

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAROLINE MACIEL DOMINGOS

Análise Comparativa das Propriedades do Políácido Láctico (PLA) de Fornecedores Distintos para Aplicações em Manufatura Aditiva: Uma avaliação dos parâmetros de impressão na busca da otimização do processo de impressão 3D via Fabricação Filamento Fundido (FFF).

BLUMENAU

2022

CAROLINE MACIEL DOMINGOS

Análise Comparativa das Propriedades do Políácido Láctico PLA de Fornecedores Distintos para Aplicações em Manufatura Aditiva: Uma avaliação dos parâmetros de impressão na busca da otimização do processo de impressão 3D via Fabricação Filamento Fundido (FFF).

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Johnny De Nardi Martins

BLUMENAU

2022

Domingos, Caroline Maciel

Análise Comparativa das Propriedades do Poliacido Láctico PLA de Fornecedores Distintos para Aplicações em Manufatura Aditiva : Uma avaliação dos parâmetros de impressão na busca da otimização do processo de impressão 3D via Fabricação Filamento Fundido (FFF). / Caroline Maciel Domingos ; orientador, Johnny De Nardi Martins, 2022.

89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Manufatura Aditiva. 3. Fabricação por Filamento Fundido. I. De Nardi Martins, Johnny. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

CAROLINE MACIEL DOMINGOS

Análise Comparativa das Propriedades do Políácido Láctico PLA de Fornecedores Distintos para Aplicações em Manufatura Aditiva: Uma avaliação dos parâmetros de impressão na busca da otimização do processo de impressão 3D via Fabricação Filamento Fundido (FFF).

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pela Comissão Examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Blumenau, 08 de março de 2022

Caroline Maciel Domingos
Estudante

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Johnny de Nardi Martins
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Blumenau

Prof. Dr. Marcio R. da Rocha
Avaliador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Blumenau

Prof. Dr. Fabricio Celso
Avaliador(a)
Universidade Feevale

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe, de trabalho,
e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e aos professores do Campus Blumenau por todo os ensinamentos e o auxílio durante esses anos de graduação.

Agradeço imensamente à Electro Aço Altona S.A, por me permitir desenvolver este trabalho e me auxiliar ao longo deste período.

Agradeço ao Prof. Dr. Johnny de Nardi Martins por toda atenção dedicada durante a realização desta pesquisa, pelo auxílio na realização das atividades e contribuição durante todo o período de construção deste trabalho.

Agradeço à Prof. Dr. Claudia Merlin que sempre se mostrou disponível para auxiliar, mesmo não podendo continuar como orientadora, fico grata de ter tido seu auxílio na determinação deste trabalho.

Agradeço à disponibilidade e toda a atenção da Fernanda Volpatto da Central de Análises do Departamento de Engenharia Química da UFSC – Florianópolis, seu apoio foi fundamental para realizar a caracterização térmica das amostras.

Ao Sr. Gustavo Henrique Keuncke pela confiança e oportunidade de estar desenvolvendo este estudo.

Ao Sr. Adnan Cunha que desde o início me auxilio com a impressão dos corpos de prova, sempre disponível e atencioso, sua ajuda foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço à Srta. Andriele, por ouvir minhas aflições estar sempre disponível a ajudar. Aos meus grandes amigos e colegas de trabalho que me acompanharam nestes últimos anos de graduação, sempre incentivando e apoiando.

Agradeço ao meu noivo Carlos H. O. Becker, por ter ficado sempre ao meu lado, me incentivando. Obrigada pelo suporte em todas as dificuldades e por me encorajar a buscar sempre melhorar.

Por fim, agradeço imensamente aos meus pais, Marilei e Antonio, pela oportunidade de realizar esta graduação, por me derem forças e acreditarem em mim. Sem vocês nada seria possível.

Agradeço a Deus por ser luz em todos os meus dias.

RESUMO

Com os avanços tecnológicos, novas formas de se obter ou criar peças ou produtos no meio industrial foram desenvolvidos. Dentre esses avanços, uma das tecnologias mais promissoras é a manufatura aditiva, a qual vem revolucionando os métodos de produção de bens trazendo uma opção de baixo custo e operação otimizada. Dentre os materiais que se destacam para esta aplicação estão os polímeros termoplásticos, uma vez que, uma das principais técnicas da manufatura aditiva é a Fabricação de Filamento Fundido (FFF). Esta técnica consiste na extrusão de filamento gradualmente aquecido e extrudado sobre uma base de construção. O material utilizado no processo rapidamente é resfriado, solidificando e se unindo camada a camada até a formação final da estrutura projetada. Neste ponto, os termoplásticos possuem preferência, pois podem ser extrusados em temperaturas relativamente baixas, otimizando o processo. Dentre os principais materiais utilizados estão os filamentos de Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), Poliacido Láctico (PLA), Politereftalato de Etileno Glicol (PETG), Policarbonato (PC) e Poliamida. No presente trabalho, será estudado o comportamento do Poliacido Láctico (PLA) aplicado na manufatura aditiva. Este material possui grande popularidade no âmbito tecnológico da impressão 3D, uma vez que, é um polímero biodegradável, decorrente de fontes renováveis (milho, trigo, cana de açúcar) e com boas propriedades mecânicas atrelada a uma boa processabilidade decorrente da baixa temperatura de transição vítrea (em torno de 55-65°C) apresentando assim, vantagens significativas nesta aplicação. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise comparativa das propriedades térmicas e mecânicas de dois filamentos de PLA de diferentes fornecedores (PLA Nacional e PLA Importado). Nesta etapa, foram avaliados padrões de preenchimento distintos (Concêntrico, Linear e Retilíneo), com variação no ângulo de impressão de 45 e 90° e com taxas de preenchimento de 100 e 50%, com o objetivo de identificar qual filamento proporciona melhores valores de resistência à tração. Com a caracterização térmica dos filamentos, foi possível identificar valores de cristalinidade distintos e a sua relação com a resistência mecânica obtida. Na segunda etapa, foram avaliados os impactos de diferentes padrões de deposição e preenchimento, parâmetros de processo e qualidade de impressão na resistência mecânicas das peças impressas por FFF. Ao avaliar o comportamento do PLA Nacional e PLA Importado para os mesmos padrões de impressão, foi possível identificar que o PLA Nacional possui um grau de cristalinidade maior e fornece uma resistência mecânica superior que o PLA Importado para três de quatro variáveis de impressão analisadas. Com relação aos padrões de impressão, o preenchimento de 100% no método de deposição concêntrico é a configuração que fornece maior resistência mecânica. No entanto, a escolha do melhor padrão deverá levar em conta a finalidade e durabilidade necessária do componente impresso, bem como, o custo e o tempo de impressão atrelado a técnica escolhida.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Fabricação por Filamento Fundido; Poliacido Láctico.

ABSTRACT

With the technological advances, new ways to obtain or create parts or products in the industrial environment have been developed. Among these advances, one of the most promising technologies is the additive manufacturing, which has been revolutionizing the production methods of goods, bringing an option of low cost and optimized operation. Among the materials that stand out for this application are the thermoplastic polymers, since one of the main additive manufacturing techniques is the Fused Filament Fabrication (FFF). This technique consists of extruding filament that is gradually heated and extruded onto a building block. The material used in the process is rapidly cooled, solidifying and bonding layer by layer until the final formation of the designed structure. Here, thermoplastics are preferred, because they can be extruded at relatively low temperatures, optimizing the process. Among the main materials used are filaments of Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA), Polyethylene Glycol Terephthalate (PETG), Polycarbonate (PC) and Polyamide. In the present work, the behavior of Polylactic Acid (PLA) applied to additive manufacturing will be studied. This material has great popularity in the technological field of 3D printing, since it is a biodegradable polymer, derived from renewable sources (corn, wheat, sugar cane) and with good mechanical properties coupled with a good processability resulting from the low glass transition temperature (around 55-65°C) thus presenting significant advantages in this application. In this context, the present work presents a comparative analysis of the thermal and mechanical properties of two PLA filaments from different suppliers (National PLA and Imported PLA). In this step, distinct filling patterns were evaluated (Concentric, Linear and Rectilinear), with variation in the printing angle of 45 and 90° and with filling rates of 100 and 50%, with the objective of identifying which filament provides better tensile strength values. With the thermal characterization of the filaments, it was possible to identify different crystallinity values and their relation with the mechanical resistance obtained. In the second step, the impacts of different deposition and filling patterns, process parameters and printing quality on the mechanical strength of the FFF printed parts were evaluated. By evaluating the behavior of the Domestic PLA and Imported PLA for the same printing patterns, it was possible to identify that the Domestic PLA has a higher degree of crystallinity and provides higher mechanical strength than the Imported PLA for three of four printing variables analyzed. Regarding the printing patterns, the 100% fill in the concentric deposition method is the configuration that provides higher mechanical strength. However, the choice of the best pattern should take into account the purpose and required durability of the printed component, as well as the cost and printing time tied to the chosen technique.

Keywords: Additive Manufacturing; 3D Printing; Fused Filament Fabrication; Polylactic Acid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama representativo das etapas envolvidas no processo de manufatura aditiva.	20
Figura 2 – Representação esquemática da obtenção de itens através da construção aditiva.	21
Figura 3 – Representação da conversão do modelo 3D para o formato STL.....	21
Figura 4 – Influência da quantidade de malhas na resolução do objeto a ser impresso.	22
Figura 5 – Diagrama das principais tecnologias existentes de prototipagem rápida.	23
Figura 6 – Princípio da técnica de Estereolitografia.....	25
Figura 7 – Representação esquemática do sistema SLS.....	27
Figura 8 – Suporte impresso via SLS.	29
Figura 9 – Representação do processo de impressão 3D via Fabricação por filamento fundido.	30
Figura 10 – Representação de uma impressora 3D por FFF com dois bicos extrusores.	31
Figura 11 – Peça impressa via FFF com alteração da taxa de preenchimento.	32
Figura 12 – Suporte de PLA impresso via processo FFF a.	33
Figura 13 – Principais polímeros utilizados na impressão 3D.	34
Figura 14 – a – parâmetros do processo FFF, b – orientação de construção.....	36
Figura 15 – Possibilidades de preenchimento no processo FFF; a – raster, b – contour, c – contour e raster, e d – camadas alternadas em 90°.	38
Figura 16 – Influência da altura de impressão na resolução final do componente impresso. ...	39
Figura 17 – Efeito start-stop no filamento durante o processo de impressão.....	42
Figura 18 – Variação entre o formato do filamento recém extrudado e após estar depositado.	43
Figura 19 – Ilustração da composição de uma peça impressão via FFF.	44
Figura 20 – Demonstração dos pontos de adesão e vazios na estrutura de peças obtidas por FFF.	44
Figura 21 – Ilustração do processo de sintetização polimérica entre filamentos.	45
Figura 22 – Relação entre temperatura do filamento e o crescimento do “pescoço”.....	46
Figura 23 – Principais defeitos em peças impressas via FFF.	47
Figura 24 – Diagrama Ishikawa representativo das variáveis de impressão em FFF que determinam a propriedade mecânica do componente.....	48
Figura 25 – Vazios formados de acordo com o padrão de deposição	49

Figura 26 – Resistência das peças de acordo com o ângulo e gap negativo.....	50
Figura 27 – Resistência à tração em relação à velocidade de impressão (a) e temperatura da mesa de construção (b)..	51
Figura 28– Exemplos de alguns métodos de preenchimentos das camadas – Vista superior.....	52
Figura 29 – Métodos de preenchimento internos, direção e ângulo.	52
Figura 30 – Exemplos de orientações possíveis para impressão.	53
Figura 31 – Impressão na vertical – Pz e orientação na horizontal – Pxy.....	53
Figura 32 – Exemplos estruturas impressas em diferentes taxas de preenchimento.....	54
Figura 33 – Estrutura química do Políácido Láctico.....	55
Figura 34 – Estrutura molecular das lactonas.....	55
Figura 35 – Rotas de obtenção de PLA.	56
Figura 36 – Balanceamento reação de formação PLA.	57
Figura 37 – Modelo impressora 3D utilizada.	60
Figura 38 – Cabeçote da impressora 3D utilizada, modelo BigRepOne	60
Figura 39 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 100% e com deposição linear do filamento (90°).....	61
Figura 40 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 100% e deposição inclinada (45°).	61
Figura 41 – Projeto do corpo de prova com 50% de preenchimento e padrão retilíneo de 90°.	61
Figura 42 – Projeto do corpo de prova com 50% de preenchimento e padrão retilíneo de 45°.	61
Figura 43 – Parâmetro de codificação dos corpos de prova utilizados.	62
Figura 44 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroide com ângulo de 45°.	63
Figura 45 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroide com ângulo de 90°.	63
Figura 46 – Exemplar da máquina utilizada nos ensaios de tração.	64
Figura 47 –Curva de resfriamento resultante do ensaio de DSC para PLA Importado e PLA Nacional.....	66
Figura 48 – Curva de DSC para o PLA Nacional.	67
Figura 49 – Curva de DSC para o PLA Importado.	67
Figura 50 – Configuração dos corpos de prova impressos para o ensaio de tração.	70

Figura 51 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova com 100% de preenchimento para o PLA Nacional e PLA Importado.	71
Figura 52 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova com 50% de preenchimento para o PLA Nacional e PLA Importado.	71
Figura 53 – Aspecto da fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, a – preenchimento de 100%, b – preenchimento de 50%.	72
Figura 54 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova impressos com PLA Nacional.	73
Figura 55 – Configuração dos corpos de prova impressos para o ensaio de tração.	74
Figura 56 – Padrão de deposição Giroyde 90°.	76
Figura 57 – Padrão de deposição Giroyde 45°	76
Figura 58 – Fratura do corpo de prova com padrão Giroyde 90° (CPG9050N).....	77
Figura 59 – Fratura do corpo de prova com padrão Giroyde 45° (CPG4550N)	77
Figura 60 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova impressos com PLA Nacional.	78
Figura 61 – Corpo de prova A após ensaio de tração.....	79
Figura 62 – Corpo de prova B após ensaio de tração.	80
Figura 63 – Resultado do ensaio de tração para os corpos de prova A e B.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos principais processos de manufatura aditiva	23
Quadro 2 - Principais características dos termoplásticos mais utilizados na manufatura aditiva.	35
Quadro 3 - Especificações técnicas dos filamentos.....	59
Quadro 4 - Propriedades de impressão dos corpos de prova em PLA Importado e PLA Nacional	62
Quadro 5 - Propriedades obtidas com o ensaio de DSC para o PLA Nacional e PLA Importado	68
Quadro 6 - Valores de resistência à tração e alongamento encontrados para os corpos de prova ensaiados.....	69
Quadro 7 - Valores de resistência à tração e alongamento encontrados para os corpos de prova de PLA Nacional.	73
Quadro 8 - Custos relacionados à impressão de cada configuração de corpo de prova utilizado.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D Três Dimensões

ABS Acrilonitrila Butaríeno Estireno

BJ Binder Jetting

CAD “*Computer-Aided Design*” Software de Desenho Assistido por Computador

DLP Processamento Digital de Luz

DMLS Sinterização Direta a Laser

DOD Deposição por Demanda

EBM Derrame de feixe de elétrons

FFF Fabricação por Filamento Fundido

LOM – Fabricação de Objetos Laminados

MJ Jateamento de Material

PA Poliamida

PET Politereftalato de Etileno

PLA Poliacido Láctico

SLA Estereolitografia

SLM Fusão Seletiva a Laser

SLS Sinterização Seletiva à Laser

STL “*Standard Triangle Language*” - Linguagem Padrão do Triângulo

UAM Manufatura Aditiva Ultrassônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO DA MANUFATURA ADITIVA.....	18
2.2	PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	20
2.2.1	Impressão 3D via Estereolitografia (SLA)	24
2.2.2	Impressão 3D via Sinterização Seletiva à Laser (SLS)	27
2.2.3	Impressão 3D via Fabricação de Filamento Fundido (FFF).....	29
2.3	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO E QUALIDADE DA PEÇA NO PROCESSO FFF	35
2.3.1	Controle do Fluxo de Material	39
2.3.2	Adesão entre Camadas	43
2.3.3	Defeitos nas peças obtidas por FFF.....	46
2.4	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS FINAIS NO PROCESSO FFF	47
2.4.1	Preenchimento das Camadas.....	51
2.4.2	Ângulo de orientação da impressão	53
2.4.3	Densidade de preenchimento	54
2.5	POLIÁCIDO LÁCTICO - PLA.....	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	599
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	599
3.2	IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	59
3.3	CARACTERIZAÇÃO VIA CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL - DSC.....	63
3.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	644

3.5	ANÁLISE DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO	
3D.	655
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	666
4.1	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO PLA NACIONAL E PLA IMPORTADO ..	
	666
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE PLA NACIONAL E PLA IMPORTADO	699
4.3	AVALIAÇÃO DA RESPOSTA MECÂNICA DE ACORDO COM OS	
	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	722
4.4	OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO DE COMPONENTES VIA	
FFF.	81
5	CONCLUSÃO.....	833
	REFERÊNCIAS.....	844

1 INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida (PR), também denominada por Manufatura Aditiva (MA), é um método de manufatura avançado que permite a construção de objetos 3D, a partir da deposição em camadas do material sobre uma plataforma de construção. A PR fornece um conjunto de ferramentas importantes para a fabricação de peças funcionais geometricamente complexas. Os processos de manufatura aditiva utilizam como ferramenta o software de desenho assistido por computador - CAD para desenvolver o projeto do componente a ser impresso. Este arquivo é posteriormente convertido em um arquivo STL cuja função é fatiar os dados geométricos do CAD criando assim os caminhos de impressão (MARTINEZ, 2019).

As principais vantagens da manufatura aditiva frente à processos tradicionais, estão relacionadas com a eficiência do processo, que permite a produção rápida e econômicas sem geração de grandes quantidades de materiais residuais, e, além disso, em algumas técnicas é possível reutilizar o material residual. (KUMAR, PANDEY, WIMPENNY, 2019). A versatilidade ganha destaque, uma vez que, são processos que permitem a confecção de peças com geometrias complexas e com maior acessibilidade, visto que, o custo das máquinas e equipamentos são relativamente menores. Como citado, há diferentes técnicas que permitem trabalhar com diferentes materiais, podendo ser aplicada na impressão de metais, polímeros, compósitos ou demais materiais particulados. (RAYNA, 2016)

No início do desenvolvimento das técnicas de manufatura aditiva, os sistemas eram direcionados apenas à fabricação de protótipos utilizados para desenvolvimento de produtos, destinando a demonstrações conceituais, ajustes e testes. As técnicas de impressão 3D são utilizadas em várias indústrias, como engenharia e construção, automotiva, aeroespacial, indústria médica, fabricação de componentes eletrônicos e etc. Espera-se que os novos métodos de impressão 3D, embora estejam em desenvolvimento, criem um impacto agudo na fabricação de componentes. (PERES, 2016)

Segundo Silva, 2019, a fabricação por filamento fundido (FFF) é uma das técnicas de impressão 3D mais populares atualmente. Nesta técnica o material na forma filamentar é extrudado por um bico aquecido e depositado em uma plataforma de construção criando objetos tridimensionais camada por camada. Uma vasta gama de materiais termoplásticos está disponível no mercado, incluindo o ABS (Acrilonitrila Butaríeno Estireno), PLA (Poliácido Láctico), PA (Poliamida), PET (Politereftalato de Etileno), dentre outros. O PLA é um dos polímeros que ganham maior destaque, pois são materiais biodegradáveis de alta disponibilidade e fácil processamento. (SILVA, 2019).

Neste trabalho foram avaliadas as variáveis aplicadas na impressão 3D de objetos via processo FFF, e sua relação com a resistência mecânica dos componentes impressos. Em um primeiro momento, as variáveis estudadas foram selecionadas de acordo com a possibilidade de otimização do processo, buscando redução de custos e aumento de produtividade. Nesta etapa os resultados serviram como base para validação da substituição do material de origem importada para um material de origem nacional. Em um segundo momento, as variáveis foram analisadas de forma a entender o efeito no comportamento mecânico dos componentes impressos

Este trabalho foi conduzido paralelamente ao projeto de Estágio III desenvolvido no setor de Engenharia de Manufatura da empresa Electro Aço Altona S.A, cujo intuito foi a análise do processo de impressão 3D, buscando redução dos custos e aumento da produtividade. A manufatura aditiva chegou na Altona como uma alternativa para a produção dos modelos utilizados no processo de moldagem, promovendo otimização no tempo e custo de fabricação destes itens.

Inicialmente foram utilizados filamentos de PLA de origem internacional para a fabricação dos ferramentais, e com o objetivo de reduzir custos, foi desenvolvido um fornecedor nacional do filamento. Dessa forma, este trabalho serviu como validação da alteração do uso de filamentos de PLA de fornecedores estrangeiros para uso de um filamento de PLA fornecido por uma empresa nacional, bem como, identificar padrões de impressão com menores consumos de materiais e maior rapidez de impressão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento do PLA de diferentes fornecedores (PLA nacional e PLA importado) na impressão 3D via Fabricação por Filamento Fundido (FFF).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a cristalinidade de cada um dos materiais utilizados (PLA nacional e PLA importado);
- Comparar a resposta mecânica das peças impressas em PLA nacional e em PLA importado;
- Avaliar impacto de diferentes padrões de deposição e parâmetros de processo na resistência mecânica das peças impressas por FFF;
- Identificar qual filamento apresenta o melhor custo benefício de acordo com as propriedades mecânicas dos componentes impressos, visando justificar o uso do PLA nacional como filamento principal;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção foi subdividida em tópicos, cujo objetivo é explorar os conceitos envolvidos na manufatura aditiva, bem como, os materiais utilizados. Serão descritas as principais técnicas de impressão 3D, com ênfase na técnica FFF, contemplando as vantagens e desvantagens, juntamente com os parâmetros necessários para caracterização física e mecânica dos produtos obtidos. Serão abordados os aspectos relacionados ao material de estudo, o PLA, suas propriedades, aplicações e principais características que o caracteriza como uma das grandes apostas na manufatura aditiva.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA MANUFATURA ADITIVA

Apesar de recente, às técnicas envolvidas na manufatura aditiva vêm ganhando cada vez mais destaque na área industrial. Pode-se dizer que as primeiras invenções e pesquisas se deram em 1960, porém foi no fim de 1970 e começo de 1980, que A. Hebert (3M em Minneapolis, EUA), H. Kodama (Instituto de Pesquisa da Prefeitura de Nagoya, Japão) e C. Hull (Ultraviolet Products, Inc. - UVP, da Califórnia, EUA) realizaram trabalhos independentes sobre os conceitos de prototipagem rápida (PR). (WHOLERS, 2014) Estes trabalhos eram baseados na cura (polimerização) seletiva de uma camada de um fotopolímero e construção de objetos tridimensionais, a partir da polimerização sucessiva de camadas de material. Enquanto Hebert e Kodama tiveram dificuldades em manter o apoio permanente dos centros de pesquisa dos quais faziam parte, e pararam seus trabalhos antes da fase comercial do produto, a UVP continuou apoiando a pesquisa de Hull garantindo, assim, o desenvolvimento de um sistema capaz de construir de forma automática peças de geometrias complexas. (RAYNA, STRIUKOVA, 2016)

Hull usou o termo *Stereolithography* (Estereolitografia) ou *Three-dimensional printing* (impressão 3D). O sistema foi patenteado em 1986, e nesse momento Hull e R. Freed, junto com acionistas da UVP, fundaram a 3D System, Inc. para desenvolver aplicações comerciais de impressão tridimensional. (BARBOSA, 2010)

Na década de 90 a impressão 3D obteve grande destaque, mais precisamente em 1997 com a comercialização da Estereolitografia (SLA) pela 3D Systems. Nesta técnica, de forma geral, promovia-se a solidificação de camadas finas de polímero sensibilizados pela luz ultravioleta (UV) através do uso de um laser. (WHOLERS, 2014)

Após desenvolvimento do método precursor da manufatura aditiva, SLA, novas técnicas passaram a serem comercializadas, mais precisamente em 1991, três tecnologias

surgiram, sendo estas, a Modelagem e Deposição por Fusão (FDM – Fused Deposition Modeling), atualmente denominada por Fabricação por Filamento Fundido (FFF), a cura sólida na base – SGC (Solid Ground Curing) e a fabricação de objetos laminados (LOM – Laminated Object Manufacturing). (WHOLERS, 2014)

De forma geral, a FFF consiste na extrusão de polímeros termoplásticos na forma de filamentos, camada a camada até formação da geometria desejada. A SGC segue um princípio similar à SLA, em que o material polimérico é fotossensível, porém neste processo é utilizado um polímero líquido que cura uma camada inteira de uma única vez, ou seja, a máquina impõe uma máscara correspondente à camada a ser gerada, que é impressa sobre uma placa de vidro. (CHICCA JUNIOR, 2017). O processo da LOM, consiste na deposição de folhas do material de forma sucessiva, e com o uso de um laser, a geometria é definida. Estas últimas duas técnicas não são tão comuns atualmente pois as empresas que as desenvolveram, Cubital e Helisys não estão mais no mercado. (WHOLERS, 2014) No início do ano 2000 houve um acelerado processo de inovações nesta área, novas impressoras foram lançadas no mercado, permitindo uma maior acessibilidade à tecnologia. Hoje é possível obter modelos novo de impressora por valores mais acessíveis, cada vez mais comum encontrá-las em empresas, escritórios de design, de arquitetura, área da saúde, educação e afins, que antigamente não era viável. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017). Segundo o estudo do Fórum Econômico Mundial, de 2018, 41% das organizações mundiais pretendem investir e aplicar a impressão 3D como facilitador de seus processos até 2022, e para o Brasil, a previsão é ainda mais promissora, chegando à 49% das organizações investindo neste setor. (RESEARCH, 2021)

Com relação ao mercado global atual. em 2020 ficou avaliado em US \$13,78 bilhões e como citado, tende a expandir cada vez mais, atingindo um crescimento anual de 21% de 2021 à 2028. Em 2020, globalmente, 2,1 milhões de unidades de impressoras foram vendidas e espera-se que este valor chegue à 15,3 milhões de unidades até 2028. Este impulsionamento do mercado deve-se em grande parte, em decorrência do investimento de empresas da área da saúde, aeroespacial, automotivo e de defesa. (RESEARCH, 2021)

Apesar da grande acessibilidade, demais fatores relacionados aos aspectos positivos, negativos e às limitações envolvidas variam de acordo com a técnica de prototipagem e estas variam de acordo com os objetivos e demandas de operação. Por exemplo, existem impressoras desenvolvidas para adaptação em diferentes materiais, impressão de alimentos, gesso, cimento, areia, argila, plásticos, chegando até mesmo à impressão de materiais vivos – células tronco.

São mais de 100 tipos de materiais que possuem aplicabilidade desenvolvida de impressão 3D. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

2.2 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, também denominada por impressão 3D, consiste em um processo de união de materiais para construção de objetos a partir de dados de um modelo 3D, caracteriza o processo de construção aditiva de uma peça construída pela deposição de camada sob camada, ao contrário de outras técnicas subtrativas, como por exemplo, o processo de usinagem. (ARANHA, 2019). Este processo possui uma gama variada de tecnologias para obtenção do objeto 3D, cada uma com suas próprias propriedades, limitações, eficiências e possibilidades de materiais. As peças podem ser obtidas de inúmeras maneiras, uma vez que, o preenchimento da camada e a orientação de impressão variam entre impressoras e entre os parâmetros de projetos escolhidos. As principais etapas envolvidas no processo de manufatura aditiva estão demonstradas no diagrama da Figura 1 abaixo. (MATHIAS, 2019).

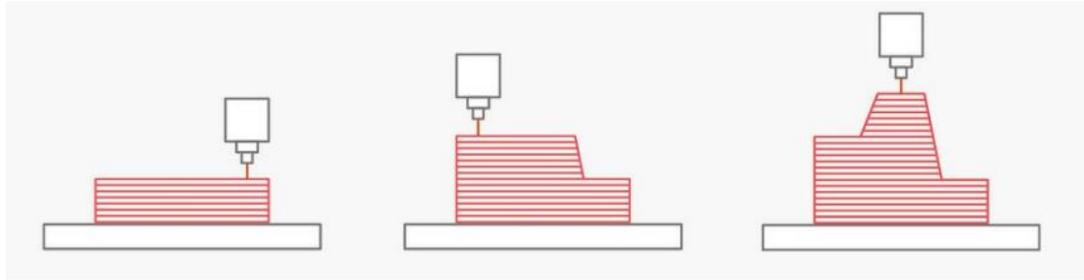
Figura 1 – Diagrama representativo das etapas envolvidas no processo de manufatura aditiva.



Fonte: adaptado de Mathias, 2019.

A obtenção de objetos via impressão 3D, está diretamente associada a utilização de um modelo digital desenvolvido em um software 3D, de CAD (*Computer Aided Manufacturing*) através da construção aditiva, ou seja, através da deposição de camada sobre camada de material, conforme demonstrado na Figura 2. A camada é depositada em um plano x-y bidimensional, em conjunto com a movimentação da plataforma de deposição na direção z, sendo que, quanto menor o passo z, mais fiel ao desenho 3D resulta a impressão. (COSTA, 2011)

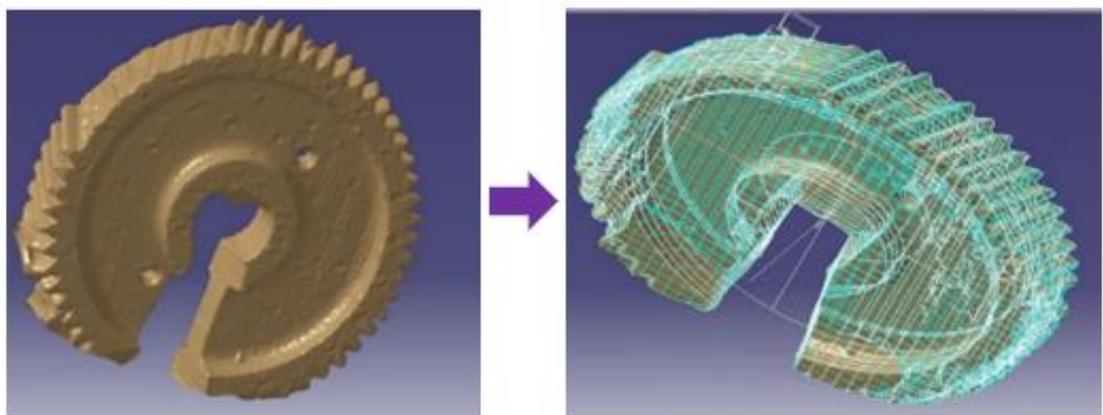
Figura 2 - Representação esquemática da obtenção de itens através da construção aditiva.



Fonte: Redwood; Schoffer; Garret, 2017.

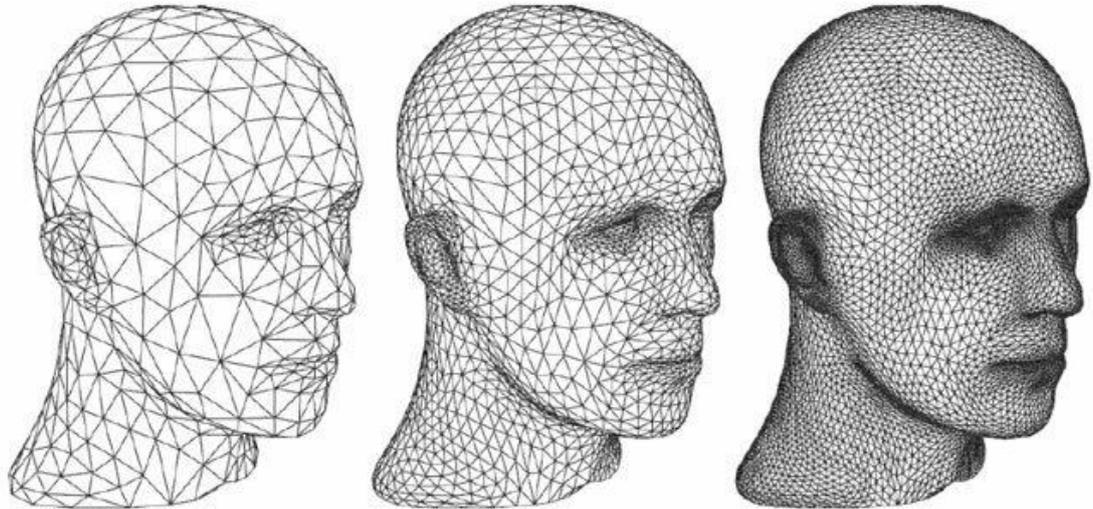
Para que a impressão ocorra, o modelo CAD deve ser convertido em um arquivo que a impressora possa ler, o arquivo mais comum é o *STereoLithography* (STL) – palavra em inglês para o termo estereolitografia. Neste arquivo a base desenhada em CAD é convertida em uma infinidade de triângulos para que o arquivo possa ser interpretado, uma vez que, o triângulo possui profundidade, direção e sentido, características fundamentais para a impressão 3D. De forma geral, o arquivo STL consiste na conversão do desenho 3D em uma malha geométrica, conforme exemplificado na Figura 3 abaixo. A quantidade de malhas a serem projetadas variam de acordo com a geometria e complexidade do objeto, e da resolução esperada. Quanto maior o número de triângulos, maior será a exatidão da forma, conforme demonstrado na Figura 4. (KUMAR; PANDEY; WIMPENNY, 2019)

Figura 3 - Representação da conversão do modelo 3D para o formato STL.



Fonte: adaptado de Kumar; Pandey; Wimpenny, 2019.

Figura 4 - Influência da quantidade de malhas na resolução do objeto a ser impresso.

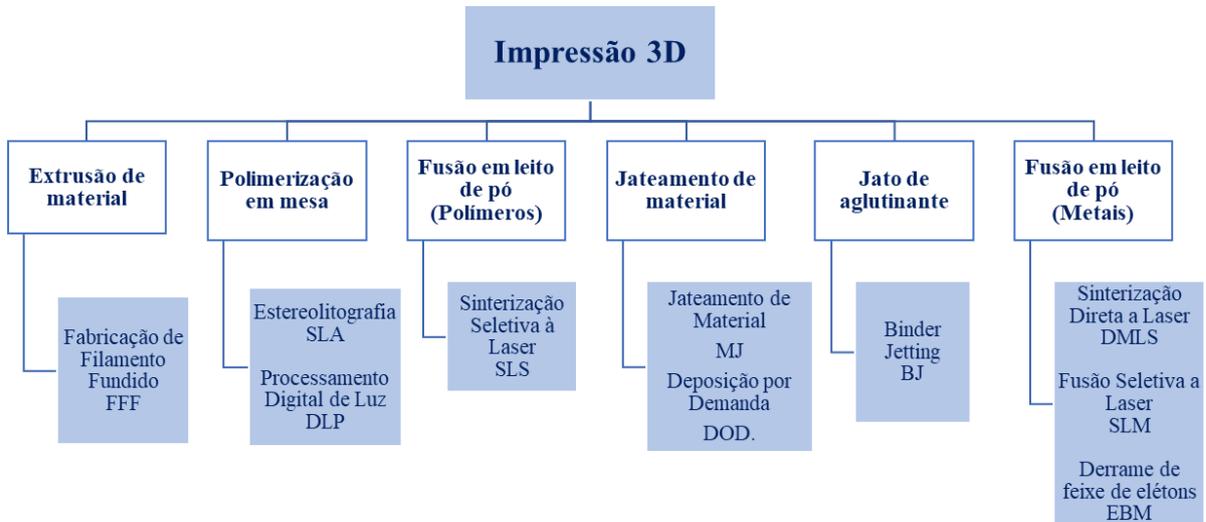


Fonte: Redwood; Schoffer; Garret, 2017.

A partir da modelagem 3D, se faz o planejamento do processo, ou seja, são definidos os parâmetros de orientação, suportes, técnica de preenchimento, porosidade, espessura de camadas e afins. Em seguida é programada a impressão e por fim, determina-se o pós-processamento ou acabamento superficial, incluindo, limpeza, lixamento, revestimento, dentro outros, de forma a conferir o acabamento superficial necessário. (COSTA, 2011)

Dentre as diferentes técnicas empregadas na impressão 3D, estas podem ser classificadas de acordo com o método de impressão, sendo estes: Laser, extrusão, jateamento adesivo e feixe de elétrons. Dentro de cada classe existem no mínimo dois processos distintos, porém, que obedecem ao mesmo princípio. A impressão 3D é aplicada em todas as classes de materiais, porém cada classe com suas técnicas particulares, as principais tecnologias existentes na atualidade estão demonstradas no diagrama da Figura 5 abaixo. (ARANHA, 2019).

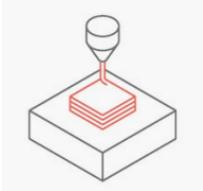
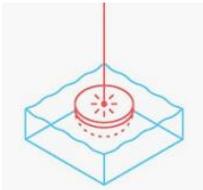
Figura 5 – Diagrama das principais tecnologias existentes de prototipagem rápida.

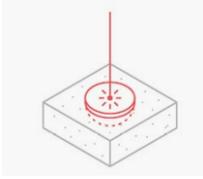
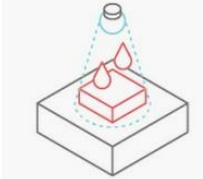
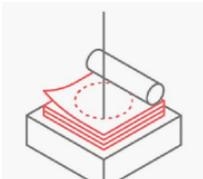


Fonte: adaptado de Sadasivuni; Deshmukh; Almaadeed, 2020.

Conforme o diagrama acima, no quadro 1 abaixo, está exposto uma descrição breve dos principais processos de manufatura aditiva utilizados atualmente. Juntamente com os principais processos estão os respectivos materiais que podem ser aplicados.

Quadro 1 - Descrição dos principais processos de manufatura aditiva.

Processo	Descrição	Tecnologia	Material
Extrusão de Material 	Processo impressão 3D em que o material é utilizado na forma filamentar e depositado através de um bico de extrusão, promovendo distribuição de camada a camada na base de impressão.	Fabricação de Filamento Fundido (FFF)	Polímeros Termoplásticos
Polimerização em Mesa 	Processo de impressão 3D, o qual utiliza um fotopolímero líquido em uma cuba, cuja polimerização é ativada por luz.	Estereolitografia (SLA); Processamento Digital de Luz (DLP)	Resinas Termorrígidas

<p>Fusão em Leito de Pó</p> 	<p>Processo de impressão 3D, em que o material particulado termofundível depositado sobre a plataforma de impressão é polimerizado através de um feixe de laser de CO₂.</p>	<p>Sinterização Seletiva à Laser (SLS); Sinterização Direta a Laser (DMLS); Fusão Seletiva a Laser (SLM); Derrame de feixe de elétrons (EBM).</p>	<p>Resinas Termoplásticas e Materiais Metálicos</p>
<p>Jateamento de Material</p> 	<p>Processo de impressão 3D através da deposição seletiva de gotas de material que são curadas quando expostos à luz sobre a plataforma de impressão.</p>	<p>Jateamento de Material (MJ); Deposição por Demanda (DOD).</p>	<p>Resinas Termorrígidas</p>
<p>Jateamento de Aglutinante (cola)</p> 	<p>Processo de impressão 3D em que um agente ligante é jateado sobre o material em pó depositado na plataforma de impressão.</p>	<p><i>Binder Jetting (BJ)</i></p>	<p>Materiais Metálicos e Particulados Cerâmicos (Areia).</p>
<p>Laminação de Folhas</p> 	<p>Processo de impressão 3D através da deposição de laminados de plástico ou metal que são fundidos utilizando calor e pressão, ou por meio de soldagem ultrasônica, e cortados por um laser no formato projetado.</p>	<p>Fabricação de Objetos Laminados (LOM); Manufatura Aditiva Ultrasônica (UAM)</p>	<p>Materiais Poliméricos e Metálicos.</p>

Fonte: adaptado de Redwood; Schoffer; Garret, 2017.

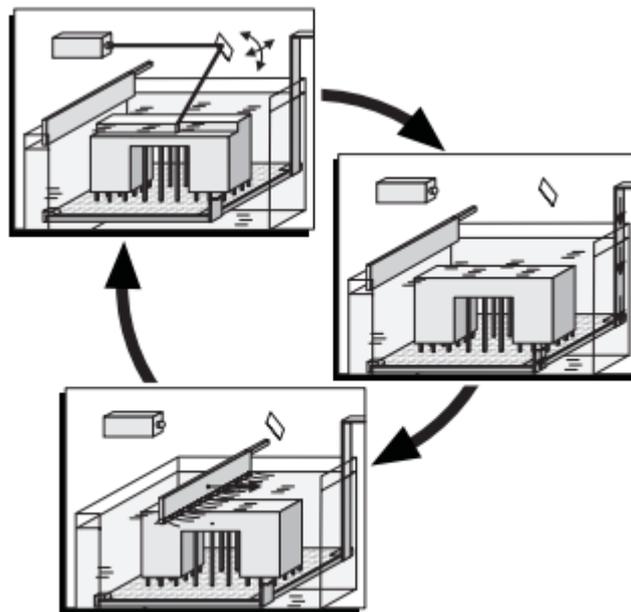
Ao que se refere aos materiais poliméricos, as técnicas de grande aplicação na manufatura aditiva são, Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva à Laser (SLS), e a Fabricação por Filamento Fundido (FFF), ambas as técnicas serão detalhadas nos itens abaixo. (SADASIVUNI; DESHMUKH; ALMAADEED, 2020).

2.2.1 Impressão 3D via Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia é uma técnica de manufatura aditiva amplamente utilizada e conta com um mecanismo de impressão de polimerização fotoiniciada, em que o desenvolvimento do componente, conforme mencionado anteriormente, ocorre diretamente a partir de um modelo 3D gerado em softwares, como por exemplo o CAD (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017).

Para impressão via SLA, são utilizados espelhos, conhecidos como galvanômetros ou galvos, (um no eixo x e outro no eixo y) para apontar rapidamente um feixe de laser através de um tanque, a área de impressão, polimerizando e solidificando a resina à medida que avança, conforme demonstrado na Figura 6. Sendo assim, no início do processo, a plataforma se encontra perto da superfície da resina líquida, e o feixe de laser percorre uma trajetória de cura que compreende à base do objeto a ser formado. (MATHIAS, 2019).

Figura 6 – Princípio da técnica de Estereolitografia.



Fonte: Gebhardt; Hotter, 2016.

Este mecanismo proporciona alta precisão dimensional, sendo constantemente utilizada como referência para demais métodos de prototipagem rápida. Além do mais, proporciona desenvolver protótipos de forma a identificar e visualizar possíveis defeitos e erros que poderiam vir a causar grandes prejuízos em uma produção em larga escala. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

Para o desenvolvimento desse processo se utiliza resina líquida composta de monômero/oligômero fotocurável, fotoiniciador e juntamente com os demais aditivos são colocados em um reservatório onde uma plataforma de construção é usada para controlar o movimento da resina. Duas direções de impressão, de baixo para cima e de cima para baixo são aplicadas em diferentes impressoras SLA. (COSTA, 2011). Vale ressaltar que o processo de

construção se dá por camadas da resina líquida a ser utilizada em ambas as configurações. (ARANHA, 2019).

A técnica de SLA pode ser classificada de acordo com a movimentação da plataforma de suporte e com relação ao movimento do Laser. Como citado anteriormente a movimentação da plataforma pode ser de baixo para cima ou de cima para baixo. O laser é incidido com um comprimento de onda característicos para cada material para garantir que o processo de polimerização de início. A resina pode preencher o espaço entre a resina solidificada e o reservatório automaticamente por gravidade, portanto, o rolo não é necessário para a impressora SLA de baixo para cima. (WHOLERS, 2014). O processo continua até que se obtenha a quantidade e o formato das camadas projetadas. Após a finalização a plataforma é elevada para que o excesso de resina não curado possa ser descartado. (BARBOSA, 2010)

A outra classificação se dá de acordo com a movimentação do laser, que pode ser dividida em duas outras técnicas, uma delas baseada em projeção (PSL) e outra em varredura (SSL). A primeira técnica varre a superfície como um todo, ou seja, com uma única foto de exposição a laser padronizada, diferente deste movimento o SSL varre a superfície de cada camada ponto a ponto para posteriormente desenvolver o padrão. O PSL é então mais adequado para peças pequenas sem grandes volumes de espessura, até mesmo pelo fato de ser uma impressão que ocorre com maior rapidez. (BARBOSA, 2010)

Um dos grandes desafios relacionados a esta técnica é a precisão no caso de grandes superfícies planas, uma vez que, há o encolhimento de cada camada após solidificação. Quando essa redução se dá no topo de uma camada previamente solidificada, ocorre a formação de uma tensão entre elas, gerando ondulações na superfície, portanto, a orientação da peça e o planejamento do suporte são importantes para evitar o problema. Neste caso, as resinas mais flexíveis apresentam uma tendência maior ao empenamento e podem não ser indicadas para aplicações de alta precisão. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

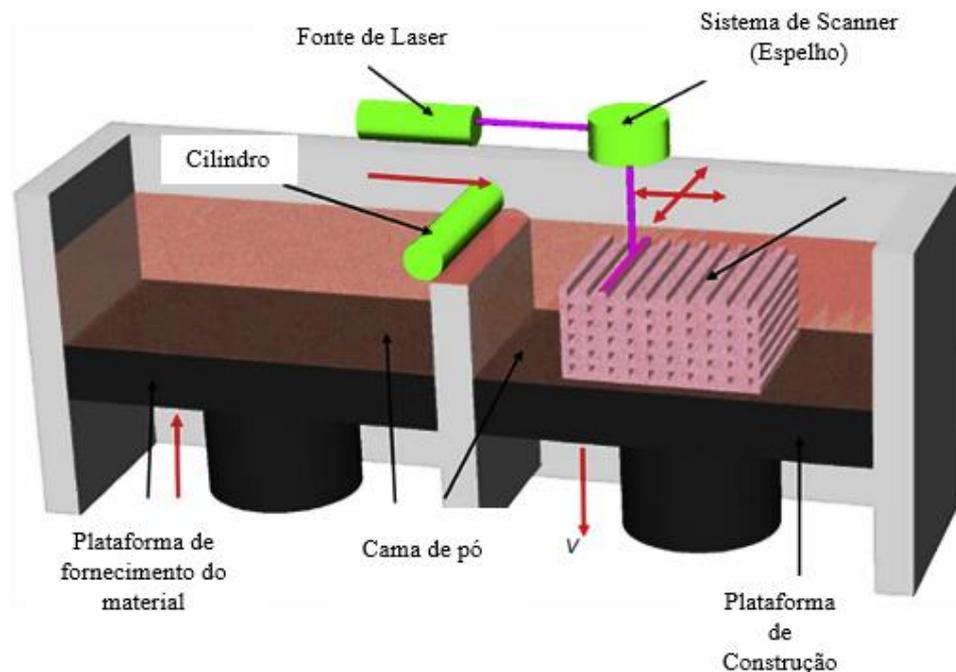
Conforme mencionado acima, é importante atentar ao planejamento do suporte do modelo para que não ocorram alterações dimensionais na peça, apesar de ser uma técnica que permite a obtenção de peças com alta precisão, visto é possível trabalhar com espessuras tão pequenas quanto 0,3mm. Sendo assim, no momento do planejamento do suporte é importante que estes fiquem na parte menor visível do modelo, pois no momento da remoção criam marcas e irregularidades na superfície. Porém, de maneira geral, as peças por SLA apresentam um excelente acabamento superficial, muito similar à uma peça moldada por injeção. (KUMAR; PANDEY; WIMPENNY, 2019). Por conta da alta precisão dimensional e alta qualidade do

acabamento superficial, esta técnica é utilizada geralmente nas indústrias de joalheria e odontológica. Em contrapartida, a maior limitação desta técnica são as propriedades do material utilizado no processo. As resinas são frágeis e não apresentam resistência ao impacto e a durabilidade que as peças desenvolvidas por outros métodos produtivos, como a injeção, por exemplo. Mesmo com o desenvolvimento de revestimentos de proteção a SLA ainda não conseguiu ser competitiva com o processo de injeção. (KUMAR; PANDEY; WIMPENNY, 2019).

2.2.2 Impressão 3D via Sinterização Seletiva à Laser (SLS)

A técnica de SLS, ou também denominada como fusão em leito de pó, proporciona a obtenção de objetos a partir do princípio de construção por camadas com o auxílio de um feixe de laser, o qual promove a fusão do material em pó. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017) O SLS utiliza uma varredura de um feixe de laser controlada para sinterizar o pó por aquecimento nas regiões previamente definidas, promovendo a obtenção do objeto 3D projetado, conforme mostrado esquematicamente na Figura 7 (SADASIVUNI; DESHMUKH; ALMAADEED, 2020)

Figura 7: Representação esquemática do sistema SLS.



Fonte: Sadasivuni; Deshmukh; Almaadeed, 2020.

A configuração de impressão consiste em uma fonte de laser, um leito de pó, plataforma de fornecimento de pó, rolo, sistema de varredura e plataformas de fabricação. Uma lâmina de recobrimento deposita uma camada muito fina do material em pó (normalmente 0,1 mm) em uma plataforma de construção, que se funde sob laser de alta potência por meio de difusão molecular seguida pelo início do processamento da próxima camada, e o pó indesejado e não fundido é removido para obter o produto final. (SADASIVUNI; DESHMUKH; ALMAADEED, 2020) O cilindro então reposiciona a nova camada no topo e o laser começa a sinterizar a secção transversal da peça e assim o processo se estende até finalização da impressão. O pó que não foi utilizado para a sinterização também pode ser utilizado como suporte da peça, dessa forma não é necessário montar um suporte à parte. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

A precisão e qualidade da impressão por SLS irá depender do ponto do laser e a altura da camada de pó depositada, sendo a camada geralmente padrão de 0,1mm. Outro fator importante são as características do pó utilizado, como, tamanho e geometria, quanto mais fino mais lisa será a superfície final do item impresso, em contrapartida tendem a gerar maiores dificuldades de manuseio no equipamento. Pós com granulometrias maiores, embora sejam mais práticos de se trabalhar, prejudicam o acabamento superficial, logo, o importante a avaliar o melhor tamanho de acordo com o objetivo de impressão. (KUMAR; PANDEY; WIMPENNY, 2019).

A SLS é mais adequada para a fabricação de itens que necessitam de maiores resistências mantendo sua complexidade geométrica. Os objetos obtidos possuem as vantagens de apresentarem alta precisão geométrica, com propriedades mecânicas uniformes em todas as direções, e com acabamento superficial sem marcas de camadas (porém, podem ficar com o aspecto granuloso), conforme demonstrado na Figura 8. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017) O fato de não necessitar de estrutura de suporte é um ponto de destaque, pois evita que fiquem marcas na superfície. Contudo, uma grande limitação da impressão por SLS é o elevado custo dos equipamentos e o tempo necessário para a impressão relativamente mais longo. (SADASIVUNI; DESHMUKH; ALMAADEED, 2020)

Figura 8 - Suporte impresso via SLS

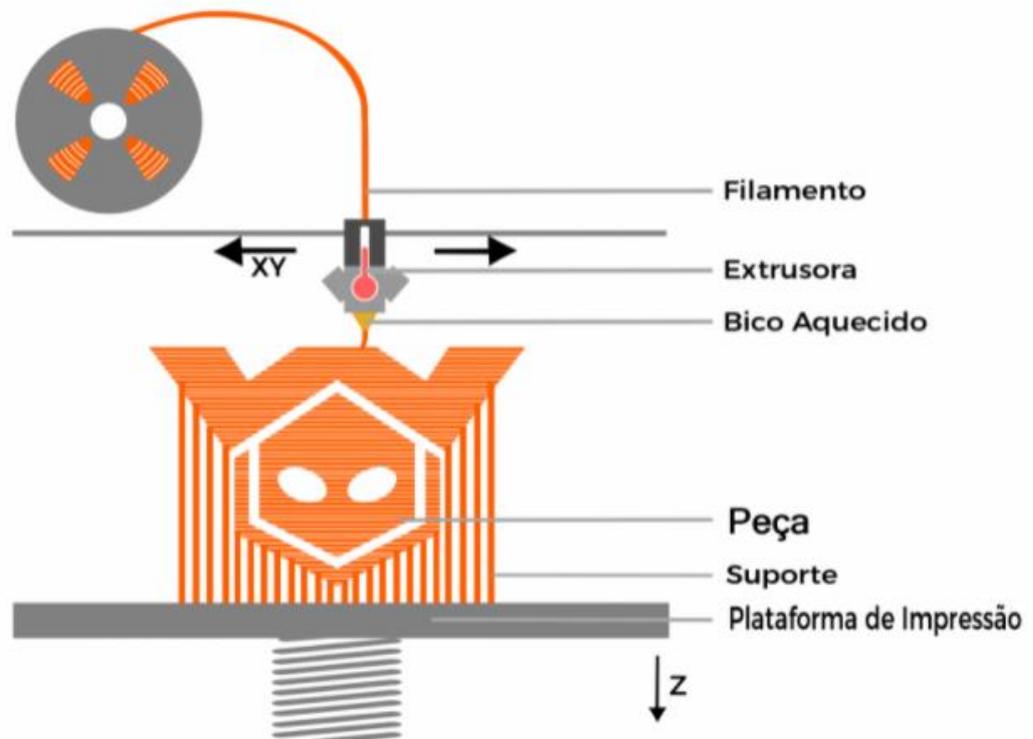


Fonte: Redwood; Schoffer; Garret, 2017

2.2.3 Impressão 3D via Fabricação de Filamento Fundido (FFF)

A técnica de extrusão de material mais comum é a Fabricação por Filamento Fundido – FFF, a qual consiste em termos gerais na extrusão de material filamentar sobre a placa de impressão, conforme demonstrado pela Figura 9. Neste método, a bobina de filamento alimenta o cabeçote e assim que o bico atinge a temperatura programada, o motor aciona o filamento para atravessar o bico aquecido, derretendo-o. A ferramenta de extrusão tem movimento na direção X-Y, enquanto a plataforma se movimenta no eixo Z. Sendo assim, o cabeçote movimenta depositando o material sobre a plataforma de impressão de acordo com as posições pré-programadas, e o processo se repete até a construção final da peça, camada sobre camada. A quantidade de material que alimenta o bico de aquecimento determinará a pressão de extrusão, forçando o material através do bico, ou seja, o tracionamento do próprio filamento atua como um êmbolo no início do processo de extrusão, expulsando o filamento através do bico. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019).

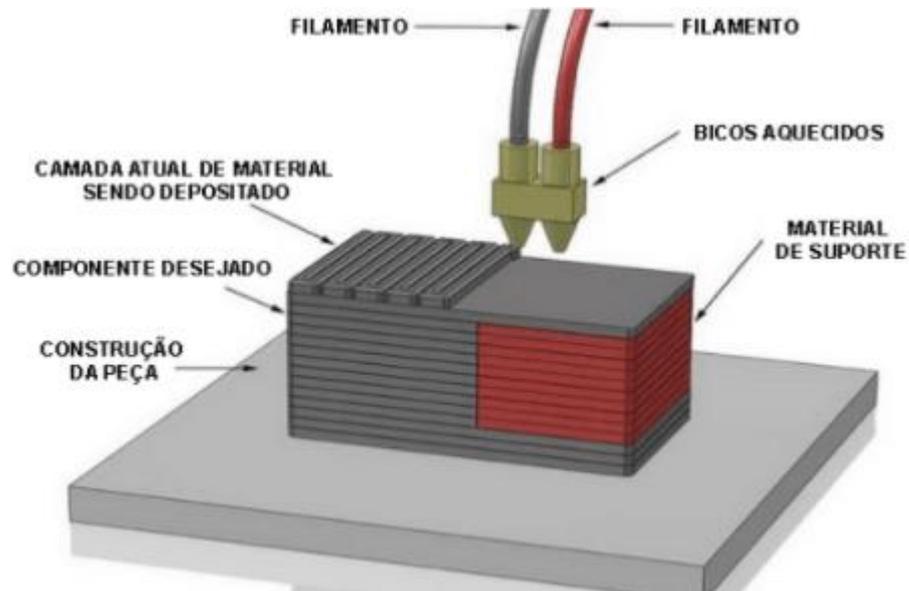
Figura 9 - Representação do processo de impressão 3D via Fabricação por filamento fundido



Fonte: WishBox, 2019)

O material é utilizado no estado líquido viscoso, atingido após o aquecimento do material pelos bicos da extrusora e depositado na plataforma de construção a uma temperatura de no mínimo 1°C acima da sua temperatura de fusão, resfriando imediatamente após a deposição devido à transferência de calor imediata, aderindo nas camadas pré-depositadas. (MATHIAS, 2019). Conforme demonstrado na Figura 10, embora a solidificação do material seja rápida, em muitos casos são necessários suportes para as regiões de projeção. As colunas de suporte extrudadas são feitas de um material mais frágil do que o componente, o que permite uma extração prática manual e rápida sem promover danos à estrutura e sem necessidade de ferramentas para a posterior remoção. (SANTOS *et al.*, 2018). Muitas vezes, quando necessário utilizar dois filamentos distintos a impressora é projetado com um segundo bicos de extrusão, responsável pela deposição do segundo material, sendo muito comum nos casos em que se faz necessário a construção dos suportes durante a impressão do componente. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019).

Figura10: Representação de uma impressora 3D por FFF com dois bicos extrusores.



Fonte: Cabreira; Santana, 2020.

Durante a impressão via FFF, algumas variáveis são passíveis de alteração, e influenciam diretamente na qualidade e/ou velocidade da impressão. A velocidade de deposição, a velocidade de extrusão e a temperatura do bico definem a consistência do filamento extrudado (alguns parâmetros são disponibilizados como referência de acordo com o material), demais variáveis como diâmetro do bico e altura da camada definem a resolução da impressão. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016) Outras variáveis se referem ao ângulo de impressão e a taxa de preenchimento do componente impresso, uma vez que, as peças por FFF em sua maioria para economizar material e reduzir tempo de impressão não são impressos com o preenchimento completo conforme ilustrado na Figura 11. As influências de cada variável serão melhor descritas na próxima secção deste trabalho. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).

Figura 11: Peça impressa via FFF com alteração da taxa de preenchimento



Fonte: Redwood; Schoffer; Garret, 2017

O processo de impressão por FFF se estende à inúmeras aplicações, tendo destaque nas áreas de design e arquitetura, no que se refere à produção em grande escala de itens decorativos, na área de fundição, referente à produção de moldes e modelos, uma vez que proporcionam uma alternativa prática e barata comparado aos materiais disponíveis no mercado e, em protótipos para o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos. Uma das grandes vantagens que geram tamanha popularidade da técnica é a possibilidade de trabalhar com materiais baratos e de alta disponibilidade, produzindo componentes nos mais diversos tamanhos e estruturas. Com isso, a FFF caracteriza uma técnica de prototipagem rápida de baixo custo e de fácil operação, aspectos estes que fazem da FFF uma técnica muito competitiva na produção de componentes a partir de materiais termoplásticos, representando a maior base instalada de impressoras 3D no mundo. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

O processo é consideravelmente limpo, uma vez que, não exige utilização de químicos fortes ou tóxicos, e dispõe de uma ampla variedade de materiais para aplicação, incluindo polímeros amorfos e semicristalinos. Vale ressaltar que consiste em um equipamento compacto e seu processo se dá em uma única estação, ou seja, não necessita de equipamentos extras. (CUAN-URQUIZO *et al.*, 2019)

As principais limitações da impressão via FFF se referem à obtenção de peças e/ou componentes com propriedades anisotrópicas decorrentes dos padrões de deposição das camadas, gerando maior fragilidade quando submetidas a esforços sob determinadas direções, portanto, é importante levar em consideração a aplicação da peça e os esforços nos quais será submetida para avaliar o melhor padrão de impressão a ser programado. (CABREIRA; SANTANA, 2020). Vale ressaltar a maior dificuldade de se obter alta precisão dimensional, uma vez que, a impressão pode variar de espessura ficando entre 0,05mm e 0,3mm

ao longo do tempo de impressão, principalmente no caso de geometrias mais complexas. Para maiores precisões dimensionais, se faz necessário um tempo muito longo de impressão, tornando o processo inviável e além do mais, o bico de extrusão é circular, muitas vezes impossibilita a formação de cantos em geometrias mais complexas. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019). Outra desvantagem atrelada à FFF é a produção de peças com a superfície rugosa, no sentido em que as camadas de deposição ficam visíveis necessitando de um pós-processamento para remoção das irregularidades. (CABREIRA; SANTANA, 2020). Na Figura 12 abaixo, está ilustrado um suporte impresso via FFF, interessante observar a diferença de acabamento superficial quando comparado ao suporte impresso via SLS demonstrado na Figura 8. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Figura 12- Suporte de PLA impresso via processo FFF



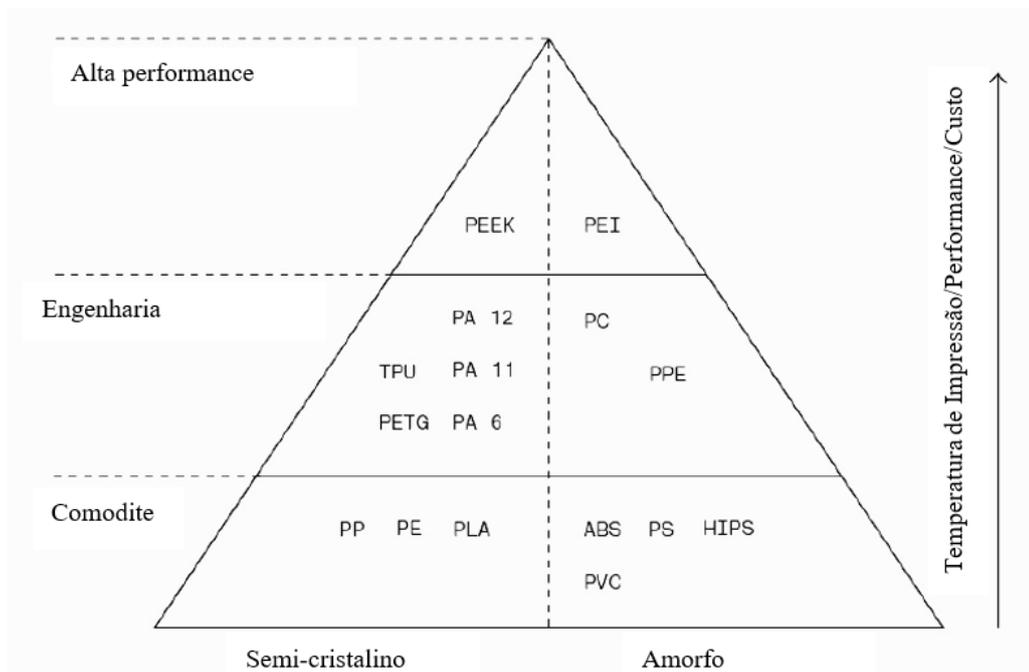
Fonte: Redwood; Schoffer; Garret, 2017

Existem diferentes materiais termoplásticos disponíveis para a aplicação na impressão por FFF, porém alguns materiais precisam de equipamentos personalizados de acordo com a temperatura necessária para serem utilizados. (SADASIVUNI; DESHMUKH; ALMAADEED, 2020) De forma geral, são utilizados filamentos de termoplásticos normalmente com diâmetros variando de 1,75mm à 3mm, desde materiais comerciais, com preço mais acessível à materiais de engenharia (alto desempenho) de alto custo, como o PEEK - Poli(éter-éter-cetona), por exemplo, para aplicações especiais. De forma geral, quanto melhores forem suas propriedades mecânicas, maior será a temperatura de processamento, logo, maior a dificuldade de impressão

e controle dimensional, uma vez que, materiais que necessitam de altas temperaturas de processamento apresentam maior tendência de empenamento e variações dimensionais decorrentes da sua maior taxa de resfriamento ao longo da impressão, podendo gerar tensões internas mais severas. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Os materiais comumente utilizados na FFF estão elencados na pirâmide abaixo, demonstrada na Figura 13, a qual separa os materiais de acordo com sua estrutura cristalina, sua temperatura de processamento, performance e custo. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017) Na base da pirâmide estão os materiais comerciais, mais utilizados decorrentes da facilidade de obtenção e processamento, direcionados à fabricação de componentes que não requerem características especiais de engenharia. (CABREIRA; SANTANA, 2020).

Figura 13 – Principais polímeros utilizados na impressão 3D.



Fonte: Adaptado de Redwood; Schoffer; Garret, 2017

No topo da pirâmide estão os termoplásticos desenvolvidos para aplicações específicas que exigem materiais de alta performance, como é o caso do PEEK e PEI, em contrapartida, além de serem materiais mais caros, exigem equipamentos desenvolvidos especificamente para sua impressão, pois, necessitam de um maior controle de aquecimento e resfriamento para garantir a qualidade e estabilidade do produto final. No Quadro 2 abaixo, estão destacadas as

principais características de alguns destes termoplásticos de maior utilização. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Quadro 2 – Principais características dos termoplásticos mais utilizados na manufatura aditiva.

Material	Características
ABS - Acrilonitrilo-butadieno-estireno	<ul style="list-style-type: none"> - Boas propriedades mecânicas; - Boa resistência térmica; - Susceptível ao empenamento.
PLA - Políácido Láctico	<ul style="list-style-type: none"> - Maior aplicação em FFF; - Facilidade de impressão e controle do processo; - Baixa resistência ao impacto, menor coeficiente de elasticidade e menor resistência à temperatura que o ABS.
PA 66 – Poliamida 66	<ul style="list-style-type: none"> - Boa flexibilidade; - Ótima resistência química; - Não requer pós-processamento.
PETG - Politereftalato de Etileno Glicol	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistência ao impacto; - Alta resistência química; - Boas propriedades térmicas; - Susceptível ao empenamento.
TPU – Poliuretano Termoplástico	<ul style="list-style-type: none"> - Boa flexibilidade; - Baixa precisão na impressão.
PEI - Polietierimida	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente resistência mecânica; - Alta resistência química; - Alta resistência à chama; - Alto custo.

Fonte: adaptado de Sadasivuni; Deshmukh; Almaadeed, 2020.

2.3 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO E QUALIDADE DA PEÇA NO PROCESSO FFF

Os componentes impressos via FFF podem ser categorizados tecnicamente de acordo com sua resposta mecânica no que diz respeito a resistência à tração, flexão e impacto, a precisão dimensional final e a precisão estrutural – de forma, bem como, podem ser categorizados devido fatores econômicos envolvidos no processo, como tempo de fabricação e quantidade de material utilizada, considerando tanto o material de construção quanto de suporte. Ambas descrições levantadas são influenciadas pelos parâmetros de processo escolhido, os quais são definidos e controlados pelo projetista, seja de forma direta ou indireta. (SANTANA, 2015).

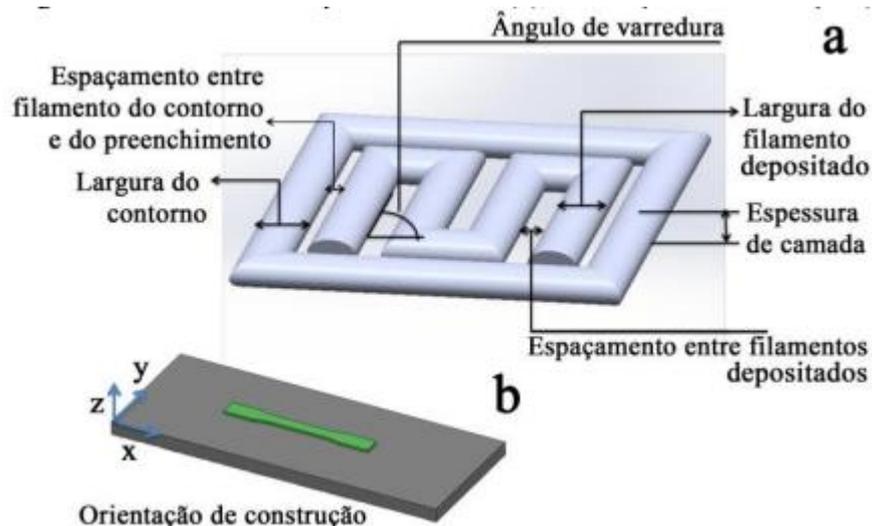
No processo de fabricação por filamento fundido ocorre a deposição do material sobre a plataforma de criação, e no decorrer deste processo algumas variáveis são evidenciadas e as configurações pré-determinadas caracterizam as propriedades final de componente impresso. As variáveis iniciam nos parâmetros de impressão configurados no software, seguem para o equipamento de impressão utilizado, método de aquecimento no bico de extrusão, dimensões

dos bicos e filamentos e assim por diante. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017) Dito isso, os parâmetros envolvidos na técnica por FFF podem ser classificados de da seguinte forma:

- Parâmetros de Fabricação: Temperatura de extrusão, velocidade de impressão ou taxa de deposição, temperatura da plataforma, temperatura ambiente e afins. (CUAN-URQUIZO *et al.*, 2019).
- Parâmetros Estruturais: Distância entre camadas, orientação de deposição, porosidade e afins. (CUAN-URQUIZO *et al.*, 2019).

Dessa forma, muitos parâmetros podem ser ajustados buscando uma impressão com maior precisão. As principais características a serem avaliadas para a impressão dos componentes estão demonstrados na Figura 14, e são eles: ângulo de varredura, largura do filamento depositado (largura de varredura), espessura da camada, largura do contorno, orientação de construção, espaçamento entre filamentos depositados, espaçamento entre filamento do contorno e do preenchimento. Vale ressaltar, que ao se referir ao termo varredura (raster), é uma descrição utilizada para o filamento depositado pelo bico de extrusão durante o processo de impressão. (SANTANA, 2015)

Figura 14- a – parâmetros do processo FFF, b – orientação de construção.



Fonte: Santana, 2015.

Os parâmetros citados e ilustrados na Figura 14, podem ser descritos da seguinte forma:

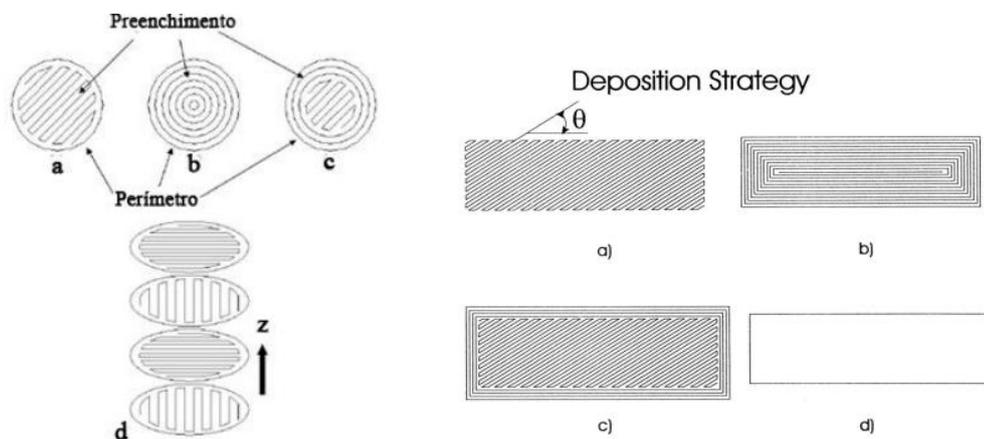
- Ângulo de varredura (*raster angle*): ângulo em que os filamentos (varreduras) estão dispostos em relação ao eixo X da plataforma de construção. (SANTANA, 2015)
- Largura do filamento (*part raster width*): Largura do filamento depositado, a qual está ligada diretamente ao tamanho do bico de extrusão utilizado, podendo ser selecionada de acordo com a faixa de recomendação para cada equipamento e material. (SANTANA, 2015)
- Espessura de camada (*layer thickness*): Corresponde à espessura (altura) de cada camada de material depositada ao longo do eixo Z e está diretamente relacionada ao tipo de bico extrusor utilizado. (COUTINHO, 2017).
- Largura do contorno (*contour width*): Corresponde a largura do perímetro até o início do preenchimento do componente (contorno que circunda a peça). (SANTANA, 2015)
- Orientação de construção (*build rientation*): Determina à orientação da disposição do componente na plataforma em relação aos eixos X, Y e Z, sendo X e Y os eixos paralelos à plataforma de construção. (COUTINHO, 2017).
- Espaçamento entre filamentos depositados (*raster to raster air gap ou air gap*): espaço vazio entre filamentos, ou seja, corresponde a distância entre dois filamentos adjacentes entre si. (SANTANA, 2015) As varreduras podem estar distantes entre si, gerando um valor positivo do espaçamento, podem estar em contato direto com espaçamento nulo ou podem estar com espaçamento negativo, neste caso ocorre sobreposição dos filamentos. (COUTINHO, 2017).
- Espaçamento entre filamento do contorno e do preenchimento (*rater to contour air gap ou air gao between contourn and rasters*): Corresponde a distância entre filamentos de contorno de perímetro (externo) e os filamentos de preenchimento interno do componente. Como padrão é visado a obtenção de espaçamento nulo, sendo assim se tangenciam. (SANTANA, 2015)

No processo de FFF, a construção das camadas começa pela identificação do perímetro da seção transversal do componente. O perfil tem de possuir contorno fechado, em que o local e início e final se coincidem. Após determinação do perímetro, ocorre o preenchimento da região interna da peça. (COUTINHO, 2017). Na Figura 15 está um esquema indicando o

perímetro e algumas possibilidades de enchimento. Segundo Coutinho (2017), as formas mais gerais e práticas de preenchimento podem ser descritas como:

- Raster: denominada pelo preenchimento em zig-zag, trajetória onde os filamentos estão dispostos paralelamente entre si.
- Contour: preenchimento neste caso ocorre por vários ciclos equidistantes dispostos, de acordo com o perímetro ou perfil da camada.
- Contour e raster: resultado da combinação dos dois métodos de preenchimentos citados em cada camada.

Figura 15: Possibilidades de preenchimento no processo FFF; a – raster, b – contour, c – contour e raster, e d – camadas alternadas em 90°.



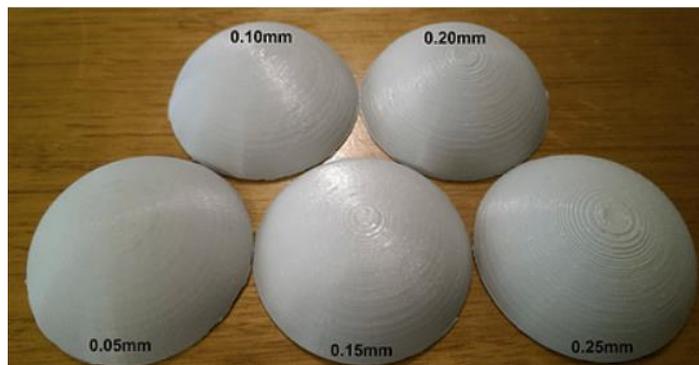
Fonte Li, 2002.

Além dos parâmetros destacados, a velocidade de impressão, a velocidade de extrusão (velocidade que o filamento passa pelo bico) e a temperatura do bico determinam a consistência do filamento depositado e são controladas pelo operador (podendo usar definições automáticas com base no material utilizado). No caso de altas velocidades de impressão, o material pode não atingir a temperatura esperada e não aderir na camada anterior, provocando defeitos na impressão. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016) Da mesma forma que, no caso de super aquecimento o material tende a perder as propriedades e não solidificar da maneira esperada durante a deposição. A temperatura de extrusão é determinada considerando as propriedades reológicas do material e sua temperatura de fusão. (COUTINHO, 2017). Segundo de Sadasivuni; Deshmukh; Almaadeed (2020), para realizar o ajuste da temperatura de maneira eficaz é necessário ponderar três requisitos importantes:

- Viscosidade baixa do material fundido na região de aquecimento, a fim de otimizar a extrusão do mesmo pelo bico;
- Capacidade de amolecer a camada pré-depositada garantindo a adesão entre as camadas do material;
- Viscosidade suficiente para garantir que o material depositado se suporte sob a camada previamente depositada.

A resolução, ou seja, a precisão da peça impressa por FFF são definidos principalmente pelo diâmetro do bico e a altura da camada. Embora todos os parâmetros definam a precisão dimensional, o uso de um bico menor e uma menor altura entre as camadas propiciam melhores resoluções de impressão, gerando uma peça com superfície lisa. Em contrapartida há um custo aplicado, pois, a velocidade de impressão tende a reduzir, a escolha dependerá do objetivo final da impressão, no geral varia entre 0,05 mm a 0,4 mm. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016). Na Figura 16 abaixo é possível observar a diferença de impressão em diferentes alturas utilizadas.

Figura 16- Influência da altura de impressão na resolução final do componente impresso.



Fonte: Santana, 2015.

2.3.1 Controle do Fluxo de Material

Além dos parâmetros já citados, como, método de preenchimento, espessura e largura da camada, parâmetros relacionados diretamente ao fluxo de material exercem influência direta na qualidade do processo de impressão, pois um ajuste falho destes parâmetros pode gerar graves defeitos às características estruturais das peças. (MATHIAS, 2019). É importante destacar a necessidade de se realizar o controle do fluxo de material de forma precisa através do cabeçote de extrusão para garantir a qualidade das peças. Um sistema com controle preciso significa que o fluxo de material deve ter uma taxa de vazão na saída do sistema de mesma

intensidade à que foi comandada, no entanto podem ocorrer variações ao longo do processo que prejudicam esse resultado. (SANTANA, 2015)

Para realização de um controle adequado do processo de extrusão, alguns fatores devem ser considerados, sendo eles:

- Pressão de entrada do material: este parâmetro tende a sofrer alterações ao longo do processo, uma vez que, depende de outros parâmetros de controle. A modificação na pressão de entrada determina a taxa de deposição do processo e sua alteração faz com que a taxa de deposição também sofra modificações. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).
- Temperatura: a constância da temperatura é fundamental para garantia da homogeneidade do processo, apesar de sofrer flutuações facilmente, é imprescindível realizar o controle da temperatura na zona de aquecimento para que quaisquer oscilações que venham a ocorrer possam ser compensadas realizando ajustes na pressão de entrada do material. (SANTANA, 2015) Sendo assim, caso ocorra aumento da temperatura é recomendado reduzir a pressão para manter a taxa de deposição constante. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).
- Diâmetro do bico: O diâmetro é intrínseco do equipamento escolhido, porém pode ser alterado ao longo do processo de extrusão como meio de compensação da velocidade ao invés da precisão. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).
- Propriedades do material: as características do material devem estar dispostas nos modelos de controle, contemplando informações como viscosidade do material para auxiliar no planejamento de compensação do fluxo do filamento através do bico extrusor. (SANTANA, 2015)
- Gravidade e demais fatores: o efeito da gravidade pode promover a deposição do material mesmo que não esteja sendo aplicada pressão na câmara, uma vez que, a massa de material fundido provoca pressão sob o cabeçote. Este efeito é intensificado por pressão gasosa gerada dentro do sistema, no caso de sistema fechado (lacrado). A tensão superficial do material e as forças de arraste nas regiões internas do bico podem minimizar esse efeito. (SANTANA, 2015)
- Temperatura no componente impresso: logo após o material ser extrudado a peça passa a resfriar homogeneamente ou heterogeneamente de acordo com a geometria impressa. Peças maiores e densas (maciças) tendem a armazenar mais calor do que

peças pequenas, resultado das variações na superfície em relação ao volume. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).

Ao considerar os fatores citados, será possível ter um controle maior do processo de deposição e da precisão final. Contudo, os aspectos do próprio filamento utilizado interferem diretamente nas variações de fluxo, e, esta interferência ocorre de duas maneiras, uma delas ocorre pela modificação no diâmetro do filamento e a outra está ligada à diferença entre o diâmetro da entrada do extrusor e o diâmetro de saída do filamento. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

Vale destacar a importância de realizar manutenção e limpeza do equipamento, principalmente do bico extrusor, pois podem ficar excesso de material aderido no local que conseqüentemente provocará alterações de fluxo durante a impressão. Como citado, características do filamento utilizado podem promover interferências no fluxo de material, sendo o diâmetro do filamento um dos pontos-chaves. Foi desenvolvida a equação 1 para comparar o movimento na zona de fusão da extrusora durante alterações no fluxo de material (ΔS_g), o desvio padrão do diâmetro (σ_f), e o diâmetro médio do filamento (d_t). (SANTANA, 2015)

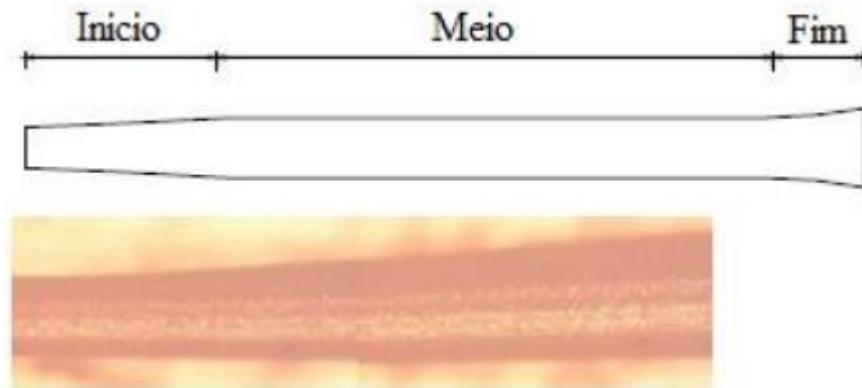
$$V_{erro} = \frac{3\pi\Delta S_g\sigma_f d_t}{2} \quad (1)$$

Com base na equação, verifica-se uma proporcionalidade direta entre diâmetro do filamento, desvio padrão de diâmetro e o erro do fluxo, ou seja, quanto maior for o diâmetro do filamento utilizado e o desvio padrão do diâmetro, maior será o erro associado no fluxo. Sendo assim, com o objetivo de minimizar estas interferências o recomendado é utilizar diâmetros menores e com tolerâncias menores e precisas. No que se refere ao equipamento, é importante que o diâmetro interno do bico aquecido seja o mais próximo do diâmetro externo máximo do filamento. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Sendo assim, para garantir o fluxo preciso de material, é fundamental possuir pontos de controle para identificação destes desvios. Uma forma de realizar o controle é padronizar o movimento do cabeçote de extrusão de acordo com a taxa de deposição projetada para todos os pontos da construção. Outra forma é utilizar um sensor que compense as alterações durante o processo de deposição, ou seja, o cabeçote de extrusão pode manter seu movimento constante, enquanto ocorre a adaptação da taxa de deposição para realizar a compensação das alterações. (SANTANA, 2015). As diferenças entre velocidade do cabeçote e fluxo de material provoca

oscilações na quantidade de material depositada, podendo gerar os defeitos conhecidos por start-stop, demonstrado na Figura 17.

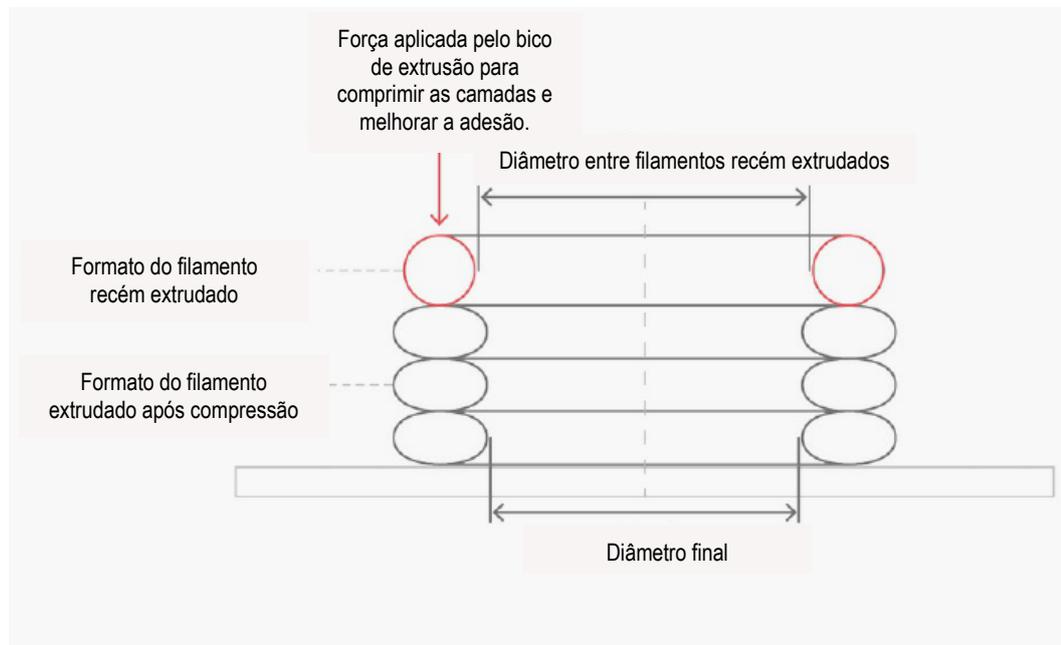
Figura 17: Efeito start-stop no filamento durante o processo de impressão.



Fonte: Santana, 2015.

Durante o processo de deposição o filamento sofre esforços compressivos que provocam um leve espalhamento seguindo uma forma “oblonga”, alargada e sua forma final bem como sua taxa de espalhamento alteram de acordo com a viscosidade do material fundido e da energia superficial da superfície do filamento e a superfície na qual foi depositado. A resolução da peça dependerá da largura final do filamento depositado e da área de contato entre filamentos. Seu aspecto alargado e arredondado promove a ocorrência de pequenos vazios em determinadas regiões, os quais irão influenciar diretamente nos aspectos estruturais e na resistência do componente. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016). É importante estar atendo ao quão alargado o filamento ficará pois poderá provocar alterações dimensionais do que foi projetado, a Figura 18 traz uma ilustração deste efeito. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Figura 18 - Variação entre o formato do filamento recém extrudado e após estar depositado.

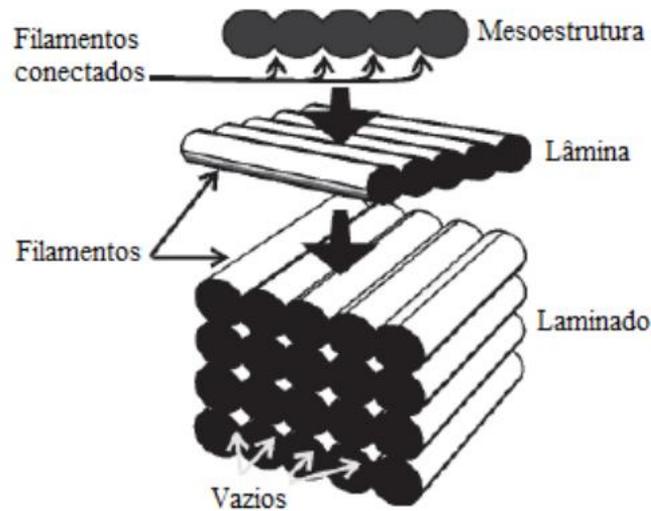


Fonte: adaptado de Redwood; Schoffer; Garret, 2017

2.3.2 Adesão entre Camadas

A adesão entre as camadas é extremamente importante não só por aspectos estéticos do produto impresso, mas também garantem a resistência do componente e a preservação das suas características dimensionais. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016). Pode-se utilizar como analogia ao entendimento da estrutura interna de um componente impresso, a estrutura de um compósito de fibras reforçadas, uma vez que, os filamentos individuais do material possuem maior resistência na direção axial, do mesmo modo que ocorrem com as fibras de um compósito. Por outro lado, as peças impressas por FFF apresentam fragilidade maior nos pontos de adesão entre camadas e entre filamentos, justamente por serem regiões de contato e que podem sofrer alterações ao longo do processo. (SANTANA; ALVES; NETTO; MERLINI, 2018) Sendo assim, as propriedades de cada lâmina de material dependem das características do filamento, da intensidade e qualidade da adesão e da quantidade e tamanho dos vazios formados. A Figura 19 exemplifica a estrutura de uma peça impressa por FFF. (SANTANA, 2015)

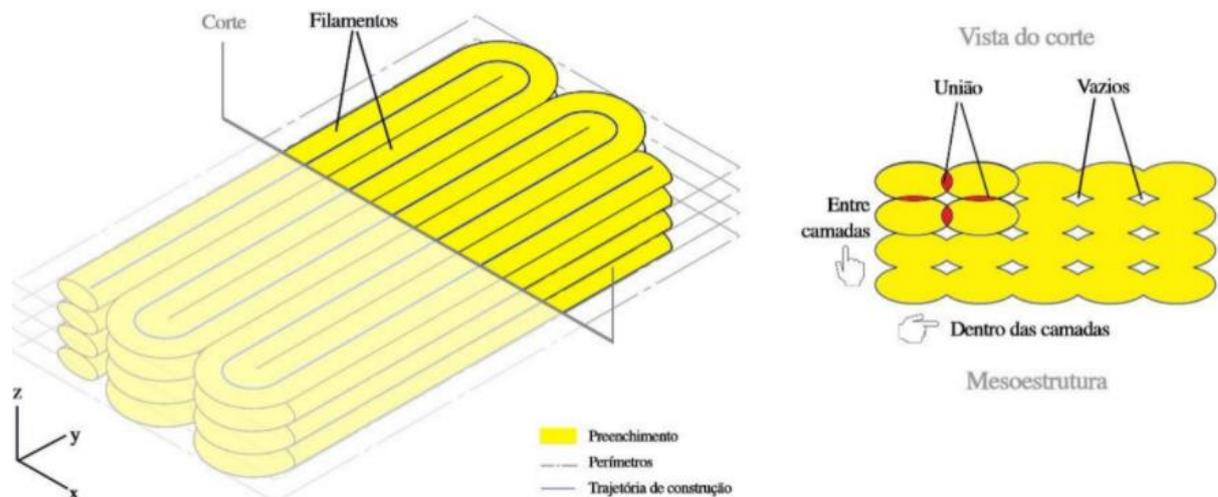
Figura 19: Ilustração da composição de uma peça impressão via FFF



Fonte: Santana, 2015.

Na Figura acima é possível observar dois pontos de contato e adesão entre filamentos: dentro das camadas (intra layer), corresponde aos filamentos adjacentes entre si em uma mesma camada e adesão entre camadas (inter layer), corresponde ao contato entre duas camadas sucessivas, na Figura 20 está disposta uma representação sobre cada um dos pontos de adesão possíveis. (SANTANA; ALVES; NETTO; MERLINI, 2018)

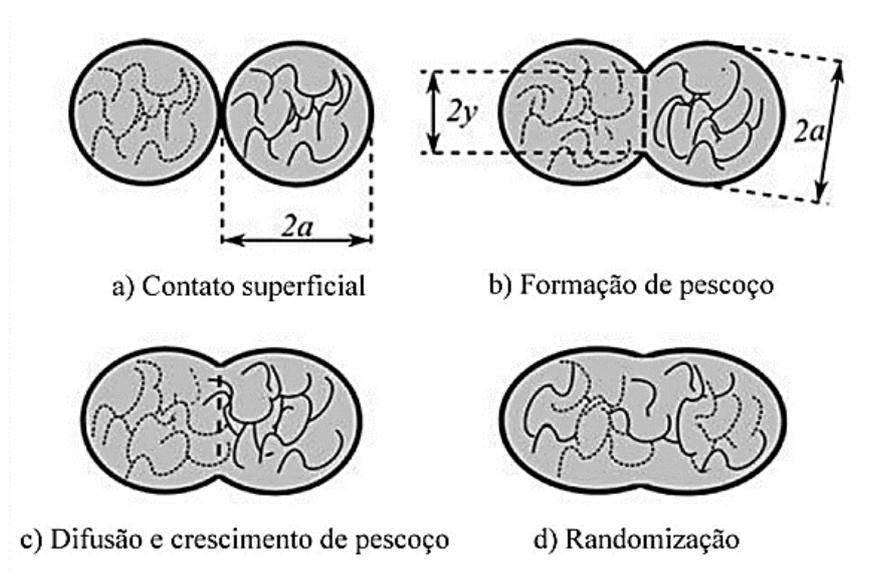
Figura 20 - Demonstração dos pontos de adesão e vazios na estrutura de peças obtidas por FFF.



Fonte: Santana; Alnes; Netto; Merlini, 2018.

O processo de adesão entre camadas é promovido pela energia térmica do material semifundido, e se dá através do fluxo viscoso e difusão molecular das cadeias do polímero pela interface das secções em contato. A qualidade da adesão entre as camadas depende do crescimento do “pescoço”, da difusão molecular e da randomização das cadeias poliméricas na interface, conforme disposto na Figura 21 para filamentos de diâmetro $2a$ e comprimento de pescoço de $2y$. (COUTINHO, 2017)

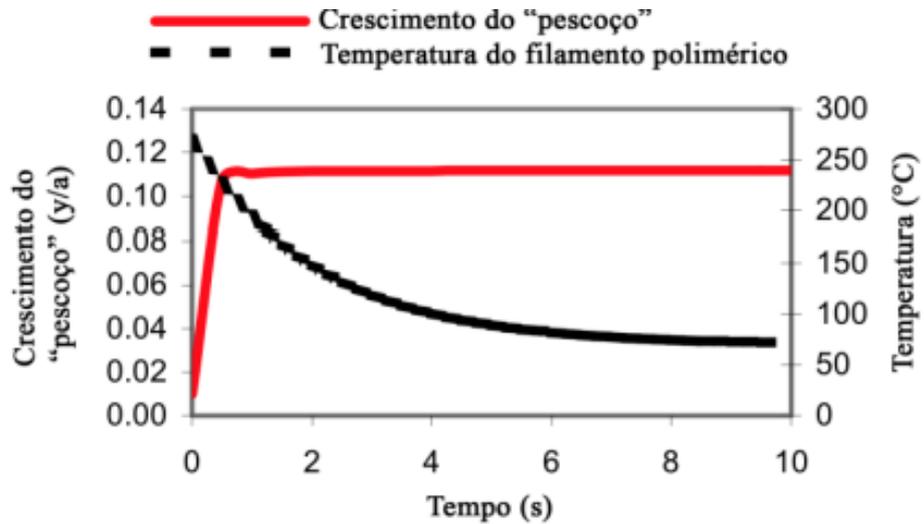
Figura 21: Ilustração do processo de sintetização polimérica entre filamentos.



Fonte: Coutinho, 2017.

Estudos realizados por Li (2002) comprovam a teoria da adesão para materiais depositados por FFF, pois quando o filamento é depositado e se encontra em contato com o material circundante, a temperatura na interface é superior a temperatura de transição vítrea, consequentemente o processo de adesão é favorecido, ou seja, ocorre o rápido desenvolvimento de uma ligação adesiva no local, sendo assim, foi verificado que o pescoço cresce com maior intensidade instantes após a extrusão, conforme demonstrado na Figura 22 abaixo. Logo, a capacidade de molhamento entre filamentos sofre grande dependência das temperaturas de extrusão e das propriedades de convecção. (Li, 2002)

Figura 22: Relação entre temperatura do filamento e o crescimento do “pescoço”.

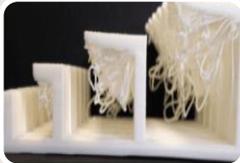


Fonte: Adaptado Li, 2002.

2.3.3 Defeitos nas peças obtidas por FFF

Nos tópicos anteriores foram abordadas variáveis que interferem diretamente no processo de obtenção nas peças por FFF, alterando suas características superficiais e mecânicas. Na Figura 23 abaixo, seguem demonstrados alguns exemplos destes defeitos, a causa e o que pode ser feito para minimizá-los. Vale ressaltar que os defeitos de uma forma geral, podem ser classificados em decorrência dos vazios gerados pelo sistema de deposição e/ou pelas falhas no processo de adesão entre os filamentos. (GEBHARDT; HÖTTER, 2016).

Figura 23 – Principais defeitos em peças impressas via FFF.

	<p>Vazios nos contornos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Preenchimento incompleto. Na área em que a trajetória do cabeçote se aproxima do perímetro a direção é alterada para um caminho tangente ao perímetro, gerando fluxo insuficiente nas intersecções. • Solução: Promover espaçamento negativo ao perímetro e/ou aumentar a taxa de deposição nas regiões de intersecção.
	<p>Overhang</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Falta de suporte. Camadas depositadas com ângulos de até 45° é suportada em 50% pela camada inferior, porém quando a impressão estiver inclinada acima de 45° com o plano da mesa deve-se utilizar suportes. • Solução: Projetar suportes para realizar o apoio em toda a região.
	<p>Pulo de camadas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Altura da camada inadequada, provocando falha na adesão. Geralmente ocorre quando os bicos tem diâmetro entre 0,3 e 0,5mm destinados a peças com muitos detalhes, que consequentemente geram limitações na altura de camada que deve ser utilizada para garantir a adesão adequada. • Solução: Altura da camada deve ser 20% menor que o diâmetro do bico para garantir adesão completa.
	<p>Contração nas camadas iniciais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Aquecimento excessivo na mesa de construção. Após aquecimento ocorre a contração do material, e caso a mesa esteja a uma temperatura muito alta, durante o resfriamento as camadas externas irão contrair de maneira diferente que o núcleo da peça. Peças grandes ou muito compridas são mais susceptíveis. • Solução: Seguir orientação de temperatura do fabricante. Usar spray adesivo na mesa auxilia a evitar o problema.
	<p>Sub extrusão</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Falta de material, pois o fornecimento do filamento não acompanhou a velocidade de extrusão programada para a impressão. Qualidade ruim do filamento pode provocar falhas caso o mesmo possua variações de diâmetro ou esteja ovalizado. • Solução: Programar a extrusão de acordo com o limite de fornecimento do filamento. Garantir filamento uniforme.
	<p>Empenamento (warping)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Causa: Contração pós extrusão. As forças de contração podem ser tão intensas que provocam grandes desvios dimensionais chegando a descolar a peça da mesa de construção. • Solução: Evitar que existam fatores externos que provoquem alteração no resfriamento. Atentar a materiais mais susceptíveis ao empenamento, como o caso do ABS que requer isolamento da impressora, de forma a manter a temperatura no seu interior o mais alta possível. Uma alternativa é utilizar spray fixador ou cola para melhorar a aderência na mesa.

Fonte: adaptado de Sadasivuni; Deshmukh; Almaadeed, 2020

2.4 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS FINAIS NO PROCESSO FFF

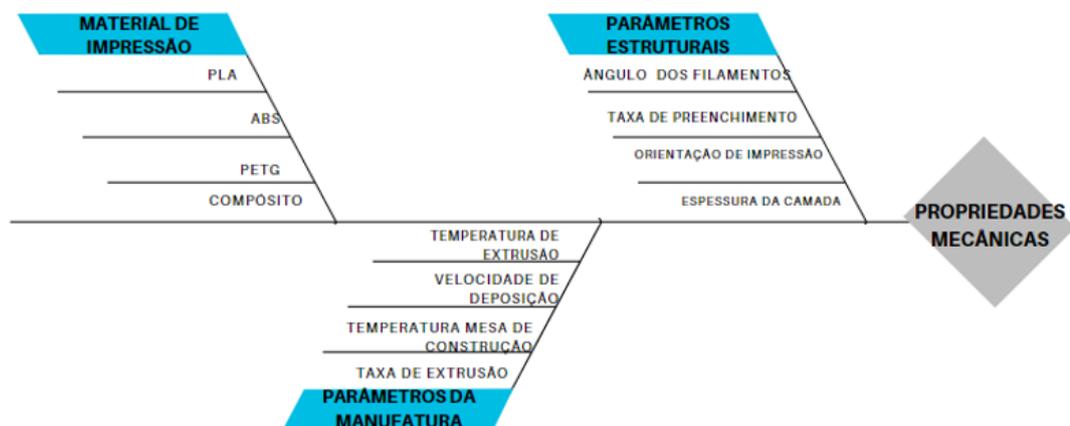
Estudos realizados por Khatwani e Srivastava relacionaram o efeito dos parâmetros do processo nas propriedades mecânicas das peças fabricadas via FFF utilizando o PLA como material e demonstraram uma dependência direta da espessura de camada e o diâmetro do bico

de extrusão em relação a resistência à tração e à flexão, em que, à medida que a espessura de camada aumenta, a resistência à flexão aumentou, e à medida que o diâmetro do bico aumentou, as resistências também aumentaram. [26 cap 9] Resultado já esperado, de acordo com os critérios de adesão já destacados nos itens anteriores, pois quanto maior a área de contato entre os filamentos depositados maior é a força de ligação e adesão entre os mesmos. (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017)

Em resumo, as temperaturas de fabricação desempenham o papel mais importante na formação da ligação entre filamentos enquanto diferentes estratégias de deposição de camadas promovem comportamentos mecânicos variáveis. A resposta mecânica irá depender fortemente de dois fatores: orientação da construção e da estratégia de preenchimento em cada camada. Como já citado anteriormente, o processo por FFF gera peças anisotrópicas devido o processo de deposição promover a formação de vazios internos. A geometria desses vazios e o tamanho da união entre filamentos individuais irão influenciar o grau de anisotropia e a resistência máxima apresentada pelo componente. (Li, 2002)

Como a tecnologia é relativamente nova, as informações sobre o comportamento dimensional e qualidade superficial estão sendo estudadas. O diagrama Ishikawa demonstrado na Figura 24 descreve estas variáveis que ditam o comportamento mecânico final. (CUAN-URQUIZO *et al.*, 2019).

Figura 24 – Diagrama Ishikawa representativo das variáveis de impressão em FFF que determinam a propriedade mecânica do componente.



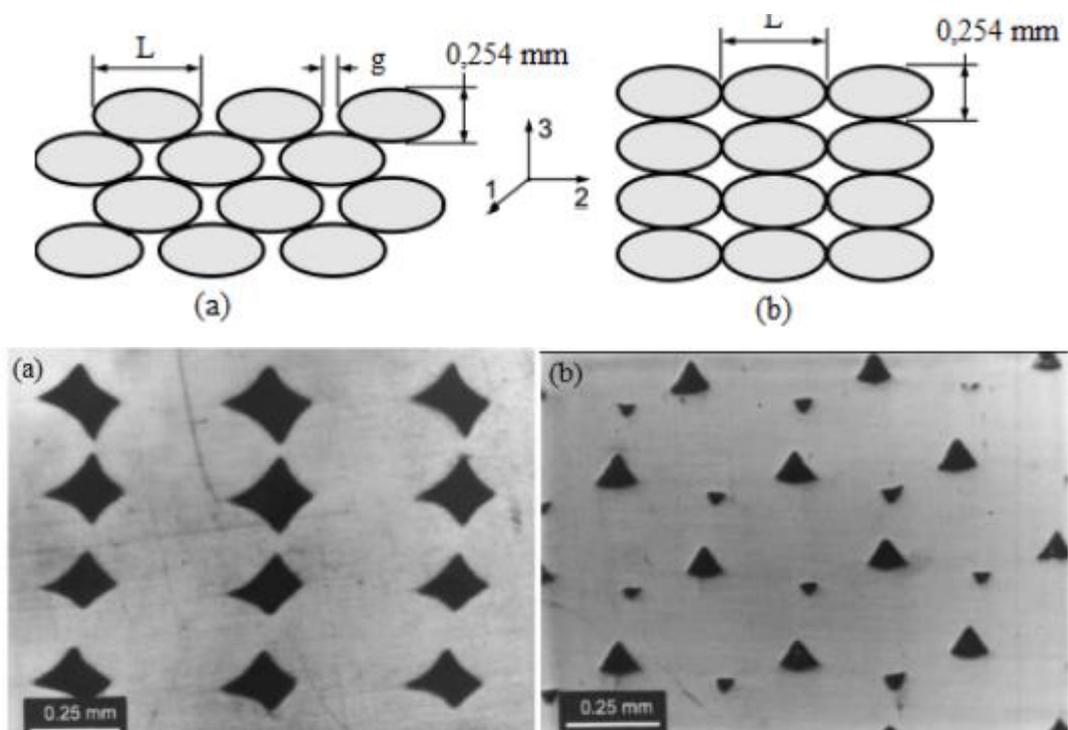
Fonte: adaptado de Cuan-Urquizo *et al.*, 2019.

No diagrama acima, são destacados três grupos de variáveis, material utilizado, parâmetros estruturais e parâmetros de fabricação. Com relação ao material, o nível de

aderência entre os filamentos é determinante para o sucesso do processo, a formação dos pescoços e consequente união, sofre influência direta da difusão de cadeias de polímeros na interface. Estas variam de acordo com as propriedades do material, como, viscosidade, tensão superficial e temperatura de transição vítrea. Esta coalescência entre as camadas impressas é o ponto chave do processo, porém não é algo simples, uma vez que, na realidade, o processo é incompleto e vazios são gerados entre as camadas que acabam influenciando negativamente a propriedade mecânica e superficial do produto final. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019).

Nos tópicos anteriores fatores de formação dos vazios foram discutidos e verificado que a quantidade e tamanho dependerão do método de deposição proposto. Para que a peça obtenha boas propriedades mecânicas a densidade de vazios deverá ser a menor possível, consequentemente apresentando maior densidade de adesão entre os filamentos. Na Figura 25 abaixo há uma demonstração da alteração do tamanho de vazios conforme o padrão de deposição. (CUAN-URQUIZO *et al.*, 2019).

Figura 25: Vazios formados de acordo com o padrão de deposição.

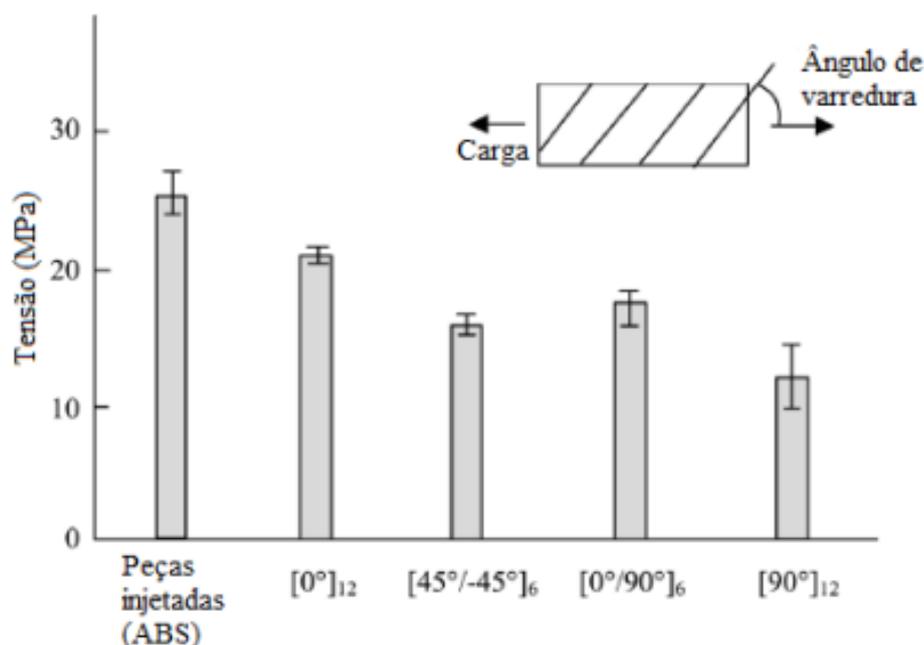


Fonte: Adaptado de Santana, 2015.

Para este caso, conforme os estudos de Rodriguez, a configuração da estrutura desalinhada (Figura 25, b) conferiu uma menor densidade de vazios internos, ao ser comparada à configuração alinhada (Figura 25, a), promovendo uma maior resistência mecânica à peça final. [32] (SANTANA, 2015)

Ao avaliar a resposta mecânica para diferentes espaçamentos e ângulos de disposição dos filamentos, verificam-se alterações elevadas na resposta mecânica, conforme pode ser observado na Figura 26. Os maiores valores de resistência são encontrados quando os filamentos estão orientados no mesmo sentido em que a carga é aplicada e o espaçamento entre filamentos é negativo (baixa quantidade de vazios). (SANTANA, 2015)

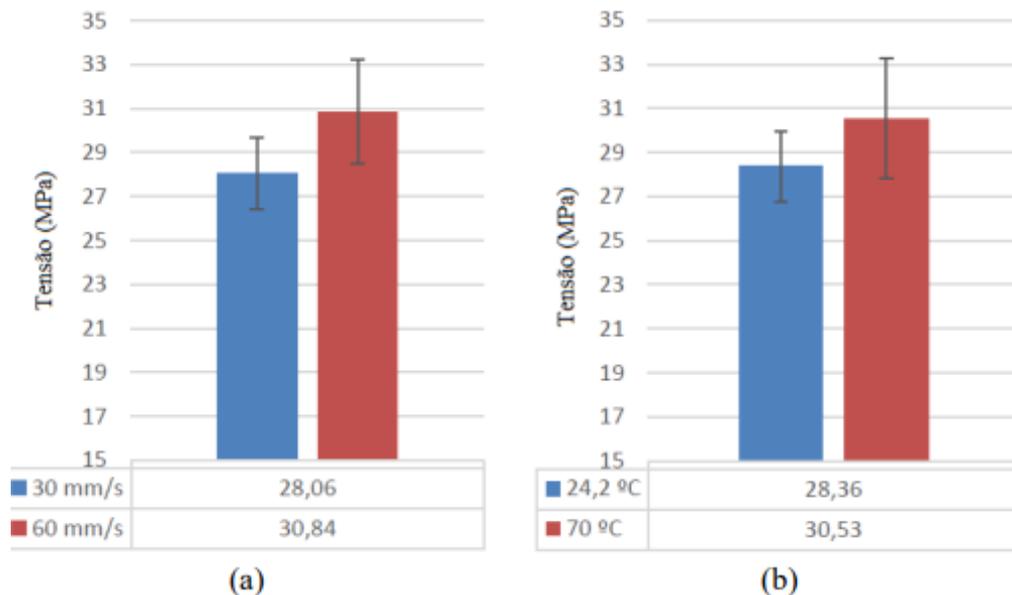
Figura 26: Resistência das peças de acordo com o ângulo e gap negativo.



Fonte: Santana, 2015

Com relação aos parâmetros da manufatura de impressão, a influência é também muito significativa, ao avaliar a resistência à tração para velocidades de deposição diferentes e para temperaturas diferentes da mesa de construção. A Figura 27 mostra um exemplo de testes de tração realizados a partir dessas alterações, demonstrando que melhores valores de resistência foram obtidos para velocidades de impressão de 60mm/s e com aquecimento da mesa de construção de 70°C. (SANTANA, 2015)

Figura 27: Resistência à tração em relação à velocidade de impressão (a) e temperatura da mesa de construção (b).



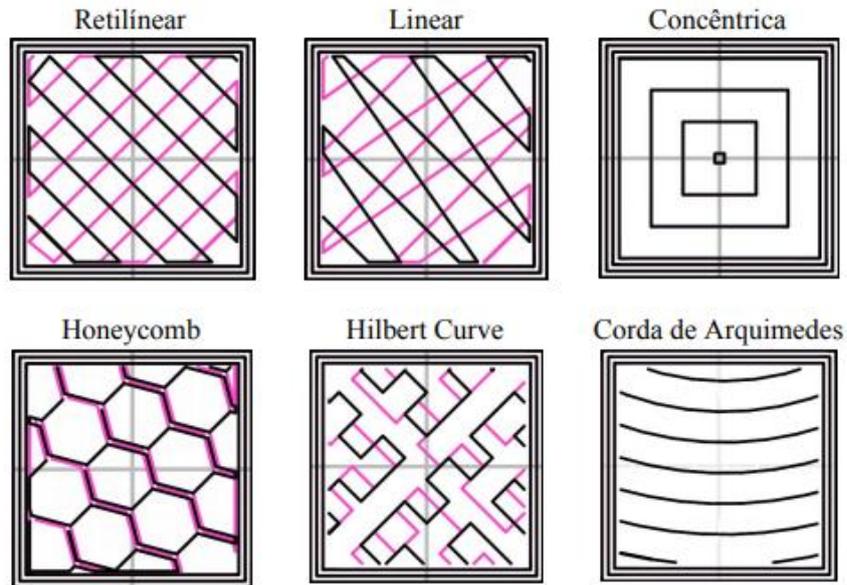
Fonte: Santana, 2015.

Contudo, entende-se que a resposta mecânica é influenciada por um conjunto de fatores que se também exercem influência uns sobre os outros, muitas vezes uma alteração na temperatura de extrusão promove um aumento na resposta mecânica em decorrência da temperatura da mesa de construção, caso esta temperatura altere mesmo mantendo constante a temperatura de extrusão a resposta será diferente. Da mesma forma que, para aumento da temperatura de extrusão mantendo a temperatura da mesa, o aumento na resistência pode ser muito pequeno ou praticamente nulo, pois o ponto ideal já havia sido atingido. Por isso, é importante entender as propriedades do material e seu comportamento de acordo com os diferentes padrões que podem ser utilizados (ARANHA, 2019)

2.4.1 Preenchimento das Camadas

O processo de preenchimento consiste em determinar a técnica do caminho a ser percorrido pelo cabeçote durante a impressão no plano horizontal, e pode variar de acordo com a estratégia utilizada, levando em conta a espessura, fluidez do material, a interação entre linhas e camadas adjacentes. Algumas destas estratégias de preenchimentos podem ser visualizadas na Figura 28 disposta abaixo. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

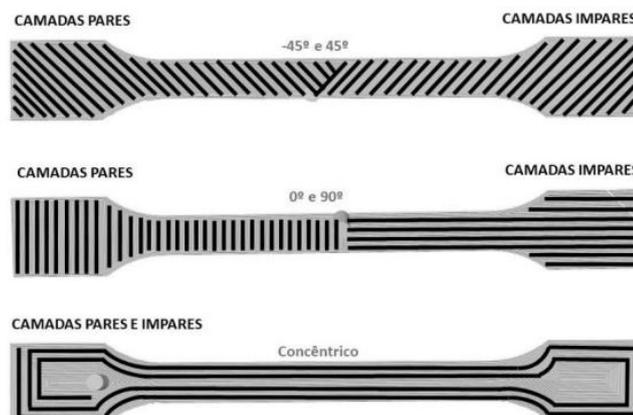
Figura 28: Exemplos de alguns métodos de preenchimentos das camadas – Vista superior.



Fonte: Porsani; Silva; Hellmeister, 2017

Dentre estas possibilidades, podemos citar duas como as mais comuns e mais práticas, são elas, a retilínea e a concêntrica. O método retilíneo é característico pela construção em zig-zag, em que os filamentos se dispõem paralelamente, podendo ser alternados em diferentes ângulos. O método concêntrico, por sua vez, caracteriza um preenchimento a partir do centro do objeto, ou seja, consiste no preenchimento interno realizado conforme o perímetro da camada em ciclos equidistantes. Os ângulos utilizados na trajetória de preenchimento pelo cabeçote são denominados por ângulo de varredura. Na Figura 29, são mostrados mais exemplos, evidenciando também o ângulo da trajetória. (MATHIAS, 2019).

Figura 29: Métodos de preenchimento internos, direção e ângulo.

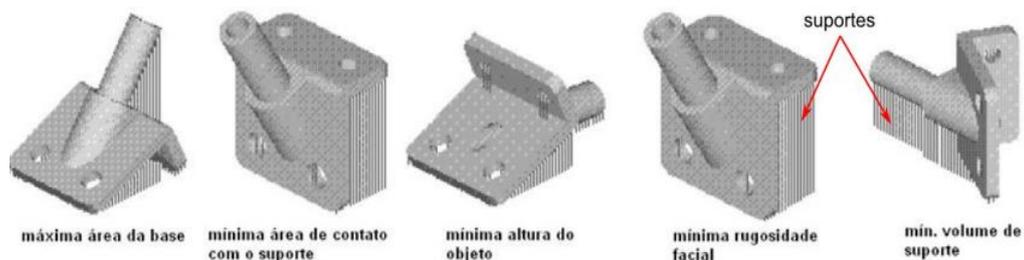


Fonte: Mathias, 2019.

2.4.2 Ângulo de orientação da impressão

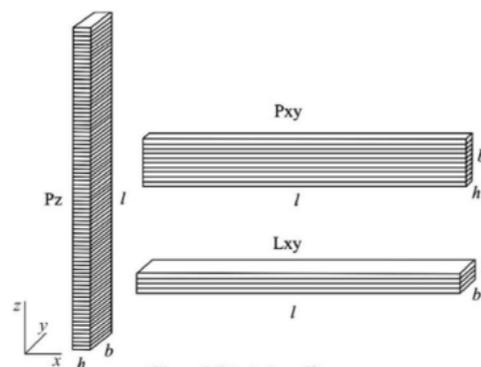
As peças podem ser projetadas para a impressão em diferentes posições, seja na vertical, horizontal, na diagonal, dentre outros. Dependendo do ângulo escolhido para a impressão, se faz necessário o uso de suporte, ou seja, deposição de material para atuar na sustentação da peça, geralmente o suporte é recomendado nos casos em que as peças apresentam ângulos menores do que 45° com a superfície base de deposição. (MATHIAS, 2019). Como citado nos tópicos anteriores, o processo FFF confere um material com propriedades de resistência mecânica anisotrópicas, ou seja, suas propriedades mecânicas serão influenciadas pela direção de aplicação do esforço mecânico. Para tal, a orientação escolhida, deve garantir que a resistência seja maior na orientação de maior esforço mecânico que o componente será submetido. A Figura 30 apresenta alguns exemplos de possibilidades de projeção e planejamento dos suportes. (COSTA, 2011). Dependendo do padrão escolhido, o número de camadas irá mudar, como pode ser observado na Figura 31, que descreve um padrão vertical (90°) e outro horizontal (0°). (COSTA, 2011).

Figura30: Exemplos de orientações possíveis para impressão



Fonte: Costa, 2011

Figura 31: Impressão na vertical – Pz e orientação na horizontal – Pxy.



Fonte: Mathias, 2019.

2.4.3 Densidade de preenchimento

Para confecção da peça, além dos fatores já evidenciados, é necessário definir também, a densidade do preenchimento. A densidade apresenta influência diretamente no tempo de impressão, quantidade de material necessário e resistência final. Quanto mais denso o material for maior será o tempo necessário para a impressão e maior será a quantidade de matéria-prima, conseqüentemente, o componente apresentará um peso maior, juntamente com uma maior resistência. [5,8]

Na Figura 32, está demonstrado um corpo de prova, impresso em diferentes densidades (taxas de preenchimento) de preenchimento de 10%; 30%; 50%; 70%; 90% e 100%. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

Figura 32: Exemplos estruturas impressas em diferentes taxas de preenchimento.

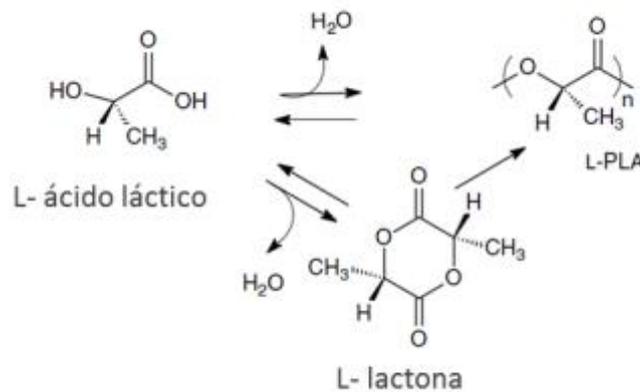


Fonte: Porsani; Silva; Hellmeister, 2017

2.5 POLIÁCIDO LÁCTICO – PLA

O poliácido láctico – PLA faz parte da classe de polímeros biodegradáveis, cuja degradação ocorre pela ação de micro-organismos, como, algas, bactérias e fungos. Este polímero é um poliéster alifático termoplástico, obtido por fontes renováveis. Estas propriedades fazem do PLA um polímero importantíssimo na substituição de polímeros derivados do petróleo. Sua estrutura molecular pode ser visualizada na Figura 33 abaixo. (COUTINHO, 2017)

Figura 35: Rotas de obtenção de PLA.



Fonte: Peres, 2016

A estrutura do PLA pode ser alterada através da polimerização da mistura dos isômeros L- ou D, que pode ser ajustada para obter polímeros cristalinos ou amorfos de alta massa molecular. Como observado, o PLA pode ser encontrado como D-PLA e L-PLA. A mistura D-L-PLA apresenta estrutura amorfa e o polímero de um único isômero tende a apresentar estrutura cristalina. (RECH *et al.*, 2021). O PLA é descrito então, como um polímero termoplástico sintético e biodegradável de alta resistência mecânica. (PERES, 2016)

É característico nos polímeros termoplásticos a possibilidade de tomarem inúmeras formas quando aquecidos e que se estabilizam após seu resfriamento. Logo, é possível retrabalhar o material quantas vezes for necessário, consequência da sua flexibilidade e resistência. (SANTOS *et al.*, 2018) Os polímeros termoplásticos apresentam em sua composição duas fases distintas, as quais variam de acordo com a configuração de cada material, uma dessas fases corresponde à estrutura amorfa, responsável pela elasticidade do material, enquanto que a segunda fase corresponde à estrutura cristalina, responsável por promover rigidez, e demais propriedades mecânicas de resistência ao impacto. (SILVA, 2019)

Na medicina o PLA possui uma ampla gama de utilização, principalmente decorrente de seu caráter biocompatível, que permite utilizar este material em implantes e como revestimento para transporte de fármacos. Sua aplicação se estende à indústria têxtil, como fibras para roupas e no ramo de embalagens descartáveis, por exemplo. (SANTOS *et al.*, 2018). No que se refere às propriedades mecânicas e térmicas o PLA concorre com os polímeros convencionais, como poliestireno (OS), politereftalato de etileno (PET) e afins. Porém, apresentam algumas limitações na sua resistência ao impacto e flexibilidade, justamente por

apresentarem uma baixa tenacidade. Novas pesquisas estão sendo desenvolvidas buscando desenvolver um material com propriedades de tenacidade melhoradas através da alteração do método de obtenção, buscando a sintetização através da copolimerização ou até mesmo blends com outros polímeros. (RECH *et al.*, 2021)

Nos estudos da copolimerização (mistura de duas unidades monoméricas distintas) do PLA, surgiram algumas possibilidades diferentes alterando a proporção dos isômeros destacados anteriormente. As consequências das alterações provocadas para cada balanceamento com adição do copolímero (D, L) pode ser visualizada na tabela da Figura 36. (RECH *et al.*, 2021)

Figura 36 – Balanceamento reação de formação PLA

Proporção (L/D,L)	T_g (°C)	T_m (°C)
100/00	63	178
95/05	59	164
90/10	56	150
85/15	56	140

Fonte: Peres, 2016.

O PLA possui grande popularidade no âmbito tecnológico da impressão 3D por FFF, uma vez que, é um polímero biodegradável, decorrente de fontes renováveis (milho, trigo, cana de açúcar) e com boas propriedades mecânicas atrelada a uma boa processabilidade decorrente da baixa temperatura de transição vítrea (em torno de 55-65°C) apresentando assim, vantagens significativas nesta aplicação. (CABREIRA; SANTANA, 2020).

O polímero PLA possui forte aplicabilidade à temperatura ambiente, uma vez que, possibilita a extrusão direta na placa de construção usando métodos convencionais. É um material que solidifica rapidamente, característica importante quando se precisa aumentar a velocidade da extrusão e otimizar o tempo de deposição. Juntamente com estes fatores, apresenta baixa tensão térmica, reduzindo a tendência de empenamento, por conta das diferenças térmicas entre trabalhar em temperatura ambiente e a temperatura do material da peça (190-220°C). (CABREIRA; SANTANA, 2020)

Como citado anteriormente, o PLA pode ser modificado alterando a proporção do monômero, permitindo obter tanto um polímero amorfo quanto semicristalino. Sua temperatura de fusão fica em torno de 170°C, podendo ser processado sem grandes dificuldades entre 180 e 200°C. Em contrapartida, vale ressaltar que, sofre degradação considerável em temperaturas

posteriores à 200°C. Caso ocorra a degradação, o polímero sofre alterações no peso molecular e nas propriedades mecânicas, fazendo com que a faixa de trabalho de 180-200°C deva ser necessariamente respeitada. (RECH *et al.*, 2021).

Nestas condições, juntamente com alta umidade o polímero degrada-se rapidamente, podendo se desintegrar dentro de semanas ou meses. Por fim, devido à sua alta energia superficial, o PLA apresenta boas propriedades de coalescência, essenciais para o processo de FFF. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019). Apesar de ter um índice de fluidez (MFI) razoável, (entre 3 a 15 g/10 min), apresenta uma baixa viscosidade de fusão, sendo assim, possui baixa pressão de processamento. Ressalta-se que, quando submetido a um pequeno aumento de temperatura, a sua viscosidade diminui, tornando mais uma vez, esse polímero ideal para FFF. (RECH *et al.*, 2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão abordados os procedimentos e materiais utilizados para a realização do estudo e avaliação dos corpos de prova produzidos em PLA, comparando os resultados do uso do PLA nacional com o PLA importado.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados filamentos com diâmetro de 2,85mm de dois fornecedores, denominados como PLA nacional e PLA importando, ambos materiais *Hight Temp* – Alta resistência térmica. Segundo as especificações, os materiais possuem as seguintes características expostas no Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 – Especificações técnicas dos filamentos

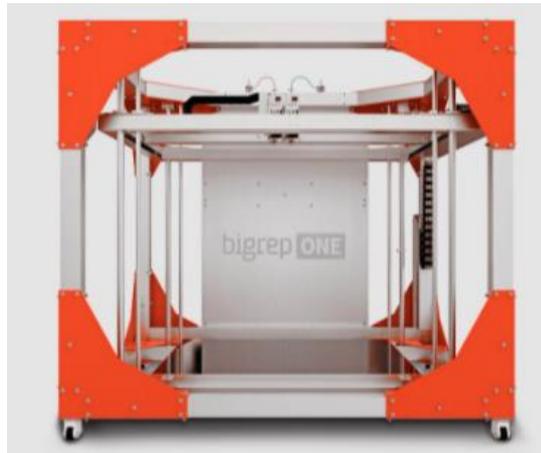
Propriedades	PLA Importado	PLA Nacional
Cor	Preto	Preto
Densidade	1,39 g/cm ³	1,24 g/cm ³
Temperatura de Fusão	190 – 210°C	165 – 180°C
Temperatura de Transição Vítre	160°C	55 – 60°C
Resistência à Tração	60 MPa	50 MPa
Alongamento na Ruptura:	3%	3,31%

Fonte: Acervo interno.

3.2 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram impressos em impressora 3D pelo método FFF, partindo de um filamento com diâmetro de 2,85mm. A impressora utilizada é da empresa alemã BigRep, do modelo BigRepOne ilustrado na Figura 37 e 38 abaixo. A BigRepOne é uma impressora de escala industrial que funciona muito bem na impressão de objetos 3D de grande escala. (BIGREP, 2022)

Figura 37 – Modelo impressora 3D utilizada.



Fonte: BigRep, 2022.

Figura 38 – Cabeçote da impressora 3D utilizada, modelo BigRepOne.

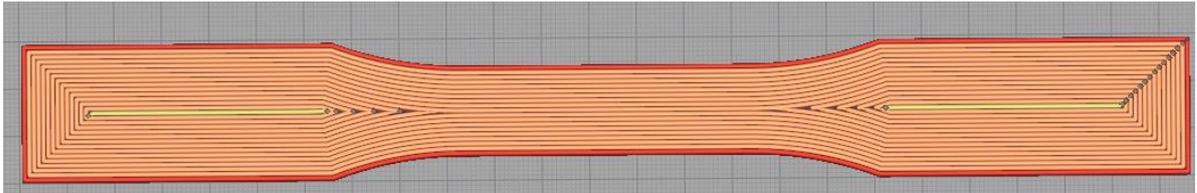


Fonte: Autor, 2022.

Os corpos de prova foram confeccionados com as dimensões padrão do corpo de prova do tipo III da norma ASTM D 638 -14, cuja secção transversal possui espessura de $3,2 \pm 0,4$ mm e largura de $19 \pm 0,5$ mm. Primeiramente foi realizado o desenho no SolidEdge e transferido para o software fateador da BigRep. A primeira etapa consistiu em imprimir corpos de prova em PLA Nacional e PLA Importado, ambos foram impressos com duas taxas de preenchimento diferentes, 100% de preenchimento e 50% de preenchimento. Dentro desta seleção, foram impressos corpos de prova com preenchimento de 100% e com deposição linear do filamento (90°) no padrão concêntrico, conforme Figura 39, corpos de prova com

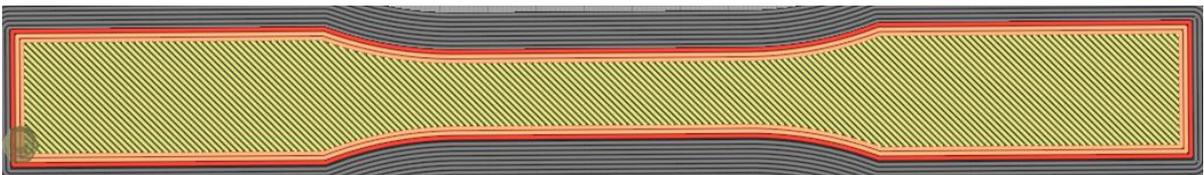
preenchimento de 100% e deposição linear (45°), conforme Figura 40, corpos de prova com 50% de preenchimento seguindo padrão retilíneo de 90°, conforme Figura 41 e corpos de prova com 50% de preenchimento seguindo padrão retilíneo de 45°, conforme Figura 42.

Figura 39 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 100% e com deposição linear do filamento (90°) no padrão concêntrico.



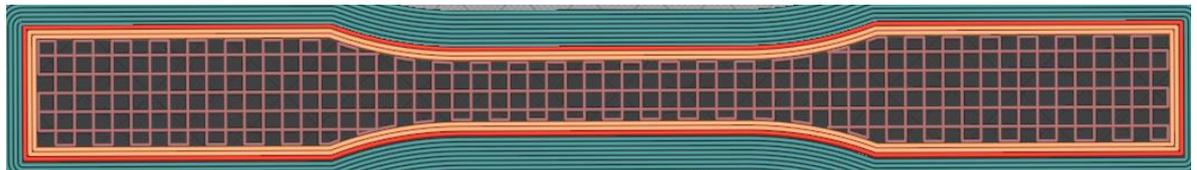
Fonte: Autor, 2022

Figura 40 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 100% e deposição linear (45°).



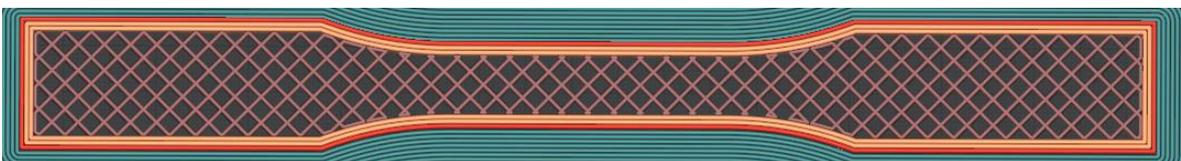
Fonte: Autor, 2022.

Figura 41 – Projeto do corpo de prova com 50% de preenchimento e padrão retilíneo de 90°.



Fonte: Autor, 2022

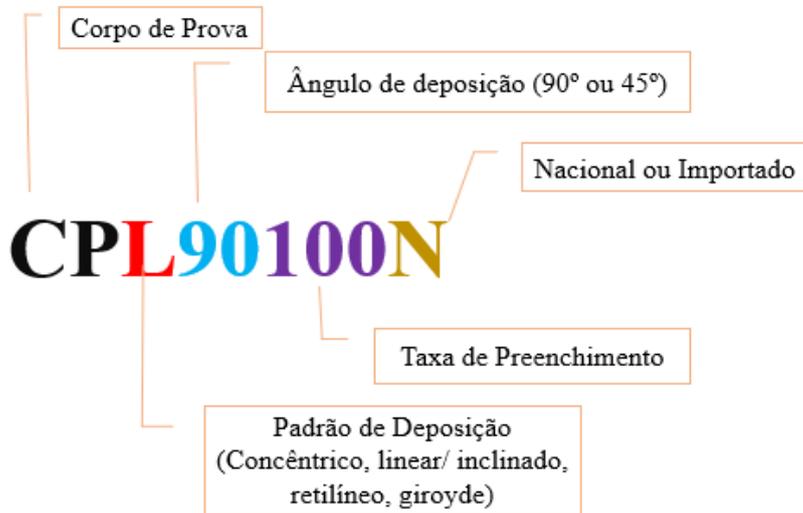
Figura 42 – Projeto do corpo de prova com 50% de preenchimento e padrão retilíneo de 45°.



Fonte: Autor, 2022

Para otimizar a identificação dos corpos de prova, os mesmos foram nomeados de acordo com seu padrão de posição, ângulo de deposição, taxa de preenchimento, e origem do material. A Figura 43 abaixo representa o processo codificado de forma mais prática.

Figura 43 – Parâmetro de codificação dos corpos de prova utilizados.



Fonte: Autor, 2022.

As configurações de impressão utilizadas são muito similares, como pode ser visto no Quadro 4. Porém, a temperatura de extrusão foi característica para cada material em decorrência de particularidades da fabricação, sendo assim, foram selecionadas de acordo com as orientações dos fornecedores.

Quadro 4 – Propriedades de impressão dos corpos de prova em PLA Importado e PLA Nacional.

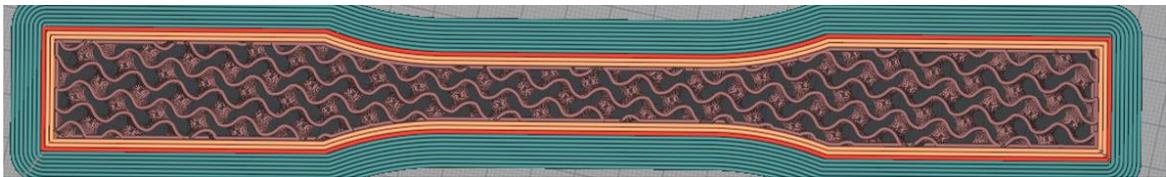
Propriedades	PLA Importado	PLA Nacional
Temperatura de Extrusão	190°C	217°C
Temperatura da mesa de impressão	60°C	60°C
Temperatura ambiente	23°C	23°C
Velocidade de impressão	45mm/s	45mm/s

Fonte: Autor, 2022.

Na segunda etapa, foram impressos corpos de prova apenas em PLA Nacional, para avaliar um padrão de deposição mais robusto, e comparar o impacto da variação na temperatura da mesa de impressão e da variação na taxa de deposição. Sendo assim, foram impressos corpos de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroyde e deposição inclinada

(45°) conforme Figura 44, corpos de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroyde e deposição linear (90°) conforme Figura 45. Corpos de prova com preenchimento de 100% e com deposição linear do filamento (90°) com alteração da temperatura da mesa de 60°C para 70°C e corpos de prova com preenchimento de 100% e com deposição linear do filamento (90°) com alteração da taxa de deposição de 45mm/s para 60mm/s. Essas duas últimas variações no padrão de impressão serão denominadas por “-2” e “-3” respectivamente ao final da codificação citada acima.

Figura 44 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroyde com ângulo de 45°



Fonte: Autor, 2022.

Figura 45 – Projeto do corpo de prova com preenchimento de 50% no padrão de deposição Giroyde com ângulo de 90°.



Fonte: Autor, 2022.

3.3 CARACTERIZAÇÃO VIA CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL- DSC

O comportamento térmico do PLA de cada fornecedor foi analisado via DSC. A primeira corrida de aquecimento foi importante para entender o histórico de processamento do material e a segunda corrida foi possível obter as propriedades do material após apagar o seu histórico térmico. O objetivo desta análise foi comparar as propriedades dos dois materiais a fim de, verificar se existem diferenças significativas que venham a provocar alterações nas propriedades dos componentes impressos.

O ensaio de DSC foi realizado na Central de Análises do Departamento de Engenharia Química da UFSC – Florianópolis em um equipamento Jade-DSC da marca Perkin Elmer. Para a realização do ensaio foram utilizadas 10mg de amostra, com vazão de gás (N₂) de 50mL/min, cuja programação de temperatura foi:

- 1ª corrida: Temperatura inicial de 25°C, temperatura final de 200°C, taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹ e taxa de resfriamento de 10°C min⁻¹ (de 200°C à 25°C);
- 2ª corrida: Temperatura inicial de 25°C, temperatura final de 200°C, taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹.

Para o cálculo do grau de cristalinidade (X_c) da amostra, foi utilizada a Equação 2, em que ΔH_m consiste na variação de entalpia de fusão do material, e ΔH_m^0 consiste na variação de entalpia para o PLA 100% cristalino, cujo valor em literatura é de 93J.g⁻¹ ¹³

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \quad (2)$$

3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a realização da avaliação mecânica, foi utilizada a máquina universal de ensaios, da marca Inston, mostrada na Figura 46, que atende a necessidade de ensaios de 5000/10000 Kgf, à temperatura ambiente sob uma taxa de carregamento de aproximadamente 5,0mm/min. Todos os corpos de prova foram submetidos a aplicações de cargas crescentes em tempo constante até a ruptura.

Figura 46. Exemplar da máquina utilizada nos ensaios de tração.



Fonte: Embracal, 2022.

A resistência à tração e o alongamento na ruptura foram calculados a partir das curvas tensão-deformação de no mínimo quatro amostras de cada variável analisada. Os corpos de prova, como citados anteriormente, foram confeccionados de acordo com o tipo III da norma ASTM D638-03.

3.5 ANÁLISE DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D.

Foram correlacionados os dados de resistência à tração dos corpos de prova com o custo de construção dos mesmos, a fim de, avaliar o melhor custo-benefício. No primeiro momento foram analisados os custos para impressão em PLA Nacional e em PLA Importado e realizado a diferença percentual conforme a equação 3, entre cada valor para assim determinar o material mais econômico para o processo.

$$i \% = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{V_{inicial}} \cdot 100 \quad (3)$$

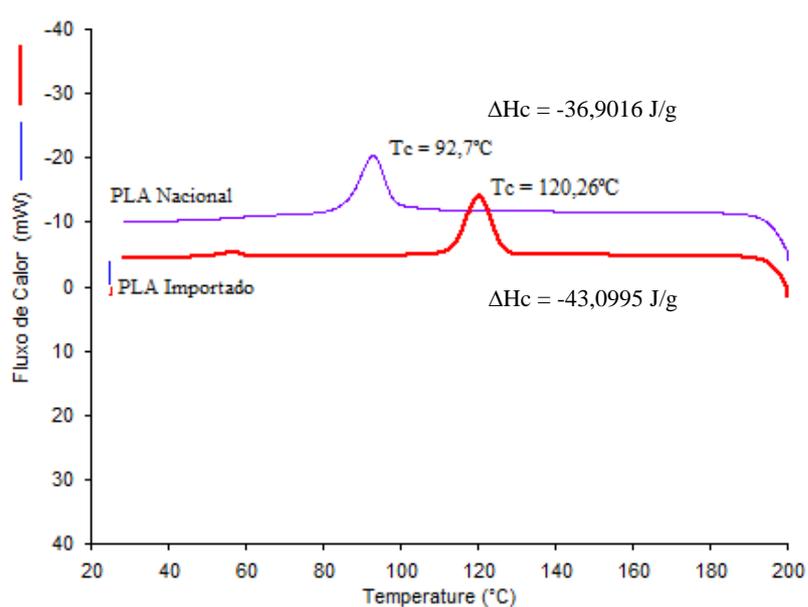
Em seguida, foram analisados os custos de fabricação dos corpos de prova em PLA nacional para diferentes padrões de impressão, e com o cálculo percentual da diferença de valores, foi possível correlacionar o custo com as propriedades mecânicas. Além dos desses valores, foram analisadas possibilidades de acelerar o processo de impressão, e assim, foram simulados os possíveis ganhos percentuais no processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO PLA NACIONAL E PLA IMPORTADO

A Figura 47 expõe a corrida do primeiro resfriamento tanto para o PLA Nacional quanto para o PLA Importado. Fica claro a diferença entre as temperaturas de cristalização visto que, o PLA Nacional apresentou uma T_c de $92,77^\circ\text{C}$ enquanto que o PLA Importado apresentou T_c de $120,26^\circ\text{C}$.

Figura 47 – Curva de resfriamento resultante do ensaio de DSC para PLA Importado e PLA Nacional.

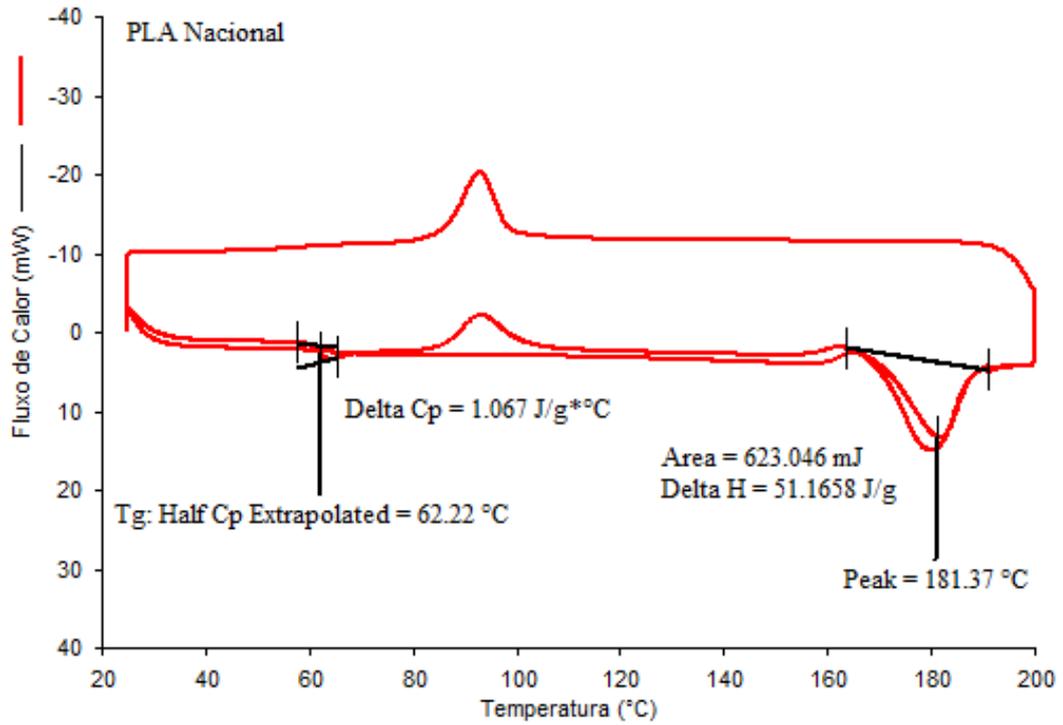


Fonte: Autor, 2022.

As Figuras 48 e 49 mostram as curvas obtidas durante o ensaio de DSC com duas corridas de aquecimento e uma corrida de resfriamento. O comportamento de modo geral é similar, visto que, os picos endotérmicos (T_m) e os picos exotérmicos (T_c) caracterizam transições de primeira ordem similares às características térmicas do PLA evidenciadas por outros autores (FRANCISCO, 2017; SANTANA; ALVES; NETTO; MERLINI, 2018).

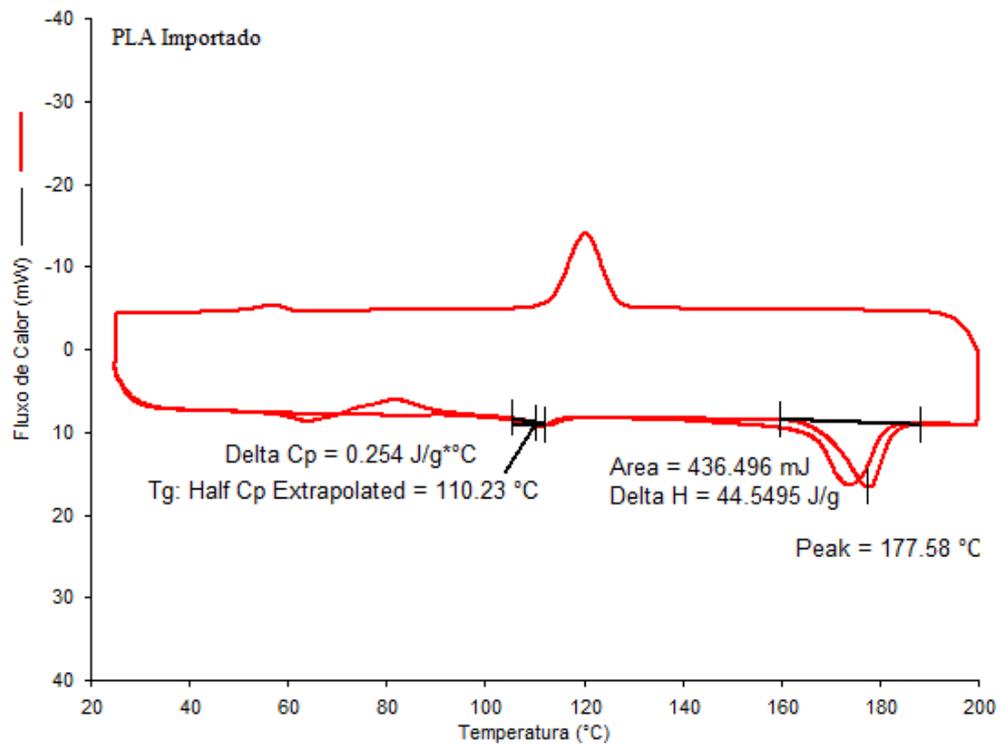
Percebem-se alterações na intensidade dos picos de fusão, alteração da temperatura de cristalização e de transição vítrea. Em ambos os materiais ocorreu a formação de um leve pico na primeira corrida de aquecimento entre 80°C e 100°C , representando perda de massa da amostra, devido à presença de umidade no material, visto que, o PLA apresenta propriedades hidrofílicas. (FRANCISCO, 2017).

Figura 48 – Curva de DSC para o PLA Nacional



Fonte: Autor, 2022.

Figura 49 – Curva de DSC para o PLA Importado



Fonte: Autor, 2022.

Nas curvas para o PLA Nacional e PLA importado verifica-se a presença de uma transição de segunda ordem à 62,22°C e 110,23°C respectivamente, que representa a transição vítrea (Tg) de cada material. A Tg de ambos os materiais ficou acima da temperatura ambiente, sendo assim, os materiais provavelmente apresentarão um comportamento vítreo e frágil, conforme evidenciado nos estudos de MARTINEZ et al., 2019 .

É possível identificar nas corridas de aquecimento a presença de um pico endotérmico característico da mudança de fase à 181,37°C para o material nacional e de 177,58°C para o material importado, representando a Tm de cada material. FRANCISCO, 2017; SANTANA; ALVES; NETTO; MERLINI, 2018 encontraram faixas muito próximas ao PLA Nacional, em que a TG encontrada foi de 65°C e a Tm de 175°C. Com relação ao material importado os valores ficaram muito próximos dos valores disponibilizados pelo fabricante (BIGREP, 2022).

Com os dados de entalpia das transformações de fusão é possível determinar a cristalinidade de cada amostra. Sendo assim, as propriedades gerais obtidas pela análise de DSC estão dispostas no Quadro 5 abaixo. Nota-se que a Tg do PLA Importado é 77% maior que a Tg do PLA Nacional, logo, considerando a aplicação do componente à temperatura ambiente, espera-se que o PLA Importado apresente um comportamento vítreo maior que o material nacional. Com relação à temperatura de fusão, a diferença é muito pequena entre os dois materiais, o PLA Nacional apresenta uma Tm apenas 2% acima do PLA Importado.

Quadro 5 – Propriedades obtidas com o ensaio de DSC para o PLA Nacional e PLA Importado.

Propriedades	PLA Nacional	PLA Importado
Temperatura de Transição Vítrea - Tg	62,22°C	110,23°C
Temperatura de Cristalização – Tc	92,7°C	120,26°C
Temperatura de Fusão – Tm	181,37°C	177,58°C
Entalpia de Cristalização - ΔH_c	- 36,9016 J/g	-43,0995 J/g
Entalpia de Fusão - ΔH_m	51,1658 J/g	44,5495 J/g
% Cristalinidade	55%	48%

Fonte: Autor, 2022.

Foi possível observar uma diferença no grau de cristalinidade das amostras, visto que, o PLA Nacional apresentou um grau de cristalinidade 13% acima que o PLA Importado. A cristalinidade dos materiais poliméricos é definida pela forma e simetria de suas moléculas, pela ramificação, rigidez, regularidade estruturas, e também, pelos parâmetros de

processamento. Sendo assim, esta diferença pode estar associada com o método de produção dos filamentos e os tipos de configuração de cadeia de PLA utilizados na formulação. Visualmente é possível observar que o PLA Nacional é brilhoso enquanto que o PLA Importado é fosco e a diferença foi comprovada com o ensaio. (PERES, 2016)

O grau de cristalinidade de termoplásticos semicristalinos exerce influência significativa nas suas propriedades mecânicas e viscoelásticas. Teoricamente, a porção cristalina é responsável por aumentar a rigidez e a resistência à tração, enquanto que a fase amorfa é responsável por melhorar a tenacidade. Nos estudos de Martinez et al, 2019, comparando o PLA semicristalino com o ABS amorfo, ficou evidenciado que, materiais com regiões cristalinas propiciam maiores valores de resistência à tração. Dessa forma, espera-se um comportamento mecânico superior para o PLA Nacional em comparação ao PLA Importado, visto que, o percentual de cristalinidade ficou levemente superior.(PERES, 2016)

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE PLA NACIONAL E PLA IMPORTADO

Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova impressos nas mesmas condições para ambos os materiais, conforme demonstrado na Figura 50 e descrito anteriormente. Os resultados gerais estão expostos no Quadro 6 abaixo.

Quadro 6 – Valores de resistência à tração e alongamento encontrados para os corpos de prova ensaiados.

Corpo de Prova	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão	Alongamento na ruptura (%)	Desvio Padrão
CPC90100N	60	5,3273	6,68	0,5449
CPC90100I	51	8,8891	6,01	0,6239
CPL45100N	58	2,0075	6,89	0,2316
CPL45100I	46	8,5066	6,26	0,7882
CPR9050N	15	2,1806	3,58	0,4479
CPR9050I	15	0,7348	3,56	0,3251
CPR4550N	22	0,2049	5,82	0,1454
CPR4550I	16	0,2872	4,43	0,1599

Fonte: Autor, 2022.

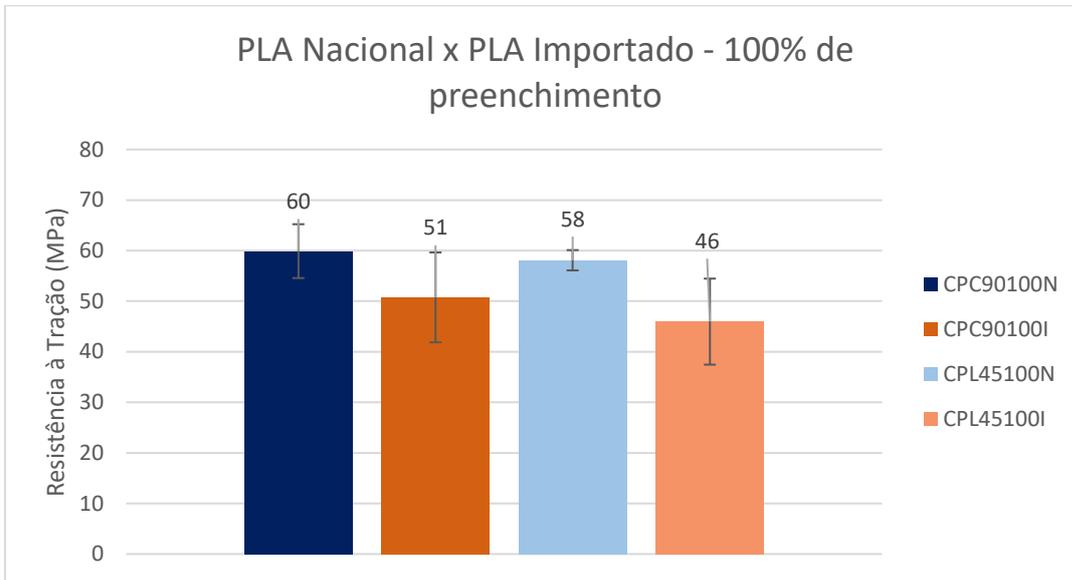
Figura 50 – Configuração dos corpos de prova impressos para o ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2022.

Ao avaliar inicialmente os corpos de prova com preenchimento de 100% tanto com padrão concêntrico quanto com padrão linear, percebe-se que o PLA Nacional se destaca, apresentando maior resistência à tração que o PLA Importado. No padrão concêntrico a diferença foi de 15%, já no padrão linear, a diferença muda para 21%. Na Figura 51 é possível verificar estes resultados. Conforme visto pelo ensaio de DSC, o PLA Nacional apresentou um grau de cristalinidade 13% acima que o PLA Importado. Segundo Martinez et. al.,2019, o grau de cristalinidade é uma característica importante que determina o comportamento mecânico dos materiais termoplásticos, e é possível observar essa relação com os resultados de resistência à tração superiores obtidos para o PLA Nacional em comparação aos valores encontrados para o PLA Importado.

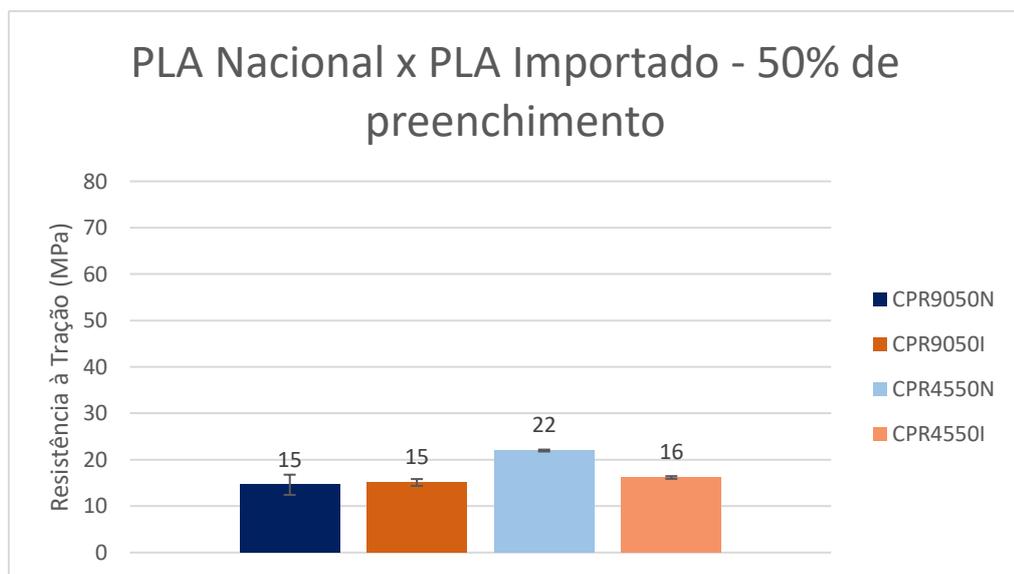
Figura 51 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova com 100% de preenchimento para o PLA Nacional e PLA Importado.



Fonte: Autor, 2022.

Com relação a taxa de preenchimento de 50%, são vistos dois comportamentos, conforme demonstrado na Figura 52. Analisando o padrão retilíneo de 90°, os valores ficam similares, em contrapartida para o padrão retilíneo de 45° o material nacional fica 26% acima que o material importado.

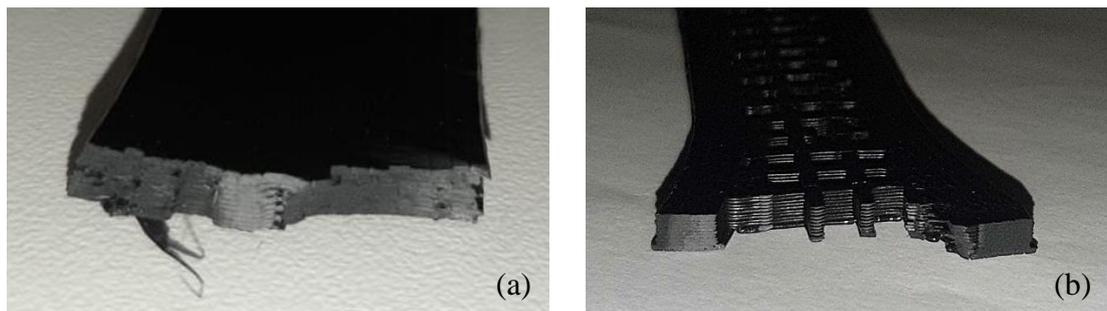
Figura 52 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova com 50% de preenchimento para o PLA Nacional e PLA Importado.



Fonte: Autor, 2022.

Outro fator interessante, é o alongamento na ruptura, para todos os ensaios o material nacional apresentou um alongamento superior. Esse comportamento pode ser relacionado com a Tg de cada material, pois o PLA Importado possui uma Tg maior que o PLA Nacional, considerando a aplicação à temperatura ambiente de aproximadamente 24°C, espera-se que, sua fragilidade seja maior. Com relação a ruptura, ambos os materiais apresentaram fratura frágil, pelo mesmo fator que o alongamento é baixo, na Figuras 53 é possível verificar o aspecto da fratura. No que se refere à substituição do PLA Importado para o PLA Nacional, não será observado perda de resistência dos componentes, podendo em muitas vezes proporcionar uma resistência mecânica maior de acordo com os parâmetros estabelecidos.

Figura 53 – Aspecto da fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, a – preenchimento de 100%, b – preenchimento de 50%.



Fonte: Autor, 2022.

4.3 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA MECÂNICA DE ACORDO COM OS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Os ensaios de tração trouxeram informações referentes à resistência mecânica de cada variável aplicada no processo. Para essa análise a quantidade de corpos de prova ensaiados estão dispostos no Quadro 7 abaixo. Com isso, foi possível correlacionar os padrões de deposição, a qualidade de impressão, o preenchimento utilizado, a variação na velocidade de impressão e a variação na temperatura da mesa de construção com a resposta mecânica final. Vale ressaltar que, para discutir essas variáveis com maior foco, foram utilizados apenas corpos de prova impressos em PLA nacional como referência.

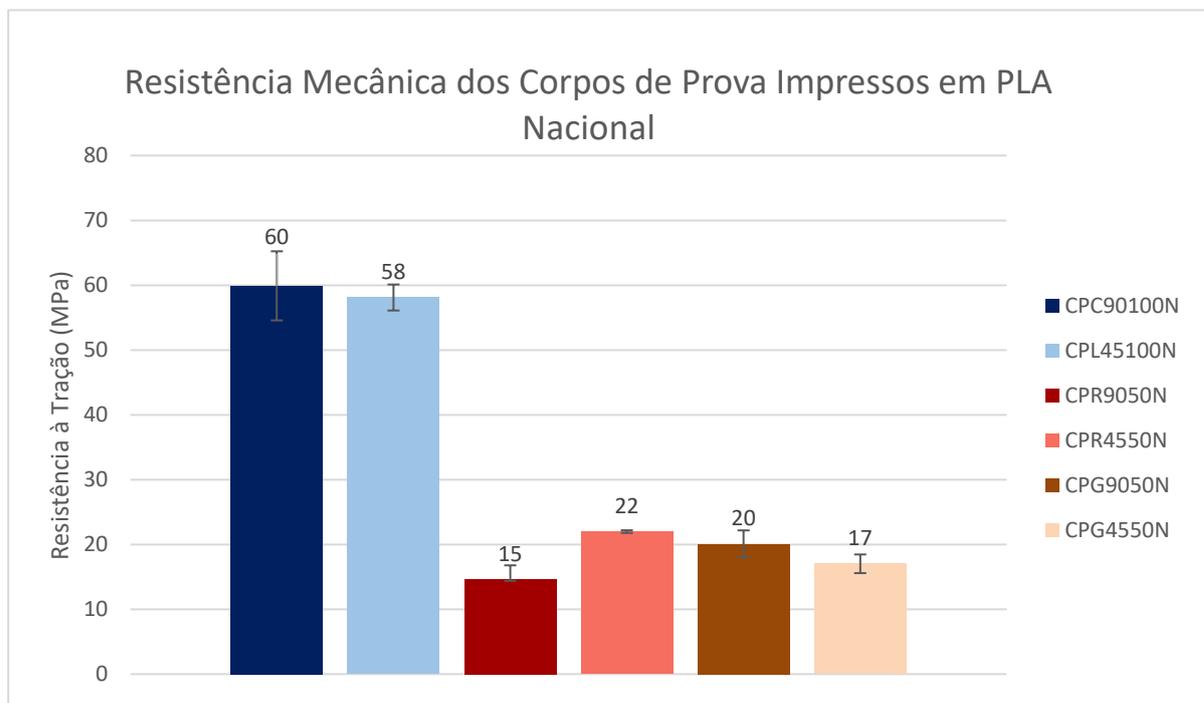
Quadro 7 – Valores de resistência à tração e alongamento encontrados para os corpos de prova de PLA Nacional.

Corpo de Prova	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão	Alongamento na ruptura (%)	Desvio Padrão
CPC90100N	60	5,3273	6,68	0,5449
CPL45100N	58	2,0075	6,89	0,2316
CPR9050N	15	2,1806	3,58	0,4479
CPR4550N	22	0,2049	5,82	0,1454
CPG9050N	20	2,0748	5,716	0,5027
CPG4550N	17	1,4412	5,352	0,3374
CPC90100N-2	64	2,3537	7,434	0,2801
CPC90100N-3	63	5,2723	7,312	0,4125

Fonte: Autor, 2022.

No gráfico apresentado na Figura 54 estão os ensaios para comparação da resposta mecânica de diferentes padrões de preenchimento, os quais estão demonstrados na Figura 55. Vale destacar que, neste gráfico estão apenas os corpos de prova em PLA Nacional que foram impressos nos mesmos padrões de processamento, com temperatura de extrusão de 217°C, temperatura da mesa de deposição de 60° e velocidade de impressão de 45mm/s. Os corpos de prova com alterações desses padrões serão avaliados posteriormente.

Figura 54 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova impressos com PLA Nacional.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 55 – Configuração dos corpos de prova impressos para o ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2022.

Os dois primeiros resultados são referentes ao preenchimento de 100% com alteração do ângulo de construção em que, no primeiro os filamentos ficam dispostos axialmente, enquanto que, no segundo os filamentos são dispostos 45° com a plataforma de construção. A variação da resposta mecânica foi pequena, porém, o primeiro se destaca pelo fato de os filamentos estarem alinhados na direção de carregamento do ensaio de tração. Este padrão acaba promovendo maior resistência, uma vez que, nesta configuração há maior orientação e estiramento das cadeias poliméricas, quando comparada à uma distribuição aleatória, no qual, o desempenho mecânico será menor na direção transversal da disposição do filamento. (FRANCISCO, 2017; SANTANA; ALVES; NETTO; MERLINI, 2018)

Vale ressaltar que, no padrão concêntrico a deposição do filamento se ajusta muito bem ao limite da peça, porém faz necessário depositar o filamento por todo o perímetro, gerando uma deposição longa e com maiores possibilidades de falha. (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017). Sendo assim, é importante que o fluxo, temperatura de diâmetro do filamento não sofram variações, caso contrário terá a geração de muitos defeitos de adesão que provocará variação na resposta mecânica dos componentes. Essa oscilação ficou clara durante o ensaio, pois no padrão concêntrico o desvio padrão das medidas ficou bem acima do desvio no padrão linear (inclinado). No padrão linear, a ocorrência de falhas é menor justamente pelo fato de a deposição ser rápida e os caminhos serem menores. (PLAZA; LÓPEZ; TORIJA; MUÑOZ, 2019).

Os demais resultados apresentados se referem a taxa de preenchimento de 50% com variações nos padrões de deposição. Neste grupo, a menor queda observada ficou em 62%, chegando a uma queda de resistência de 75% quando comparado ao CPI45100N.

A queda na resistência à tração foi esperada, visto que às diferenças da taxa de preenchimento são significativas. Em um preenchimento de 50% existem muitos vazios que fragilizam o material, a quantidade de pontos de contato intensifica e como resultado, existem mais pontos suscetíveis à falha mecânica. (ARANHA, 2015)

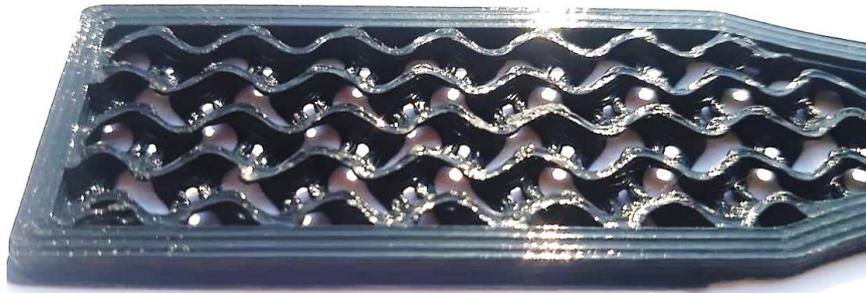
Entre os corpos de prova com preenchimento de 50%, há dois padrões de preenchimentos dispostos em dois ângulos diferentes. Avaliando o padrão de preenchimento retilíneo, foi verificado que, a deposição inclinada (45°) proporcionou uma melhor resposta mecânica. No padrão retilíneo de 90° os espaços vazios ficam mais visíveis e existem muitos cantos retos que acabam provocando maior tensionamento e maior possibilidade de falha na deposição.

Ao avaliar o desvio padrão do ensaio, a deposição de 90° apresentou uma maior oscilação na resistência dos corpos de prova ensaiados, sendo que, o desvio padrão ficou em 2,1806, enquanto que para a deposição em 45° ficou em 0,2049. A maior fragilidade desse padrão é comprovada também pelo alongamento na ruptura do corpo de prova que ficou em 4%, sendo que para a deposição em 45° o alongamento aumentou para 6%. Sendo assim, na deposição de 45°C não houve formação de filamentos perpendiculares à aplicação da carga, e assim a resposta mecânica foi muito positiva, ficando 34% acima do valor encontrado para a deposição de 90°.

Os padrões retilíneos, concêntrico e lineares são os mais populares de serem avaliados, no entanto, existem inúmeras possibilidades, e para comparar a alteração na resposta mecânica de componentes com 50% de preenchimento foi utilizado um padrão específico do software da BigRep, o padrão Giroyde depositado de forma linear (considerado como 90°) e de forma inclinada à 45°. Este padrão de deposição é recomendado por fornecedores por teoricamente ser mais robusto dando mais estrutura ao componente.

No padrão Giroyde, a deposição linear (CPG9050N) se mostrou mais efetiva, proporcionando uma resistência à tração de 20 Mpa, cerca de 15% acima quando comparado à deposição de 45°. Neste padrão de deposição linear, há uma maior quantidade de filamentos depositados axialmente, conforme pode ser visualizado na Figura 56, e existem ligações entre os filamentos na base do corpo de prova. Essa estrutura apresentou um resultado muito positivo não só na resistência à tração, mas o alongamento ficou próximo do visualizado para os corpos de prova com preenchimento de 100%.

Figura 56 – Padrão de deposição Giroyde 90°.



Fonte: Autor, 2022.

Com relação ao padrão Giroyde com deposição à 45° (CPG4550N), representado na Figura 57, apesar de ter ficado com uma resistência inferior ao padrão Giroyde 90° (CPG9050N), os valores ficaram muito próximos, tanto de resistência à tração quanto de alongamento, conforme mostrado no Quadro 7 e no gráfico da Figura 55. Este comportamento era esperado, visto que a maior parte dos filamentos se encontram à 45° do carregamento aplicado.

Figura 57 – Padrão de deposição Giroyde 45°.



Fonte: Autor, 2022

Outro ponto evidenciado, foi a fratura entre os dois corpos de prova, pois no padrão linear a fratura foi localizada e no padrão com 45° ocorreram quebra dos filamentos em mais de uma região, como pode ser observado nas Figuras 58 e 59. O padrão Giroyde de 45° foi o único que apresentou quebra dos filamentos em região distinta à fratura, podendo ser consequência de uma falha na impressão devido à característica da deposição, visto que, três de cinco corpos ensaiados apresentaram este comportamento.

Figura 58 – Fratura do corpo de prova com padrão Giroyde 90° (CPG9050N).



Fonte: Autor, 2022

Figura 59 - Fratura do corpo de prova com padrão Giroyde 45° (CPG4550N).



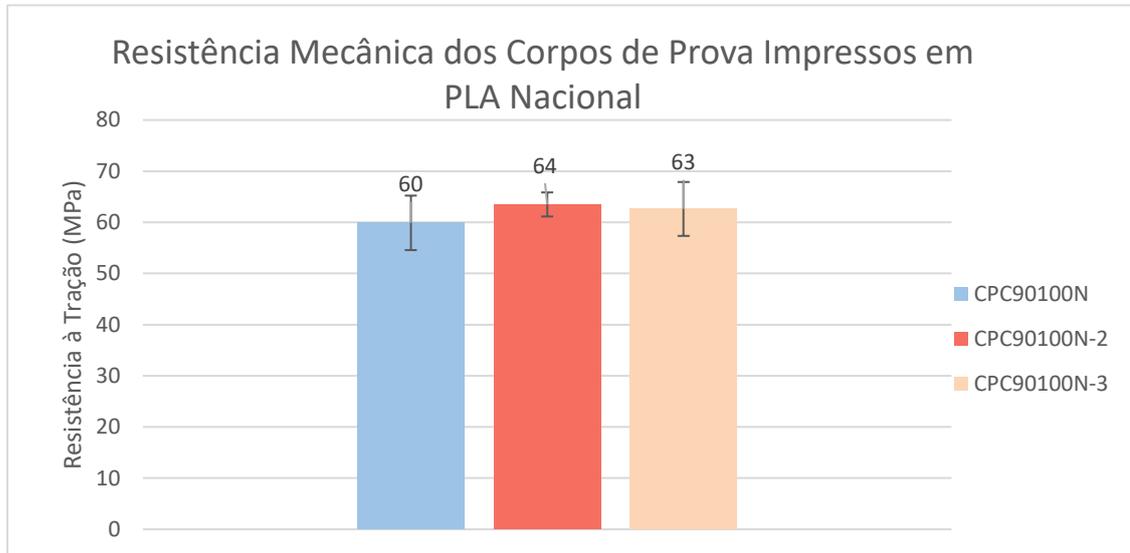
Fonte: Autor, 2022

Os diferentes padrões de deposição dos filamentos, interferiram significativamente na resposta mecânica dos componentes impressos via FFF. Analisando de forma geral, preenchimentos de 100% se destacam significativamente perante taxa de preenchimentos menores, porém geram impressões mais demoradas e que necessitam de uma quantidade maior de filamento. Analisando os resultados para taxas de preenchimento de 50%, os que mais se destacaram foram o retilíneo de 45° e o Giroyde de 90°, respectivamente. Dentre estes, o padrão retilíneo de 45° mostrou um comportamento mais homogêneo, pois o desvio padrão para os corpos de prova ensaiados foi de apenas 0,2049, enquanto que para o padrão Giroyde de 90° o desvio ficou em 2,9748. Senso assim, é possível concluir que o padrão de deposição retilíneo de 45° foi o mais robusto (para a taxa de preenchimento de 50%) e o que proporcionou uma melhor qualidade da impressão, visto que, não houveram variações significativas na resistência à tração dos corpos de prova ensaiados.

Além dos padrões de impressão, foram analisadas alteração dos parâmetros de impressão e o impacto na resistência mecânica dos componentes impressos. Para realizar esta comparação, foram impressos corpos de prova em PLA Nacional, com 100% de preenchimento e padrão de deposição concêntrico, com alterações na temperatura da mesa de construção e na velocidade de impressão. Sendo assim, foram impressos os CPC90100N-2 com aumento da temperatura da mesa para 70°C (10° acima do padrão anterior) e os CPC90100N-3 com aumento

da taxa de impressão para 60mm/s (15mm/s acima do padrão anterior) e comparando-os aos CPC90100N. Os resultados estão evidenciados no gráfico da Figura 60 abaixo.

Figura 60 – Valores de resistência à tração dos corpos de prova impressos com PLA Nacional.



Fonte: Autor, 2022

Com relação às alterações nos padrões de processamento, ambas modificações foram positivas para a resposta mecânica final. O aumento da temperatura da mesa gerou um aumento na resistência mecânica dos corpos de prova ensaiados, isso ocorreu, pois, a temperatura maior da mesa promoveu uma melhor adesão entre as camadas, favorecida pela temperatura da mesa em torno da T_g do PLA Nacional. Outro ponto positivo foi a redução no desvio padrão das amostras ensaiadas, ou seja, o aumento da temperatura, reduziu a ocorrência de imperfeições e alterações na impressão dos corpos de prova gerando uma impressão mais homogênea. (SANTANA, 2015).

O aumento da taxa de impressão poderia gerar falhas nesta e danos às propriedades mecânicas. Porém na taxa de impressão de 60mm/s o resultado foi positivo, uma vez que, a resistência a tração foi maior. Este comportamento também foi evidenciado nos estudos realizados por SANTANA, 2015, em que o aumento da taxa de impressão de 30 para 60mm/s e o aumento da temperatura da mesa de impressão de 24,2 para 30,53°C gerou um aumento de 10% na resistência mecânica das amostras ensaiadas, conforme demonstrado na Figura 27.

Este resultado abre uma possibilidade de otimização do processo de impressão sem afetar consideravelmente às propriedades mecânicas. Um aumento ainda maior pode provocar danos à estrutura, dificultando a adesão entre as camadas, visto que, apensar de, neste caso, a

resistência ter aumentado o desvio padrão ficou maior. Na impressão por FFF a combinação de padrões de processo determinará a qualidade final, uma velocidade de impressão mais alta atrelada a uma temperatura da mesa de construção próxima da Tg do material utilizado tenderá a garantir uma boa resistência mecânica.

Foi discutido acima, as oscilações que alguns padrões apresentaram na resistência à tração dos corpos de prova ensaiados, principalmente para o padrão concêntrico com 100% preenchimento, cujo desvio padrão foi maior (5,3273). Como citado, nesta forma de preenchimento o filamento percorre um comprimento muito maior sem ocorrer alteração da orientação que está sendo depositado. O processo de extrusão do filamento para deposição sofre alterações, seja de fluxo, quanto de temperatura, quanto de pressão de entrada do filamento. Após a extrusão a peça resfria homogênea ou heterogênea de acordo com a sua geometria. Peças maiores e mais densas tendem a armazenar mais calor do que as peças pequenas, resultando em maiores variações na superfície. (SANTANA, 2015)

Caso o filamento não possua um diâmetro padrão com pouquíssimas variações, a alteração do diâmetro gera alteração no fluxo e na pressão de entrada, provocando alterações no processo de adesão e na área de contato entre os filamentos. (COUTINHO, 2015). Para validar estas afirmações, foram separados dois corpos de prova com taxa de preenchimento de 100% e com padrão de preenchimento concêntrico. Os corpos de prova utilizados para comparação estão dispostos nas Figura 61 e 62 abaixo.

Figura 61 - Corpo de prova A após ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2022.

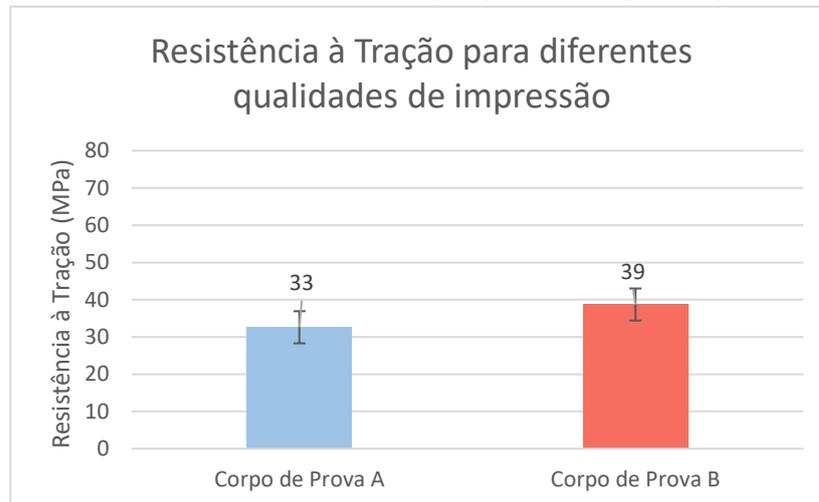
Figura 62 - Corpo de prova B após ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2022.

É possível observar a diferença de qualidade entre os corpos de prova, e as falhas provocadas na aderência das camadas, apesar deste padrão já possuir tendência a irregularidades, variações no processo podem intensificá-las ainda mais. Vale destacar que estes corpos de prova foram descartados dos ensaios anteriores devido às irregularidades apresentadas e estão sendo utilizados para confirmação do quanto as irregularidades podem prejudicar a resistência mecânica. Os valores de tração dos corpos de prova citados estão apresentados na Figura 63 abaixo.

Figura 63 – Resultado do ensaio de tração para os corpos de prova A e B.



Fonte: Autor, 2022.

O corpo de prova B, como esperado, apresentou uma resistência mecânica superior ao corpo de prova A, justamente pelos fatores já citados acima. O interessante é comparar estes valores com os valores de resistência à tração dos CPC90100N que ficou em 60Mpa,

comprovando mais uma vez o quão importante é avaliar os padrões de impressão com cautela para garantir a melhor adesão entre as camadas.

4.4 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO DE COMPONENTES VIA FFF.

Como citado, este estudo foi desenvolvido em conjunto com o projeto de Estágio III cujo intuito foi reduzir os gastos com a impressão de ferramentais para moldagem. No Quadro 8 abaixo estão apresentados os custos em reais de impressão.

Quadro 8 – Custos relacionados à impressão de cada configuração de corpo de prova utilizado.

Corpo de Prova	Peso (g)	Resistência à tração	Tempo de impressão (min)	Custo (R\$)
CPC90100N	32	60	34	4,8
CPC90100I	32	51	34	11,0
CPL45100N	28	58	54	4,2
CPL45100I	28	46	54	9,6
CPR9050N	19,0	15	23	2,9
CPR9050I	19,0	15	23	6,5
CPR4550N	19,0	21	23	2,9
CPR4550I	19,0	16	23	6,5

Fonte: Autor, 2022.

Houve a redução nos custos de impressão dos corpos de prova foi de 56,3% ao utilizar o PLA Nacional, sendo assim, independente do padrão escolhido este material será a opção de maior rentabilidade para o processo. Juntamente com a maior cristalinidade e maior resistência mecânica, o PLA mostrou uma melhor resistência térmica, uma vez que, apresentou T_m de 181,37°C superior à T_m de 177,58°C do PLA Importado. Todos estes fatores justificam a utilização deste material como primeira opção.

A taxa de preenchimento pode variar de acordo com o objetivo de cada impressão, a alteração neste parâmetro de impressão promove alteração no tempo de impressão e consequentemente na quantidade de material necessária, fatores que influenciam diretamente na rentabilidade do processo. A redução de custos na obtenção do corpo de prova com taxa de preenchimento de 50% foi de 40% para o material nacional e para o importado foi de 37%, um valor bem expressivo no caso de impressões em largas escalas.

A taxa de impressão também pode ser aumentada até 60mm/s sem gerar danos à estrutura do componente, sendo assim, pode-se otimizar em 25% o tempo de impressão. A

avaliação do aumento da taxa foi realizada nos CPC90100N, corpos de prova que apresentam maior oscilação na impressão, acredita-se que, aplicando esta taxa de impressão nos demais padrões disponíveis a resposta se manterá positiva.

Como citado anteriormente, a escolha dependerá do objetivo da peça impressa, se há necessidade de alta durabilidade e resistência ou não. Sabemos que as opções não se limitam apenas às variáveis estudadas neste trabalho, a taxa de preenchimento pode aumentar na busca de garantir uma melhor resistência sem necessitar de um preenchimento completo do componente.

5 CONCLUSÃO

Ao avaliar o comportamento do PLA Nacional e PLA Importado para os mesmos padrões de impressão, foi possível identificar que o PLA Nacional fornece uma resistência mecânica superior que o PLA Importado para três de quatro variáveis avaliadas, ficando no mínimo 15% acima nas três variáveis de destaque. A resistência térmica, no diz respeito a temperatura de fusão, também foi melhor para o PLA Nacional, a qual ficou 2% acima. A Tg do PLA Nacional, de 62,22°C é inferior ao PLA Importado com Tg de 110,23°C, promovendo a este uma maior flexibilidade à temperatura ambiente e melhor qualidade na impressão, visto que é possível aquecer a plataforma de construção à uma temperatura superior à Tg sem grandes dificuldades, o que facilitará o processo de adesão dos filamentos.

A partir do estudo da influência dos padrões de impressão na resistência mecânica dos componentes impressos, foi possível correlacionar essa avaliação com a otimização do processo de impressão 3D. Sendo assim, foram avaliadas possibilidades de padrões de impressão diferentes e o impacto no custo final da impressão. Inicialmente optava-se pela impressão com 100% de seu volume preenchido de material, porém é possível reduzir a taxa de preenchimento da estrutura. Esta redução proporciona uma otimização do processo de impressão pela redução dos custos com material e com o tempo de impressão necessário.

Além de otimizar a impressão, o estudo serviu como base para validação do uso do material nacional. Esta validação é importante pois o material nacional apresenta um custo menor quando comparado ao material importado, uma vez que, o PLA Nacional tem um custo de R\$ 150,00 por quilo, enquanto que o PLA Importado possui um custo de R\$ 340,53 por quilo (cotação atual para \$62,00).

Comparando as variáveis estudadas para o PLA Nacional, o preenchimento de 100% é o que fornece maior resistência mecânica, porém a escolha do melhor padrão deverá levar em conta a finalidade e durabilidade necessária do componente impresso. Em muitos casos, a peça impressa terá uma utilização muito baixa e muitas vezes não chegara a sofrer grandes esforços, sendo assim, não se exige uma resistência elevada. É importante destacar que a taxa de preenchimento menor, além da redução de custo com a impressão, promove redução do tempo de impressão, liberando mais rápido a impressora para próximos trabalhos.

REFERÊNCIAS

3DX Filamentos. Ácido Polilático Alta Temperatura. Disponível em:<
https://www.loja3dxfilamentos.com/MLB-1380132209-filamento-pla-preto-1kg-preto-285300-mm-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=ec63f0b8-9560-4245-b919-6e8adec0c204> Acesso em: 23/02/2021

ARANHA, Elvio Franco de Camargo. **Análise da Viabilidade de um Novo Processo de Manufatura por Aglutinação de Compósitos Polímeros/Metals para Fabricação de Implantes Dispositivos Médicos**. 2019. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Medicina, Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BARBOSA, M. I. R. **Desenvolvimento de materiais nanocompósitos e do processo de estereolitografia laser no infravermelho (CO₂)**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 2010

BIGREP. HIGH-TEMPERATURE RESISTANT FILAMENT. Disponível em:<
<https://bigrep.com/filaments/hi-temp/>> Acesso em: 23/02/2021

CABREIRA, Vinicius; SANTANA, Ruth Marlene Campomanes. **Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, 30 mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1126>

CHICCA JUNIOR, Natal Anacleto. **A Integração da Impressora 3D FDM no Processo Ensino-Aprendizagem da Prática Projetual de Design**. 2017. 259 f. Tese (Doutorado) - Curso de Design, Centro de Artes e Comunicação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

COSTA, Branilson Luiz Santos. **POPFAB 3D – UM SISTEMA DE MANUFATURA ADITIVA DE BAIXO CUSTO**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mecatrônica, Escola Politécnica e do Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011

COUTINHO, Rafaella Rabello Teixeira Perdone. **AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DE PLA/PBAT**

FABRICADAS POR IMPRESSÃO 3D. 2017. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CUAN-URQUIZO, Enrique *et al.* **Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials**: a review on the experimental, computational and theoretical approaches. *Materials*, v. 12, n. 6, p. 895, 18 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12060895>.

EMBRACAL. Máquina Universal de Ensaio EMIC. Disponível em: < <https://www.embracal.com/maquina-universal-ensaios-emic> > Acesso em: 22/02/2022.

FISCHER, Matheus. **ESTUDO PARA READEQUAÇÃO AO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO**. 2018. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Metal-Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GEBHARDT, Andreas; HÖTTER, Jan-Steffen. **Additive Manufacturing**: 3d printing for prototyping and manufacturing. Munich: Hanser Publications, 2016. 610 p.

JACOBS, P. F. **“Rapid prototyping and manufacturing: fundamentals of Stereolithography”**, Michigan: SME, Dearbon. 1992.

KUMAR, L. Jyothish; PANDEY, Pulak M.; WIMPENNY, David Ian (ed.). **3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**. Singapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 308 p.

KUMAR, L. Jyothish; PANDEY, Pulak M.; WIMPENNY, David Ian (ed.). **3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**. Singapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 308 p.

Li, L. (2002). **Analysis and fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties (Unpublished doctoral thesis)**. University of Calgary, Calgary, 2002 AB. doi:10.11575/PRISM/21634

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L.; SANTOS, D. M.; PEDROTI, L. G.; CARLO, J. C.; MARTINS, M. A. D. **Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural.** Gestão e Tecnologia de Projetos, São Carlos, v.14, n.1, p.125-141, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>

MATHIAS, R. F. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM PLA ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO.** 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

PERES, Rafael Vidal. **Caracterização e Processamento do Poli (Ácido Lático) 70/30 para Impressão 3D.** 2016. 96 f. Tese (Doutorado) - Curso de Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

PLAZA, Eustaquio García; LÓPEZ, Pedro Núñez; TORIJA, Miguel Caminero; MUÑOZ, Jesús Chacón. **Analysis of PLA Geometric Properties Processed by FFF Additive Manufacturing: effects of process parameters and plate-extruder precision motion.** *Polymers*, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 1581, 27 set. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym1110158>

PORSANI, Rodolfo Nucci; SILVA, Bruno Borges; HELLMEISTER, Luiz Antonio Vasques. **Revisão Teórica da História da Manufatura Aditiva e das Propriedades dos Principais Insumos e Estruturas de Preenchimento nas Impressoras 3D FDM Open Material..** In: II CONGRESSO INTERNACIONAL E VIII WORKSHOP: DESIGN & MATERIAIS 2017, Joinville. Dm: Design & Materiais, 2017. 20 p.

RAYNA, T.; STRIUKOVA, L. **From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation.** *Technological Forecasting and Social Change*, v. 102, p. 214–224, 2016.

RECH, Fernanda et al. **Formulação e caracterização de potenciais filamentos compósitos de PLA e talos de tabaco para aplicação em manufatura aditiva.** *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, 12 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210002.1288>.

REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D Printing HandBook.** Amsterdam: Coers & Roest, 2017. 347 p.

RESEARCH, Grand View (ed.). **3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component, By Printer Type, By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Material, By Region And Segment Forecasts, 2021 - 2028**. 2021. Report Overview. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing->

SADASIVUNI, Kishor Kumar; DESHMUKH, Kalim; ALMAADEED, Mariam Alali. **3D AND 4D PRINTING OF POLYMER NANOCOMPOSITE MATERIALS**. Amsterdam: Elsevier, 2020. 575 p.

SANTANA, Leonardo. **AValiação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; NETTO, Aurélio da Costa Sabino; MERLINI, Claudia. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, 6 dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601>.

SANTOS, Luana Machado dos; ROCHA, Daniela Sousa Guedes Meirelles; CARNEIRO, Marcos Lajovic; LUZ, Marta Pereira. **TIPOS DE POLÍMEROS UTILIZADOS COMO MATERIA PRIMA NO MÉTODO DE MANUFATURA ADITIVA POR FDM: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL**. In: XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, 12f. 2018, Maceió, 2018.

SILVA, Felipe Lopes Fonseca da. **Comissionamento e Estudo dos Materiais PLA e ABS Processado Através da Manufatura Aditiva**. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC). Sorocaba, 2019.

SILVA, Felipe Lopes Fonseca da. **COMISSIONAMENTO E ESTUDO DOS MATERIAIS PLA E ABS PROCESSADO ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA**. 2019. 33 f. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba “José Crespo Gonzales”, Sorocaba, 2019.

WHOLERS, Terry; GORNET, Tim. **History of Additive Manufacturing**. 2014. 34 f. Wholers Associates, Inc., Wohlers Report, 2014.

WISHBOX. TUDO SOBRE IMPRESSÃO 3D: O QUE É, COMO FUNCIONA E TIPOS.
2019. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>. Acesso em: 22 fev.
2022.