

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPGEMec

GABRIEL CONSONI ZUTIN

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D POR
EXTRUSÃO DE POLÍMEROS GRANULADOS**



São Carlos - SP
2024

GABRIEL CONSONI ZUTIN

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D POR
EXTRUSÃO DE POLÍMEROS GRANULADOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal de São Carlos com o objetivo de obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki



São Carlos - SP

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gabriel Consoni Zutin, realizada em 28/02/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (UFSCar)

Prof. Dr. Iris Bento da Silva (USP)

Prof. Dr. João Gustavo Pereira da Silva (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedico este trabalho a minha família, minha noiva, aos companheiros de trabalho, engenharia e de república estudantil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Aos meus avós que deram todo apoio possível para minhas realizações pessoais. Aos meus pais, Glauco e Adriana, que se esforçaram para me dar a melhor educação e me ensinaram valores que levarei por toda vida.

Agradeço a minha noiva Amanda, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos. Obrigado por enfrentar todos os obstáculos da vida junto a mim nesses últimos 12 anos, e mesmo a quilômetros de distância, permaneceu junto a mim durante toda essa fase acadêmica.

Agradeço a todos meus colegas da turma 015 da Engenharia Mecânica, a todos os membros da Engrenar Jr., e a todos os outros amigos que fiz durante toda essa trajetória na UFSCar. Em especial aos que estiveram comigo durante toda caminhada, participando de grupos de estudos e virando noites em claro.

Agradeço a todos os moradores da república estudantil, que fizeram parte da minha vida quando iniciei a graduação em Engenharia em São Carlos, que estiveram ao meu lado em momentos difíceis e que hoje considero todos como irmãos que fiz durante essa trajetória. Sem eles não teria me tornado a pessoa que sou.

Agradeço a todos os companheiros de trabalho da Embraer, que me ajudaram a conciliar os estudos com a carreira profissional, me fazendo evoluir em ambos os caminhos, constantemente, em todo processo.

Agradeço aos professores Gustavo Barbosa e Sidney Bruce que caminharam ao meu lado durante todo o período acadêmico. Sem eles, não seria possível a conclusão deste trabalho. Agradeço a todos os professores tanto do departamento de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica quanto dos outros departamentos que tive o privilégio de me relacionar nesses 2 anos na Universidade Federal de São Carlos.

Por fim, agradeço a todos os membros da banca, ao CAPES, a todos que participaram deste e outros trabalhos acadêmicos que fui integrante, e a todos os amigos que fiz durante a estrada da vida.

"I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work."

- **Thomas Edison**

RESUMO

A manufatura aditiva vem ganhando cada vez mais espaço no universo da produção em larga escala. Inventada como um processo de produção ágil e flexível, ela surgiu como uma alternativa de prototipagem rápida para pequenos conjuntos de geometria complexa. Hoje, os desafios nesse novo rumo em direção a fabricação em larga escala são inúmeros. Plataformas de impressão maiores, combinados com utilização de extrusoras de grande porte controladas por braços robóticos são exemplos das novas aplicações da manufatura aditiva. O processo também precisa se adequar aos novos requisitos exigidos. Dentre eles, pode-se afirmar que a qualidade de impressão aliada a boas propriedades estão entre os mais desejados pelo mercado. Desta forma, o objetivo central desta pesquisa foi identificar a influência das variáveis velocidade e temperatura no método de impressão por extrusão de material granulado, nas propriedades e qualidade de impressão do filamento polimérico extrudado. Para isso, foram coletadas amostras de uma extrusora customizada para orientação vertical de três polímeros distintos (ABS, PLA e PCL), realizadas medições dimensionais dos filamentos, assim como aferição da pressão de extrusão, peso e volume. Também foi feita a caracterização térmica através de DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial), para verificação das temperaturas de transição transição vítrea e fusão (T_g e T_m), assim como o grau de cristalinidade (X_c). Após a compilação de todos os resultados, é possível concluir que para os três polímeros, a rotação intermediária testada de 20 rpm consegue entregar filamentos com boas propriedades, sem perder significativamente as qualidades geométricas. O ABS se mostrou melhor quando extrudado a 190°C e também, foi possível concluir que a 180°C o ABS pode não ter se fundido corretamente, e que a 200°C há indícios de degradação do material. O PLA mostrou seu melhor desempenho extrudado a 170°C e em temperaturas inferiores, teve sua densidade mais baixa, o que pode ser explicado devido ao polímero não ter se fundido corretamente. Para o PCL, foram observadas características melhores quando extrudado na temperatura de 70°C , mas houve uma grande dificuldade no manuseio, resfriamento e solidificação das amostras devido a sua baixa temperatura de fusão, relativamente próxima a temperatura ambiente. Portanto, é possível concluir o PCL não é indicado para extrusoras de grande porte, e para o processo de fabricação aditiva de peças em grande escala.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Extrusão; Polímeros Pellets (FGF); Caracterização térmica de polímeros; DSC.

ABSTRACT

Additive manufacturing is gaining more space in the universe of large-scale production. Invented as an agile and flexible production process, it emerged as a rapid prototyping alternative for small assemblies with complex geometry. Today, the challenges in this new direction towards large-scale manufacturing are numerous. Larger printing platforms, combined with the use of large extruders controlled by robotic arms are examples of new applications of additive manufacturing. The process also needs to adapt to the new requirements. It can be said that the printing quality combined with good properties are among the most desired by the market. In this way, the main objective of this research was to identify the influence of the variables speed and temperature in the printing method by extrusion of granulated material, in the properties of the extruded polymer and printing quality. For this, samples were collected from an extruder customized for vertical orientation of three different polymers (ABS, PLA and PCL), dimensional measurements of filaments were carried out, as well as measurement of extrusion pressure, weight and volume. Thermal characterization was also carried out using DSC (Differential Scanning Calorimetry), to verify the thermal transition temperatures (T_g and T_m) and the degree of crystallinity (X_c). to verify the glass and melt temperatures (T_g and T_m), and the degree of crystallinity (X_c). After compiling all the results, it is possible to conclude that for the three polymers, the rotation speed of 20 rpm manages can deliver filaments with good properties, without significantly losing the geometric qualities. ABS proved to be better when extruded at 190°C and it was also possible to conclude that at 180°C the ABS may not have melted correctly, and that at 200°C there are signs of degradation of the material. PLA showed its best performance extruded at 170°C and at lower temperatures, its density was lower, which can be explained by the polymer not having melted correctly. For PCL, better characteristics were observed when extruded at a temperature of 70°C, but there was great difficulty in handling, cooling and solidifying the samples due to its low melting temperature, relatively close to room temperature. Finally, it is possible to conclude that PCL is not suitable for large extruders, and for the additive manufacturing process of large-scale parts.

Keywords: Additive Manufacturing; Extrusion; Polymer Pellets (FGF); Thermal characterization of polymers; DSC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva tensão-deformação esquemática de um polímero.....	21
Figura 2 - Influência da temperatura na tensão-deformação do poli(metacrilato de metila)..	21
Figura 3 - Estrutura da cadeia dobrada para um polímero cristalino em forma de plaqueta. ..	23
Figura 4 - Metodologia da pesquisa.	26
Figura 5 - Extrusora Miotto no setup vertical fixada em um pórtico.	28
Figura 6 - Componentes da extrusora sua configuração original (horizontal).	28
Figura 7 - Painel de comando acoplado a extrusora.....	29
Figura 8 - Matriz de extrusão utilizada e sua geometria.	30
Figura 9 - Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz.	30
Figura 10 - Zonas de aquecimento.	33
Figura 11 - Filamentos e amostradas.....	35
Figura 12 - Curva típica do PLA obtida por DSC.....	36
Figura 13 - Velocidade de Extrusão ABS	39
Figura 14 - Velocidade de Extrusão PLA	39
Figura 15 - Velocidade de Extrusão PCL.....	40
Figura 16 - Pressão de extrusão ABS.....	41
Figura 17 - Pressão de extrusão PLA	42
Figura 18 - Pressão de extrusão PCL	42
Figura 19 - Seção Transversal Média ABS	44
Figura 20 - Seção Transversal Média PLA	44
Figura 21 - Seção Transversal Média PCL	45
Figura 22 - Vazão Mássica ABS	47
Figura 23 - Vazão Mássica PLA	48
Figura 24 - Vazão Mássica PCL	48
Figura 25 - Vazão Volumétrica ABS	50
Figura 26 - Vazão Volumétrica PLA	50
Figura 27 - Vazão Volumétrica PCL.....	51
Figura 28 - Densidade ABS	53
Figura 29 - Densidade PLA.....	53
Figura 30 - Densidade PCL.....	54
Figura 31 - Curvas DSC plotadas dos polímeros	55
Figura 32 - Curvas da análise de DSC ABS.....	56

Figura 33 - Curvas da análise de DSC PLA.....	57
Figura 34 - Curvas da análise de DSC PCL.....	59
Figura 35 - Desenho 2D da matriz de extrusão.....	66
Figura 36 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do ABS	73
Figura 37 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do PLA	74
Figura 38 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do PCL.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração de Temperatura e velocidade utilizadas	33
Tabela 2 - Desvio Padrão da Seção Transversal Média	46
Tabela 3 - Vazão Mássica	47
Tabela 4 - Vazão Volumétrica	49
Tabela 5 - Densidade Média de cada Temperatura	52
Tabela 6 - Amostras ensaiadas no DSC	55
Tabela 7 - Propriedades Térmicas do PLA	58
Tabela 8 - Propriedades Térmicas do PCL.....	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*
AM – *Additive Manufacturing*
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
CAD - *Computer Aided Design*
CAM - *Computer Aided Manufacturing*
CCDM - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
CDP – Corpo de Prova
CFD - *Computational Fluid Dynamics*
DSC - *Differential Scanning Calorimetry*
EBM - *Eletron Beam Melting*
FDM® - *Fused Deposition Modeling*
FFF – *Fused Filament Fabrication*
FGF – *Fused Granular Fabrication*
FPM - *Fused Pellet Modeling*
I4.0 - Indústria 4.0
LAM - *Laser Additive Manufacturing*
LFAM – *Large-Format Additive Manufacturing*
LOM - *Laminated Objects Modeling*
LSAM – *Large Scale Additive Manufacturing*
MA - Manufatura Aditiva
PCL - *Polycaprolactone*
PLA - *Polylactic Acid*
PPGEMec - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SLM - *Selective Laser Melting*
SLS - *Selective Laser Sintering*
UFSCar - Universidade Federal de São Carlos
VLP - *Vertical Layer Print*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Introdução	15
1.2 Objetivo geral	17
1.3 Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Manufatura Aditiva.....	18
2.1.1. O Processo de Extrusão na Manufatura Aditiva	18
2.1.2. FGF – <i>Fused Granular Fabrication</i>	19
2.1.3. LFAM (<i>Large-Format Additive Manufacturing</i>) e os Desafios do Processo	19
2.2. Caracterização de Polímeros	20
2.2.1. Deformação Viscoelástica no Processo de Extrusão.....	22
2.2.2. Cristalização dos Polímeros	23
2.2.3. Temperaturas de Fusão e Transição Vítreas	24
2.2.4. DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial.....	24
2.2.5. Influência das variáveis nas propriedades do extrudado	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. Materiais	26
3.1.1. Polímeros termoplásticos	27
3.1.2. Extrusora	27
3.1.3. Matriz de extrusão.....	30
3.1.4. Instrumentos e equipamentos.....	31
3.2. Métodos	31
3.2.1. Aquecimento e <i>setup</i> da extrusora.	31
3.2.2. Configurações de temperatura e velocidade utilizadas.	32
3.2.3. Extrusão dos filamentos amostras.....	34
3.2.4. Coleta de dados e ensaios.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Caracterização dos Filamentos e Amostras	38
4.1.1. Velocidade de extrusão	38
4.1.2. Pressão.....	41
4.1.3. Dimensões da seção transversal	43
4.1.4. Vazão mássica.....	47
4.1.5. Vazão volumétrica.....	49
4.1.6. Densidade	51
4.2. Propriedades Térmicas dos Polímeros.....	55

4.2.1. ABS	56
4.2.2. PLA	57
4.2.3. PCL.....	58
4.3. Análise dos Resultados.....	60
5. CONCLUSÃO	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXO A - Desenho 2D da matriz de extrusão	66
ANEXO B – Propriedades do SABIC CYCOLAC™ MG94 ABS	67
ANEXO C – Propriedades do NatureWorks Ingeo™ 4043D PLA	69
ANEXO D – Propriedades do Perstorp Capa™ 6500 PCL	72
ANEXO E – Dados Coletados do Processo e Parâmetros	73

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A manufatura aditiva (MA) surgiu na década de 80, onde a primeira impressão 3D funcional foi inventada por Chuck Hull. Uma das primeiras versões comerciais semelhantes às impressoras de depósito por fusão (FDM®), similar às impressoras 3D domésticas, foi desenvolvida no final de 80 e começo de 90 (RUSSMANN et al., 2015).

Recentemente, as impressoras 3D tornaram-se financeiramente acessíveis para pequenas e médias empresas, levando a prototipagem da indústria pesada para o ambiente de trabalho. Além disso, é possível trabalhar simultaneamente com diferentes tipos de materiais. A tecnologia é utilizada em diversos ramos de produção, como: *design* de produto, prototipagem rápida e até mesmo na indústria automotiva, aeroespacial e de desenvolvimento médico. Várias técnicas de manufatura aditiva foram introduzidas nos últimos anos. Uma maneira de classificar essas técnicas é baseada no estado da matéria-prima depositada. No estado líquido, um exemplo é a deposição de filamento fundido (FFF) ou estereolitografia (SLA). Já no caso do material em partículas discretas (normalmente em pó) pode se encontrar a sinterização seletiva a laser (SLS) ou *electron beam melting* (EBM). Por último, para matéria-prima em folhas sólidas, destaca-se a modelagem de objetos laminados (LOM) (CERUTI et al., 2019).

A técnica mais utilizada atualmente para a criação de pequenos protótipos é a de deposição fundida, onde um filamento fino de polímero é derretido por um bocal (matriz de impressão), que deposita o material em camadas seguindo um caminho pré-definido, solidificando em poucos segundos após sua deposição. O grande diferencial dessa tecnologia é a capacidade de criar geometrias complexas. Com a Indústria 4.0, esses métodos de manufatura aditiva são amplamente usados para produzir produtos customizados que oferecem vantagens de construção, como projetos complexos e leves (RUSSMANN et al., 2015).

Com o passar dos anos, as técnicas de MA foram aprimoradas. Ferramentas computacionais e softwares (fatiadores inteligentes, modelos paramétricos 3D, simuladores físico-mecânicos e/ou termo-fluídicos), melhoraram o processo de fabricação, expandindo assim, seu universo de aplicação e explorando os limites da impressão 3D. Essa evolução foi responsável por alavancar os avanços da LFAM (*Large-Format Additive Manufacturing*), possibilitando a criação de geometrias cada mais complexas e de grande porte (TIWARY; P.; MALIK, 2021).

Neste novo universo de geometrias complexas e de grande porte, as variáveis do processo são importante para garantir que os requisitos de projeto sejam atendidos. Vazão mássica,

volumétrica e temperatura de operação devem estar correlacionados as propriedades térmicas e mecânicas da matéria-prima, já que são responsáveis por influenciar diretamente na qualidade superficial, variação dimensional, adesão de camadas e densidade de vazios da peça (VIJAY et al., 2019). Tal objetivo só é possível de ser alcançado com uma perfeita sincronização entre o processo de modelagem, escolha dos parâmetros de impressão corretos para a matéria-prima selecionada, além de uma plataforma que possibilite a deposição de camadas de uma forma precisa e flexível (CHESSER et al., 2019).

Configurações que unem o processo de fabricação do filamento, em conjunto com uma plataforma que possibilita a fabricação de peças de grande porte se mostraram ideais para o processo de LFAM. Braços robóticos aliados a pequenas extrusoras se mostraram eficientes neste processo, assim como grandes extrusoras fabricantes de filamentos em larga escala conectadas a uma plataforma móvel para controle da deposição de camadas. Este processo permite o uso de um grande conjunto de matéria-prima (seja no estado puro ou blendas) (URBANIC; HEDRICK, 2016).

O processo de extrusão pode trabalhar com diferentes geometrias de matéria-prima (*pellets*), mostrando-se como uma alternativa viável de eliminar o processo de fabricação do filamento, de forma que ela seja utilizado na forma granulada direto na impressão. Este processo é altamente flexível quanto a gama de materiais utilizados, possibilitando o uso de matéria-prima reciclada e, até mesmo, blendas poliméricas ou de materiais compósitos para melhorar as propriedades mecânicas do extrudado. O maior desafio é adequar as variáveis do processo, principalmente, temperatura e vazão, de forma que seja atingido a qualidade de impressão desejada (GUTOWSKI et al., 2017).

Diante desse contexto, o presente projeto de pesquisa em questão busca expandir os conhecimentos e aplicações de uma extrusora de filamento polimérico em larga escala, aplicada no processo de impressão 3D, sendo necessário entender como os parâmetros do processo de extrusão influenciam na qualidade e propriedades dos filamentos poliméricos. A extrusora foi customizada para que o filamento seja depositado na orientação vertical e alimentada com material polimérico na forma granulada (*pellets*). Estudos foram realizados quanto as propriedades dos polímeros manufaturados aditivamente pelo processo de extrusão, fabricação em grandes escalas e também quanto ao uso de matrizes de extrusão customizadas. Todos as pesquisas tem o objetivo de melhorar a qualidade do impresso, mas cada uma segue apenas uma vertente. Assim, é relevante correlacionar todas estas vertentes em um único escopo.

Portanto, é de suma importância estudar a produção de filamentos com seções transversais customizadas (quadrática) e como as variáveis do processo de extrusão influenciam nas

dimensões, qualidade e propriedades dos filamento produzidos. Desta forma, será possível estimar o comportamento do impresso, dada uma certa rotação do fuso combinada a uma faixa de temperatura de processamento. Assim, o *setup* da extrusora para os polímeros avaliados pela pesquisa será concebível, considerando todos os requisitos de projeto e aplicação.

Foi utilizada uma matriz de extrusão com seção transversal quadrática côncava incluso em um círculo de 3 mm de diâmetro. Sabendo que o polímero em *pellet* plastificado extrudado se comporta como um fluido não-newtoniano e que durante sua passagem pelo orifício de saída da matriz é característico a presença do efeito Barus (inchamento da seção transversal do extrudado), tal matriz extruda filamentos com seção transversal quadrática, permitindo uma maior área de contato entre as camadas durante o processo de impressão e, conseqüentemente, uma menor densidade de vazios devido a melhor deposição do extrudado (OLIVEIRA, 2023).

Foram estudados três tipos de matéria-prima polimérica: ABS, PLA e PCL, extrudadas em três temperaturas de operação distintas (cada uma selecionada de acordo com a temperatura de fusão de cada polímero e teste preliminares) e em 5 velocidades diferentes de rotação do fuso roscado da extrusora (10, 15, 20, 25 e 30 rpm). Cada configurações de temperatura e velocidade geraram 2 tipos de corpos de prova (CDP), uma amostra e um filamento. Na totalidade foram analisados uma série de 90 condições de extrusão.

1.2 Objetivo geral

O objetivo central da pesquisa foi identificar a influência das variáveis velocidade e temperatura no processo de extrusão de material granulado, nas propriedades dos polímeros (ABS, PLA e PCL) e qualidade de impressão para que, posteriormente, os resultados sejam utilizados na impressão de peças de grande escala.

1.3 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo final, foram avaliados os seguintes parâmetros do processo:

- Velocidade de extrusão em mm/s;
- Média da seção transversal dos filamento;
- Qualidade e regularidade de extrusão avaliando a variação da seção transversal.
- Densidade em g/mm³;
- Vazão mássica em g/min;
- Vazão volumétrica em mm³/min;
- Caracterização térmica através do ensaio de DSC para verificação das temperaturas de transição térmica (T_g e T_m) e grau de cristalinidade (X_c).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

Várias técnicas de manufatura aditiva foram introduzidas nos últimos anos. Uma maneira de classificar essas técnicas é baseada no estado da matéria-prima depositada, que pode ser líquida como por exemplo na modelagem de deposição fundida (FDM®) ou estereolitografia (SLA). Também pode ser utilizado partículas discretas (normalmente em pó), como na sinterização seletiva a laser (SLS) ou elétron beam melting (EBM), ou até mesmo folhas sólidas, como na modelagem de objetos laminados (LOM) (CERUTI et al., 2019).hyy

A técnica mais utilizada atualmente para a criação de pequenos protótipos é a de deposição fundida, onde um filamento fino de polímero (geralmente ABS ou PLA) é derretido por um bocal, que deposita o material em camadas seguindo um caminho pré-definido, solidificando em poucos segundos após sua deposição. O grande diferencial dessa tecnologia é a capacidade de criar geometrias complexas dada a uma liberdade de modelagem. Com a Indústria 4.0, esses métodos de manufatura aditiva serão amplamente usados para produzir pequenos lotes de produtos customizados que oferecem vantagens de construção, como projetos complexos e leves (RUSSMANN et al., 2015).

2.1.1. O Processo de Extrusão na Manufatura Aditiva

O processo de extrusão de materiais, é definido como o processo MA no qual o material é dispensado seletivamente através de um bocal ou orifício (ASTM, 2021a). No caso da extrusão de polímeros, ele pode ser feito com materiais à base de termoplásticos, onde a matéria-prima e os materiais estão na forma de *pellets* (FGF), o qual envolve a fusão de matéria-primas em um sistema de extrusão vertical.

Um sistema de extrusão é um sistema constituído por um alimentador, um duto aquecido e um bocal. A função do alimentador é colocar *pellets* em um duto quente. Durante a passagem do polímero, o mesmo derreterá e será guiado derretido até o bocal (matriz de extrusão), responsável por definir a geometria da seção transversal do material fundido a ser depositado. O processo de extrusão de polímeros também pode ser realizado com termofixos (sem fusão), usando um cabeçote de extrusão que combina resina e endurecedor durante a deposição (LINDAHL et al., 2018). Em geral, a relação entre bico diâmetro, velocidade e taxa de alimentação de material são coordenados tal que a deposição do material (FGF) seja precisa, criando o produto desejado, camada por camada (MASOOD, 2014).

2.1.2. FGF – *Fused Granular Fabrication*

O FGF ou FPF é uma técnica de impressão 3D baseada em extrusão, na qual *pellets* são derretidos e alimentados através de um bocal. Dentro de todas as famílias de processos da MA, o FGF tornou-se um dos métodos mais amplamente utilizados na indústria para protótipos funcionais e produção em série de baixo volume, usando polímeros como ABS, PLA ou PCL.

A abordagem de alguns autores para grandes sistemas de impressão 3D começa adotando uma alimentação por *pellets* (ROSCHLI, 2016). Esse método implica na necessidade de incorporar um fuso extrusora, aumentando a complexidade da máquina. Mesmo assim, quando em comparação com outros métodos, as soluções de *pellets* geralmente o custo do material é reduzido. Além disso, tecnologia de extrusão pode aumentar a taxa de processo, em mais de 2 ordens de magnitude e diminuir a necessidade de eletricidade por kg em cerca de 2 ordens de grandeza quando comparado com a tecnologia de impressão com filamentos pré-fabricados (GUTOWSKI et al., 2017).

Uma pesquisa mostra que, na extrusão de *pellets*, a eficiência do processo e a qualidade da deposição podem ser aumentadas usando uma rosca de passo variável e diâmetro progressivo (WANG et al., 2016). Múltiplos bocais podem ser usados seletivamente em diferentes áreas de construção de uma peça visando aumentar a qualidade das peças sem alterar significativamente o tempo de impressão.

Para melhorar as propriedades mecânicas (resistência, rigidez e fluência) de peças obtidas por FGF, polímeros como polifenilsulfona (PPSU), polieterimida (PEI) e poli-éter-éter-cetona (PEEK), estão em desenvolvimento contínuo e podem ser aplicados ao método junto a outros materiais formando blendas. Esses materiais oferecem propriedades específicas melhoradas, mas são muitas vezes limitadas por defeitos inerentes à técnica FGF, como dificuldade em prever porosidades e baixa adesão entre camadas (VICENTE et al., 2023).

2.1.3. LFAM (*Large-Format Additive Manufacturing*) e os Desafios do Processo

O LFAM ou LSAM refere-se à fabricação de estruturas que excedem o volume de construção de configurações convencionais de manufatura aditiva. Tal solução poderia ser aplicada na indústria aeroespacial por exemplo, facilitando a fabricação de grandes estruturas funcionais no espaço.

O LFAM surge como uma solução para fabricar peças grandes e ao mesmo tempo evitar a união/soldagem de várias peças (TIWARY; P.; MALIK, 2021). O processo LFAM, traz problemas associados de empenamento de peças durante o processo de resfriamento. Se não

otimizado, o encolhimento anisotrópico do material e características de compressão não linear causam delaminação severa, afunilamento da seção transversal e empenamento (VIJAY et al., 2019), aumentando também o risco de flambagem das estruturas (HOPKINS; VAN VUUREN; BROOKS, 2020). Uma solução repetidamente relatada para minimizar o empenamento é o uso de termoplásticos reforçados com pequenas fibras (DUTY et al., 2017).

Os termoplásticos reforçados têm um coeficiente de expansão térmica médio, uma ordem de grandeza menor do que o termoplásticos não reforçados. Uma abordagem alternativa é a utilização de materiais termofixos usando uma combinação de resina e endurecedor durante a deposição (RIOS et al., 2018). No LFAM, ou o tempo é comprometido ou, usando larguras de extrusão maiores, a tendência é uma diminuição na qualidade do acabamento superficial das peças. Portanto, este processo pode levar a desvios geométricos potencialmente significativos (CHESSER et al., 2019).

A fabricação de peças através de módulos de extrusão múltiplos e colaborativos surge como uma potencial solução para superar as limitações de velocidade, custo e escalabilidade de sistemas de extrusão comuns. Na impressão 3D colaborativa, impressoras 3D móveis ou módulos de extrusão, funcionam de forma conjunta construindo uma peça simultaneamente (URBANIC; HEDRICK, 2016).

Com a introdução de vários cabeçotes de extrusão, novas estratégias de colagem são necessárias para unir as partes fracionadas da peça que foram produzidas pelos diferentes cabeçotes, uma vez que a existência de módulos de extrusão independentes impõe a existência de áreas de intersecção entre as partes (WACHSMUTH; BØHN, 2008).

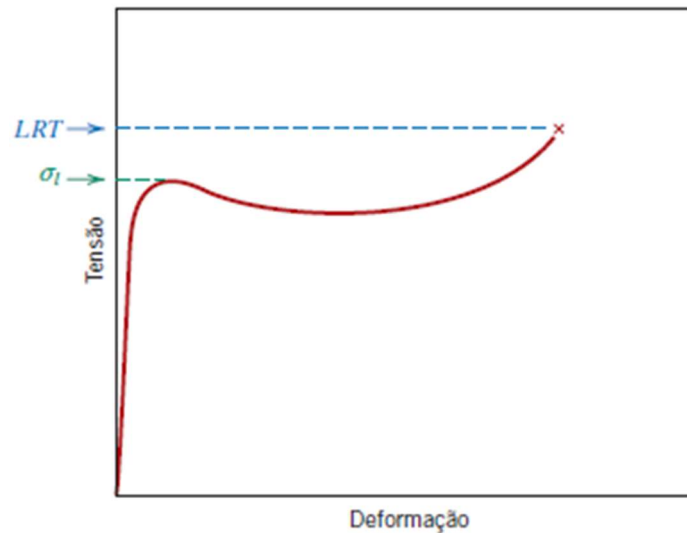
Robôs com cabeçote de impressão também podem ser utilizados no processo, trabalhando cooperativamente para imprimir uma peça desejada, que precisa ser divididas em seções menores (POUDEL; ZHOU; SHA, 2020). Este processo é complexo e uma das dificuldades é gerar caminhos de impressão eficientes e livres de colisões. Softwares de fatiamento podem ser utilizados para otimizar o particionamento das peças e surge como uma estratégia para evitar colisões durante o processo (FRUTUOSO, 2017).

2.2. Caracterização de Polímeros

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por muitos dos mesmos parâmetros que são usados para os metais, isto é, módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração. Para um material plástico, a deformação inicial é elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica. Finalmente, a deformação é totalmente elástica, conforme ilustrado na figura 1. Essa elasticidade é típica da borracha

(grandes deformações recuperáveis e produzidas sob baixos níveis de tensão) podendo ser exibida por uma classe de polímeros denominada elastômeros (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

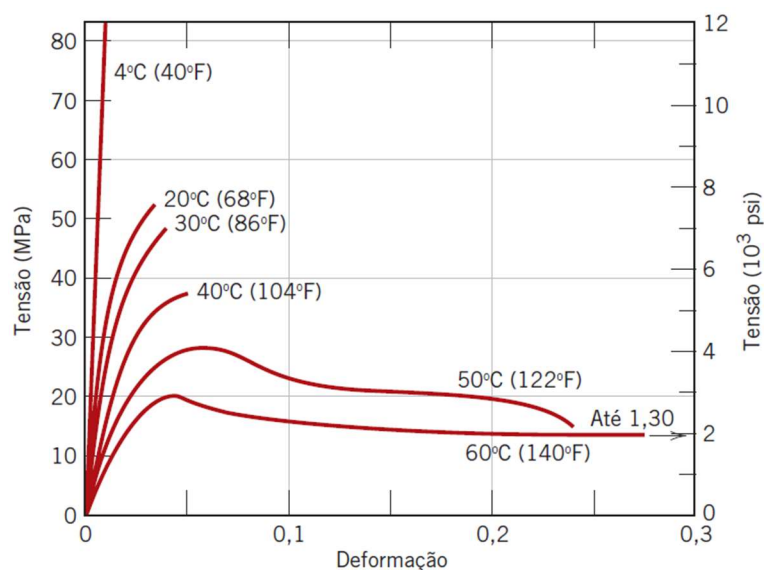
Figura 1 - Curva tensão-deformação esquemática de um polímero.



Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018

Além disso, as características mecânicas dos polímeros são muito mais sensíveis a mudanças de temperatura próximo à temperatura ambiente. A figura 2 representa o comportamento tensão-deformação para o poli(metacrilato de metila), popularmente conhecido como acrílico, em temperaturas entre 4°C e 60°C. Um aumento na temperatura promove a redução no módulo de elasticidade, no limite de resistência à tração, e melhora na ductilidade. Já em temperaturas mais baixas o material é totalmente frágil, enquanto há uma deformação plástica considerável tanto em temperaturas mais elevadas.

Figura 2 - Influência da temperatura na tensão-deformação de um poli(metacrilato de metila).



Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018

A influência da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico também pode ser importante. Em geral, uma diminuição na taxa de deformação tem a mesma influência sobre as características tensão-deformação que um aumento na temperatura; isto é, o material torna-se mais macio e mais dúctil (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Para muitos materiais poliméricos é necessário apenas um ensaio simples para que seja possível analisar as características mecânicas deste material. Estas, em sua maioria, são altamente sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente (presença de água, oxigênio, solventes orgânicos). Em alguns casos, é necessário empregar técnicas variadas e modificações nos CDP's, para possibilitar o ensaios de polímeros devido as suas características e, principalmente, se o material for altamente elástico.

2.2.1. Deformação Viscoelástica no Processo de Extrusão

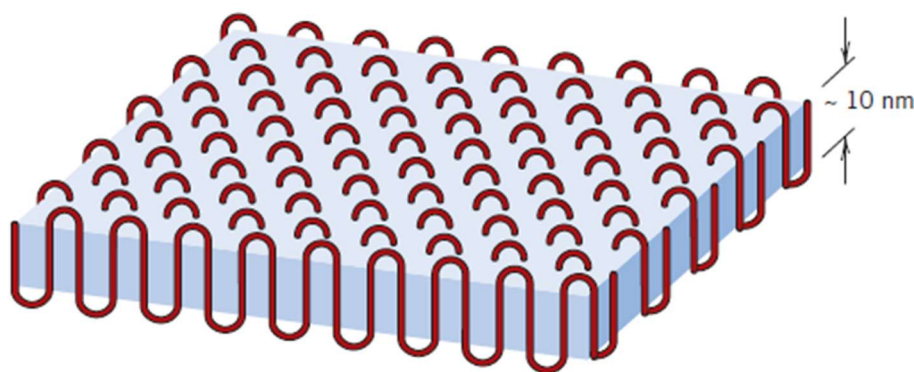
Um polímero amorfo pode se comportar como um sólido em temperaturas baixas, como uma borracha em temperaturas intermediárias (acima da temperatura de transição vítrea) e como um líquido viscoso, conforme a temperatura é aumentada. Sob deformações relativamente pequenas, o comportamento mecânico em baixas temperaturas pode ser elástico, ou seja, conforme a Lei de Hooke. Em temperaturas mais altas, prevalece um comportamento viscoso ou semelhante ao de um líquido. Em temperaturas intermediárias, o polímero é um sólido com características de borracha, exibindo características mecânicas que são uma combinação desses dois extremos; essa condição é denominada viscoelasticidade (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). A deformação elástica é instantânea; isso significa que a deformação total ocorre no instante em que a tensão é aplicada ou liberada (isto é, a deformação é independente do tempo). Além disso, com a liberação das tensões externas, a deformação é totalmente recuperada — a amostra assume suas dimensões originais.

No processo de extrusão, o polímero fundido é forçado contra uma matriz de extrusão. O polímero plastificado extrudado se comporta como um fluido não-newtoniano e durante sua passagem pelo orifício de saída da matriz é característico a presença do efeito Barus. Este efeito representa o inchamento da seção transversal do filamento, devido ao relaxamento das tensões advindas do processo de extrusão, e das deformações viscoelásticas que acontecem acima da temperatura de transição vítrea dos polímeros. Existem 3 maneiras de suprir esse efeito: aumentar a temperatura de extrusão, permitindo a relaxação durante o processo; aumentar o tempo que o polímero fica comprimido; diminuir o ângulo da matriz ou aumentar seu orifício, visando diminuir a taxa de deformação (MEDEIROS, 2015).

2.2.2. Cristalização dos Polímeros

A cristalização de um polímero fundido ocorre por processos de nucleação e crescimento. Para os polímeros, no resfriamento pela temperatura de fusão, formam-se núcleos nos pontos em que pequenas regiões das moléculas embaraçadas e aleatórias tornam-se ordenadas e alinhadas, na forma de camadas com cadeias dobradas (figura 3). Em temperaturas acima da temperatura de fusão, esses núcleos são instáveis em razão das vibrações térmicas dos átomos, que tendem a romper os arranjos moleculares ordenados.

Figura 3 - Estrutura da cadeia dobrada para um polímero cristalino em forma de plaqueta.



Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018

Após a nucleação e durante o estágio de crescimento da cristalização, os núcleos crescem pela continuação da ordenação e do alinhamento de novos segmentos de cadeias moleculares. As camadas com cadeias dobradas permanecem com a mesma espessura, mas aumentam em suas dimensões laterais.

Uma compreensão do mecanismo e da cinética da cristalização dos polímeros é importante, uma vez que o grau de cristalinidade influencia as propriedades mecânicas e térmicas desses materiais. A cristalinidade está relacionada com a forma com a qual essas longas cadeias estão organizadas. Assim, um cristal é formado quando as moléculas poliméricas se apresentam na ordem de longo alcance, ou seja, estão ordenadamente empacotadas ao longo de grandes distâncias atômicas (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Devido ao enorme comprimento de suas cadeias, os polímeros, em condições normais, não se cristalizam por completo e, dessa forma, são conhecidos como polímeros semicristalinos. O processo de cristalização de um determinado polímero depende de diversos fatores, principalmente, da taxa de resfriamento utilizada durante o processo de moldagem.

A cristalinidade tem influência na maioria das propriedades dos polímeros. Como por exemplo, as propriedades ópticas. Quanto maior o grau de cristalinidade dos polímeros mais opacos eles se tornam. Assim, polímeros transparentes não possuem cristalinidade, ou seja, são

amorfo. Além disso, à medida que os teores de cristalinidade aumentam em um polímero, há também o aumento do módulo elástico, resistência ao escoamento e dureza (CANEVAROLO JR, 2006).

2.2.3. Temperaturas de Fusão e Transição Vítreas

A fusão de um cristal polimérico corresponde à transformação de um material sólido, que contém uma estrutura ordenada de cadeias moleculares alinhadas, em um líquido viscoso no qual a estrutura é altamente aleatória. Esse fenômeno ocorre, ao se aquecer, na temperatura de fusão (T_m). Existem várias características distintas na fusão dos polímeros que são consequência das estruturas moleculares dos polímeros e da sua morfologia cristalina lamelar. A fusão ocorre ao longo de uma faixa de temperaturas. Além disso, o comportamento do processo de fusão depende do histórico da amostra, em particular da temperatura na qual ela foi cristalizada.

A transição vítrea ocorre em polímeros amorfo (ou vítreos) e semicristalinos, devido a uma redução no movimento de grandes segmentos de cadeias moleculares causada pela diminuição da temperatura. No resfriamento, a transição vítrea corresponde a uma transformação gradual de um líquido em um material borrachoso e, finalmente, em um sólido rígido. A temperatura na qual o polímero apresenta a transição do estado borrachoso para o estado rígido é denominada temperatura de transição vítrea (T_g). Além disso, mudanças bruscas em outras propriedades físicas acompanham essa transição vítrea, como por exemplo, a rigidez, a capacidade calorífica e o coeficiente de expansão térmica (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

As temperaturas de fusão e de transição vítrea são parâmetros importantes relacionados com as aplicações em serviço dos polímeros. Elas definem, respectivamente, os limites de temperatura superior e inferior para numerosas aplicações, especialmente para os polímeros semicristalinos. Além disso, os valores de T_m e de T_g também influenciam os procedimentos de fabricação e de processamento para os polímeros e os compósitos de matriz polimérica.

2.2.4. DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

O ensaio de DSC é utilizado para determinar as propriedades térmicas de: temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização (T_c), tempo de cristalização, entalpia de fusão, porcentagem de cristalinidade (X_m), calor específico (c_p), capacidade calorífica, velocidade de cura dos polímeros, dentre outros. O ensaio mede o fluxo

de calor associado com as transições térmicas dos materiais em função da temperatura e do tempo (ASTM, 2021b).

Tais medidas fornecem informações qualitativas e quantitativas sobre mudanças físicas e químicas que envolvem processos endotérmicos (absorção de calor), exotérmicos (liberação de calor) ou mudanças de capacidade calorífica.

O método de ensaio consiste em aquecer ou arrefecer uma amostra a uma taxa controlada, sob ação de um gás de purga específico com fluxo controlado e monitoramento contínuo com dispositivo de detecção adequado para observar a diferença de entrada de calor entre o material de referência e um material de ensaio.

2.2.5. Influência das variáveis nas propriedades do extrudado

Temperatura de operação e velocidade de extrusão são responsáveis por determinar as características térmicas e mecânicas do extrudado. Seja de forma direta, como é o caso da temperatura, seja de forma indireta, como no caso da velocidade, que influencia diretamente a pressão de operação e, por sua vez, determina as características do polímero.

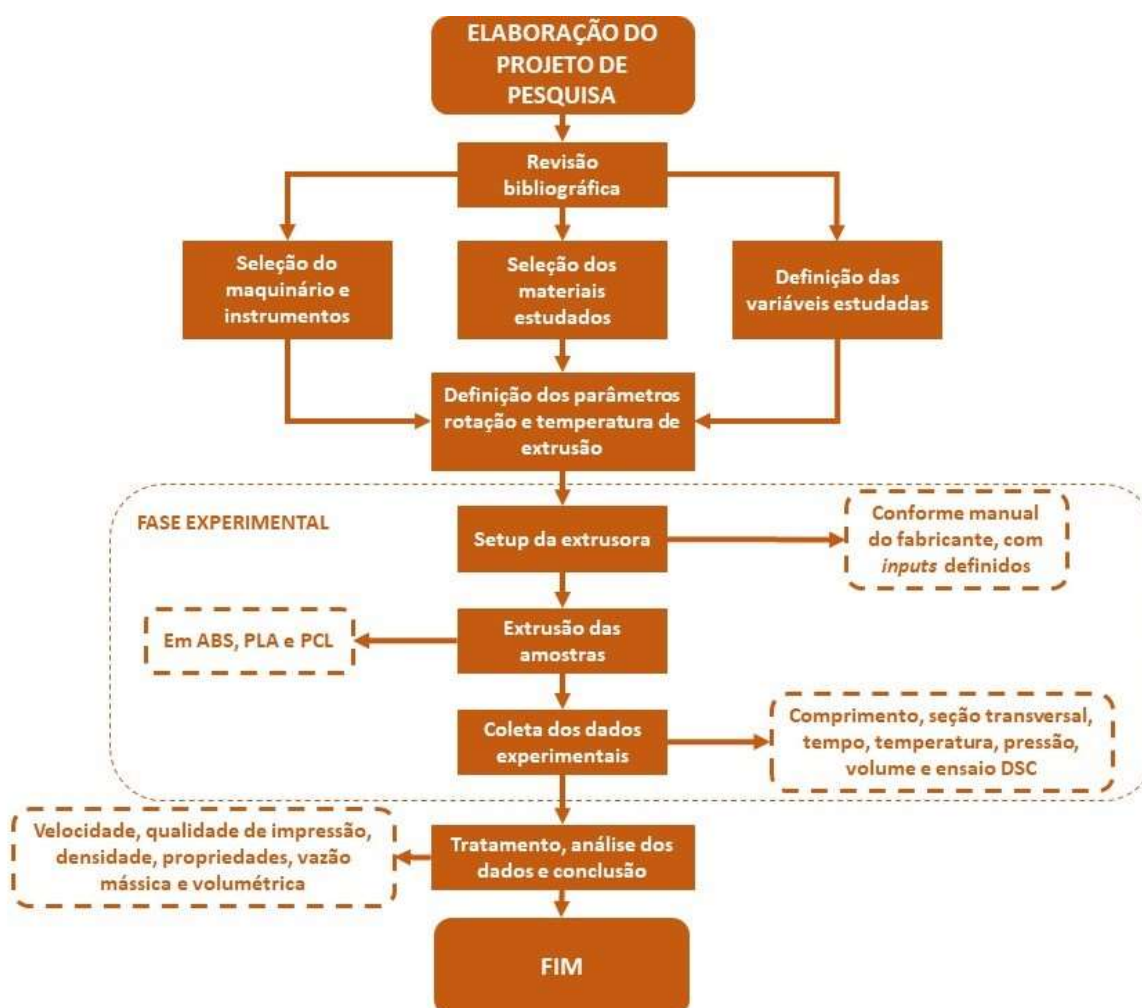
Sob condições de baixa pressão, os filamentos impressos tendem a apresentar maior massa, volume, densidade e menor porosidade. Também demonstram um acabamento superficial melhor se comparados a extrudados sob maior pressão. Funcionalidade química e propriedades térmicas dos polímeros impressos se demonstraram semelhantes, o que sugere pouca influência da variável pressão nestas propriedades (O'CONNOR; DOWLING, 2018).

A temperatura, por outro lado, tem um efeito significativo na porosidade. A porosidade pode influenciar diretamente na resistência à tração. O mesmo pode ser observado quando analisado a tenacidade (capacidade do material suportar tensões sem fraturar), e ductilidade (capacidade de deformar plasticamente antes da fratura). Temperaturas maiores geralmente apresentam um extrudado com uma menor porosidade e melhores propriedades mecânicas. Temperaturas mais altas, superiores a temperatura de transição vítrea, promovem a fusão baseada em difusão de camadas adjacentes depois que as interfaces são estabelecidas, enquanto temperaturas mais baixas geralmente resultam em diminuição da mobilidade molecular, o que dificulta o processo de difusão molecular (ADENIRAN et al., 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas da pesquisa estão ilustradas na figura 4, e podem ser divididas em 3 fases. A primeira consiste na pesquisa teórica, bibliográfica e definições iniciais, que antecedem aos experimentos. Já a fase experimental consiste na coleta de amostras, medições e ensaios. Por fim, foram realizados a análise dos resultados e a conclusão da pesquisa.

Figura 4 - Metodologia da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada material utilizado, assim como cada etapa observada na figura 3, será detalhada nas próximas seções.

3.1. Materiais

Os materiais utilizadas na pesquisa consistem em polímeros termoplásticos, extrusora monorosca, matriz de extrusão customizada, ferramentas para realização dos ensaios e instrumentos de medição. Estes foram descritos nesta seção.

3.1.1. Polímeros termoplásticos

Foram utilizados os seguintes materiais poliméricos granulado (*pellets*):

- ABS (acrilonitrila butadieno estireno) do fabricante SABIC denominado Resina Cicolac™ MG94 (SABIC, 2022), que possui uma temperatura de fusão de processamento de 205-245°C (polímero amorfo, não possui uma temperatura de fusão típica) e uma densidade específica de 1,04 g/cm³.
- PLA (ácido poliláctico) do fabricante NatureWorks denominado Ingeo™ Biopolymer 4043D (NATUREWORKS, 2023), que possui uma temperatura de fusão de processamento de 210°C (145-160°C temperatura de fusão típica) e uma densidade específica de 1,24 g/cm³.
- PCL (policaprolactona) do fabricante Perstorp denominado Capa™ 6500 (PERSTORP, 2010), que possui uma temperatura de fusão típica de 60°C e uma densidade específica de 1,14 g/cm³.

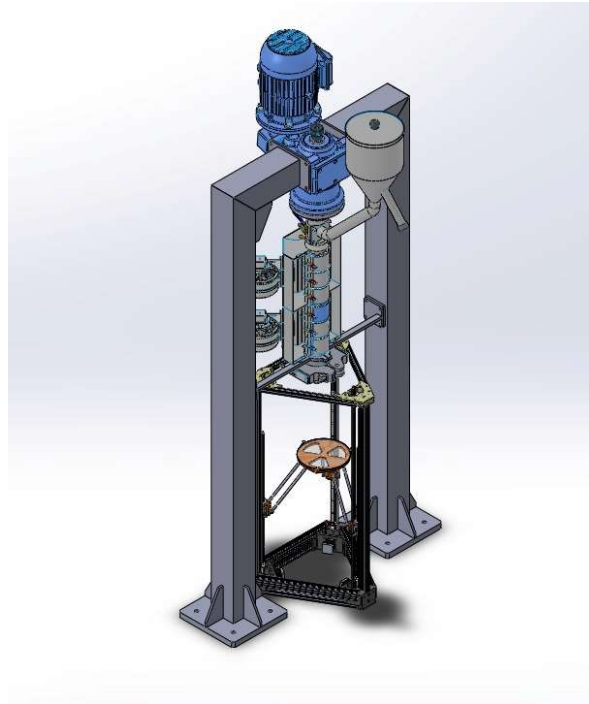
Estes materiais foram selecionados por serem amplamente utilizados na manufatura aditiva, e são os polímeros que possuem uma maior aplicação no setor.

3.1.2. Extrusora

A extrusora monorosca modelo P2788 Miotto foi utilizada para retirada das amostras e CDP's. Originalmente, a extrusora possuía o eixo do fuso roscados orientado horizontalmente, no entanto, ela foi customizada para o modo vertical (figura 5) no LEA - Laboratório de Engenharia Aplicada da UFSCar, possibilitando a impressão de peças de médio e grande volume, extrudados com auxílio de uma plataforma delta móvel desenvolvida por outro projeto de pesquisa paralelo.

A matéria-prima (*pellets*) é alimentada através de um funil, onde por gravidade, alimenta o canal de entrada do eixo monorosca sem fim, conduzindo o material dentro de um cilindro que possui três zonas de aquecimento, aquecidas através de resistências elétricas alojadas em cerâmica, e resfriadas por ventiladores em conjunto com um sistema de circulação de água. Por fim, extruda o material fundido conformando o filamento extrudado através de uma matriz de extrusão. A rosca é acoplada a um redutor de engrenagens cilíndricas, que é acionado pelo motor elétrico trifásico principal.

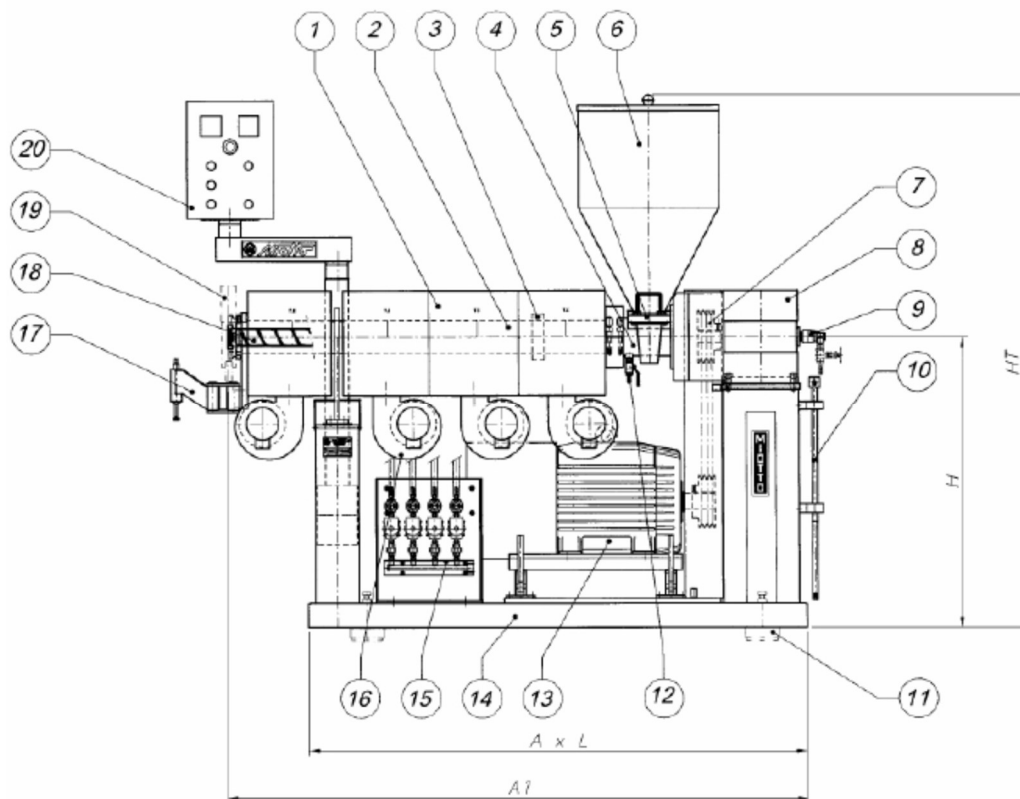
Figura 5 - Extrusora Miotto no setup vertical fixada em um pórtico (abaixo um projeto de mesa Delta acoplada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os principais componentes da extrusora são definidos na figura 6 fornecida pelo manual do fabricante e listado abaixo:

Figura 6 - Componentes da extrusora sua configuração original (horizontal).



Fonte: Manual de operação da extrusora modelo P2788 Miotto.

1. Carenagem do sistema de aquecimento;
2. Cilindro;
3. Resistências de aquecimento;
4. Módulo de alimentação;
5. Bloqueador tipo gaveta;
6. Funil de alimentação;
7. Transmissão por polias e correias;
8. Redutor de engrenagens;
9. União rotativa (refrigeração da rosca);
10. Extrator de rosca;
11. Coxim antivibração;
12. Refrigeração do módulo de alimentação;
13. Motor de acionamento;
14. Estrutura da extrusora;
15. Sistema de refrigeração a água;
16. Ventilador de refrigeração (resfriamento a ar);
17. Suporte articulado para cabeçote;
18. Rosca e matriz;
19. Abraçadeira bipartida;
20. Painel de comando (IHM).

As funções da extrusora são controladas através de um painel de comando, montado na estrutura do equipamento, ilustrados na figura 7.

Figura 7 - Painel de comando acoplado a extrusora.

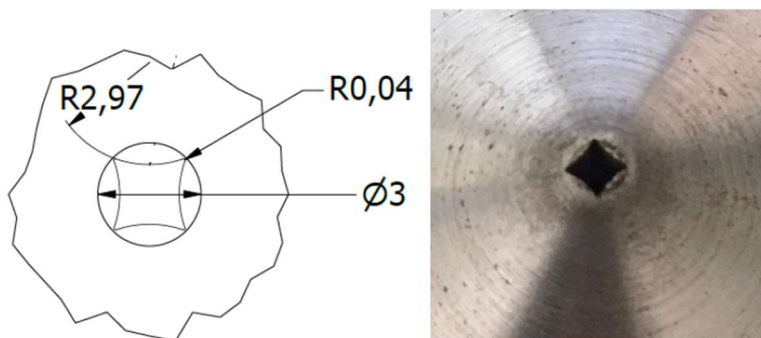


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3. Matriz de extrusão

Foi utilizado a matriz de extrusão com seção quadrática côncava incluso em um círculo de 3 mm de diâmetro customizada, desenvolvida por Oliveira (2023). As matrizes foram usinadas em aço SAE 1020 e o formato geométrico da seção de extrusão foi concebida pelo processo de eletroerosão. Não foram feitos tratamentos térmicos e superficiais. A matriz utilizada pode ser observada na figura 8.

Figura 8 - Matriz de extrusão utilizada e sua geometria.



Fonte: Oliveira (2023).

Tal matriz extruda filamentos com seção transversal quadrática devido ao polímero em *pellet* plastificado extrudado se comportar como um fluido não-newtoniano, e durante sua passagem pelo orifício de saída da matriz é característico a presença do efeito Barus. Este efeito representa o inchamento da seção transversal do filamento, devido ao relaxamento das tensões de compressão do processo de extrusão, e das deformações viscoelásticas. Essa geometria permite uma maior área de contato entre as camadas durante o processo de impressão e, conseqüentemente, uma menor densidade de vazios devido a melhor deposição do extrudado. A seção do filamento pode ser observada na figura 9.

Figura 9 - Detalhe da seção dos filamentos extrudados com a matriz.



Fonte: Oliveira (2023).

3.1.4. Instrumentos e equipamentos.

Para execução do trabalho, foram utilizados diversos equipamentos e instrumentos encontrados no próprio DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica e no DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais, ambos da UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Todos os equipamentos e instrumentos estão descritos a seguir:

- Paquímetro digital Mitutoyo Absolute Digimatic 500-172-20B;
- Régua metálica Starret de 500mm;
- Trena Starret 1000mm;
- Balança Mettler Toledo Modelo PB8001-S;
- Proveta Deltex 1000 ml;
- Seringa Descarpack 10ml Bico Luer Slip sem Agulha;
- Câmera fotográfica do celular;
- Cronômetro digital;
- Ventilador Mondial.
- DSC Q2000 V24.11 Build 124, para execução do ensaio de DSC.

3.2. Métodos

Com todos materiais, instrumentos e equipamentos descritos na seção anterior, foram realizadas uma sequência de operações para coleta das amostras e realização dos ensaios que serão detalhadas nesta seção.

3.2.1. Aquecimento e *setup* da extrusora.

Seguindo orientações do fabricante da extrusora, foi utilizado a sequência de operações conforme manual de instruções (INDÚSTRIA DE MÁQUINAS MIOTTO LTDA, 2007):

1. Energizar o painel;
2. Ligar todas as zonas de aquecimento uma hora antes da partida da máquina;
3. Programar as temperaturas desejadas em cada zona, de acordo com o perfil de temperatura do material escolhido;
4. Verificar se a água está circulando no módulo de alimentação do cilindro;
5. Verificar se o bloqueador tipo gaveta do funil de alimentação está fechado;
6. Despejar o material dentro do funil de alimentação;

7. Após atingir a temperatura programada em todas as zonas, certifica-se que todo o conjunto (cilindro, rosca, cabeçote, ferramentas e etc.) estejam com suas temperaturas estabilizadas, no mínimo por 5 minutos;

8. Zerar todas as velocidades;

9. Ligar o motor da extrusora;

10. Girar a rosca de 10% a 15% de sua velocidade;

11. Abrir aproximadamente 50% do bloqueador do funil;

12. Verificar a corrente do motor (a mesma nunca deve ultrapassar o valor nominal);

13. Abrir totalmente o bloqueador do funil;

14. Aguardar até que o material comece a sair no cabeçote;

15. Aumentar até 30% a velocidade da rosca;

16. Observar o estado do material e o funcionamento da extrusora;

17. Estando o material fluindo pela matriz, monitorar a corrente do motor principal, aumentar a velocidade da rosca, conforme a necessidade do processo, monitorando sempre o sistema de aquecimento através dos controladores de temperatura.

Este processo de *setup* junto ao processo de limpeza da extrusora, levou em torno de 90 minutos até o início da retirada de amostras. A higienização do maquinário e retirada das amostras se encontra detalhada na seção 3.2.3. Garantindo que todos os passos do manual foram seguidos corretamente, se inicia a retirada dos filamentos e amostras.

3.2.2. Configurações de temperatura e velocidade utilizadas.

Para os testes, foram utilizadas diferentes faixas de temperatura e velocidade de rotação do fuso. As amostras foram colhidas em cinco velocidades de rotação distintas: 10, 15, 20, 25 e 30 rpm, que foram selecionadas de acordo com a capacidade da máquina. Para a temperatura, foram selecionadas três faixas de acordo com cada material estudado, com o objetivo de observar a variação das propriedades:

- ABS: 180°, 190° e 200°C
- PLA: 150°, 160° e 170°C
- PCL: 60°, 70° e 80°C

Essas temperaturas foram selecionadas depois da análise das propriedades das matérias-primas informadas pelos fabricantes e após testes preliminares na extrusora, com a finalidade de verificar o comportamento dos materiais no processo. Desta forma, as velocidades de rotação do fuso foram combinadas com as faixas de temperatura selecionadas, ilustrados na tabela 1.

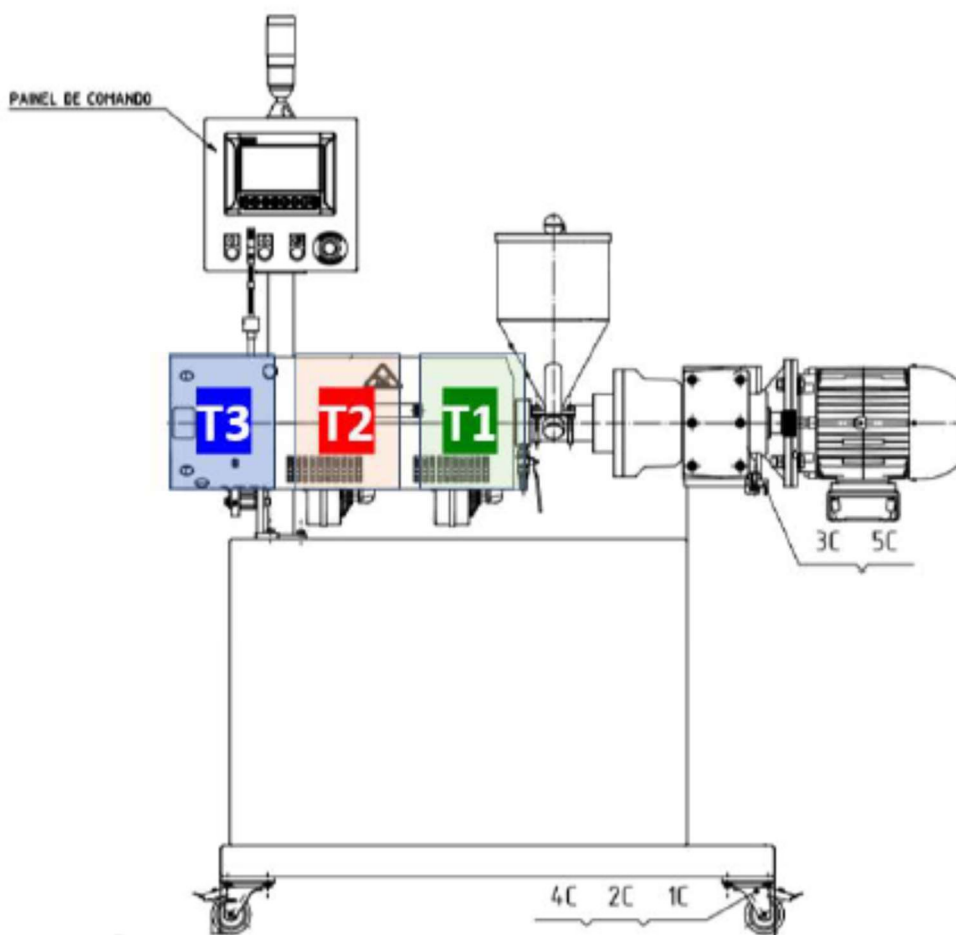
Tabela 1 - Configuração de Temperatura e velocidade utilizadas

Configurações de Temperatura e Velocidade			
Rotação do Fuso	Temperatura [°C]		
	ABS	PLA	PCL
10			
15	180	150	60
20	190	160	70
25	200	170	80
30			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como cada uma das três zonas de temperatura (T1, T2 e T3) da máquina são controladas de forma independente, todas as três zonas (ilustradas pela figura 10) foram setadas para a mesma temperatura, mantendo a temperatura de extrusão constante em todo cilindro da extrusora.

Figura 10 - Zonas de aquecimento.



Fonte: Manual de operação da extrusora modelo P2788 Miotto.

É importante ressaltar que as temperaturas registradas durante a coleta das amostras se referem as temperaturas mostradas no painel de comando da extrusora e estas são aferidas a partir de termopares instalados em cada zona de aquecimento da máquina. Portanto, devido a pressão, atrito com o fuso da extrusora e distância do material fundido ao sensor, o polímero pode atingir valores de temperatura ligeiramente superiores aos registrados pelo painel. Como essa temperatura é a utilizada para manter a operação da extrusora com precisão conforme *setup* utilizado, essa mesma temperatura foi utilizada para realizar a análise dos resultados. Desta forma, os testes preliminares para seleção das temperaturas testadas se mostraram ainda mais importantes para o estudo.

3.2.3. Extrusão dos filamentos amostras.

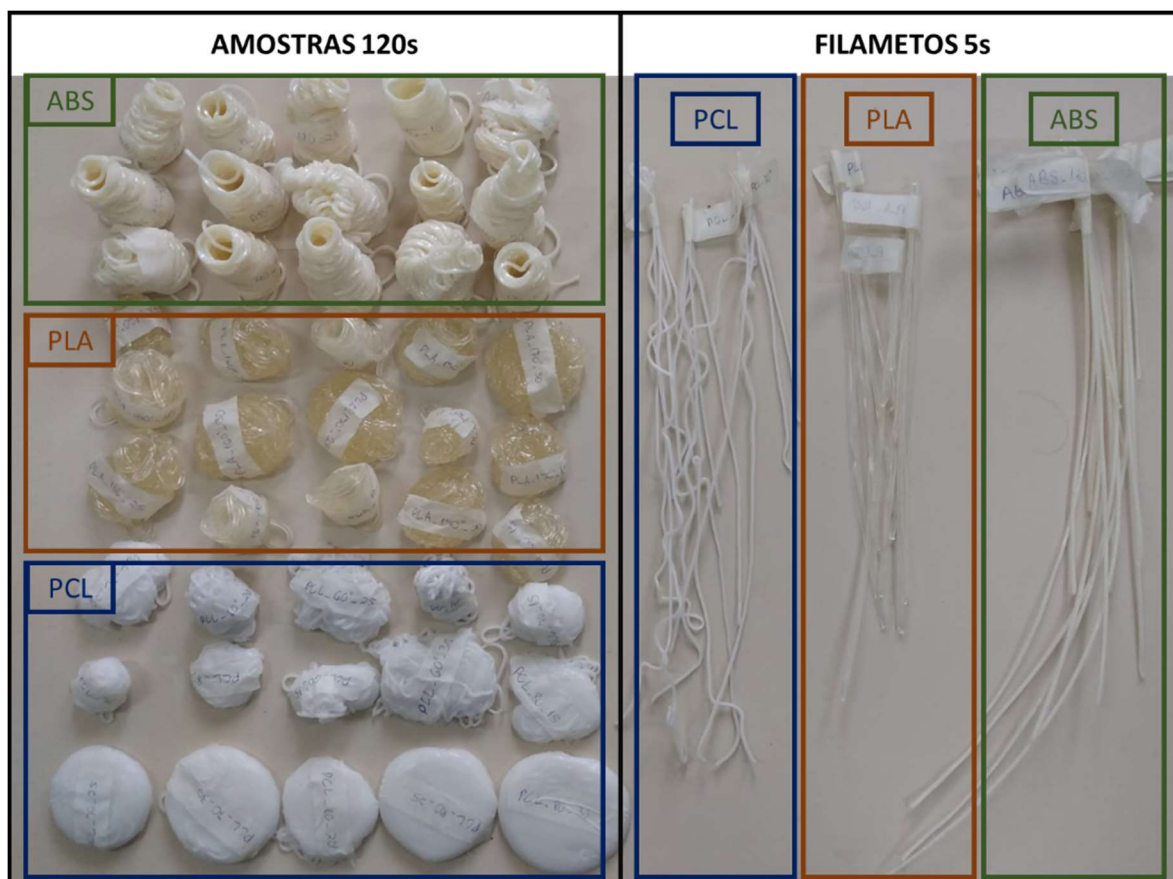
Após seguir os passos recomendados pelo fabricante para alimentação da matéria-prima e energização do equipamento (seção 4.2.1), se fez necessário a configuração da rotação e temperatura diretamente na IHM da extrusora.

Com a definição dos parâmetros, é preciso remover a primeira leva de material extrudado de cada configuração de temperatura e velocidade antes do início da produção dos filamentos e amostras, de maneira a se obter uma estabilização tanto da pressão interna quanto da vazão da extrusora, certificando-se se está operando em regime permanente. É importante salientar que a cada troca de material polimérico, foi feito a higienização da máquina utilizando material Purga-UltraPlast®, evitando assim a contaminação de um polímero com outro.

Com o equipamento estabilizado, foram extrudados filamentos durante um período de 5 segundos sobre uma base plana móvel de madeira. Também foram extrudadas amostras de 120 segundos, onde a máquina trabalhou livremente durante todo período de coleta, depositando o material sob a mesma região. Filamentos e amostras são apresentados na figura 11.

Após a coleta dos filamentos e amostras, ambos são resfriados até a temperatura ambiente por meio de convecção natural, com exceção apenas para os filamentos e amostras de PCL que foram resfriados com auxílio de um ventilador (convecção forçada), devido a baixa temperatura de fusão do material (em torno de 60°C).

Figura 11 - Filamentos e amostradas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4. Coleta de dados e ensaios

Filamentos e amostras estabilizados a temperatura ambiente, foram coletados dos filamentos de 5 segundos:

- Comprimento (L) com régua metálica ou trena;
- Lados (A e B) da seção transversal quadrática com paquímetro digital;
- Tempo de extrusão com cronômetro digital;
- Temperatura e pressão de extrusão fornecidos pelo painel da extrusora.

As medidas A e B da seção do filamento foram aferidas a cada 20mm de comprimento. Com estes dados foi possível calcular a velocidade de extrusão em mm/s e a média da seção transversal, bem como mensurar a qualidade e regularidade de extrusão avaliando a variação da seção transversal. No caso das amostras de 120 segundos, além de temperatura, pressão e tempo de extrusão, também foram coletados:

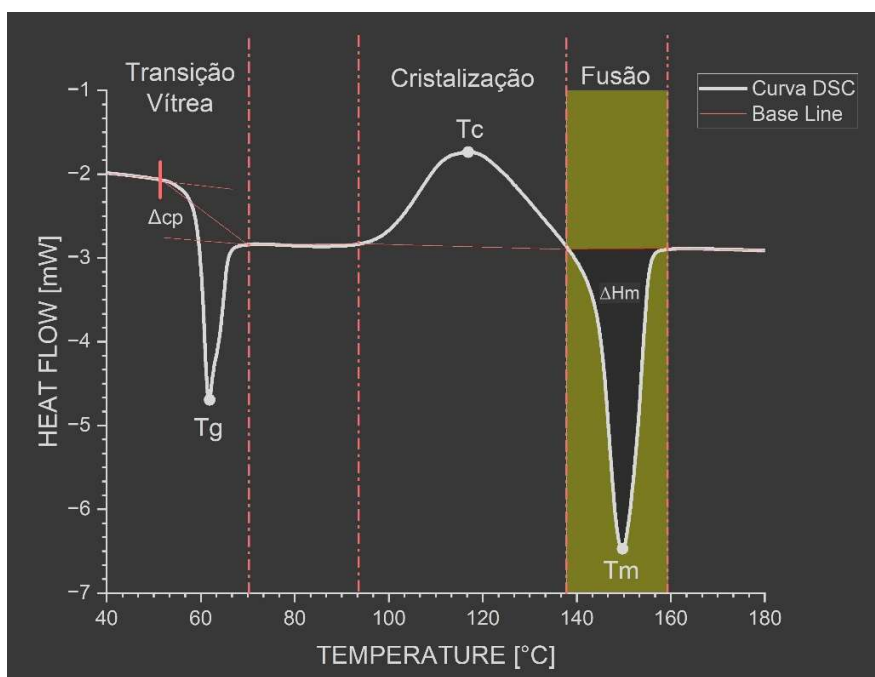
- Peso em gramas com a balança de laboratório;
- Volume em mm³ com auxílio da proveta graduada e seringa;

Para a aferição do volume, foi utilizado a proveta de 1L com resolução de 1ml, e a seringa de 10ml com uma resolução de 0,1ml. Desta forma, as amostras foram depositadas dentro da proveta com água, e o delta da coluna de água foi registrado com auxílio da seringa, retirando água até a graduação mais próxima para alcançar uma precisão maior na medição. Assim, foi possível calcular a densidade em g/mm^3 , a vazão mássica em g/min e a vazão volumétrica em mm^3/min . Toda a coleta, análise de dados e confecção dos gráficos foi realizada por meio do software Microsoft® Excel 2016.

Amostras entre 7 e 7,5 mg foram retiradas dos filamentos e enviadas ao o laboratório CCDM, onde passaram pelo processo de caracterização térmica através de DSC utilizando o instrumento DSC Q2000 V24.11 Build 124. Para o ensaio, foi utilizado um taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ sob atmosfera de nitrogênio. As curvas de fluxo de calor por temperatura foram plotadas por meio do software OriginLab® OriginPro 2024.

As temperatura de fusão (T_m) e temperatura de cristalização (T_c) foram determinadas extraindo os pontos máximo (pico exotérmico) e mínimo (pico endotérmico) das curvas, respectivamente (com eventos exotérmicos para cima). Já para obter a temperatura de transição vítrea (T_g), foi necessário observar a variação da linha de base da curva, onde ocorre um delta no calor específico (c_p), que representa uma mudança de estado do polímero, podendo ocorrer um pico local (depende das características do polímero ensaiado), conforme ASTM D3418. Os pontos descritos podem ser observados na figura 12, uma curva típica do PLA obtida por DSC com eventos exotérmicos orientados para cima.

Figura 12 - Curva típica do PLA obtida por DSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter o grau de cristalinidade (X_c), a abordagem utilizada foi calcular a área do pico de fusão abaixo da linha de base da curva, integrando a curva com os limites encontrados, obtendo ΔH_m em $mW^\circ C$ (área do pico demarcada na figura 11). Com massa das amostras ensaiadas e a taxa de aquecimento setada de $10^\circ C/min$, foi possível calcular a entalpia de fusão ΔH_f em J/g , conforme a equação abaixo, onde q representa a taxa de aquecimento e m a massa:

$$\Delta H_f = \frac{\Delta H_m}{m \cdot q}$$

Desta forma, pode-se aplicar a seguinte equação para obter o grau de cristalinidade do polímero, onde $\Delta H_{f100\%}$ é a entalpia teórica do polímero caso ele fosse 100% cristalino:

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f100\%}} * 100$$

Os valores de $\Delta H_{f100\%}$ foram encontrados na literatura. Para o PLA considerou-se uma entalpia teórica de fusão de $93 J/g$ (HARRIS; LEE, 2008), e PCL de $146 J/g$ (NÚÑEZ et al., 2004). Tal análise é válida somente para o PLA e PCL, já que o ABS é um polímero amorfo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos Filamentos e Amostras

Após a coleta de dados conforme descrito na seção 3.2, estes foram analisados para observar a influência das variáveis do processo de extrusão no material polimérico. Esta seção, tem o objetivo de apresentar os resultados referentes as características do processo e qualidade do filamentos. Também será discutido a relação das variáveis (*inputs*) com os dados observados nos filamentos e amostras (*outputs*).

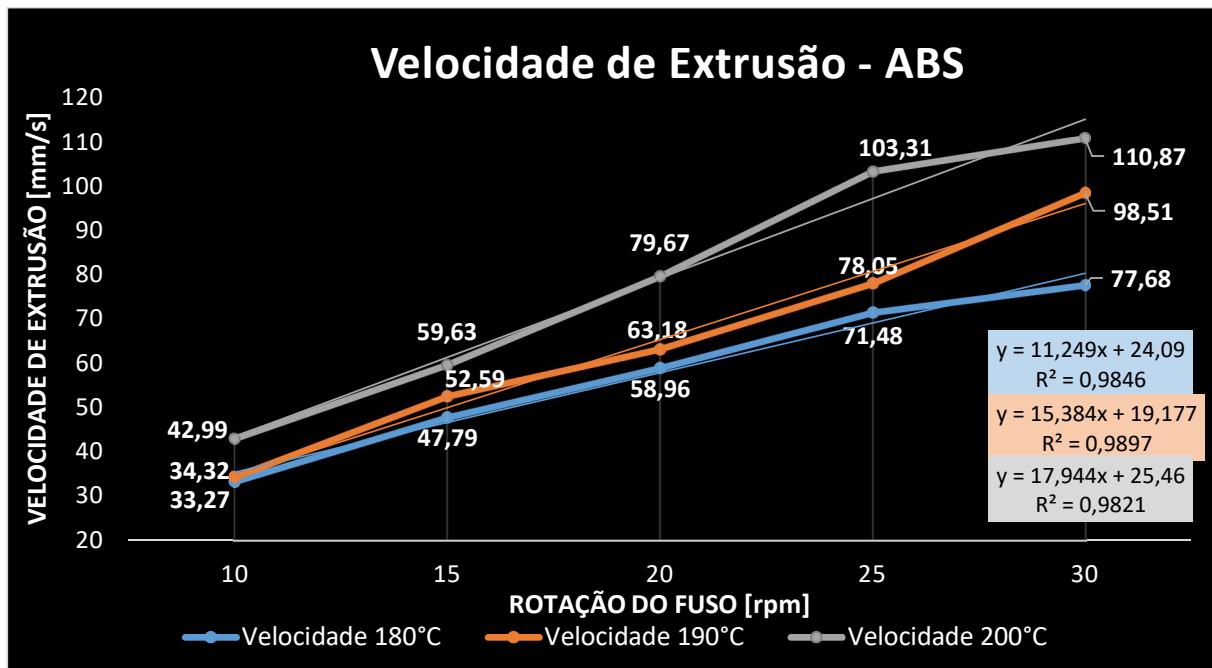
Vale ressaltar, que todas as amostras relativas ao mesmo material foram coletadas no mesmo dia e período com o objetivo de minimizar os efeitos da variação de temperatura ambiente nos resultados. Desta forma, essa variação foi a menor possível para um mesmo material.

Outro ponto relevante é que foram realizadas regressões lineares de alguns dados, a fim de caracterizar o processo, já que em muitos casos as curvas geradas se aproximam de retas, o que é confirmado através dos valores de R^2 também presentes nos gráficos (muito próximos de 1); no entanto, essas retas geradas pela regressão linear não convergem para o ponto $[0,0]$ quando, muitas vezes, faria sentido que para uma rotação de 0 rpm (*input*) o resultado do *output* também seja nulo. Portanto, a análise realizada só é válida para faixa de temperatura e rotação em que as amostras foram coletadas. Todos os dados coletados do processo e parâmetros analisados se encontram no apêndice E.

4.1.1. Velocidade de extrusão

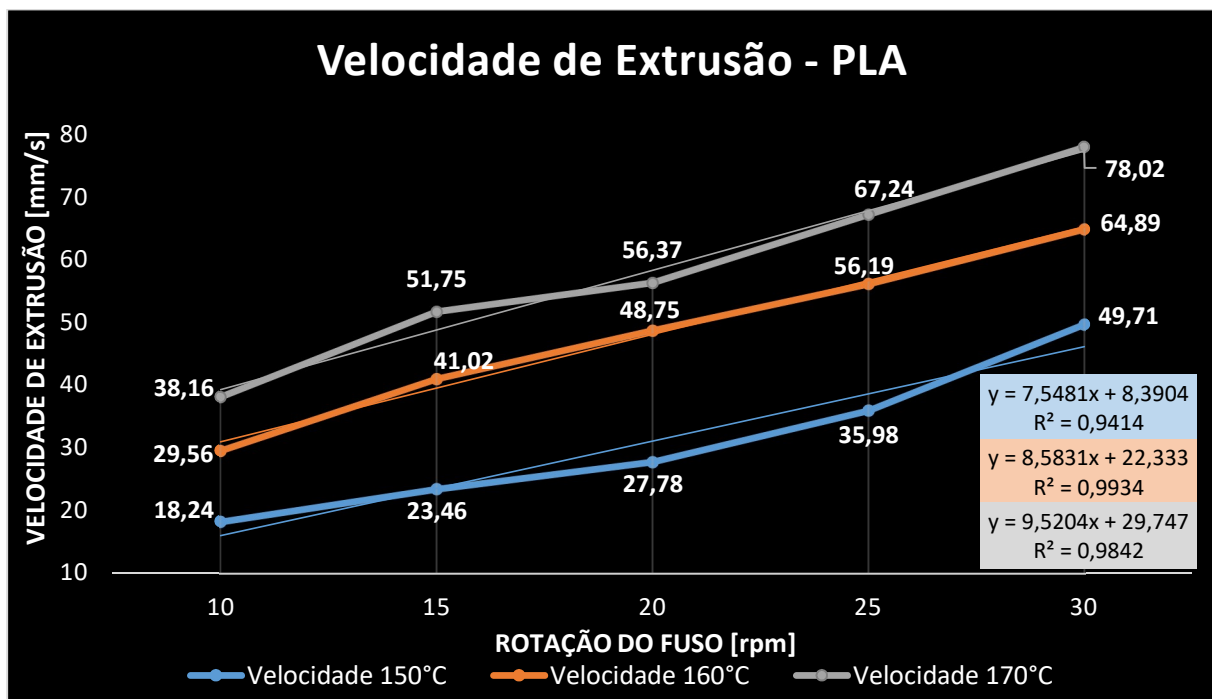
A velocidade de extrusão foi encontrada medindo o comprimento dos filamentos retirados em 5 segundos de extrusão e dividindo este valor encontrado pelo tempo exato de coleta. É nítido que a velocidade de extrusão aumenta linearmente com o aumento da rotação do fuso para os três materiais analisados. Um dado importante foi observar o coeficiente angular da reta, gerada pela regressão linear dos pontos traçados no gráfico de velocidade de extrusão x rotação do fuso. Os resultados se encontram nas figuras 13, 14 e 15.

Figura 13 - Velocidade de Extrusão ABS



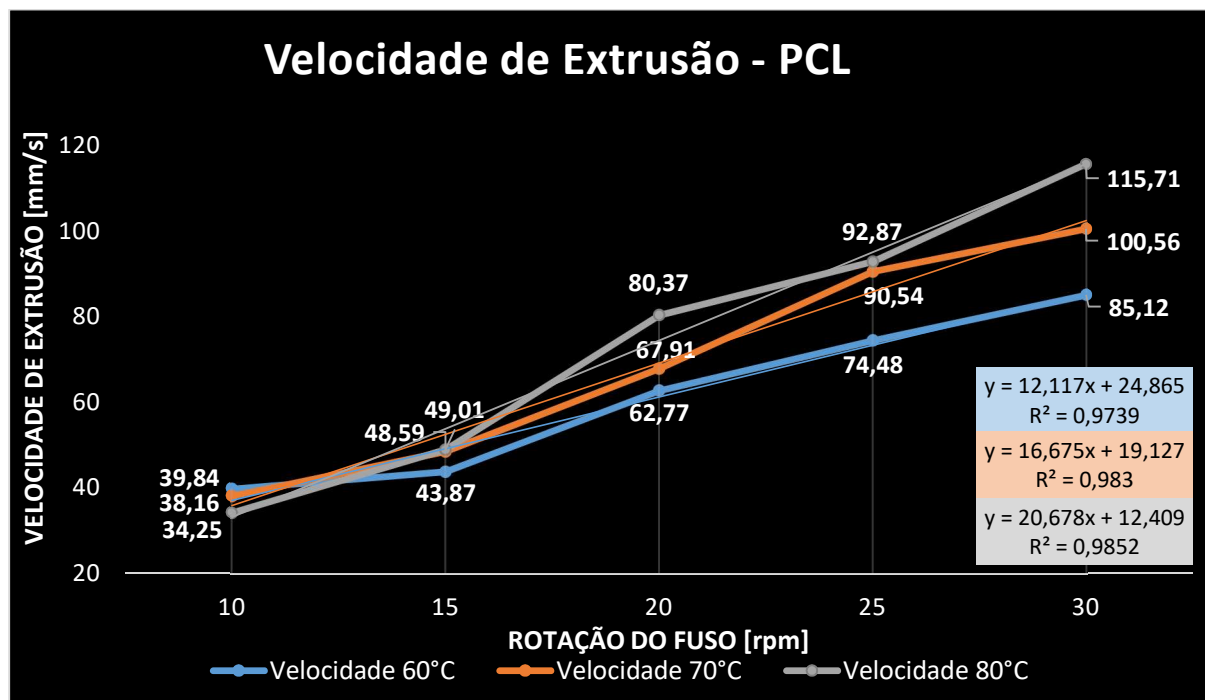
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Velocidade de Extrusão PLA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Velocidade de Extrusão PCL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os três materiais, observou-se que a velocidade de extrusão depende não somente da rotação do fuso (o que já era esperado), mas também da temperatura de extrusão. Maiores temperaturas tendem a resultar em velocidades de extrusão maiores devido a matéria prima estar em temperaturas superiores com menor viscosidade.

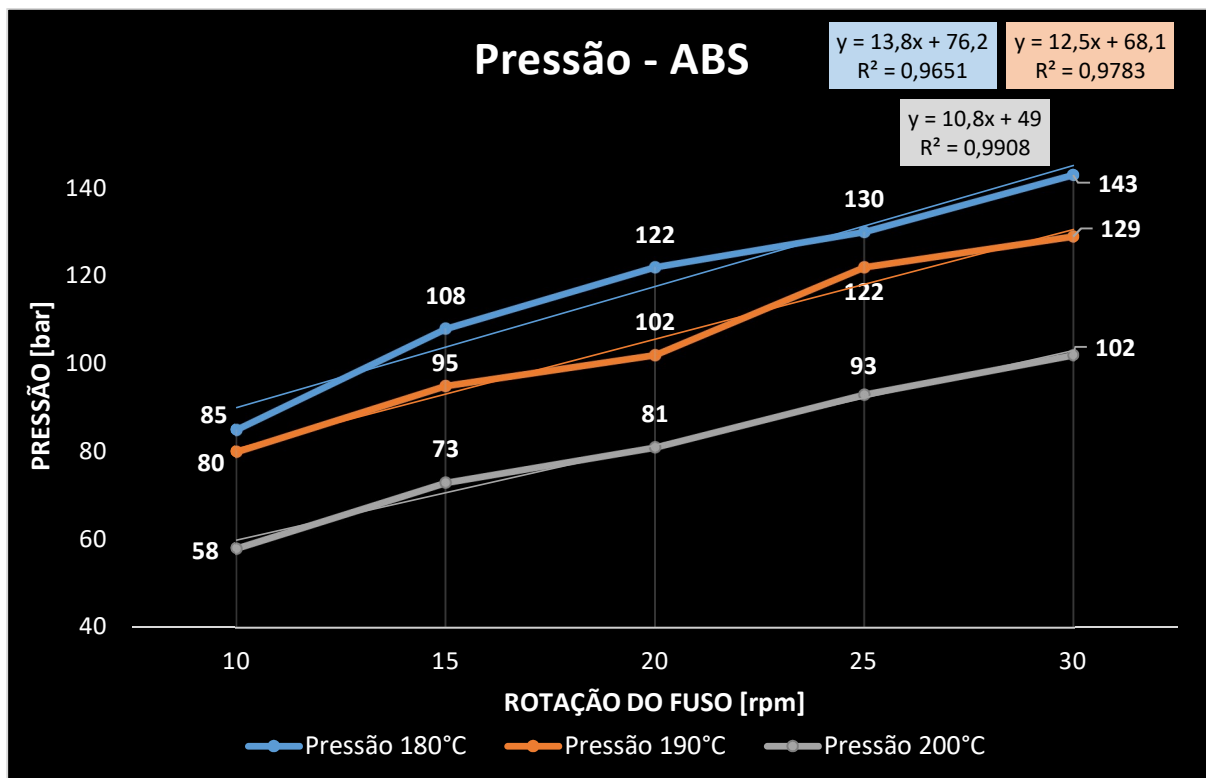
No caso do ABS e PLA, pode-se afirmar que se comportaram de forma semelhante. Quanto maior a temperatura de operação e maior a rotação do fuso, maior será a velocidade de extrusão do filamento. Para o PCL, apesar do comportamento ser similar, em rotações mais baixas, é notável que a temperatura tem pouca influência na velocidade de extrusão. Em contrapartida, para rotações mais altas, a temperatura começa a influenciar mais no comportamento dessa variável.

Ao analisar o coeficiente angular da regressão linear para os três gráficos, é possível afirmar que quanto maior a temperatura, maior é o coeficiente angular da reta. Ou seja, a taxa de variação da velocidade é maior para temperaturas mais altas. Isso faz com que a medida que a temperatura de extrusão aumenta, a rotação do fuso começa a ter cada vez mais influência na velocidade de extrusão. Quanto maior a temperatura, maior o efeito da rotação sob a velocidade de extrusão.

4.1.2. Pressão

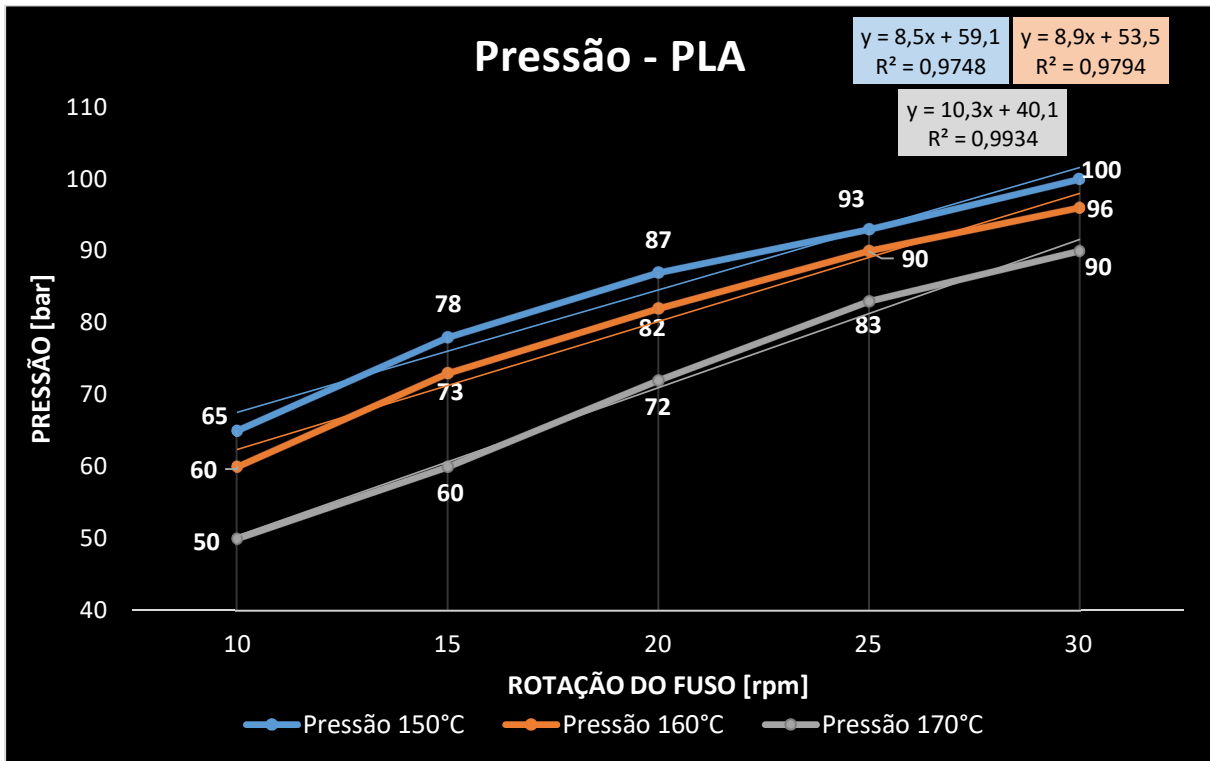
A pressão de operação foi obtida após a extrusora entrar em regime e com o valor do painel estabilizado. Também era esperado que temperaturas mais baixas gerassem pressões de operação maiores, condição que foi comum para o ABS, PLA e PCL. Em temperaturas mais baixas, a matéria-prima se encontra mais viscosa, resultando em pressões maiores para realizar o processo de extrusão. Os resultados podem ser visualizados nas figuras 16, 17 e 18.

Figura 16 - Pressão de extrusão ABS



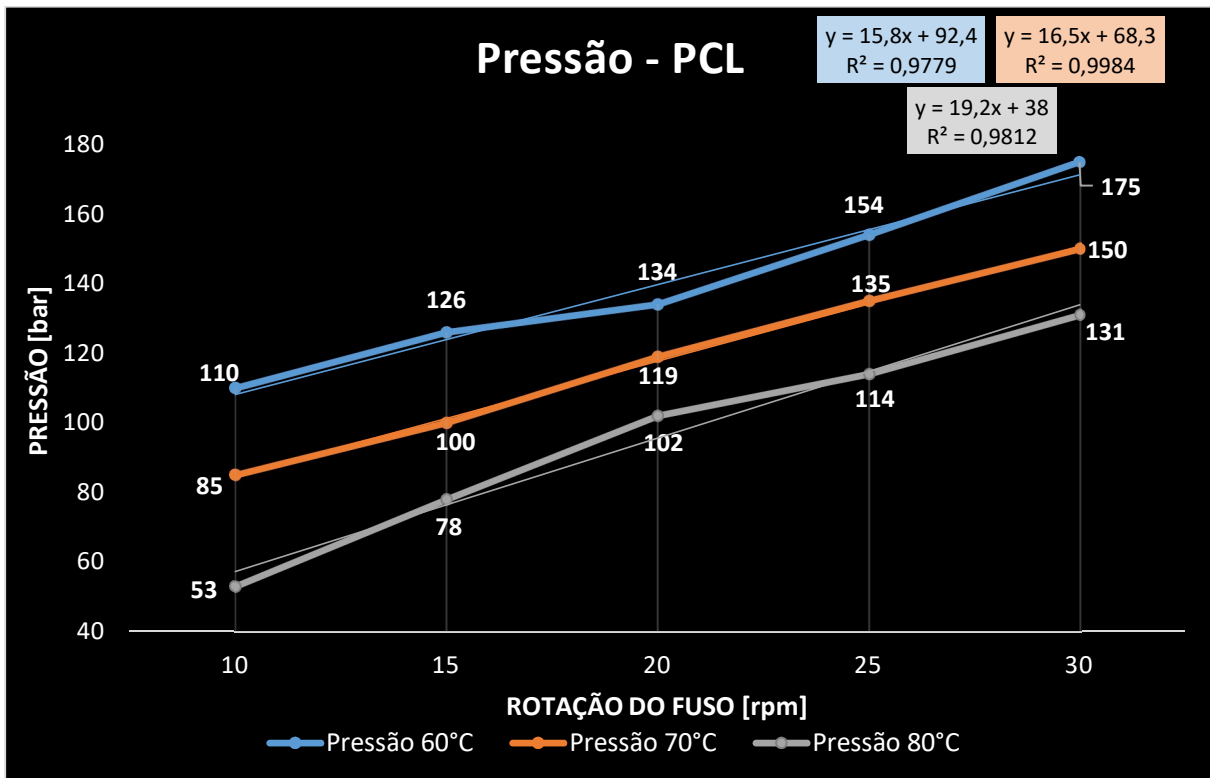
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Pressão de extrusão PLA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Pressão de extrusão PCL



Fonte: Elaborado pelo autor.

A exemplo da velocidade, é possível traçar uma dependência linear da pressão com rotação e temperatura. No caso do ABS (figura 16), quanto maior a temperatura de operação, menor é a pressão de extrusão. Com relação a taxa de variação, ela decai a medida que a temperatura aumenta, ou seja, quanto maior a temperatura de extrusão, menor o efeito da rotação sob a pressão. Para o PLA e PCL observou-se o efeito inverso. Quanto maior a temperatura, maior a taxa de variação da pressão, mostrando que temperaturas de operação maiores, tem maior influência na pressão de extrusão para rotações mais altas.

É importante ressaltar, que nos três materiais, o coeficiente angular variou pouco comparando os resultados de cada faixa de temperatura ensaída. Portanto, pode-se afirmar que a temperatura tem pouca influência na taxa de variação da pressão (coeficiente angular), mas tem grande influência sob o coeficiente linear. Em tese, uma aproximação justa pode ser adotada considerando que para os três materiais, a taxa de variação da pressão é praticamente igual para as três temperaturas ensaidas.

4.1.3. Dimensões da seção transversal

O bocal (matriz de extrusão) utilizado para o estudo possui um bico extrusor com seção quadrática côncava (seção 3.1.3). Portanto, foram gerados filamentos com seção transversal quadrática (figura 9). A seção transversal dos filamentos foram aferidas a cada 20mm de comprimento (desconsiderou-se as extremidades devido a potencial influência do corte do filamento na seção transversal). Assim, foi possível calcular o valor da seção transversal média do lado (L) da seção quadrática. Estes resultados encontram-se nas figuras 19, 20 e 21.

ABS e PLA tiveram comportamentos semelhantes, de forma que quanto maior a temperatura, menor a dimensão da seção transversal. Quanto a taxa de variação gerada pela regressão linear, pode-se considerar que esta permaneceu a mesma para as três faixas de temperatura, da mesma forma que foi observada nos gráficos de pressão. Para o ABS em especial, nota-se que para 200°C, a dimensão da seção transversal cai abruptamente se comparado a 180° e 190°C.

O comportamento da seção transversal de ABS e PLA, pode ser explicado devido a presença do efeito Barus. Indubtavelmente, este efeito é mais presente quando o polímero é extrudado em faixas de temperaturas mais baixas, devido a pressão de operação ser mais elevada, levando a maiores deformações viscoelásticas, e conseqüentemente geram uma recuperação elástica maior no relaxamento das tensões advindas do processo. Desta forma, é possível afirmar que a seção transversal do filamento depende da pressão a qual ele foi extrudado e como a pressão

depende da rotação e temperatura, o mesmo ocorre tanto para a seção transversal quanto para a taxa de variação, que pode ser considerada a mesma nas três faixas de temperatura.

Figura 19 - Seção Transversal Média ABS

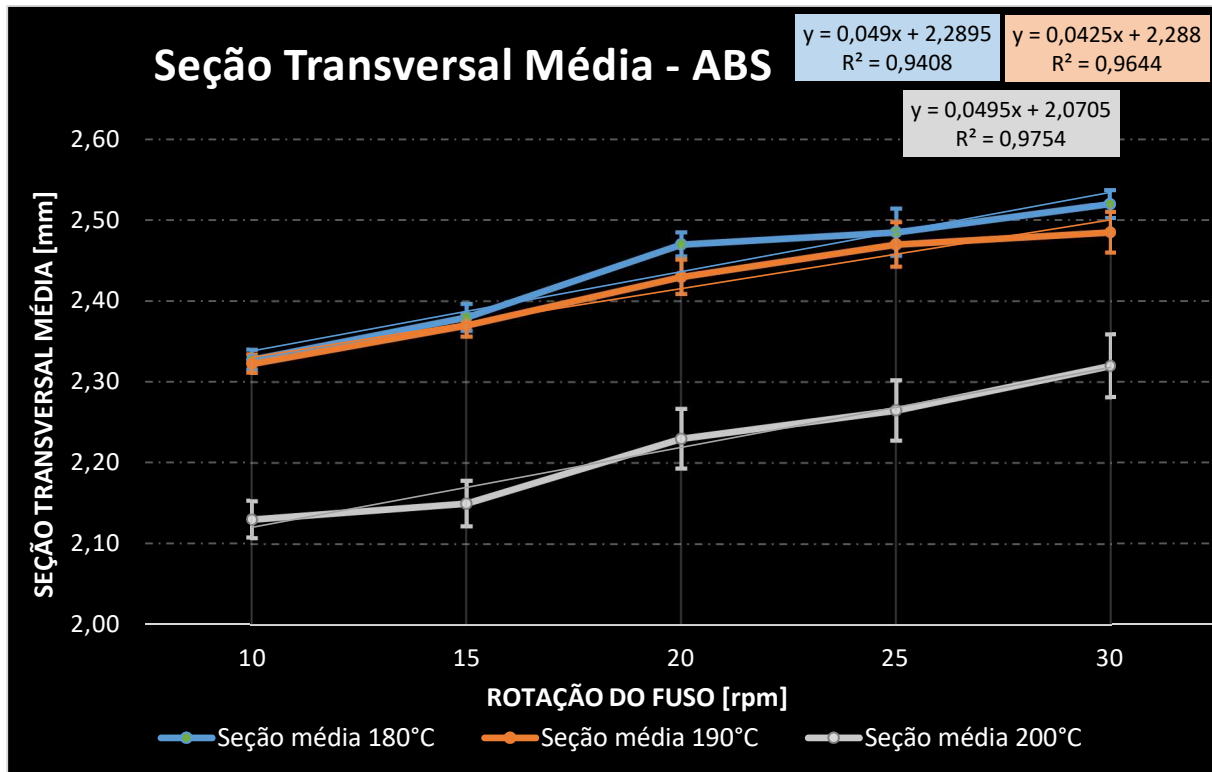


Figura 20 - Seção Transversal Média PLA

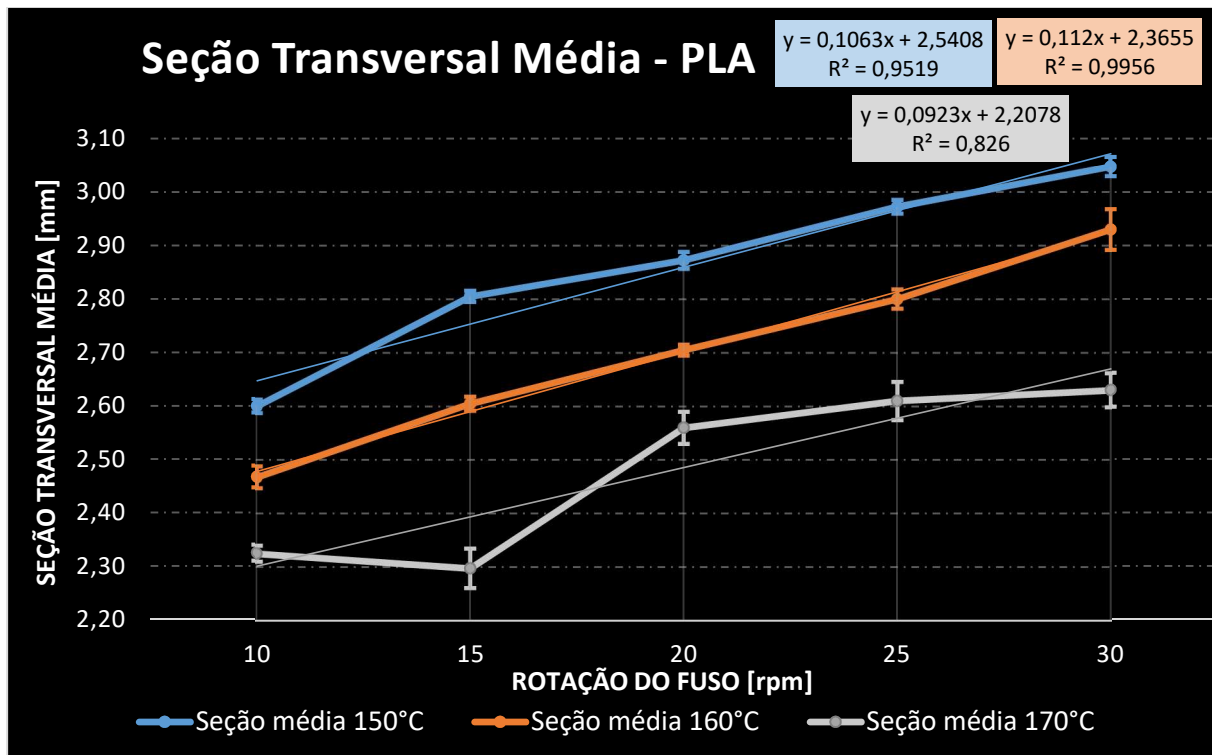
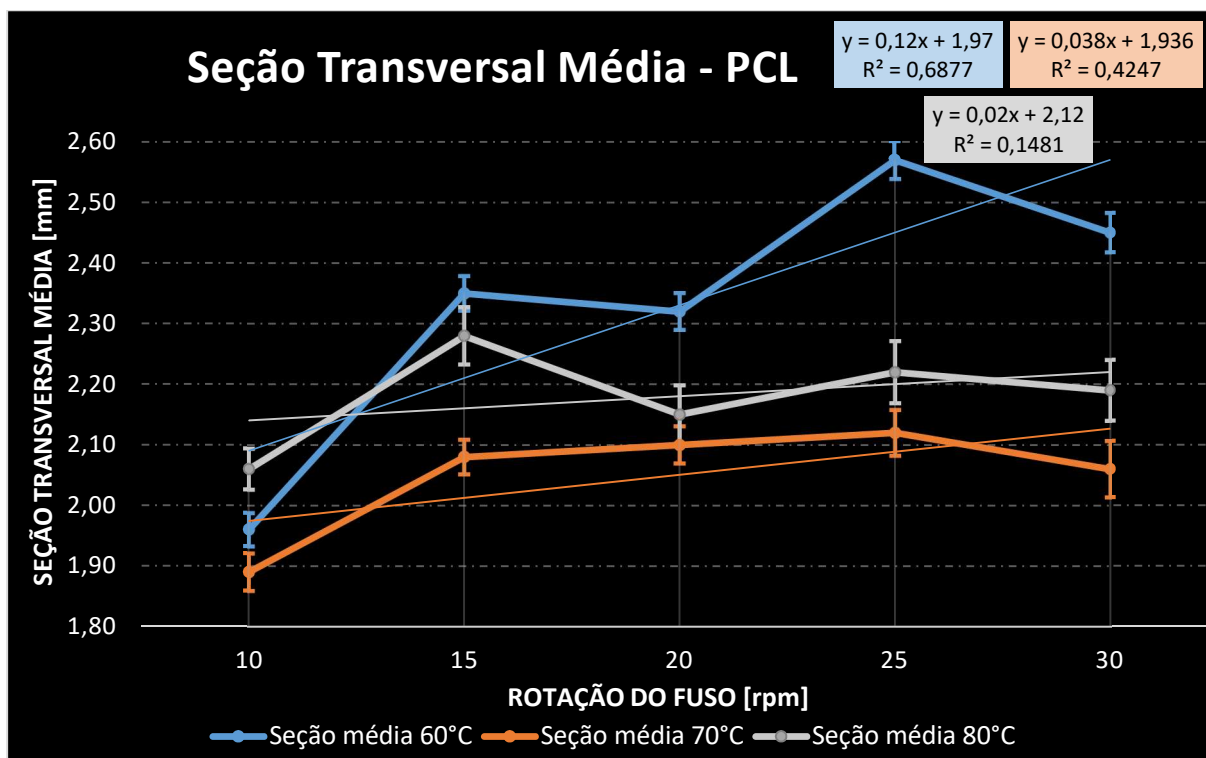


Figura 21 - Seção Transversal Média PCL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro ponto relevante, é que a expansão da seção transversal foi notada com maior relevância no PLA, seguido por ABS e PCL. Isso mostra que a seção transversal é significativamente maior no PLA, para a mesma matriz de extrusão. É extremamente importante que isso seja considerado quando impresso peças com geometrias bem definidas, já que pode afetar as dimensões finais da peça. No caso de grandes peças (LFAM), esse efeito pode ser acumulativo, gerando erros dimensionais ainda maiores. Portanto, cada polímero extrudado deve ser analisado, considerando o efeito Barus de acordo com cada matriz de extrusão, faixa de temperatura e rotação adotados, durante todo processamento. Vale ressaltar que a dilatação térmica do bocal não foi considerada, mas é esperado que esta tenha pouca influência nos resultados de uma faixa de temperatura para outra, já que o ΔT foi de apenas 10°C.

Desta forma, com a confirmação de que o comportamento da seção transversal segue uma função linear no gráfico Rotação x Temperatura, é possível prever sua dimensão para qualquer temperatura e rotação setadas na extrusora no intervalo testado. Assim, é factível que este dado seja considerado durante o processo de extrusão e impressão de grandes componentes, para se obter uma precisão maior após o processamento.

Diferentemente do ABS e PLA, o PCL se comportou de forma diferente (figura 21). Com os dados coletados, foi difícil prever o comportamento da seção transversal do PCL, vide valores de R^2 distantes de 1, o que mostra uma alta variabilidade. Primeiramente, é importante salientar que a seção transversal extrudada do PCL não resultou em uma forma quadrática, e sim circular. Isso se deve a dificuldade de resfriamento das amostras, sendo que desde a extrusão até o filamento atingir a temperatura ambiente, os filamentos sofreram pequenas deformações quando acomodados sob a base móvel de coleta. Como a temperatura de fusão do PCL é baixa se comparada aos outros polímeros, foi utilizado um resfriamento por convecção forçada e mesmo assim não foi suficiente para garantir um resfriamento rápido o bastante para não gerar deformações até que a temperatura ambiente fosse atingida, visto que os filamentos demoravam cerca de 3 a 8 minutos para tal.

Buscou-se alternativas de traçar uma relação entre as medições da seção transversal e a qualidade dimensional dos filamentos, para prever esse comportamento em peças impressas com geometrias bem definidas que exijam uma qualidade superficial e dimensional. Com isso, foram inseridas nos gráficos barras de erro com o desvio padrão dos pontos em que foram realizadas as medições dimensionais da seção transversal. Os resultados do desvio padrão também se encontram na tabela 2.

Tabela 2 - Desvio Padrão da Seção Transversal Média

Desvio Padrão da Seção Transversal Média [mm]									
Rotação [rpm]	Temperatura de Extrusão								
	ABS			PLA			PCL		
	180 °C	190 °C	200 °C	150 °C	160 °C	170 °C	60 °C	70 °C	80 °C
10	0,024	0,022	0,045	0,025	0,041	0,030	0,055	0,062	0,068
15	0,033	0,028	0,057	0,021	0,027	0,074	0,057	0,057	0,068
20	0,030	0,043	0,074	0,032	0,020	0,060	0,061	0,062	0,068
25	0,058	0,055	0,074	0,026	0,036	0,071	0,062	0,075	0,068
30	0,034	0,050	0,077	0,036	0,076	0,063	0,065	0,093	0,068

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que em velocidades mais baixas, a seção transversal transversal se comporta de maneira mais regular e com menor variação (comum para os três materiais). Isso pode ser explicado devido pressões mais baixas de extrusão, que geram uma expansão lateral menor durante o processo de fabricação do filamento (efeito Barus).

Não obstante, é importante observar o efeito da temperatura nos resultados da regressão linear e que quanto maior a temperatura de processamento, maior a variação da seção transversal. Este efeito se deve ao polímero se encontrar em uma fase mais líquida do que em baixas temperaturas, gerando deformações superficiais nos filamentos e, conseqüentemente, no

dimensional das seções. Assim, para uma maior qualidade superficial e dimensional, recomenda-se rotações mais baixas, com temperatura controlada.

4.1.4. Vazão mássica

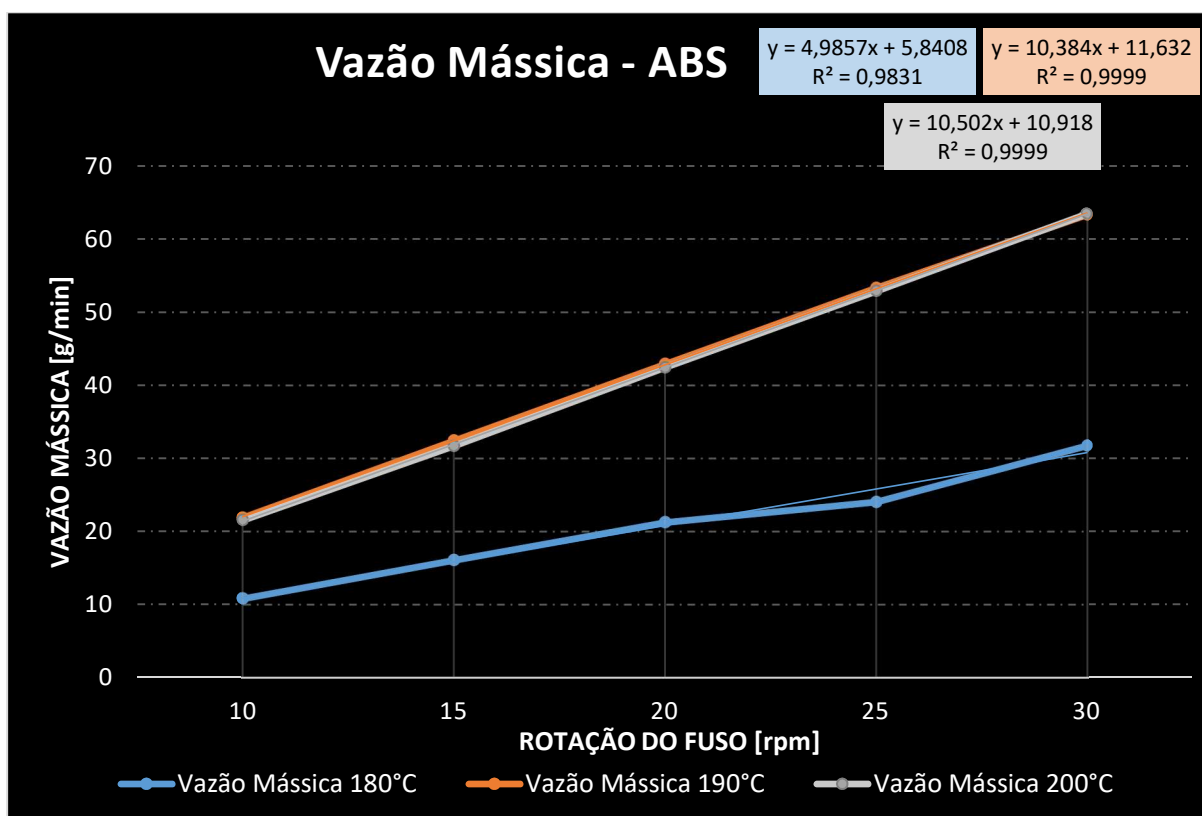
A vazão mássica foi calculada utilizando os dados obtidos a partir da massa das amostras coletadas por 120 segundos. O peso aferido com a balança de laboratório (em gramas) foi dividido pelo tempo exato de coleta. Os resultados apresentados nas figuras 22, 23 e 24 estão em g/min para facilitar a análise gráfica, da mesma forma com a tabela 3.

Tabela 3 - Vazão Mássica

Vazão Mássica [g/min]									
Rotação [rpm]	Temperatura de Extrusão								
	ABS			PLA			PCL		
	180 °C	190 °C	200 °C	150 °C	160 °C	170 °C	60 °C	70 °C	80 °C
10	10,82	10,70	10,80	10,55	13,60	12,48	12,88	11,14	11,26
15	16,08	16,16	15,85	14,61	19,92	20,11	15,61	16,15	16,83
20	21,27	21,44	21,26	17,81	24,95	26,02	20,87	21,52	20,28
25	24,05	26,63	26,10	22,33	31,02	31,51	27,06	25,53	26,98
30	31,77	31,58	31,69	26,42	35,25	37,83	33,89	32,32	33,42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Vazão Mássica ABS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Vazão Mássica PLA

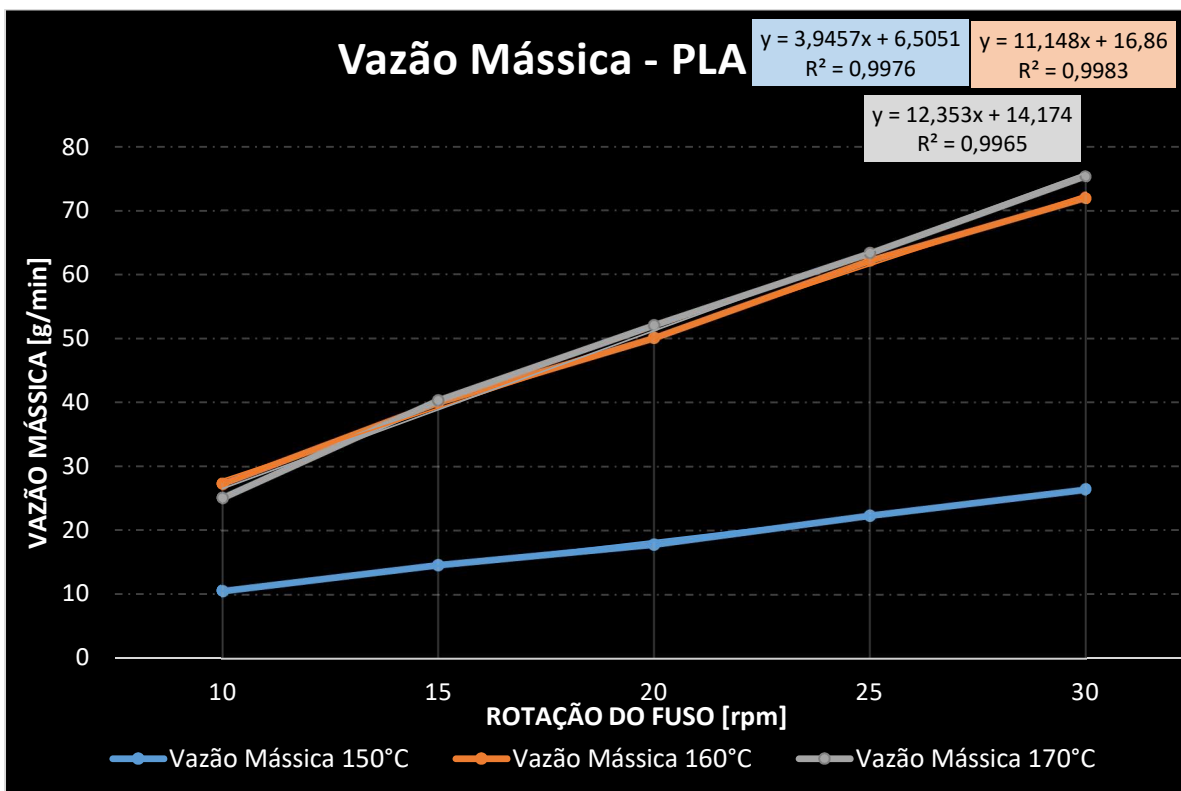
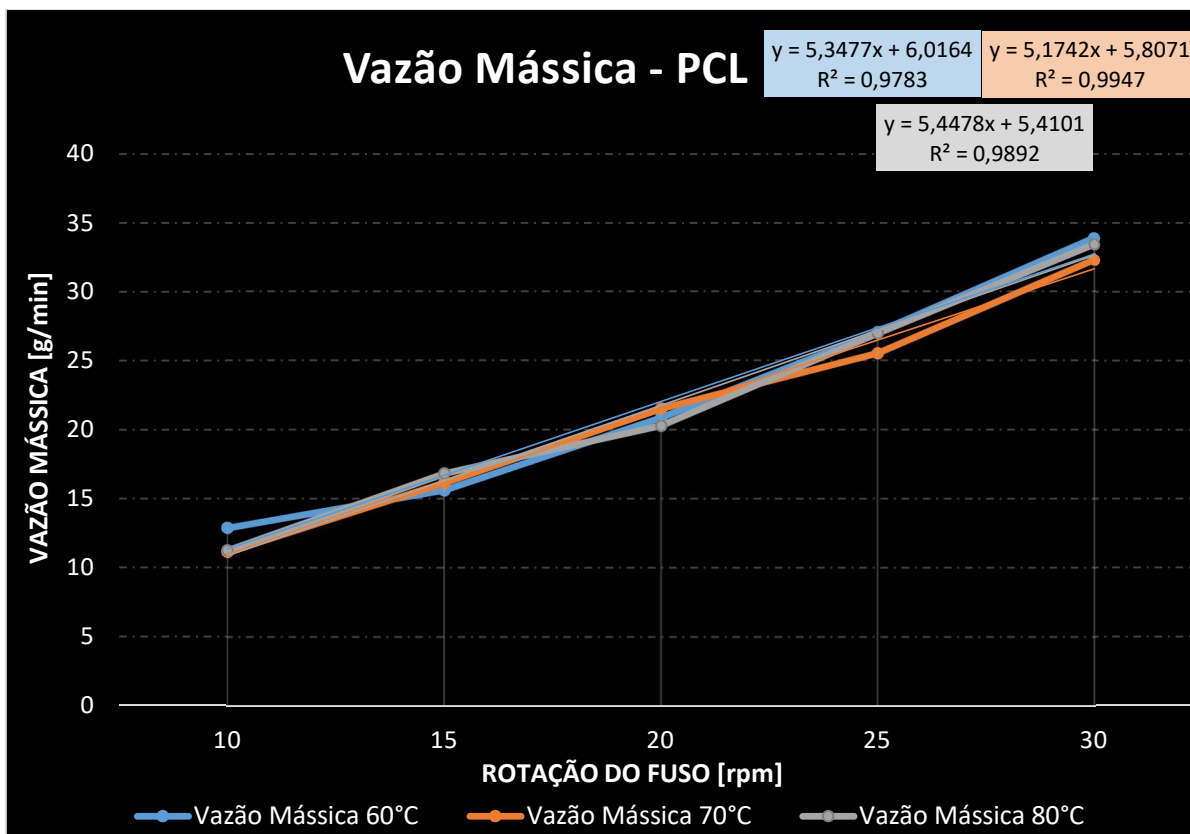


Figura 24 - Vazão Mássica PCL



Novamente, os resultados do ABS e PLA se aproximam. Exceto em baixas temperaturas, os resultados da vazão mássica praticamente se sobrepõe para ambos materiais. Para altas temperaturas, essa sobreposição das retas pode ser explicada devido a diferença da geometria da seção transversal (seção 4.1.3) e da velocidade de extrusão (seção 4.1.1).

Quando observado a velocidade de extrusão, nota-se que quanto mais baixa a temperatura, menor é a velocidade de extrusão, ou seja, durante um mesmo espaço de tempo são produzidos filamentos de menor comprimento. No entanto, observa-se pressões maiores, que resultam em uma maior expansão da seção transversal e, conseqüentemente, filamentos quadráticos com lado maior.

Esses fenômenos aparentemente são balanceados, de forma que a vazão mássica seja a mesma, independentemente da temperatura (para as temperaturas intermediárias e maiores do ABS e PLA, desconsiderando a faixa inferior). Isto é, a massa de polímero extrudada pela máquina é a mesma, porém, em baixas temperaturas resultam em filamento mais largos e em altas temperaturas, em filamento mais compridos.

Para o PCL, pode-se considerar uma sobreposição completa, de modo que mesmo em baixas temperaturas o efeito Barus vs. a velocidade de extrusão, são contrabalanceadas resultando em uma curva de vazão mássica semelhante para todas as faixas de temperatura.

4.1.5. Vazão volumétrica

Para a vazão volumétrica, foram considerados o volume aferido com auxílio da proveta e seringa submergindo as amostras em água, bem como o tempo de extrusão das amostras de 120s. Observando os resultados na tabela 4 e figuras 25, 26 e 27, pode-se afirmar que conforme aumenta-se a velocidade de operação, o gráfico segue muito próximo de uma função linear. Neste cenário, também foi incluído uma regressão linear, a fim de se esboçar esse comportamento para outras velocidades entre 10 e 30 rpm não-ensaiadas.

Tabela 4 - Vazão Volumétrica

Vazão Volumétrica [cm ³ /min]									
Rotação [rpm]	Temperatura de Extrusão								
	ABS			PLA			PCL		
	180 °C	190°C	200°C	150 °C	160°C	170°C	60 °C	70°C	80°C
10	12,26	10,51	11,57	9,40	11,55	10,30	11,43	9,15	9,58
15	17,56	15,59	16,94	12,89	16,98	16,55	14,03	13,34	14,40
20	23,85	21,39	23,14	15,61	21,02	21,29	18,53	17,69	17,31
25	27,32	26,51	27,83	19,87	26,54	26,03	24,27	21,00	23,13
30	35,05	31,55	34,54	23,30	29,97	31,07	30,53	26,89	28,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Vazão Volumétrica ABS

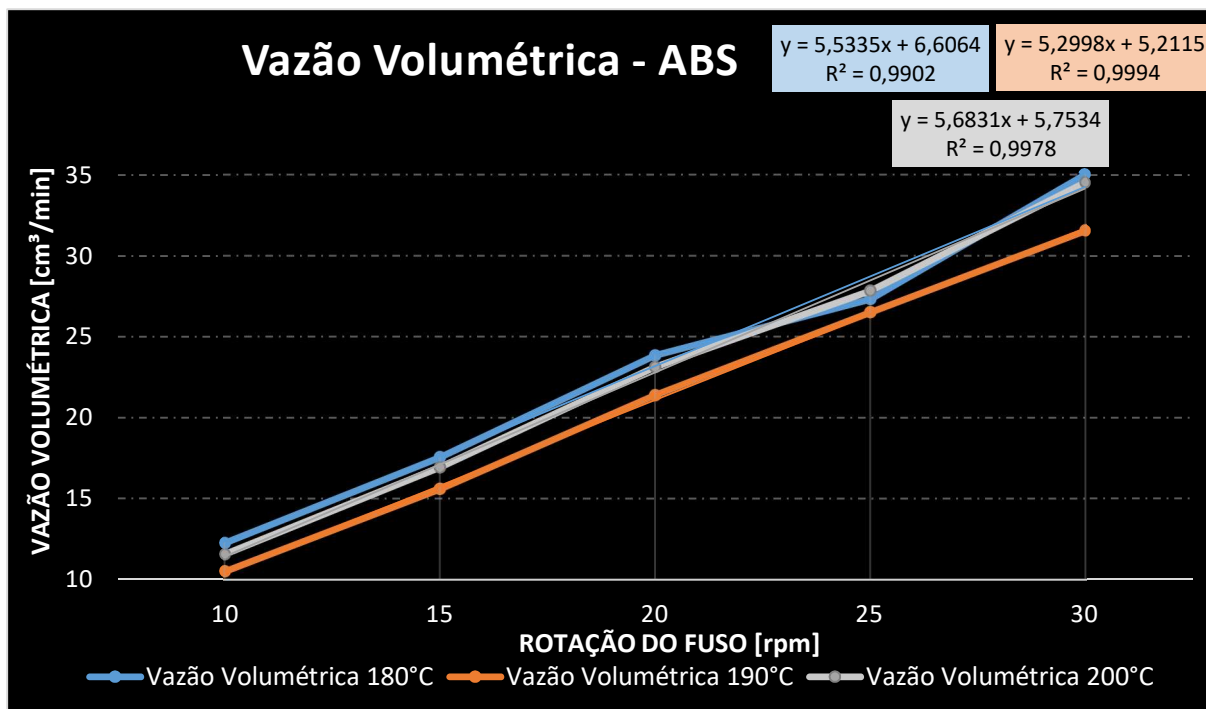


Figura 26 - Vazão Volumétrica PLA

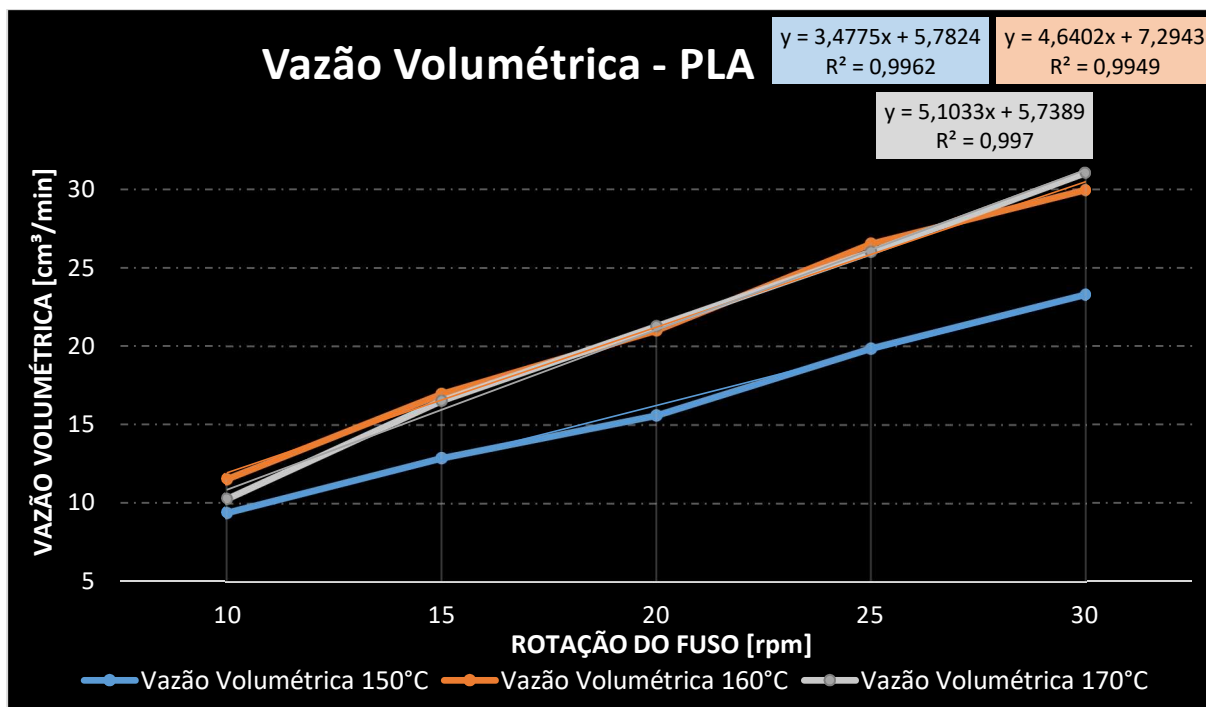
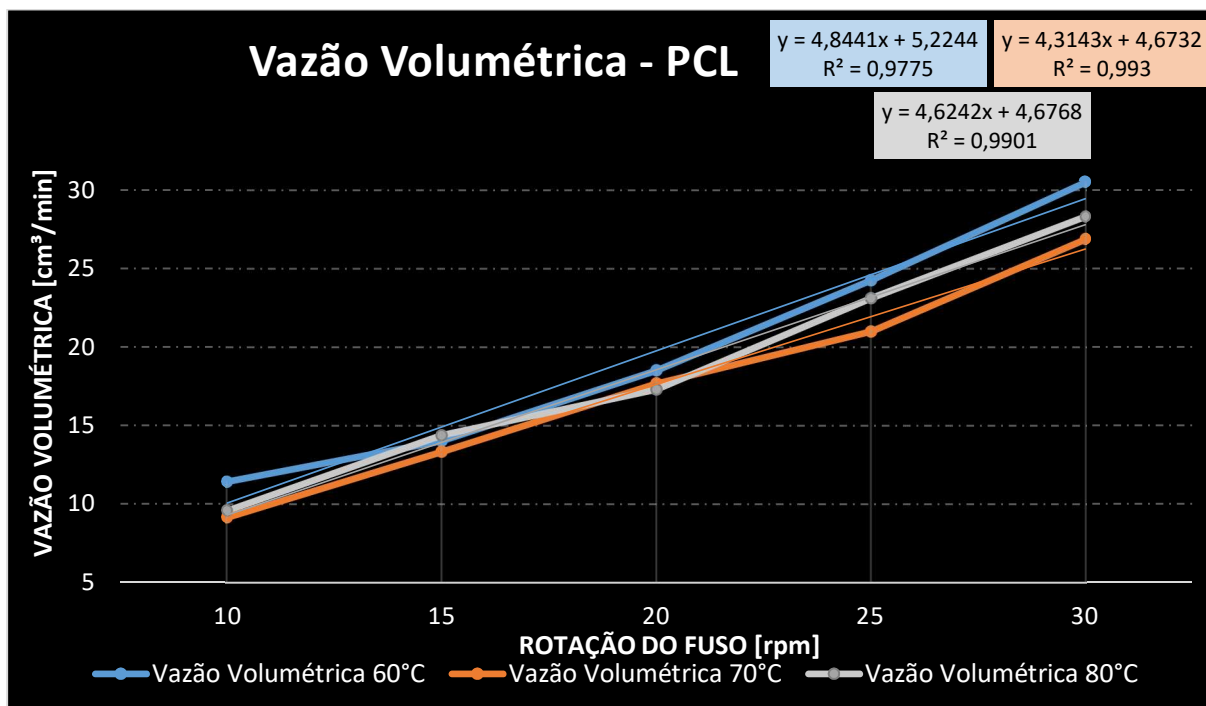


Figura 27 - Vazão Volumétrica PCL



Analisando os gráficos e os dados coletado presentes na tabela 4, fica nítido uma aproximação entre as retas e os pontos dos 3 materiais testados. Esta aproximação pode representar que para esta faixa de temperatura e rotação, a vazão volumétrica não depende da temperatura de extrusão, apenas da velocidade que a máquina foi setada.

Comparando com os resultados obtidos na seção anterior referentes a vazão mássica, fica evidente que a diferença de comportamento entre massa e volume representa também uma diferença na densidade das amostras. Para a vazão mássica, temperaturas de operação mais baixas resultaram em vazões menores, já a volumétrica, teve um comportamento muito semelhante nas 3 faixas de temperatura.

A única condição observada que não teve o comportamento citado anteriormente, foi para o PLA extrudado a 150°C, que teve valores de vazão volumétrica abaixo das outras faixas de temperatura. Uma possível causa é que talvez a temperatura de 150°C seja muito baixa para realizar o processo de extrusão do PLA e, desta forma, o material não atingiu a temperatura adequada para correta fusão dos *pellets* a fim de realizar o processo de extrusão corretamente, resultando em uma vazão volumétrica menor que nas outras faixas de temperatura ensaiadas.

4.1.6. Densidade

A densidade foi calculada com os valores obtidos da pesagem das amostras de 120s e também do volume aferido. Para os 3 materiais ensaiados, houve pouca variação da densidade

entre cada faixa de rotação. Como ilustrado nas figuras 28, 29 e 30, as retas de cada faixa de temperatura podem ser aproximadas à uma reta constante. Desta forma, fica claro a grande influência da temperatura de operação para a densidade do extrudado, assim como a pouca influência da velocidade. Com esta aproximação para valores constantes de densidade para cada temperatura testada, foi calculada a densidade média para cada temperatura e o resultado se encontra na tabela 5.

Tabela 5 - Densidade Média de cada Temperatura

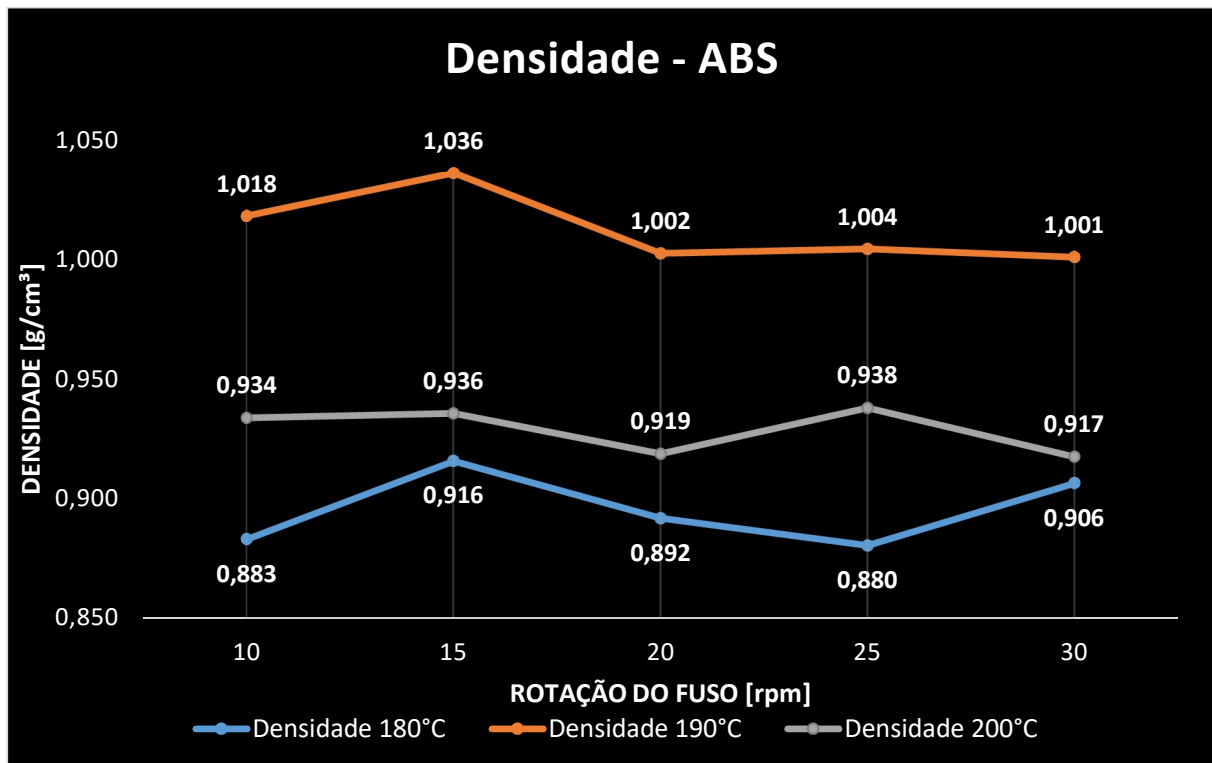
Densidade Média [g/cm ³]								
ABS			PLA			PCL		
180 °C	190 °C	200 °C	150 °C	160 °C	170 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0,895	1,012	0,929	1,131	1,176	1,215	1,118	1,212	1,172

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ABS (figura 27), os valores de densidade se aproximaram e até ficaram inferiores da densidade da água de 1,0 g/cm³. Este fato foi notado durante a aferição do volume, já que algumas amostras não ficaram submersas sem auxílio de um lastro (que teve seu volume descontado da medição). A faixa de temperatura que atingiu a maior densidade foi 190°C, seguida de 200°C e por fim, 180°C.

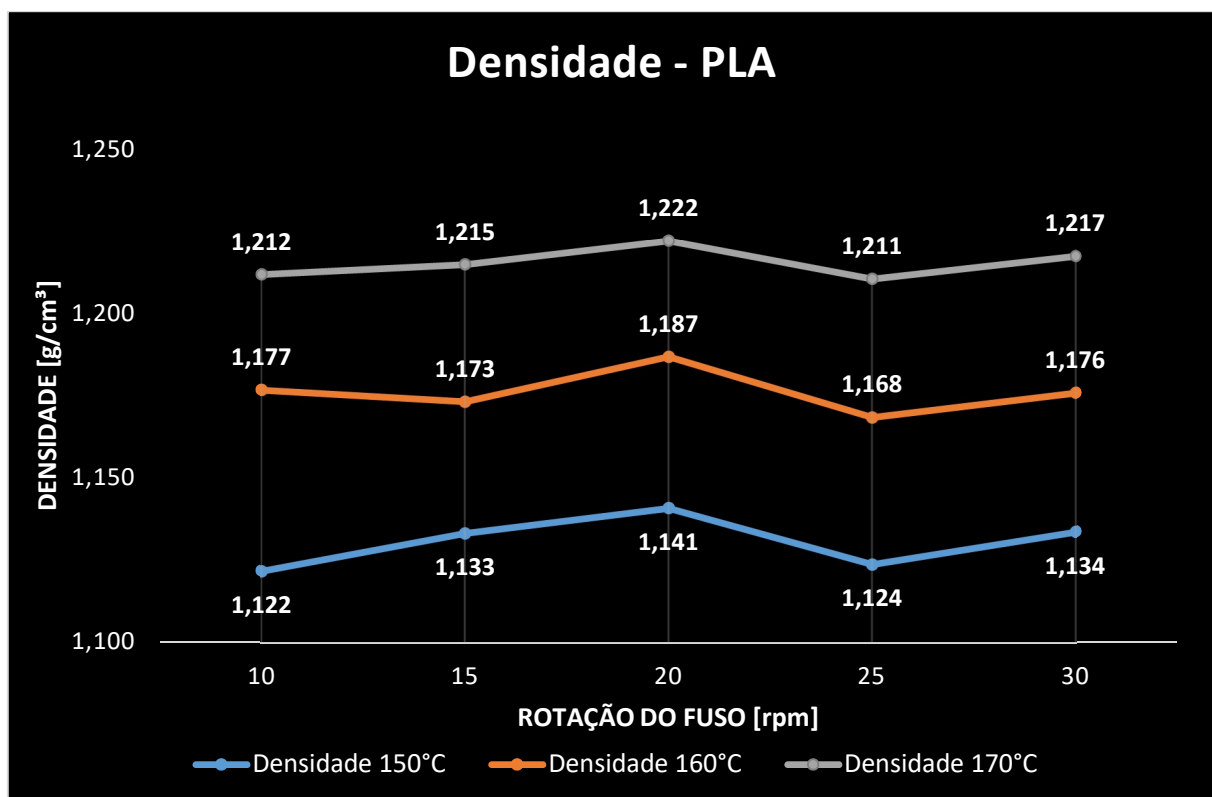
A menor temperatura testada registrou a densidade mais baixa, reforçando que esta faixa de temperatura não foi suficiente para que o material se fundisse corretamente, gerando vazios no extrudado. Já no caso da temperatura mais alta aconteceu o oposto. A temperatura excessiva fez com que surgissem pequenas bolhas em alguns pontos do filamento, que pode ser um indicativo de degradação do material, influenciando também nessa baixa densidade. Desta forma, fica claro que em termos da densidade a temperatura de extrusão mais adequada é a de 190°C, que conforme indicado na tabela 5, registrou a densidade média de 1,012 g/cm³, valor que também se aproxima muito do que foi informado pelo fabricante da matéria-prima de 1,04 g/cm³ (dados contidos na seção 3.1.1).

Figura 28 - Densidade ABS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Densidade PLA

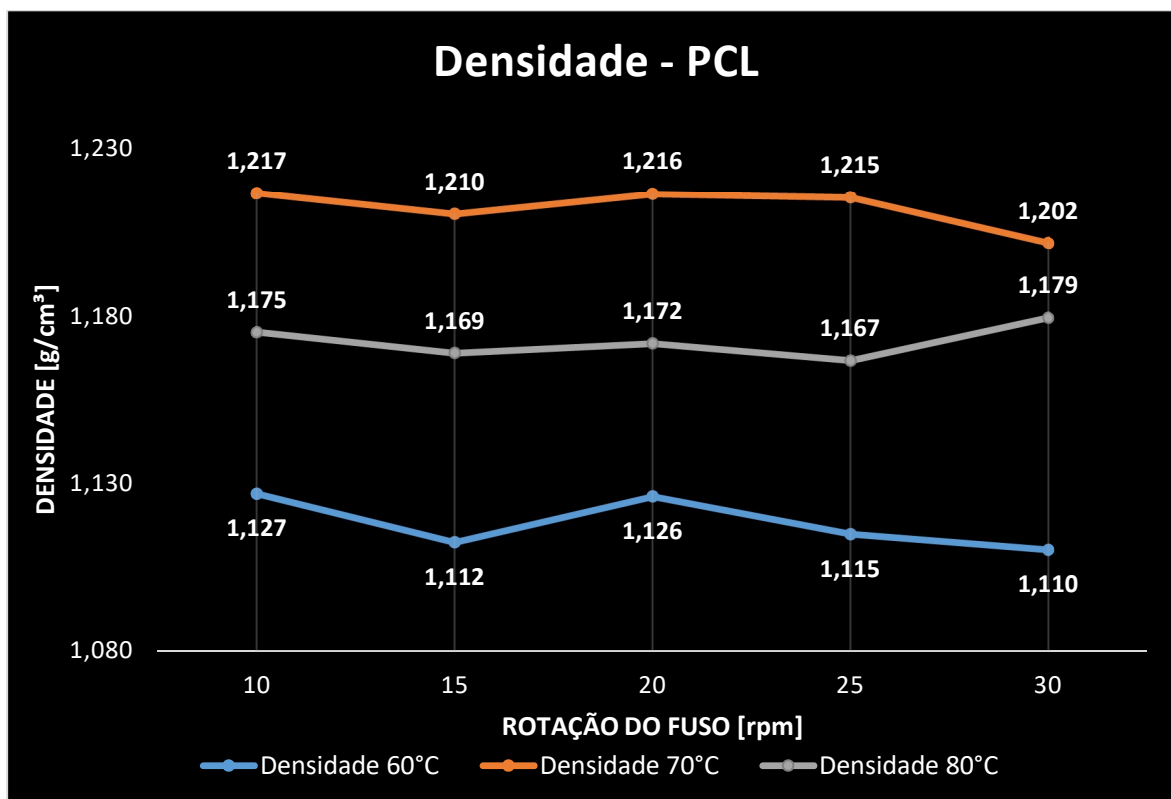


Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do PLA (figura 29), os valores de densidade foram maiores nas faixas de temperatura mais elevadas. Da mesma forma que foi citado para o ABS, nas temperaturas mais

baixas em que o PLA foi testado (150°C e 160°C) pode ser que o polímero não tenha se fundido por completo. Já em 170°C, foi registrado uma densidade média de 1,215 g/cm³, que também é muito próxima do informado pelo fabricante de 1,24 g/cm³. Assim, a temperatura de processamento de 170°C é a mais indicada para se obter extrudados de PLA mais densos.

Figura 30 - Densidade PCL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o PCL se comportou de forma muito semelhante ao ABS, como ilustrado na figura 30. Na temperatura intermediária de 70°C teve sua densidade média mais alta, registrando 1,212 g/cm³, e este valor de densidade foi superior ao informado pelo fabricante de 1,14 g/cm³. É importante salientar que apesar do PCL alcançar sua maior densidade sendo processado a 70° e 80°C, estas faixas de temperatura resultaram em um extrudado mais líquido, ou seja, filamentos com geometrias mais irregulares e que necessitam de um resfriamento mais rápido.

A temperatura que mais se aproximou da densidade informada pelo fabricante foi a de 60°C. Esta temperatura foi a que gerou filamentos com geometrias mais regulares, de solidificação mais rápida, mas exigiu um grande esforço do maquinário com pressões de operação muito elevadas. Além disso, apesar de registrar uma densidade próxima ao informado pelo fabricante, foi a menor encontrada levando em consideração as 3 faixas de temperatura testadas.

4.2. Propriedades Térmicas dos Polímeros

As propriedades térmicas dos polímeros foram coletadas por meio da análise das curvas provenientes do ensaio de DSC. Conforme ASTM E3418, durante cada ensaio as amostras sofreram dois processos de aquecimento e um de resfriamento, gerando assim 3 curvas por amostra. Como o objetivo do estudo é avaliar os impactos do processamento nas propriedades dos polímeros, foram plotadas apenas a primeira curva de aquecimento de cada ensaio, já que após esse processo, as propriedades podem ser alteradas impactando os resultados do processo de resfriamento, assim como na segunda curva de aquecimento.

Desta forma, o ensaio foi realizado com as amostras da menor e maior temperatura, combinando com a menor e maior rotação de cada polímero, conforme mostrado na tabela 6.

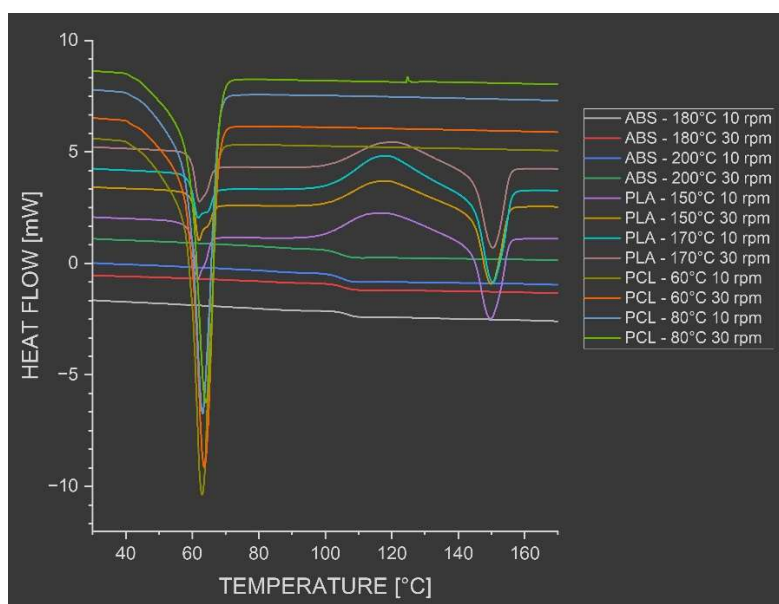
Tabela 6 - Amostras ensaiadas no DSC

Amostras DSC					
ABS	180°C 10 rpm	PLA	150°C 10 rpm	PCL	60°C 10 rpm
	180°C 30 rpm		150°C 30 rpm		60°C 30 rpm
	200°C 10 rpm		170°C 10 rpm		80°C 10 rpm
	200°C 30 rpm		170°C 30 rpm		80°C 30 rpm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 31 é possível visualizar a diferença de comportamento da curva (eventos exotérmicos para cima) de cada polímero quando submetido ao aquecimento, onde para facilitar a visualização, foi adicionado um deslocamento constante no eixo Y (fluxo de calor), de modo que as curvas ficassem mais espaçadas. É importante ressaltar que essas técnicas também foram utilizadas em todos os DSC plotados.

Figura 31 - Curvas DSC plotadas dos polímeros

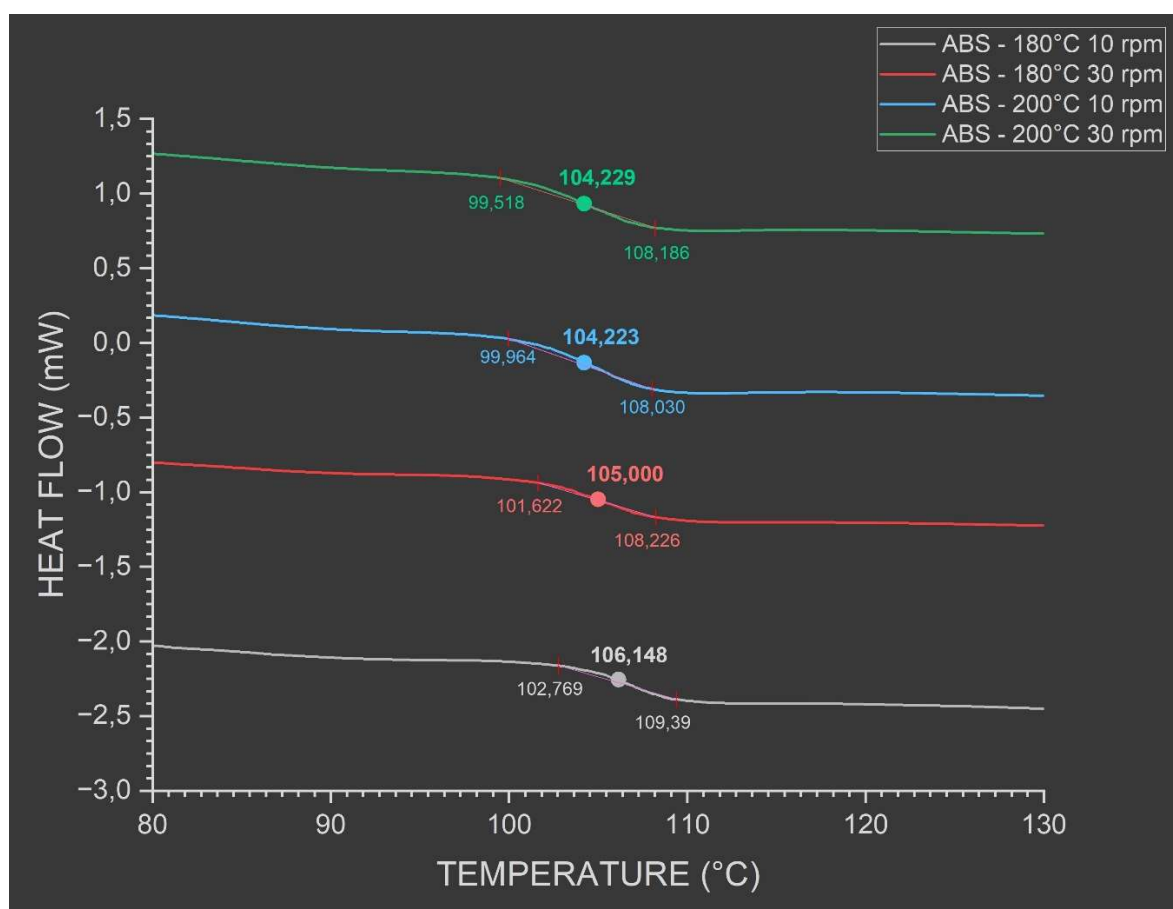


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1. ABS

Como o ABS se trata de um polímero amorfo, ou seja, não é cristalino, a análise de DSC deve ser feita apenas na região em que ocorre a transição vítrea. Para obter a temperatura de transição vítrea do ABS, foi necessário observar o ponto de inflexão da curva, onde ocorre um desvio que representa um delta do calor específico do polímero. A temperatura de início e fim desse desvio foram demarcadas, e a temperatura de transição vítrea foi tomada no ponto central da curva, conforme ilustrado na figura 32.

Figura 32 - Curvas da análise de DSC ABS



Fonte: Elaborado pelo autor.

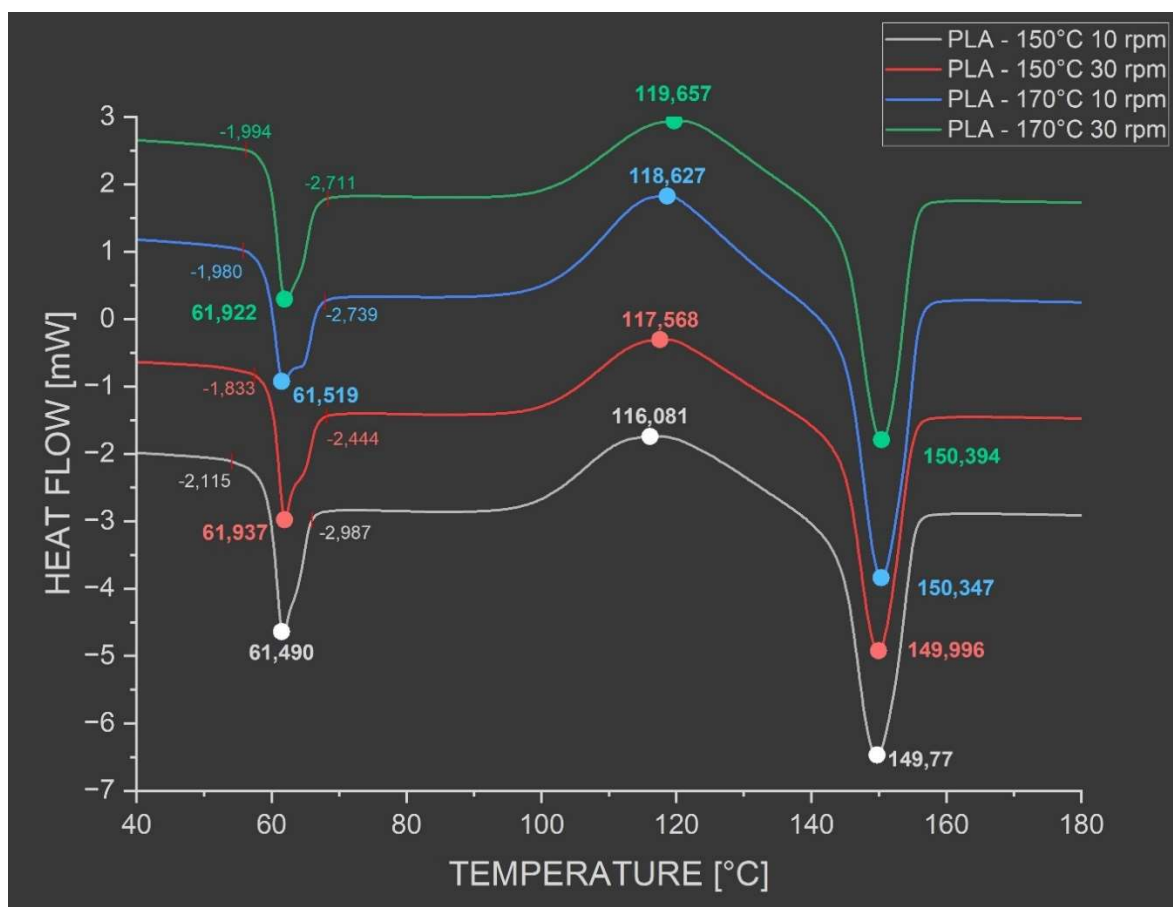
Observou-se que as amostras coletadas a 200°C alcançaram a mesma temperatura de transição vítrea de 104,22°C, que foi abaixo das encontradas nas amostras de 180°C. Essa queda na temperatura de transição vítrea representa uma possível degradação do material coletado a 200°C e que nesta temperatura a rotação não deve influenciar na Tg do ABS. Já em 180°C, a amostra coletada na rotação mais baixa de 10 rpm alcançou a maior temperatura de transição vítrea de 106,15°C, mais de 1°C a mais que a 30 rpm. Assim, pode-se afirmar que a temperatura de operação mais baixa, teve uma maior influência da rotação na Tg do ABS.

Espera-se que ensaios com as amostras coletadas a 190°C tivessem um desempenho entre as amostras de 180°C e 200°C, ou até mesmo bem similar às amostras de 180°C, já que em outros parâmetros analisados como o aspecto físico do filamento e densidade das amostras, essa temperatura de operação não degradou o material e obteve bons resultados.

4.2.2. PLA

Diferentemente do ABS, o PLA trata-se de um polímero semicristalino e então sua curva proveniente do ensaio de DSC possui uma característica distinta. Desta forma, a curva de DSC do PLA possui mais fases, possibilitando uma análise mais completa. Primeiramente, ocorre a transição vítrea do material e esta foi identificada de forma análoga ao ABS, em contrapartida no caso do PLA, observa-se um pico justamente no ponto médio do ΔC_p , onde encontra-se a temperatura de transição vítrea (T_g), conforme ilustrado na figura 33. Comparando a T_g do PLA a 150°C a 10 rpm e 170°C a 10 rpm, observou-se que a temperatura de extrusão pouco influencia nos resultados (da mesma forma que 150°C a 30 rpm e 170°C a 30 rpm). Sobre a influência da rotação, nota-se uma diferença de aproximadamente 0,4°C comparando os resultados de 10 e 30 rpm de cada temperatura ensaída.

Figura 33 - Curvas da análise de DSC PLA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela curva de DSC também foi possível identificar as temperaturas de cristalização e de fusão das amostras. Foi observado um aumento na temperatura de cristalização com temperatura de extrusão e rotação maiores, e assim, a maior temperatura de cristalização observada foi com a amostra extrudada a 170°C e 30 rpm. Já analisando a T_m, a rotação teve pouca influência, visto que as amostras de 10 e 30 rpm registraram valores muito próximos. Mesmo a temperatura de operação também não teve grande influência, pois a diferença entre as amostras de 150°C e 170°C foi de aproximadamente 0,5°C, ficando em torno de 150°C conforme o resultados apresentados na tabela 7.

Comparando esses resultados com as propriedades informadas pelo fabricante contidos no anexo C, nota-se que a temperatura de fusão ficou dentro do intervalo esperado, entre 145-160°C. Já a temperatura de transição vítrea ficou ligeiramente acima do informado pelo fabricante que foi entre 55-60°C.

Tabela 7 - Propriedades Térmicas do PLA

Propriedades Térmicas							
Polímero	Condição de Processo	T _g [°C]	T _c [°C]	T _m [°C]	ΔH _m [mW°C]	Peso [mg]	X _c [%]
PLA	150°C 10 rpm	61,490	116,081	149,770	28,404	7,55	24,27
	150°C 30 rpm	61,937	117,568	149,996	25,630	7,25	22,81
	170°C 10 rpm	61,519	118,627	150,347	31,770	7,61	26,93
	170°C 30 rpm	61,922	119,657	150,394	26,260	7,21	23,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando-se do método descrito na seção 3.2.4, foi traçada uma linha de base na curva do DSC, com o objetivo de calcular a área do pico de fusão. Com o resultado dessa integral, a massa e a taxa de aquecimento de 10°C/min setada no ensaio, foi possível calcular o grau de cristalinidade de cada amostra, apresentado na tabela 7. Observa-se que as amostras coletadas a 10 rpm e a 170°C alcançaram os maiores valores de X_c, ou seja, rotações menores e temperaturas de processamento maiores geraram amostras mais cristalinas.

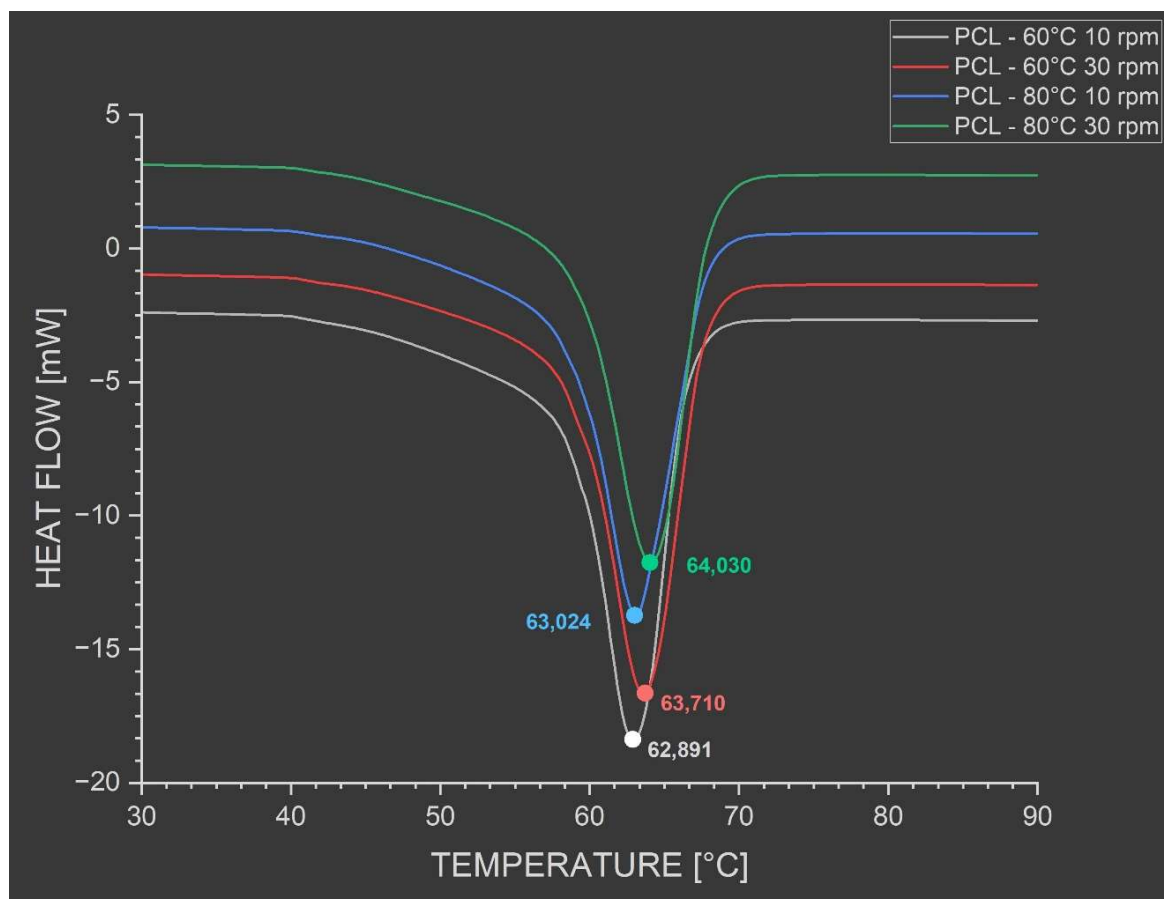
Outro ponto importante é que diferente do ABS, com o aumento na temperatura de extrusão não houve indícios de degradação molecular do PLA, visto que a as amostras coletada a 170°C alcançaram valores maiores ou iguais de T_g, T_c e T_m em relação as de 150°C. Portanto, nota-se que a temperatura de 170°C foi a que gerou as melhores propriedades térmicas no extrudado.

4.2.3. PCL

A exemplo do PLA, o PCL também é um polímero semicristalino, mas como o PCL possui uma temperatura de transição vítrea aproximada de -70°C (NÚÑEZ et al., 2004), não foi

possível analisar o comportamento dessa variável na primeira curva de aquecimento, já que as amostras em temperatura ambiente após o processamento já se encontravam acima da T_g. A mesma afirmação pode ser feita no caso da temperatura de cristalização, que é abaixo da temperatura ambiente. Na figura 34, observa-se o comportamento referente a temperatura de fusão do PCL.

Figura 34 - Curvas da análise de DSC PCL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os impactos da temperatura de extrusão, nota-se que dentro das mesmas faixas de rotação a temperatura de fusão do PCL variou pouco, ficando com valores ligeiramente superiores quando processado à 80°C (um delta de 0,2°C aproximadamente). Já a rotação de 30 rpm resultou no aumento de 1°C na temperatura de fusão, tanto no PCL extrudado a 60°C quanto a 80°C. As temperaturas de fusão observadas nos ensaios foram um pouco superiores ao informado pelo fabricante (anexo D), que foi de 60°C.

A exemplo do PLA, não foram observados sinais de degradação do material extrudado, mesmo na maior faixa de temperatura ensaiada que foi superior a T_m. Isso pode representar um bom comportamento desse material em temperaturas elevadas podendo assim, ser um bom candidato para compor blendas poliméricas com materiais que possuem T_m mais altas.

Traçando a linha base das curvas e calculando a área do pico ΔH_m , foi possível obter o grau de cristalinidade X_c de cada amostra, conforme mostrado na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades Térmicas do PCL

Propriedades Térmicas					
Polímero	Condição de Processo	T_m [°C]	ΔH_m [mW°C]	Peso [mg]	X_c [%]
PCL	60°C 10 rpm	62,891	110,626	7,51	60,54
	60°C 30 rpm	63,710	113,125	7,46	62,32
	80°C 10 rpm	63,024	107,152	7,57	58,17
	80°C 30 rpm	64,030	109,591	7,50	60,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da pouca influência da temperatura de extrusão na temperatura de fusão, observa-se que em 60°C foram obtidas amostras aproximadamente 2% mais cristalinas comparando com as amostras coletadas a 80°. O mesmo pode ser afirmado analisando o impacto da rotação, já que a 30 rpm foram coletadas amostras com grau de cristalinidade 2% maior que em 10 rpm. Logo, a amostra que obteve o maior valor de X_c foi a extrudada a 60° 10 rpm, alcançando 62,32% de cristalinidade. Espera-se também que as amostras coletadas a 70°C tenham cristalinidade entre as porcentagens obtidas em 60°C e 80°C.

4.3. Análise dos Resultados

No caso da velocidade de extrusão linear, nota-se que quanto maior a temperatura, maior é o coeficiente angular da regressão linear, ou seja, a taxa de variação da velocidade é maior para temperaturas mais altas. Analisando a pressão de operação, constatou-se pela regressão linear que a temperatura tem pouca influência na taxa de variação da pressão, mas tem grande influência sob o coeficiente linear, gerando retas praticamente paralelas. Já a velocidade de extrusão é diretamente proporcional a pressão de operação, quanto maior a velocidade da máquina, maior será a pressão observada.

De forma geral, notou-se que quanto maior a temperatura, menor a dimensão da seção transversal, comportamento que pode ser explicado devido a presença do efeito Barus. É nítido que este efeito é mais presente quando o polímero é extrudado em faixas de temperaturas menores, devido a pressão de operação ser mais elevada. Assim, conclui-se que a seção transversal do filamento depende da pressão a qual ele foi extrudado. Quanto a sua variação, notou-se que ela aumenta com temperaturas de processamento maiores. Este efeito se deve ao fato de que o polímero se encontra em viscosidades menores do que em baixas temperaturas,

gerando leves deformações e irregularidades superficiais. Para o LFAM, esse efeito pode ser acumulativo gerando erros dimensionais ainda maiores.

Com os gráficos de vazão mássica, foi possível traçar uma relação entre a dimensão da seção transversal, pressão e a velocidade de extrusão linear. Durante um mesmo espaço de tempo e para a mesma rotação, em temperaturas mais baixas são produzidos filamentos de menor comprimento com pressões maiores, que resultaram em uma maior expansão da seção transversal e, conseqüentemente, filamentos quadráticos mais largos. Mesmo assim, a vazão mássica se comportou de forma semelhante independente da temperatura setada, ou seja, a massa de polímero extrudada pela máquina é a mesma. Porém, em baixas temperaturas resultam em filamento mais largos e, em altas temperaturas, em filamento mais compridos.

Houve pouca variação da densidade entre cada faixa de rotação, ficando claro a grande influência da temperatura de operação para a densidade do extrudado. Com esta aproximação para valores constantes de densidade para cada temperatura testada, foi calculada a densidade média para cada temperatura. O ABS atingiu sua maior densidade em 190°C, o PLA 170°C e o PCL 70°C. Em geral, temperaturas baixas tendem a produzir filamentos de menor densidade, efeito que pode ser explicado devido a essas temperaturas não serem suficientes para que o material se fundisse corretamente, gerando vazios no extrudado. Já no caso de temperaturas mais altas, o excesso de calor fez com que surgissem pequenas bolhas em pontos de algumas amostras, fator que também impactou nessa densidade mais baixa.

A análise de DSC mostrou que a temperatura de 200°C pode ter sido excessiva para o ABS, causando uma queda na temperatura de transição vítrea T_g , que é um possível sinal de degradação do material. Para o PLA não foram observados sinais de degradação, visto que a T_g , T_c e T_m foram maiores na maior temperatura ensaiada de 170°C, combinadas a rotação mais alta de 30 rpm. Essa temperatura também se mostrou ser ideal para atingir o maior grau de cristalinidade X_c , porém combinado com a menor rotação de fuso de 10 rpm. No caso do PCL, temperaturas e rotações mais altas de processamento, elevaram ligeiramente a temperatura de fusão, fato que se repetiu com a rotação quando analisado X_c , mas combinado a uma temperatura de extrusão mais baixa (oposto do observado no PLA).

As tabelas com todos os dados coletados, assim como os resultados compilados de cada parâmetro estudado, se encontram no anexo E.

5. CONCLUSÃO

Este estudo destacou a influência das variáveis temperatura e velocidade de rotação do fuso de uma extrusora monorosca vertical, nos efeitos geométricos e propriedades dos filamentos poliméricos do ABS, PLA e PCL, alimentados em *pellets*. Assim, filamentos e amostras dos três polímeros foram extrudados, variando a temperatura e velocidade de operação do equipamento, respeitando as características de cada material. Com o objetivo de estudar os efeitos das variáveis de entrada, foram plotados gráficos com regressões lineares, sendo possível analisar o comportamento do material extrudado, bem como expandir para temperaturas e velocidades intermediárias não testadas.

Após a compilação de todos os resultados, é possível concluir que para os três polímeros, a rotação intermediária testada de 20 rpm conseguiu fabricar filamentos com boas propriedades, sem perder significativamente as qualidades geométricas. O ABS se mostrou melhor quando extrudado a 190°C e também, foi possível concluir que a 180°C o ABS pode não ter se fundido corretamente, e que a 200°C há indícios de degradação do material. O PLA mostrou seu melhor desempenho extrudado a 170°C e em temperaturas inferiores, teve sua densidade mais baixa, o que pode ser explicado devido ao polímero não ter se fundido corretamente. Para o PCL, foram observadas características melhores quando extrudado na temperatura de 70°C, mas houve uma grande dificuldade no manuseio e resfriamento. Assim, foi possível concluir o PCL não é indicado para o processo de fabricação aditiva de peças em grande escala.

A rotação do fuso de 20 rpm consegue entregar filamentos com boas propriedades se comparado as velocidades mais baixas (que desempenharam melhor neste quesito). Esta faixa de rotação se mostrou a mais eficiente, com pressões de operação razoáveis e que também seria possível alcançar uma produtividade razoável. Se comparado ao *datasheet* dos fabricantes, essa rotação é menor que a faixa indicada pelo fabricante do ABS de 30-60 rpm e igual ao mínimo no caso do PLA, que o indicado foi de 20-100 rpm. Desta forma, fica claro que cada máquina e *setup* devem ser estudados, pois existem outros fatores influenciam os resultados, como tipo de matriz de extrusão e passo do fuso, que afetam diretamente a pressão de operação. Além disso, outras rotações podem ser mais adequadas dependendo do seu uso e aplicação.

Ao analisar a temperatura, é importante tratar os materiais separadamente. O ABS se mostrou melhor quando extrudado a 190°C, já que nesta temperatura foram registradas a maior densidade e vazão mássica, com velocidade de extrusão e pressão intermediárias, além de uma boa qualidade e regularidade de extrusão. Da mesma forma, foi possível concluir que a 180°C o ABS pode não ter se fundido corretamente, e que a 200°C há indícios de degradação do

material com o aparecimento de bolhas devido a elevada temperatura. Este resultado também é diferente do indicado pelo fabricante que supera os 200°C nas zonas mais próximas ao bocal, fato que pode ser explicado devido a cada máquina ter seus termopares localizados em locais diferentes, sendo que muitas vezes a temperatura registrada pode ser diferente ao experimentado pelo polímero extrudado. Isso reforça a ideia de que apesar da indicação do fabricante, a temperatura de operação também deve ser analisada para cada máquina e *setup*.

O PLA mostrou seu melhor desempenho extrudado a 170°C, já que foi a temperatura que se obteve maior densidade e vazão mássica, com velocidade de extrusão e pressão intermediárias, além de uma boa qualidade e regularidade de extrusão. Em temperaturas inferiores, teve sua densidade mais baixa, o que também pode ser explicado devido ao polímero não ter se fundido corretamente. O PLA também teve seu melhor desempenho em temperaturas mais baixas que o indicado pelo fabricante, que já ressaltou em seu próprio *datasheet* que as temperaturas são apenas um ponto de partida e devem ser otimizadas de acordo com cada sistema.

Para o PCL, foram observadas características melhores quando extrudado na temperatura de 70°C. Por outro lado, houve uma grande dificuldade no manuseio, resfriamento e solidificação das amostras devido a sua baixa temperatura de fusão, relativamente próxima a temperatura ambiente. Neste cenário, a temperatura de 60°C poderia ser uma alternativa. Entretanto, devido ao comportamento adesivo do material, resultou em pressões de operação muito elevadas.

Assim, para extrusão de grandes peças, seria necessário um método de resfriamento muito mais eficiente e que não gerasse distorções geométricas, tornando o processo mais complexo. Com isso é possível concluir que o PCL não é indicado para extrusoras de grande porte e para o processo de fabricação aditiva de peças em grande escala, já que sua própria T_m baixa limita sua aplicação. Uma possível aplicação que pode ser estudada, seria combinar o PCL em pequenas proporções com outros polímeros na formação de blendas, ao qual seu perfil adesivo pudesse ser útil para melhorar as propriedades do material, principalmente, no preenchimento de vazios (possibilidade que se confirmou após o ensaio de DSC).

É evidente que a utilização do material em *pellets* se mostrou uma alternativa viável para o objetivo de baratear o processo e torná-lo mais ágil, eliminando tratamentos e processos intermediários. Mas para isso, é fundamental que o processo seja estudado para entender como as variáveis envolvidas afetam o produto final. Ficou evidente a diferença de comportamento de cada material variando os *inputs*, assim como outras matrizes e extrusoras também gerariam resultados completamente distintos. Em suma, estudos como este estão se multiplicando com o objetivo de analisar cada *setup* utilizado a fim de expandir sua aplicação, mostrando que futuramente, muitos processos de fabricação atuais podem ser substituídos pela MA.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENIRAN, O. et al. Fabrication Temperature-Related Porosity Effects on the Mechanical Properties of Additively Manufactured CFRP Composites. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 1, p. 1–14, 2023.
- ASTM. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. **ISO/ASTM 52900:2021**, 2021a.
- ASTM. Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. **ASTM D3418-21**, 2021b.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. v. 1
- CERUTI, A. et al. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 516–526, 2019.
- CHESSER, P. et al. Extrusion control for high quality printing on Big Area Additive Manufacturing (BAAM) systems. **Additive Manufacturing**, v. 28, n. September 2018, p. 445–455, 2019.
- DUTY, C. E. et al. Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 1, p. 181–189, 2017.
- FRUTUOSO, N. Tool-path Generation for a Multiple Independent Print Head System for Fused Deposition Modeling. 2017.
- GUTOWSKI, T. et al. Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 0, p. S69–S79, 2017.
- HARRIS, A. M.; LEE, E. C. Improving mechanical performance of injection molded PLA by controlling crystallinity. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 107, n. 4, p. 2246–2255, 15 fev. 2008.
- HOPKINS, N.; VAN VUUREN, R. J.; BROOKS, H. Additive manufacturing via tube extrusion (AMTex). **Additive Manufacturing**, v. 36, n. May, p. 101606, 2020.
- INDÚSTRIA DE MÁQUINAS MIOTTO LTDA. **MANUAL DE INSTRUÇÕES EXTRUSORA MONO-ROSCA SÉRIE EM-03**, 2007.
- MASOOD, S. H. Advances in Fused Deposition Modeling. **Comprehensive Materials Processing**, v. 10, p. 69 – 91, 2014.
- MEDEIROS, B. B. **Caracterização da liga amorfa Cu₃₆Ti₃₄Zr₂₂Ni₈ processada termomecanicamente**. Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- NATUREWORKS. Ingeo™ Biopolymer 3D850 Technical Data Sheet 3D Printing Monofilament – General Purpose Grade. **NatureWorks**, v. 1, n. 4, p. 1–4, 2023.
- NÚÑEZ, E. et al. Crystal structure, melting behaviour and equilibrium melting point of star polyesters with crystallisable poly(ε-caprolactone) arms. **Polymer**, v. 45, n. 15, p. 5251–5263, 12 jul. 2004.
- O’CONNOR, H. J.; DOWLING, D. P. Evaluation of the influence of low pressure additive manufacturing processing conditions on printed polymer parts. **Additive Manufacturing**, v.

21, n. 2010, p. 404–412, 2018.

OLIVEIRA, R. O. DE. **IMPRESSÃO E GEOMETRIA DA MATRIZ NO PROCESSO A MANUFATURA ADITIVA**. Universidade Federal de São Carlos, 2023.

PERSTORP. Capa™ 6500. **Perstorp**, v. 1, n. 1, p. 1, 2010.

POUDEL, L.; ZHOU, W.; SHA, Z. A generative approach for scheduling multi-robot cooperative three-dimensional printing. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 20, n. 6, 2020.

RIOS, O. et al. 3D printing via ambient reactive extrusion. **Materials Today Communications**, v. 15, p. 333–336, 2018.

ROSCHLI, A. Dynamic Extruder Control for Polymer Printing in Big Area Additive Manufacturing. 2016.

RUSSMANN, M. et al. Industry 4.0: World Economic Forum. **The Boston Consulting Group**, p. 1–20, 2015.

SABIC. CYCOLAC™ Resin MG94. **SABIC**, v. 1, p. 2, 2022.

TIWARY, V. K.; P., A.; MALIK, V. R. An overview on joining/welding as post-processing technique to circumvent the build volume limitation of an FDM-3D printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 27, n. 4, p. 808–821, 1 jan. 2021.

URBANIC, R. J.; HEDRICK, R. Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 13, n. 3, p. 348–368, 2016.

VICENTE, C. M. S. et al. Large-format additive manufacturing of polymer extrusion-based deposition systems: review and applications. **Progress in Additive Manufacturing**, n. 0123456789, 2023.

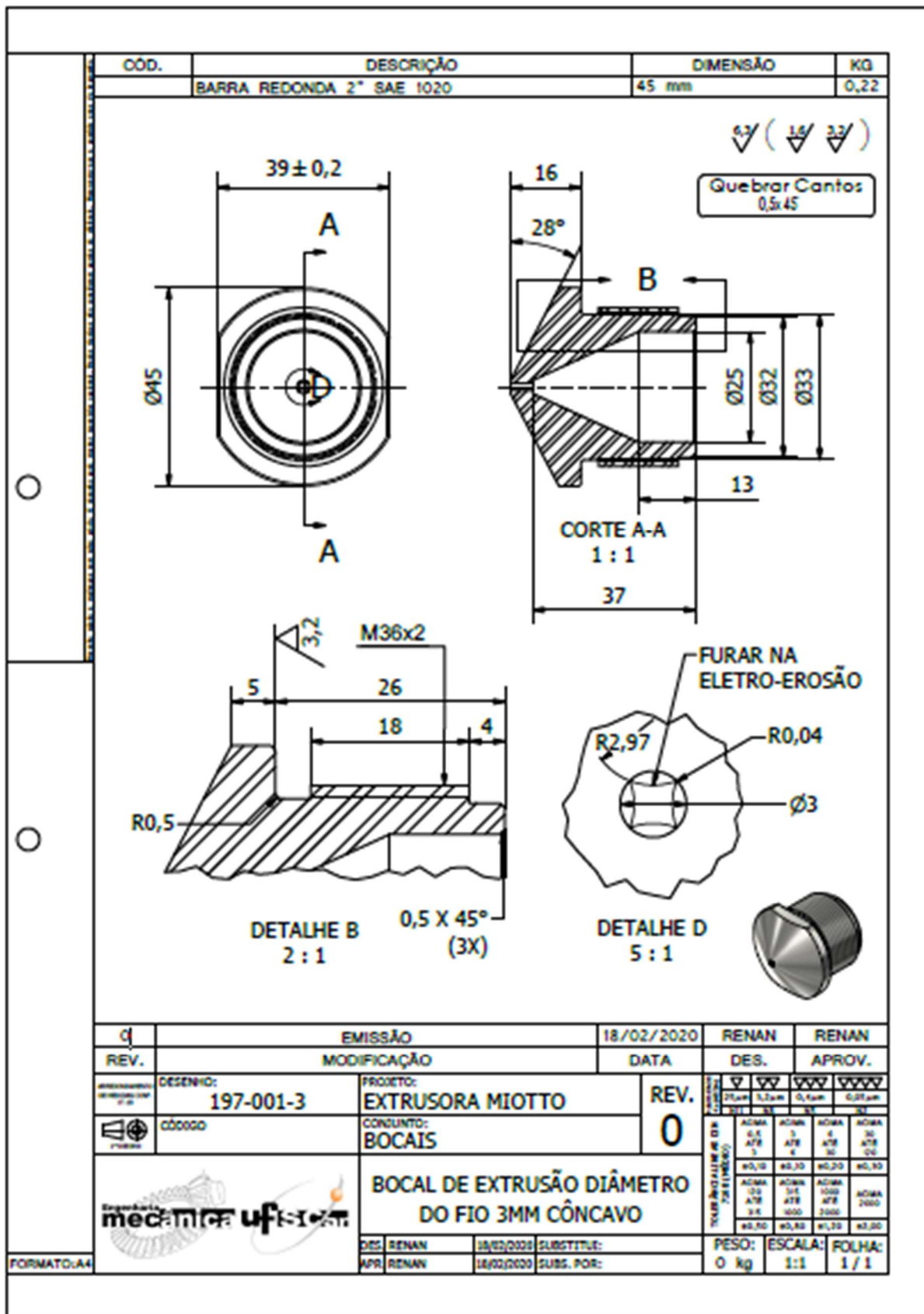
VIJAY, Y. et al. Control of process settings for large-scale additive manufacturing with sustainable natural composites. **Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME**, v. 141, n. 8, 2019.

WACHSMUTH, J. P.; BØHN, J. H. Multiple Independent Extrusion Heads for Fused Deposition Modeling. **Mechanical Engineering**, v. Master of, p. 101, 2008.

WANG, Z. et al. Large-scale deposition system by an Industrial Robot (I): Design of fused pellet modeling system and extrusion process analysis. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 3, n. 1, p. 39–47, 2016.

ANEXO A - Desenho 2D da matriz de extrusão

Figura 35 - Desenho 2D da matriz de extrusão.



Fonte: Oliveira (2023).

ANEXO B – Propriedades do SABIC CYCOLAC™ MG94 ABS



CYCOLAC™ RESIN MG94

REGION ASIA

DESCRIPTION

Superior flow, injection molding ABS. Good impact. For thin-wall applications.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20170706

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Tensile Stress, yld, Type I, 5 mm/min	46	MPa	ASTM D 638
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min	35	MPa	ASTM D 638
Tensile Strain, yld, Type I, 5 mm/min	2	%	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min	18	%	ASTM D 638
Tensile Modulus, 5 mm/min	2480	MPa	ASTM D 638
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	2620	MPa	ASTM D 790
IMPACT			
Izod Impact, notched, 23°C	240	J/m	ASTM D 256
Instrumented Impact Total Energy, 23°C	21	J	ASTM D 3763
THERMAL			
Vicat Softening Temp, Rate B/50	98	°C	ASTM D 1525
HDT, 0.45 MPa, 3.2 mm, unannealed	95	°C	ASTM D 648
HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed	82	°C	ASTM D 648
CTE, -40°C to 40°C, flow	8.82E-05	1/°C	ASTM E 831
CTE, -40°C to 40°C, xflow	8.46E-05	1/°C	ASTM E 831
Relative Temp Index, Elec	60	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	60	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	60	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Specific Gravity	1.04	-	ASTM D 792
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm (5)	0.5 – 0.8	%	SABIC method
Melt Flow Rate, 230°C/3.8 kgf	11.7	g/10 min	ASTM D 1238
Melt Viscosity, 240°C, 1000 sec-1	1720	Poise	ASTM D 3825
Melt Flow Rate, 220°C/5.0 kg	12	g/10 min	ISO 1133
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3)	1.52	mm	UL 94



PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	80 – 90	°C	
Drying Time	2 – 4	hrs	
Drying Time (Cumulative)	8	hrs	
Maximum Moisture Content	0.1	%	
Melt Temperature	205 – 245	°C	
Nozzle Temperature	205 – 245	°C	
Front - Zone 3 Temperature	205 – 225	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	200 – 210	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	190 – 200	°C	
Mold Temperature	50 – 70	°C	
Back Pressure	0.3 – 0.7	MPa	
Screw Speed	30 – 60	rpm	
Shot to Cylinder Size	50 – 70	%	
Vent Depth	0.038 – 0.051	mm	

DISCLAIMER

The information contained herein may include typical properties of our products or their typical performances when used in certain typical applications. Actual properties of our products, in particular when used in conjunction with any third party material(s) or for any non-typical applications, may differ from typical properties.

It is the customer's responsibility to inspect and test our product(s) in order to satisfy itself as to the suitability of the product(s) for its and its customers particular purposes. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of all product(s) purchased from us.

Nothing herein is intended to be nor shall it constitute a warranty whatsoever, in particular, warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

SABIC as referred to herein means any legal entity belonging to the group of companies headed by Saudi Arabia Basic Industries Corporation.

ANEXO C – Propriedades do NatureWorks Ingeo™ 4043D PLA



Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

3D Printing Monofilament – General Purpose Grade

Monofilament Applications

Ingeo 4043D can be converted into 3D printer monofilament. This multi-purpose extrusion grade results in 3D printing monofilament with excellent printability characteristics such as precise detail, good adhesion to build plates (no heating needed), less warping or curling, and low odor (no strong, greasy, or oily smell while printing). These properties make this grade well-suited for 3D printing using many different types of printers and for a broad range of printing applications.

Processing Information

Ingeo 4043D biopolymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

Ingeo biopolymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks technical support.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo 4043D is not compatible with a wide variety of resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.

Typical Material Properties ⁽¹⁾

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
MFR, g/10 min ⁽²⁾	6	D1238
Relative Viscosity ⁽³⁾	4.0	D5225
Clarity	Transparent	-
Peak Melt Temperature, °C	145-160	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
Mechanical Property		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8700 (60)	D882
Tensile Strength at Break, psi (MPa)	7700 (53)	D882
Tensile Modulus, psi (MPa)	524,000 (3.6)	D882
Tensile Elongation, %	6	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength, psi (MPa)	12,000 (83)	D790
Flexural Modulus, psi (MPa)	555,000 (3.8)	D790
Heat Distortion Temperature, °C 66 psi (0.45 MPa)	55	E2092

(1) Typical properties for injection molded amorphous bars; not to be construed as specifications.

(2) 210 °C/2.16 kg

(3) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30°C

4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

Processing Temperature Profile ⁽⁴⁾

Melt Temp.	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
Filament Diameter Inspection (on-line)	Essential for quality monofilament (+/- 3% max. deviation)	
3D Printing Temp.	190-230°C	
Print Bed Temp.	None needed. (or 50-70°C if applicable)	

(4) Starting points only, and may need to optimized depending on your system.

Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. This grade of Ingeo biopolymer is suitable for use for all food types under OM6. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks LLC. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion, or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean,

body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 170°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended

for melt operations. Use safety glasses to prevent exposure to particles which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF

WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred options is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets are not a problem in the environment except under unusual circumstances when they enter the waterway. They are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment

Product Stewardship

NatureWorks LLC has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, then take

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

Customer Notice

NatureWorks LLC encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature, should be consulted prior to the use of the company's products.

NOTICE: No freedom from any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR USE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: NatureWorks LLC does not recommend any of its products, including samples, for use as: Components of, or packaging for, tobacco products; Components of products where the end product is intended for human or animal consumption; In any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues; As a critical component in any medical device that supports or sustains human life; In any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women; and in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

ANEXO D – Propriedades do Perstorp Capa™ 6500 PCL

Capa™ 6500



Description

- ⇒ Capa™ 6500 is a high molecular weight linear polyester derived from caprolactone monomer.
- ⇒ **The molecular weight is approximately 50,000.**
- ⇒ **Supplied in granular form, approx. 3 mm pellets.**

Applications

- ⇒ Capa™ 6500 is used in a variety of adhesive applications.
- ⇒ **Compatible with a wide range of common thermoplastics and soluble in several common solvents.**

Delivery forms

- ⇒ **Supplied in quantities of 20 kg net packed in paper sacks on pallets of 1000 kg.**
- ⇒ **Bulk quantities can be supplied in 500 kg bags.**

Storage

- ⇒ **Should be stored in a dry place away from sources of heat.**

Typical properties

Mean molecular weight	50,000
Melting point, °C	58-60
Water content, %	<1.0
Colour of 30% m/m solution, Hazen	<75
Elongation at break, %	800

Melt flow index

7 g/10 min. with 2.16 kg, 1" PVC die at 160°C.

Solubility parameters

The solubility parameter (δ) is 9.34 – 9.43 (cal/cm³)^{1/2}.

CAS no.: 24980-41-4

HS No.: 3907 99

Valid from: April 23, 2009

ANEXO E – Dados Coletados do Processo e Parâmetros

Figura 36 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do ABS

ABS												
Temperatura [°C]	Rotação do Fuso [rpm]	Pressão [bar]	Tempo [s]	Comprimento do Filamento [mm]	Velocidade de extrusão [mm/s]	Seção transversal média [mm]	Desvio da seção média [mm]	Peso da Amostra [g]	Volume [cm ³]	Densidade [g/cm ³]	Vazão Mássica [g/min]	Vazão Volumétrica [cm ³ /min]
180	10	85	5,62 120,4	187	33,27	2,33	2,44E-02	21,721	24,6	0,883	10,824	12,259
	15	108	5,44 120,62	260	47,79	2,38	3,32E-02	32,324	35,3	0,916	16,079	17,559
	20	122	5,41 120,51	319	58,96	2,47	3,00E-02	42,714	47,9	0,892	21,267	23,849
	25	130	5,54 121	396	71,48	2,49	5,84E-02	48,509	55,1	0,880	24,054	27,322
	30	143	5,51 120,53	428	77,68	2,52	3,42E-02	63,811	70,4	0,906	31,765	35,045
	10	80	5,07 122,72	174	34,32	2,32	2,24E-02	21,891	21,5	1,018	10,703	10,512
190	15	95	5,02 120,43	264	52,59	2,37	2,80E-02	32,431	31,3	1,036	16,158	15,594
	20	102	4,78 120,08	302	63,18	2,43	4,26E-02	42,905	42,8	1,002	21,438	21,386
	25	122	4,92 120,18	384	78,05	2,47	5,53E-02	53,332	53,1	1,004	26,626	26,510
	30	129	5,37 120,37	529	98,51	2,49	5,04E-02	63,36	63,3	1,001	31,583	31,553
	10	58	5,49 119,8	236	42,99	2,13	4,52E-02	21,569	23,1	0,934	10,803	11,569
	15	73	5,4 120,09	322	59,63	2,15	5,66E-02	31,716	33,9	0,936	15,846	16,937
200	20	81	5,46 119,81	435	79,67	2,23	7,36E-02	42,444	46,2	0,919	21,256	23,137
	25	93	5,44 121,58	562	103,31	2,27	7,45E-02	52,895	56,4	0,938	26,104	27,834
	30	102	5,52 120,22	612	110,87	2,32	7,75E-02	63,487	69,2	0,917	31,685	34,537

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do PLA

PLA													
Temperatura [°C]	Rotação do Fuso [rpm]	Pressão [bar]	Tempo [s]	Comprimento do Filamento [mm]	Velocidade de extrusão [mm/s]	Seção transversal média [mm]	Desvio da seção média [mm]	Peso da Amostra [g]	Volume [cm ³]	Densidade [g/cm ³]	Vazão Mássica [g/min]	Vazão Volumétrica [cm ³ /min]	
150	10	65	5,1 119,96	93	18,24	2,60	2,48E-02	21,089	18,8	1,122	10,548	9,403	
	15	78	5,2 121,01	122	23,46	2,81	2,11E-02	29,464	26	1,133	14,609	12,891	
	20	87	5,22 120,69	145	27,78	2,87	3,17E-02	35,825	31,4	1,141	17,810	15,610	
	25	93	5,28 120,5	190	35,98	2,97	2,59E-02	44,839	39,9	1,124	22,326	19,867	
	30	100	5,25 120,5	261	49,71	3,05	3,57E-02	53,056	46,8	1,134	26,418	23,303	
	10	60	5,04 120,47	149	29,56	2,47	4,09E-02	27,302	23,2	1,177	13,598	11,555	
	15	73	5,12 120,5	210	41,02	2,61	2,65E-02	40,007	34,1	1,173	19,920	16,979	
	20	82	5,21 120,44	254	48,75	2,71	2,04E-02	50,087	42,2	1,187	24,952	21,023	
	25	90	5,25 120,25	295	56,19	2,80	3,56E-02	62,162	53,2	1,168	31,016	26,545	
160	30	96	5,07 122,51	329	64,89	2,93	7,59E-02	71,965	61,2	1,176	35,245	29,973	
	10	50	5,11 120,64	195	38,16	2,33	3,00E-02	25,086	20,7	1,212	12,476	10,295	
	15	60	5,14 120,34	266	51,75	2,30	7,36E-02	40,336	33,2	1,215	20,111	16,553	
	20	72	5,18 120,05	292	56,37	2,56	5,98E-02	52,063	42,6	1,222	26,021	21,291	
	25	83	5,19 120,54	349	67,24	2,61	7,12E-02	63,311	52,3	1,211	31,514	26,033	
	30	90	5,14 119,53	401	78,02	2,63	6,32E-02	75,362	61,9	1,217	37,829	31,072	
	170	10	50	5,11 120,64	195	38,16	2,33	3,00E-02	25,086	20,7	1,212	12,476	10,295
		15	60	5,14 120,34	266	51,75	2,30	7,36E-02	40,336	33,2	1,215	20,111	16,553
		20	72	5,18 120,05	292	56,37	2,56	5,98E-02	52,063	42,6	1,222	26,021	21,291
25		83	5,19 120,54	349	67,24	2,61	7,12E-02	63,311	52,3	1,211	31,514	26,033	
30		90	5,14 119,53	401	78,02	2,63	6,32E-02	75,362	61,9	1,217	37,829	31,072	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Dados Coletados do Processo e Parâmetros do PCL

PCL													
Temperatura [°C]	Rotação do Fuso [rpm]	Pressão [bar]	Tempo [s]	Comprimento do Filamento [mm]	Velocidade de extrusão [mm/s]	Seção transversal média [mm]	Desvio da seção média [mm]	Peso da Amostra [g]	Volume [cm ³]	Densidade [g/cm ³]	Vazão Mássica [g/min]	Vazão Volumétrica [cm ³ /min]	
60	10	110	5,02 120,25	200	39,84	1,96	5,46E-02	25,806	22,9	1,127	12,876	11,426	
	15	126	5,22 120,17	229	43,87	2,35	5,72E-02	31,258	28,1	1,112	15,607	14,030	
	20	134	5,05 120,46	317	62,77	2,32	6,09E-02	41,891	37,2	1,126	20,866	18,529	
	25	154	5,25 120,38	391	74,48	2,57	6,22E-02	54,293	48,7	1,115	27,061	24,273	
	30	175	5,31 120,49	452	85,12	2,45	6,50E-02	68,052	61,3	1,110	33,888	30,525	
	10	85	5,32 119,96	203	38,16	1,89	6,17E-02	22,265	18,3	1,217	11,136	9,153	
	15	100	4,98 120,09	242	48,59	2,08	5,73E-02	32,318	26,7	1,210	16,147	13,340	
	20	119	5,36 120,06	364	67,91	2,10	6,15E-02	43,062	35,4	1,216	21,520	17,691	
	25	135	5,18 120,26	469	90,54	2,12	7,55E-02	51,168	42,1	1,215	25,529	21,004	
70	30	150	5,34 120,48	537	100,56	2,06	9,32E-02	64,891	54	1,202	32,316	26,892	
	10	53	5,11 120,24	175	34,25	2,06	6,76E-02	22,563	19,2	1,175	11,259	9,581	
	15	78	5,06 120,04	248	49,01	2,28	9,51E-02	33,664	28,8	1,169	16,826	14,395	
	20	102	5,35 120,64	430	80,37	2,15	9,67E-02	40,777	34,8	1,172	20,280	17,308	
	25	114	5,05 120,12	469	92,87	2,22	1,03E-01	54,015	46,3	1,167	26,981	23,127	
	30	131	5,03 120,06	582	115,71	2,19	1,00E-01	66,875	56,7	1,179	33,421	28,336	
	80	10	53	5,11 120,24	175	34,25	2,06	6,76E-02	22,563	19,2	1,175	11,259	9,581
		15	78	5,06 120,04	248	49,01	2,28	9,51E-02	33,664	28,8	1,169	16,826	14,395
		20	102	5,35 120,64	430	80,37	2,15	9,67E-02	40,777	34,8	1,172	20,280	17,308
25		114	5,05 120,12	469	92,87	2,22	1,03E-01	54,015	46,3	1,167	26,981	23,127	
30		131	5,03 120,06	582	115,71	2,19	1,00E-01	66,875	56,7	1,179	33,421	28,336	

Fonte: Elaborado pelo autor.