAMENTO FDM

O equipamento de manufatura aditiva utilizado para a impressão do filamento calibrado, é o modelo DH+ fabricada pela empresa 3D Cloner, conta com a tecnologia FDM. Possui 505 mm de largura por 420 mm de comprimento e 670 mm de altura para impressão. Os filamentos

utilizados neste equipamento, são o PLA, ABS e PETG. O equipamento FDM pode ser visualizada na Figura 21:

Figura 21 – Impressora 3D Cloner DH+.

Fonte: Adaptado pelo autor de 3D Cloner. Disponível em < <http://www.3dcloner.ind.br/produtos.html>>. Acesso em 10/10/2018.

3.4 EXTRUSORA

A extrusora utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho foi disponibilizada pela UNOCHAPECÓ e pode ser visualizada na Figura 22. Se trata de uma extrusora de rosca única, com comprimento de 300 mm e diâmetro de 12 mm. A matriz utilizada na extrusora possui um único canal de perfil circular, para extrusão de filamento com diâmetro de 1,9mm. A velocidade de extrusão linear, de acordo com Stolaski (2017) é de 1mm/s, resultando em uma vazão volumétrica média de $2,83 \cdot 10^{-8} m^3/s$.

Figura 22 – Extrusora.

Fonte: Fotografia obtida pelo autor.

3.5 METODOLOGIA

Visando uma melhor compreensão da metodologia empregada no processo de modelagem e simulação, o fluxograma na Figura 23 retrata as etapas utilizadas na realização do estudo.

Figura 23 – Método utilizado para a realização do estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.5.1 Revisão do processo de extrusão

O processo de extrusão é muito utilizado no processamento de materiais poliméricos no Brasil. Segundo a Abiplast (2017), 55% dos materiais processados no Brasil são obtidos pelo processo de extrusão. No estudo é utilizando como referência a extrusão com mecanismo de rosca única.

Para o estudo da extrusão, foi possível a utilização de uma unidade de extrusão móvel produzida por um estudante da Unochapecó, como parte de um projeto de pesquisa. A revisão do processo de extrusão, suas variáveis e os pós processamentos que são aplicados à técnica, podem ser consultados no item da revisão bibliográfica.

3.5.2 Calibração de perfis poliméricos

Foi realizado um estudo referente aos diferentes tipos de unidades de calibração utilizados atualmente. Se tratando da extrusão de um perfil circular simples, utilizado como matéria prima para impressão 3D, algumas características iniciais de projeto devem ser levadas em conta, como a vazão de entrada, o dimensionamento dos canais de vácuo e também a vazão do material na seção final de calibração.

A seleção do calibrador ideal para o processo, deve ser relacionada com o tipo do material a ser extrudado, assim como, as propriedades mecânicas e o perfil a ser atingido.

3.5.3 Concepção dos modelos 3D

Como critério de análise, são modelados computacionalmente três concepções de calibradores, com intuito de selecionar o modelo que melhor se adequa aos critérios de seleção adotados.

3.5.4 Seleção do modelo 3D

Os critérios de seleção utilizados para a seleção do modelo 3D mais apropriado para a simulação e construção são:

- ✓ Eficiência de refrigeração e distribuição do perfil de temperatura: capacidade de resfriar o polímero abaixo da temperatura de cristalização. O modelo 3D deve possuir como característica principal a distribuição constante de temperatura na seção de calibração. Desta forma, é possível atingir uma melhor calibração e evitar o acúmulo de tensões residuais no material extrudado;
- ✓ Custo de projeto: custo de projeto reduzido, evitando a necessidade de processos especiais de usinagem, assim como o custo do material;
- ✓ Versatilidade: capacidade de montagem rápida, assim como mobilidade na manutenção e limpeza.

3.5.5 Simulação

A etapa de simulação é disposta em formato de fluxograma na Figura 24 para o maior entendimento. Cada uma das etapas do processo de simulação é descrita detalhadamente.

Figura 24 – Fluxograma de simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O estudo é dividido em etapas, de acordo com a evolução. As etapas principais são o pré-processamento, processamento e pós-processamento. Cada etapa principal é dividida em sub etapas que correspondem a evolução da simulação.

3.5.5.1 Pré-processamento

A primeira sub etapa do pré-processamento, é a modelagem CAD (*Computer Aided Design*) que consiste em modelar o sistema de calibração de acordo com os parâmetros inicialmente propostos, visando atender o perfil de temperatura adequado. O modelo deve ser então simplificado, evitando arestas com cantos arredondados, retirada dos volumes negativos e então os domínios e subdomínios são delimitados conforme a Figura 25.

Figura 25 – Domínio e subdomínios da simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O domínio computacional é delimitado em toda a região do calibrador. O subdomínio 1 é delimitado no interior da zona da serpentina de cobre, o fluido que escoar é a água de refrigeração. Entretanto, o subdomínio 2 é delimitado como a região interna do calibrador, onde escoar o material polimérico.

A resistência elétrica, o calibrador e a câmara de vácuo são denominados materiais sólidos e são definidos como aço inoxidável AISI 304. Já a serpentina de refrigeração é definida como cobre e possui um diâmetro externo de 6,35mm, e espessura de parede de 0,79mm.

Algumas hipóteses e simplificações foram adotadas na delimitação do problema, sendo assim importantes para a posterior definição das condições de contorno. Existem algumas consequências sobre as hipóteses e simplificações, desta forma, são executadas com cautela, respeitando as capacidades do software e a qualidade dos dados requeridos. São listadas:

- ✓ A ação da gravidade é desprezada por possuir um montante desprezível em relação as forças viscosas;
- ✓ São desprezados os efeitos de elasticidade do polímero e assume-se o comportamento viscoso dependente da temperatura e taxa de cisalhamento.

As seguintes condições de contorno (CC) são definidas:

- ✓ CC1 – Entrada do PLA – Vazão volumétrica de $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ com perfil de velocidades de um fluxo desenvolvido e temperatura imposta de 165°C ;
- ✓ CC2 – Saída Livre – Saída livre (à pressão atmosférica) sem que ocorra a troca de calor com o meio;
- ✓ CC3 – Paredes Externas do Calibrador – Adiabática com rugosidade de $5\mu\text{m}$;
- ✓ CC4 – Paredes Interna do Calibrador – Fluxo térmico com sentido do polímero para as paredes do sistema;
- ✓ CC5 – Resistência Elétrica – Fluxo de calor de 5W ;
- ✓ CC6 – Água de Refrigeração – Temperatura imposta de 15°C , com vazão volumétrica de $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

As condições de contorno são ilustradas na Figura 26.

Figura 26 – Condições de contorno.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O controle de malha realizado na simulação, deve atender o quesito de captação dos eventos de transferência de calor de uma forma sucinta, utilizando uma malha tão grande quanto

o possível, tendo em vista o baixo custo computacional e a captação de eventos reais, sem grandes distorções.

Para controle de malha, simulações são executadas, com o refinamento de malha na seção de escoamento do polímero tanto quanto na seção de escoamento de água, até o momento onde a variação de temperatura entre uma simulação e outra seja desprezível.

O critério de controle de malha busca maior aproximação dos resultados simulados com a descrição dos eventos reais.

As propriedades do PLA e as constantes do modelo constitutivo introduzidas no *Flow Simulator* são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas do PLA e constantes para o modelo Cross WLF.

Parâmetro	Unidade	Valor
Densidade à 20°C	$kg \cdot cm^{-3}$	1252
Densidade Fundido	$kg \cdot cm^{-3}$	1073
Temperatura TM	°C	160
Temperatura Tg	°C	55
Condutividade Térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,195 (190°C)
Calor Específico	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	2060 (190°C)
n	-	0.25
Tau	Mpa	0,100861
D1	$Pa \cdot s$	$3,31719 \cdot 10^9$
A1	-	20,2
A2	K	51,6

Fonte: Adaptado pelo autor de FARAH, S; ANDERSON, D. G.; LANGER, R., 2016.

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas da água utilizadas na etapa de simulação.

Tabela 2 – Propriedades físicas da água.

Parâmetro	Unidade	Valor
Densidade à 25°C	$kg \cdot cm^{-3}$	997
Condutividade Térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,606
Calor Específico	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	4180 (25°C)

Fonte: Adaptado pelo autor de INCROPERA, F. P. *et al.*, 2008 e ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J., 2012.

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas do Aço Inoxidável AISI 304.

Tabela 3 – Propriedades físicas do Aço Inoxidável AISI 304.

Parâmetro	Unidade	Valor
Ponto de Fusão	K	1670
Densidade à 25°C	$kg \cdot cm^{-3}$	7900
Condutividade Térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	14,9
Calor Específico	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	477 (25°C)

Fonte: Adaptado pelo autor de ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J., 2012.

As condições gerais de simulação foram definidas com base nos valores obtidos na literatura, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Condições gerais da simulação.

Parâmetro	Unidade	Valor
Polímero	-	PLA
Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,195 (190°C)
Calor específico	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	2060 (190°C)
Densidade (20°C)	$kg \cdot cm^{-3}$	1073
Velocidade de extrusão	$mm \cdot s^{-1}$	1
Vazão de extrusão	$m^3 \cdot s^{-1}$	$2,83 \cdot 10^{-8}$
Diâmetro do filamento	mm	1,75
Temperatura de entrada T1	°C	165
Temperatura ambiente	°C	25
Temperatura fluido refrigerante	°C	15
Coeficiente de condutividade metal/ar	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	5
Rugosidade do metal	μm	10

Fonte: Adaptado pelo autor de FARAH, S; ANDERSON, D. G.; LANGER, R., 2016 e ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J., 2012.

3.5.5.2 Processamento

Algumas condições de contorno são relacionadas no processo de simulação, essas condições de contorno podem vir a causar distorções do modelo simulado, em relação ao

modelo real, mas elas se fazem necessárias devido às simplificações no modelo e devido ao menor custo computacional.

Durante o processamento ocorre a simulação CFD, nesse ponto deve ser realizada uma análise criteriosa, se o a simulação do modelo CAD não convergir com os dados experimentais, as variáveis do pré-processamento são alteradas e a simulação ocorre novamente. Quando a simulação do modelo CAD converge, o estudo segue para a etapa de pós-processamento.

3.5.5.3 Pós-processamento

Munido dos resultados da simulação CFD, o passo inicial do pós-processamento é a análise do comportamento do perfil de temperaturas no calibrador, assim como, a linearidade do perfil de temperaturas na região de calibração.

Entretanto, para que exista a consistência no modelo simulado é realizada a validação teórico experimental, comparando os dados do modelo CAD simulado, como o protótipo construído.

3.5.6 Construção

Após a escolha através do processo de simulação da concepção de calibrador que melhor atende o processo de calibração, deve ser realizada a construção do protótipo, e posteriormente, a validação experimental da eficiência do sistema dentro de critérios estabelecidos como requisitos do projeto.

3.5.7 Validação experimental

O sistema de análise e comparação, é dado por ciclos de processamento. Após o processo de extrusão e calibração de alguns metros do filamento, é realizada a impressão de uma peça com dimensões pré-estabelecidas, conforme a Figura 27.

Como item de comparação, é utilizado o filamento PLA e o filamento Flex fabricados pela empresa Cliever.

A análise primária do filamento, consiste na verificação de defeitos de extrusão e aferição das dimensões do perfil extrudado. Como objetivo, o filamento extrudado deve possuir o diâmetro de 1,75mm, com tolerância de 0,05mm. A superfície externa deve ser homogênea e com baixa porosidade.

Figura 27 – Peça utilizada como modelo de impressão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O modelo 3D representado na Figura 27 possui algumas propriedades particulares, que foram calculadas e são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características do modelo comparativo.

Massa [g]	Comprimento de filamento utilizado [m]	Volume [cm³]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]
0,96	1,54	0,90	2	10	45

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para comparar os modelos, é necessária a análise de falhas na impressão, características físicas observadas visualmente, assim como uma análise de geometria com um paquímetro analógico padrão, capaz de realizar medições internas e externas, de profundidade e de ressalto, com resolução de 0,05mm que atende as necessidades da análise e comparação.

A validação do projeto é realizada a partir da metodologia descrita, partindo da seleção do modelo, assim como a validação da malha e da quantidade de elementos finitos utilizados na resolução do problema. Quando validado computacionalmente o calibrador é construído, por conseguinte são realizadas as análises nos corpos de prova poliméricos.

Atingindo um padrão aceitável de $1,75 \pm 0,05$ mm de diâmetro, assim como a contração adequada do material impresso e a resistência mecânica, com valores iguais ou superiores ao filamento comercial, então o calibrador a vácuo é validado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SELEÇÃO DO CALIBRADOR

Com base na revisão bibliográfica apresentada, a classe de calibradores que melhor se adequa na calibração de perfis circulares, com diâmetros reduzidos, e que concede um melhor acabamento superficial no extrudado, é a classe de calibradores a vácuo.

Portanto, foram geradas três concepções de calibradores para avaliações primárias. Os calibradores são chamados de A, B e C.

4.1.1 Calibrador A

O modelo “A” corresponde a um calibrador a vácuo, projetado com o bloco principal de perfil quadrado. Este modelo conta com cento e cinquenta milímetros de comprimento, para a passagem do polímero. A descrição, modelagem CAD e uma vista em corte da modelagem podem ser visualizadas nos Anexos A, B e C deste trabalho.

4.1.2 Calibrador B

O projeto do calibrador “B” corresponde a um calibrador a vácuo, projetado com o bloco principal de perfil barra redonda, facilitando o processo de fabricação. Pode ser construído pelo processo de usinagem com torno convencional. Este modelo conta com cento e cinquenta milímetros de comprimento para a passagem do polímero, e o diâmetro do bloco principal é de vinte e sete milímetros. A descrição, modelagem CAD e uma vista em corte podem ser visualizadas com mais detalhes nos Anexos D, E e F.

4.1.3 Calibrador C

O projeto do calibrador “C” corresponde a um calibrador a vácuo, cujo o corpo é projetado a partir de um perfil de barra redonda, facilitando o processo de fabricação. A construção do bloco principal, pode ser realizada em um torno convencional. Este modelo conta

com duzentos milímetros de comprimento, para a passagem do polímero e o diâmetro do bloco principal é de vinte e sete milímetros.

Este conceito, conta com um sistema de calibração á vácuo, formando 32 canais de sucção transpando o orifício de escoamento do polímero. O sistema de refrigeração projetado, utiliza um trocador de calor do tipo serpentina, onde a água circula no exterior do bloco principal com objetivo de aumentar a tranferência de calor por convecção. Para que ocorra a troca térmica por convecção forçada, a vazão de água que circula no interior da serpentina é bombeada por uma bomba externa.

Esse modelo conta com uma resistência elétrica, que circunda o bloco principal em um comprimento de vinte e cinco milímetros. Esse método de aquecimento foi implantado no modelo “C”, assim como no modelo “B” visando manter a temperatura constante na região de calibração a vácuo, fazendo com que o perfil não sofra deformações devido aos gradientes de temperaturas.

A câmara de vácuo é formada por uma peça com a cavidade de passagem do ar, acoplada ao bloco principal, assim como duas tampas laterais responsáveis pela vedação. O sistema de aquecimento conta com uma resistência elétricas, posicionada a frente do sistema de calibração, com 5W de potência.

Na Figura 28 tem-se uma ilustração da vista em corte do calibrador “C”.

Figura 28 – Calibrador modelo C.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Na Tabela 6, pode se observar a especificação dos componentes necessários para a fabricação do calibrador “C”.

Tabela 6 – Lista de materiais do calibrador C.

Número do Item	Descrição	Quantidade
1	Bloco principal - 27x200mm.	1
2	Resistência Elétrica Mica – 26,4x25mm.	1
3	Câmara de vácuo - 48x30mm.	1
4	Tampa do sistema de vácuo – 48x4mm.	2
5	Fixação da tubulação de refrigeração – 27x10mm.	1
6	Tubulação de refrigeração – 4x230mm.	1
7	Parafuso padrão M4.	8
8	Parafuso padrão M3.	3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O calibrador “A” é descartado devido à dificuldade de construção, assim como a dificuldade do acoplamento do sistema de aquecimento, devido a geometria do bloco principal. Também é descartado o calibrador “B” devido ao alto custo energético e de fabricação do sistema com duas resistências elétricas, assim como a dificuldade de montagem e manutenção da tubulação de resfriamento.

O calibrador “C” foi escolhido como o modelo a ser construído, devido a mobilidade em relação a tubulação de refrigeração, sendo possível a retirada da serpentina de cobre, assim como todos os outros componentes de forma sucinta e rápida. É necessária a versatilidade em uma unidade de calibração devido à limpeza, lubrificação, encaixe do material polimérico no interior do canal, e também devido ao armazenamento.

O aquecimento presente no calibrador “C” também é satisfatório, utilizando apenas uma resistência elétrica com potência de 5W, diferente do modelo “B” que utiliza uma resistência de 35W e outra de 15W.

4.2 SIMULAÇÃO CFD

Durante a fase de simulação, foram obtidos resultados do perfil de temperatura ao longo da região de escoamento do polímero. Cada curva representada no diagrama, é referente a um nível de refinamento de malha, conforme Figura 29.

Os canais de vácuo não são retratados nas figuras referentes a simulação, devido as simplificações aplicadas no processo.

Figura 29 – Diagrama do perfil de temperatura no calibrador “C”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As quatro curvas apresentadas possuem um comportamento muito semelhante, apenas a curva da Malha 3 (vermelho) possui um comportamento discrepante, onde apresenta um aquecimento excessivo após a zona de calibração, o que diverge da realidade. Isso é explicado, devido ao refinamento excessivo da malha, possuindo 7036174 elementos finitos. Como a região de escoamento do fluido possui um canal com diâmetro de apenas 1,75mm, existe uma quantidade muito grande de elementos nesta região, o que ocasiona a captação de flutuações e eventos que não ocorrem no escoamento real.

O refinamento de malha proposto nas três outras curvas, Malha 1 (laranja), Malha 2 (cinza) e Malha 4 (amarelo), geraram resultados muito semelhantes, com variação máxima de 8°C entre alguns pontos. Portanto, foi adotada a Malha 2 (cinza) como o refinamento ideal para a simulação CFD.

A Figura 30 representa o refinamento da malha adotada (Malha 2). É possível visualizar a homogeneidade na malha, possuindo elementos de tamanhos semelhantes na região sólida, e um refinamento maior na região do fluido e transição sólido/fluido.

Figura 30 – Refinamento da malha no calibrador “C”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Figura 31 representa o perfil de temperaturas do polímero no interior do canal de calibração e na região do trocador de calor do tipo serpentina.

Figura 31 – Perfil de temperaturas na região fluída do calibrador “C”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Analisando a Figura 31 com ênfase na seção de calibração, que como mencionado na revisão bibliográfica, os autores Carneiro e Nóbrega (2013), retratam que deve ocorrer uma homogeneidade na temperatura ao longo da seção de calibração, evitando que ocorra acúmulo

de tensões residuais. As tensões residuais formam uma contração diferente ao longo do perfil, falha que quando presente afeta diretamente a qualidade e as dimensões do perfil calibrado.

Desta forma, é possível notar que a média das temperaturas de calibração se encontra acima da faixa de cristalização do PLA, que é de aproximadamente 80°C.

Também é necessário ressaltar que temperatura média de saída do perfil é de 30°C. Observando atentamente a zona de resfriamento, pode-se ressaltar a eficiência do trocador de calor serpentina. Devido a transferência de calor do perfil para o sistema de resfriamento, a água aquece até a temperatura média de 23°C. Como a temperatura ambiente do local dos ensaios é de 15°C, não foi necessário um mecanismo de troca de calor para o fluido de arrefecimento.

A Figura 32 retrata a variação de temperatura ao longo da região de calibração, onde é observado que a variação entre o ponto de máxima temperatura (145,79°C) e o ponto de mínima temperatura (137,18°C), variam em apenas 8,61°C, tornando uma condição favorável para a calibração homogênea do perfil.

Figura 32 – Temperatura na região de calibração.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Figura 33 representa uma vista em corte da seção transversal do perfil polimérico durante o processo de calibração e refrigeração. Na região de entrada ($x=0\text{mm}$), a temperatura no interior do material do filamento é de 165°C, já na superfície externa a temperatura está na faixa de 143°C. Essa variação de temperatura é devido a transferência de calor que ocorre entre o material do filamento e a superfície interna da unidade de calibração.

Durante a região de resfriamento ($x=150\text{mm}$) até a região de saída ($x=200\text{mm}$), o polímero se encontra em uma temperatura média de 36°C , demonstrando a capacidade de refrigeração do trocador de calor empregado no calibrador. Na região de saída ($x=200\text{mm}$) o filamento deixa o calibrador com uma temperatura média de 30°C . A temperatura de cristalização do PLA está na faixa de 78°C a 80°C , entretanto o sistema de refrigeração empregado está atuando conforme as temperaturas estipuladas.

Figura 33 – Seção transversal do polímero durante o processo de calibração e refrigeração.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3 CONSTRUÇÃO DO CALIBRADOR C

O projeto do Calibrador C, pode ser visualizado nos Anexos G, H, I, J, K, L, M, N e O deste trabalho. Durante a fase de projeto do calibrador, foi possível identificar a dificuldade para realizar a furação do orifício de passagem do filamento, com apenas $1,75\text{mm}$ de diâmetro e comprimento de 200mm . Como não é possível encontrar uma broca capaz de realizar um furo com o comprimento total do calibrador, o projeto foi modificado, seccionando o corpo do calibrador em 8 partes com 25mm de comprimento.

O processo de fabricação escolhido foi o torneamento convencional, pela disponibilidade no Laboratório de Processos de Fabricação da Unochapecó.

Para a união das peças do corpo do calibrador, foi escolhido o processo de soldagem TIG sem metal de adição, resultando em um menor aquecimento durante o processo, assim minimizando a possibilidade de grandes distorções no perfil.

O material utilizado para a fabricação do corpo do calibrador, foi o Aço Inoxidável AISI 304. A câmara de vácuo e os suportes foram fabricados em Aço Carbono SAE 1020. Para a vedação da câmara de vácuo, foram utilizados borracha e adesivo de silicone.

A fixação das tampas de fechamento da câmara de vácuo, são parafusos Allen cabeça cilíndrica com sextavado interno padrão M4.

Para realizar a furação, os materiais utilizados foram brocas de aço rápido com 1mm e 1,75mm de diâmetro. As brocas de 1,75mm de diâmetro foram utilizadas para a furação do canal de passagem do perfil a ser calibrado. Já as brocas de 1mm de diâmetro foram utilizadas para a furação dos canais de vácuo.

A Figura 34 representa a montagem do corpo do calibrador com o acoplamento da câmara de vácuo.

Figura 34 – Montagem do corpo do calibrador com a câmara de vácuo.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Figura 35 representa o diâmetro da furação de 1,75mm.

Figura 35 – Furação de 1,75mm.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Figura 36 representa a montagem completa da unidade de calibração. A unidade de calibração possui uma bobina de armazenamento do filamento calibrado. A tubulação flexível é acoplada à bomba de vácuo. O acionamento do sistema é realizado por meio de dois interruptores independentes. A bomba de vácuo foi ajustada manualmente para uma condição de calibração apropriada para o Ecoflex®.

Figura 36 – Montagem da unidade de calibração.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado de acordo com as condições iniciais propostas na etapa de simulação. A Tabela 7 apresenta os dados de entrada no sistema.

Tabela 7 – Dados de entrada no procedimento experimental.

Parâmetro	Unidade	Valor
Polímero	-	Ecoflex®
Velocidade de extrusão	$mm \cdot s^{-1}$	1
Vazão de extrusão	$m^3 \cdot s^{-1}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Temperatura de entrada T1	°C	120
Temperatura ambiente	°C	15
Temperatura fluido refrigerante	°C	15

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Figura 37 retrata a unidade de calibração montada ao lado da extrusora, pronta para a realização do procedimento experimental.

Figura 37 – Unidade de calibração acoplada à extrusora.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Durante o procedimento experimental foram constatadas algumas divergências no sistema, que contribuíram para algumas das características não uniformes no filamento extrudado. As divergências são:

- ✓ Vazão descontínua na extrusora;
- ✓ Dificuldade de alimentação contínua do polímero na entrada da extrusora;
- ✓ Tração variável na calibração do filamento.

A vazão descontínua na extrusão, ocasiona na variação de material enviado para o calibrador, portanto, o diâmetro do filamento varia após a calibração por insuficiência de material polimérico.

A dificuldade de alimentação na tremonha da extrusora, ocorre devido ao formato do *pellet* utilizado. Conforme a Figura 38 (a), o *pellet* possui um formato esférico, dificultando a entrada, devido a profundidade rasa do canal da rosca da extrusora.

Como forma de solução deste problema, o material polimérico em forma de *pellet*, foi propositalmente micronizado em uma prensa hidráulica, deformando o material ao formato de disco, conforme Figura 38 (b).

Figura 38 – Material polimérico (*pellet*) antes (a) e depois (b) da compressão.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O filamento com as características ideais para o processo FDM, requer uma superfície externa livre de defeitos superficiais e com acabamento liso. O diâmetro ideal do filamento para o equipamento FDM disponível é de 1,75mm, com tolerância de 0,05mm.

Durante o procedimento experimental, foram constatados alguns defeitos superficiais no filamento até a realização da correção da temperatura das zonas de extrusão, e a vazão apropriada para a calibração do PLA. A Figura 39 representa alguns dos filamentos inicialmente obtidos e a constatação de alguns defeitos.

Figura 39 – Comparação entre os filamentos calibrados.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O filamento sem calibração (a) representado na Figura 39 foi processado com uma temperatura adequada, eximindo defeitos de superfície, entretanto, não possui o diâmetro suficiente para o processo FDM, foi utilizado apenas como comparação. O filamento calibrado (b) apresenta um defeito característico na extrusão, a pele de cação.

O defeito pele de cação, segundo Manrich (2013), ocorre na matriz de extrusão, devido aos gradientes de velocidade, inchamento do perfil na saída e a falta de adesão entre o material da matriz e a massa extrudada. Esse defeito gera irregularidades na superfície externa do perfil extrudado. Para eliminar este defeito, algumas medidas devem ser tomadas:

- ✓ Aumento da adesão da massa fundida na matriz;
- ✓ Deslizamento contínuo do extrudado;
- ✓ Arredondamento dos cantos vivos da matriz;
- ✓ Adição de aditivos para extrusão.

Durante as etapas de processamento, foi verificado que o efeito acontece quando o material polimérico é processado em baixas temperaturas e no início do procedimento experimental, devido a presença de polímero na zona morta da matriz.

O filamento (c) e (d) foram calibrados com temperaturas muito altas, ocorrendo uma variação muito grande no diâmetro externo.

O filamento (e) foi calibrado em uma temperatura de 120°C, sendo identificada como a temperatura adequada para o filamento Ecoflex®. Com a temperatura de 120°C, foram eximidos os defeitos superficiais no filamento e o diâmetro externo do filamento calibrado varia entre 1,55mm e 1,75mm.

A faixa de variação do diâmetro externo ainda é muito grande. Portanto essa variação ocorre devido à grandes oscilações na vazão da extrusora, e no tracionamento manual do perfil durante a calibração.

O filamento utilizado para o procedimento experimental foi o Ecoflex® (PLA), é um polímero biodegradável desenvolvido pela empresa alemã BASF. Possui temperatura de processamento muito similar ao PBAT.

Na Tabela 8, são apresentados alguns termoplásticos onde estão ilustradas as propriedades do PLA biodegradável.

Tabela 8 - Propriedades de poliésteres biodegradáveis e polímeros convencionais.

	PLA ^(a)	PBAT ^(c)
Temperatura de fusão (°C)	130-180	106-120
Módulo Elástico (MPa)	3700	90
Resistência a tração (MPa)	50	15
Alongamento a ruptura (%)	2.5	580-820
T _g (°C)	40-70	-30

Fonte: Adaptado de AGARWAL, S. 2012 (a) ; NOBILE, M. R. *et al.* 2015 (b) ; YAMAMOTO, M. *et al.* 2002 (c) *apud* COSTA, A. R. M., 2019.

4.5 FDM (*Fused Deposition Modeling*)

O equipamento FDM utilizado é de propriedade do Pronto 3D da Unochapecó. Este equipamento não possui adaptação para impressão de filamento com característica dúctil (flexível). Portanto, ocorreram dificuldades de alimentação do filamento no momento da FDM. A Figura 40 retrata o filamento emaranhado.

Figura 40 – Filamento emaranhado na seção de alimentação do equipamento FDM.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

É possível visualizar na Figura 40 (a), a alimentação vertical contínua do filamento no bico de impressão do equipamento, já na Figura 40 (b) pode-se observar o filamento emaranhado na seção de alimentação, devido as características de rigidez. Essa falta de alimentação contínua, gera camadas com falta de preenchimento e linhas impressas com baixa deposição, gerando distâncias muito grandes entre as linhas impressas.

A Figura 41 apresenta o defeito de baixa deposição de filamento, ocasionado pelo emaranhamento do filamento na seção de alimentação no bico de impressão.

Figura 41 – Baixa deposição ocasionada pelo emaranhamento do filamento.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Figura 42 apresenta uma das peças impressas, apresentando o defeito de baixa deposição e temperatura excessiva. A temperatura de impressão estava estabelecida em 250°C, ocorrendo a degradação do polímero. Já a distância entre as linhas é proveniente da baixa deposição de material.

Figura 42 – Efeito da alta temperatura no método FDM.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A Figura 43, retrata a impressão de três peças pelo método FDM, pelo mesmo equipamento. A diferença entre as três peças é o material utilizado.

Figura 43 – Comparação entre impressões em diferentes filamentos.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Na impressão com o PLA comercial (a), as camadas e linhas de impressão formam um preenchimento uniforme, isso resulta em uma boa precisão dimensional e um acabamento superficial de boa qualidade, não necessitando pós-processamento.

A peça impressa com o filamento calibrado Ecoflex®, atendeu as dimensões estabelecidas. Os defeitos visíveis na peça pronta são:

- ✓ Baixa densidade de preenchimento;
- ✓ Pontos com defeitos de impressão;
- ✓ Linhas com diâmetro variável.

Os defeitos na peça pronta são ocasionados pela insuficiência de deposição de material pelo bico de impressão, gerado pela falta de rigidez do filamento. Diâmetro do filamento com variações de diâmetro de cerca de 11%, gerando variações na espessura das linhas depositadas. Outro ponto que ocasiona os defeitos é a incompatibilidade do equipamento FDM disponível com filamentos flexíveis.

A impressão no filamento Flex (c), fabricado com Poliuretano ou Poliuretano Termoplástico (TPU), também ocorre o defeito de baixa deposição de filamento, isso devido à falta de rigidez do material.

Em um contexto geral, a impressão do filamento calibrado apresentou uma boa semelhança com o comportamento apresentado pelo filamento Flex comercial, isso devido a semelhança em sua rigidez.

4.6 ORÇAMENTO

O orçamento previsto na Tabela 9 é referente aos materiais utilizados na fabricação do calibrador a vácuo selecionado, o calibrador C. Os valores apresentados no orçamento não constam os processos de fabricação, isso devido a disponibilidade de uso dos equipamentos necessários no laboratório de manufatura da Unochapecó.

Tabela 9 – Orçamento dos materiais.

Item	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
1	Bomba de Água - Aquário	UND	1,00	55,00	55,00
2	Tubo Cobre Flexível – 3/16”	M	1,00	20,00	20,00
3	Parafusos M3 – 12mm	UND	12,00	1,50	18,00
4	Aço Inox 304 – 1.1/2”	M	0,25	290,00	72,50
5	Aço Inox 304 – 2.1/4”	M	0,05	660,00	33,00
6	Mini Bomba de Vácuo 12V - 65KPa	UND	1,00	100,00	100,00
7	Interruptor	UND	2,00	10,00	20,00
8	Fios Elétricos	M	4,00	0,70	2,80
				TOTAL	321,30

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Conforme apresenta a Tabela 11, para a construção do calibrador a vácuo C é necessário um investimento de R\$ 321,30. Viabilizando a produção de filamento para o processo FDM.

5 CONCLUSÕES

Inicialmente, foram realizadas simulações para os três modelos de calibradores concebidos na preparação do presente trabalho. O calibrador C destacou-se em relação aos demais. Conforme os autores Carneiro e Nóbrega (2012), uma característica importante de um calibrador é a ausência de tensões residuais, induzidas pelos gradientes térmicos. Desta forma o calibrador C destacou-se por apresentar as menores variações de temperaturas na região de calibração, em relação aos demais.

A malha selecionada para as simulações possui um total de 1 025 799 elementos finitos, sendo 584 532 elementos na região de escoamento de fluido, 331 767 elementos na região sólida e 109 500 presentes na região de transição entre o corpo sólido e o escoamento de fluido.

A manufatura do calibrador C ocorreu da forma esperada, atendendo as tolerâncias dimensionais e geométricas estabelecidas no projeto.

O processamento do filamento ocorreu da maneira programada, ocorrendo uma distorção máxima de 11% do diâmetro externo em alguns pontos do comprimento. As características visuais e qualidade superficial foram atingidas com êxito, eximido de defeitos como pele de cação e distorção do filamento, obteve-se também a homogeneidade nas temperaturas ao longo da seção de calibração, minimizando a ocorrência de tensões residuais no filamento processado.

Como causas dos desvios no diâmetro externo do filamento, pode-se citar como motivos a descontinuidade na vazão da extrusora e o tracionamento irregular do filamento.

Durante a Manufatura Aditiva pelo método FDM, a partir do filamento processado pelo sistema, foi observado a irregularidade na alimentação do equipamento, resultando em uma distância relativamente grande em relação as linhas de impressão.

De forma geral, os objetivos foram atendidos. Porém, ainda existem melhorias que podem ser efetuadas, sendo sugeridas no Item 6.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, a fim de colaborar com o desenvolvimento do estudo da extrusão e calibração de polímeros na Unochapecó, e aprimorar os conhecimentos adquiridos com este estudo:

- ✓ Desenvolver um sistema de tracionamento automático, com sistema de detecção e compensação de torque;
- ✓ Desenvolvimento de um sistema de adequação da extrusora para a continuidade da vazão, sendo possível a calibração de um filamento contínuo e com maior precisão dimensional;
- ✓ Instrumentação de um sistema para captação das temperaturas ao longo do calibrador;
- ✓ Ajuste da velocidade da rosca da extrusora.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Perfil 2017**. Revista Abiplast, São Paulo, 2017. 87 p.

AGARWAL, S. **Biodegradable Polyesters**. Polymer Science: A Comprehensive Reference, p. 333 – 361, 2012.

AGASSANT, J. et al. **Polymer Processing: Principles and Modeling**. 2. Ed. Munich: Hanser, 2017. 841 p.

ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D 638**. United States: West Conshohocken, 2014. 17 p.

BAIRD, D. G.; COLLIAS, D. I. **Polymer Processing: Principles and Design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 393 p.

BRAZEL, C. S.; ROSEN, S. L. **Fundamental principles of polymeric materials**. 3. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2012. 407 p.

BRYDSON, J. A. **Brydson's Plastics Materials**. 8. Ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2016. 892 p.

CAMPBELL, G. A.; SPALDING, M. A. **Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders**. Munich: Hanser, 2013. 777 p.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros**. 2. Ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M.; MOTA, A. R.; SILVA, C. **Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat transfer coefficient**. 2013. 8 p.

CARNEIRO, O. S.; NÓBREGA, J. M. **Design of Extrusion Forming Tools**. Shawbury: Smithers Rapra Technology Ltd, 2012. 292 p.

CARVALHO, C. et al. **Propriedades Reológicas de ABS e suas Misturas Oriundas de Reciclagem Primária**. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, Outubro 2009.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa**. São Paulo: McGraw Hill, 2012.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J.F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**. 2. Ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2008. 536 p.

3D CLONER. **Impressora 3D DH+**. Material Online. Disponível em < <http://www.3dcloner.ind.br/produtos.html>>. Acesso em 10/10/2018.

CONRAD, U. **The calibration process in uPVC profile extrusion**. Tese. Swansea: Swansea University, 2003. 375 p.

COSTA, A. R. M., 2019. **Blendas de Poli (β -hidroxibutirato) e poli (butileno-adipatotereftalato) e seus compósitos com babaçu: Efeito da composição e das condições de processamento.** Natal: UFRN, 2019. 222 p.

CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering.** 3. Ed. Oxford: Elsevier, 1998. 505 p.

DEALY, J. M.; WISSBRUN, K. F. **Melt rheology and its role in plastics processing: Theory and applications.** Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999. 665 p.

DEBBAUT, B.; MARCHAL, T. **Numerical simulation of extrusion process and die design for industrial profile, using multimode pom–pom model.** 2008. 9 p.

EMIC. **Sistema de Ensaio de Bancada com Coluna Dupla.** Material Online. Disponível em: < http://www.emic.com.br/fotos/produtos/files/23100_01_20150526170722.jpg > Acesso em 20 de novembro de 2018.

FARAH, S; ANDERSON, D. G.; LANGER, R., 2016. **Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review.** Elsevier: Advanced Drug Delivery Reviews, vol. 107, p. 367–92. 2016.

GEBHARDT, A.; HÖTTER, J. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing.** Munich: Hanser, 2016. 591 p.

HOPMANN, S. T.; MICHAELI, A. **Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations.** 4. Ed. Munich: Hanser, 2016. 451 p.

IZDEBSKA, J.; THOMAS, S. **Printing on Polymers: Fundamentals and Applications.** Oxford: Elsevier, 2016. 424 p.

INCROPERA, F. P., *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KAINTH, S. **Die Design for Extrusion of Plastic Tubes and Pipes: A Practical Guide.** Munich: Hanser, 2018. 340 p.

KLEIN, P; FRADET, F. **Cutting Extrusion Die Design Costs.** Ansys Advantage, 2010. 2 p.

KOSTIC, M. M.; REIFSCHNEIDER, L. G. **Design of Extrusion Dies.** Taylor & Francis, 2006. 17 p.

KUMAR, A.; GUPTA, R. K. **Fundamentals of Polymer Engineering.** 2. Ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 693 p.

LAFLEUR, P. G.; VERGNES, B. **Polymer Extrusion.** London: ISTE, 2014. 352 p.

LARSON, E. R. **Thermoplastic Material Selection: A Practical Guide.** New York: Elsevier, 2015. 516 p.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros.** 2. Ed. São Paulo: Blücher, 1999. 191 p.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos.** 2. Ed. São Paulo: Artliber, 2013. 485 p.

MCKEEN, L. W. **The Effect of Long Termhal Exposure on Plastics and Elastomers.** Waltham: Elsevier, 2014. 280 p.

MIDDLEMAN, S. **Fundamentals of Polymer Processing.** San Francisco: McGraw-Hill, 1977. 525 p.

NOBILE, M. R., *et al.* **Processing and properties of biodegradable compounds based on aliphatic polyesters.** Journal Applied Polymer Science, p. 132, 2015.

OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ÓRIZ, J. P. **Polymer Processing: Modeling and Simulation.** Munich: Hanser, 2006. 638 p.

OSSWALD, T. A.; MENGES, G. **Material Science of Polymers for Engineers.** 3. Ed. Munich: Hanser, 2012. 595 p.

PASCAULT, J. P.; WILLIAMS, R.J.J. **Thermosets, Chapter 1: Overview of thermosets: Present and future.** 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. 32 p.

PELLICANO, M. **Desenvolvimento e caracterização de blendas PHBV/Ecoflex® e suas modificações com amidos.** São Carlos : UFSCar, 2008. 130 p.

RAO, N. S. **Diagnostics of Extrusion Processes.** Munich: Hanser, 2014. 123 p.

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion.** 5. Ed. Munich: Hanser, 2014. 934 p.

RIBAU, A. M. *et al.* **Modeling the Calibration/Cooling Stage of Complex Thermoplastic Profiles.** 2013. 6 p.

RODRIGUEZ, F. *et al.* **Principles of Polymer Systems.** 6. Ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. 810 p.

ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V. **Reinforced plastics handbook.** Oxford: Elsevier, 2004. 1042 p.

ROSATO, D. V. **Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook.** Springer Science+ Business Media Dordrecht, 1998. 779 p.

ROSEN, S. L. **Fundamental principles of polymeric materials.** 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 420 p.

SEMENOV, A.; NYRKOVA, I. **Statistical Description of Chain Molecules.** Elsevier, 2012. 29 p.

SHEEHY, P.; TANGUY, P. A. **A Finite Element Model for Complex Profile Calibration.** 1994. 7 p.

STOLASKI, L.; BREITENBACH, E. R. **Dispositivo de Geração de Filamento para Impressoras 3D a partir de Materiais Recicláveis.** Relatório de Projeto de Pesquisa. Chapecó: Unochapecó, 2017. 25 p.

SU, A.; AL'AREFL, S. J. **History os 3D Printing,** 2018. 10 p.

TADMOR, Z; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer Processing**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 961 p.

TOPSFLO. **Ilustração da Bomba de Vácuo**. Material Online. Disponível em <<http://www.topsflo.com/mini-liquid-pumps/tf30a-a.html>>. Acesso em 20/11/2018.

TU, J.; YEOH, G.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. 2. Ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2013. 441 p.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. London: Pearson Education Limited, 2007. 517 p.

WAGNER, J. R. J.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. J. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. 2. Ed. Oxford: Elsevier, 2014. 620 p.

YAMAMOTO, M.; WITT, G. U.; SKUPIN, D.; BEIMBORN, R.J. **Biodegradable Aliphatic-Aromatic polyesters: Ecoflex®**. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002. p. 299.

8 ANEXOS

ANEXO A – Modelo CAD do calibrador A.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO B – Detalhamento do calibrador A.

Este modelo, dispõe de um sistema de calibração a vácuo, com dezesseis canais de sucção que transpõem o orifício de passagem do polímero. Os canais ficam distribuídos nos quadrantes do bloco principal.

O sistema de refrigeração é projetado com uma tubulação de água que circula no interior do bloco principal.

Conforme o Anexo C, o bloco principal foi projetado para a passagem do filamento polimérico, montagem do sistema de calibração e refrigeração. A câmara de vácuo é formada por uma peça com a cavidade de passagem do ar, acoplada ao bloco principal. O sistema de refrigeração, é formado por duas tubulações que são montadas de acordo à formar um caminho perpendicular ao plano XY.

ANEXO C – Vista em corte do calibrador A.

Figura 28 – Calibrador modelo A.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO D – Projeto CAD calibrador B.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO E – Detalhamento do calibrador B.

Este modelo, conta com um sistema de calibração á vácuo, formando 32 canais de sucção transpondo o orifício de passagem do polímero. Os canais são dispostos de forma que dezesseis canais ficam localizados em cada um dos eixos (X e Y) do bloco principal.

O sistema de refrigeração foi projetado como uma tubulação de água que circula no interior do bloco principal.

Esse modelo conta com duas resistências elétricas, que circundam um o bloco principal em um comprimento de vinte e cinco milímetros cada uma. Esse método de aquecimento foi implantado no modelo B visando manter a temperatura constante na região de calibração a vácuo, evitando com que o perfil sofra deformações devido à calibração ocorrer na presença de gradientes de temperaturas.

No Anexo F tem-se uma ilustração da vista em corte do calibrador B, assim como uma breve descrição dos componentes do projeto.

O bloco principal foi projetado para a passagem do filamento polimérico, montagem do sistema de calibração, aquecimento e refrigeração.

A câmara de vácuo é formada por uma peça com a cavidade de passagem do ar, acoplada ao bloco principal.

O sistema de refrigeração, é formado por quatro tubulações que são montadas de maneira à formar caminhos tanto no plano “XY” quanto no plano ortogonal a este.

O sistema de aquecimento conta com duas resistências elétricas, a primeira posicionada na entrada do material polimérico com 15W de potência, e a segunda posicionada a frente do sistema de calibração, com 32W de potência.

Abaixo na Tabela 7, pode se observar a especificação dos componentes para a fabricação do calibrador “B”.

ANEXO F – Vista em corte do calibrador B.

Figura 29 – Calibrador modelo B.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO G – Projeto CAD calibrador C.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO H – Projeto 3D calibrador C (Vista explodida).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO I – Projeto 3D calibrador C (Vistas laterais).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

ANEXO J – Montagem Calibrador C

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

ANEXO K – Projeto Calibrador (corpo calibrador)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

ANEXO L – Projeto Calibrador (resistência)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

ANEXO M – Projeto Calibrador (serpentina)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

ANEXO N – Projeto Calibrador (tampa)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

ANEXO O – Projeto Calibrador (câmara)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.