

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Luís Henrique Satas Labecca

**Estudo sobre a correlação entre os fatores fundamentais do processamento de polímeros por FDM (“Fused Deposition Modeling”) e as propriedades reológicas, viscoelásticas e térmicas dos polímeros:** Um estudo a partir dos resultados disponíveis no mercado e na literatura.

São Carlos

2021

LUÍS HENRIQUE SATAS LABECCA

**Estudo sobre a correlação entre os fatores fundamentais do processamento de polímeros por FDM (“Fused Deposition Modeling”) e as propriedades reológicas, viscoelásticas e térmicas dos polímeros:** Um estudo a partir dos resultados disponíveis no mercado e na literatura.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Antonio José Felix Carvalho.

VERSÃO NÃO CORRIGIDA

São Carlos  
2021

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

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

L116e      Labecca, Luís Henrique Satas  
Estudo sobre a correlação entre os fatores fundamentais do processamento de polímeros por FDM ("Fused Deposition Modeling") e as propriedades reológicas, viscoelásticas e térmicas dos polímeros: Um estudo a partir dos resultados disponíveis no mercado e na literatura. / Luís Henrique Satas Labecca; orientador Antonio José Felix de Carvalho. São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Manufatura Aditiva. 2. Polímeros. 3. Fusion Deposition Modeling. 4. PLA. 5. Impressão 3D. I. Título.



## FOLHA DE APROVAÇÃO

<b>Candidato / Student:</b> Luís Henrique Satas Labecca
<b>Título do TCC / Title:</b> Estudo sobre a correlação entre os fatores fundamentais do processamento de polímeros por FDM (“Fused Deposition Modeling”) e as propriedades reológicas, viscoelásticas e térmicas dos polímeros: Um estudo a partir dos resultados disponíveis no mercado e na literatura.
<b>Data de defesa / Date:</b> 02/12/2021

Comissão Julgadora / <i>Examining committee</i>	Resultado / <i>Result</i>
Professor Doutor Antonio José Felix de Carvalho (orientador)	Aprovado
Instituição / <i>Affiliation:</i> EESC - SMM	
Professor Doutor Iris Bento da Silva	Aprovado
Instituição / <i>Affiliation:</i> EESC - SEM	
Professora Doutora Zilda de Castro Silveira	Aprovado
Instituição / <i>Affiliation:</i> EESC - SEM	

Presidente da Banca / *Chair of the Examining Committee*

---

**Professor Doutor Antonio José Felix de Carvalho**

## DEDICATÓRIA

*À minha família, pelo  
suporte e amor incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Eduardo Bellini, e sua paciência, que me encorajou durante o período de pesquisa e contribuiu para a conclusão deste trabalho e ao meu orientador Professor Dr. Antonio José Felix, pela oportunidade e confiança na realização deste projeto.

## EPÍGRAFE

*“The scientific man does not aim at an immediate result. He does not expect that his advanced ideas will be readily taken up. His work is like that of the planter - for the future. His duty is to lay the foundation for those who are to come, and point the way. He lives and labors and hopes.” – Nikola Tesla*

*“O homem da ciência não almeja um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam prontamente entendidas. Seu trabalho é como o de um agricultor – para o futuro. Seu dever é criar a fundação para aqueles que estão por vir e apontar o caminho. Ele vive, e trabalha e espera.” – Nikola Tesla*





## RESUMO

**LABECCA, L. H. S. Estudo sobre a correlação entre os fatores fundamentais do processamento de polímeros por FDM (“Fused Deposition Modeling”) e as propriedades reológicas, viscoelásticas e térmicas dos polímeros:** Um estudo a partir dos resultados disponíveis no mercado e na literatura. 2021. 50 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Manufatura Aditiva (MA) se refere a um processo onde um arquivo digital de um objeto 3D é utilizado para construir um componente via a deposição de um material em camadas sucessivas. Também é denominada impressão 3D, embora esse termo seja mais restrito do que o anterior, que será utilizado neste trabalho. Um dos métodos mais populares de Manufatura Aditiva é o processo por “*Fused Deposition Modeling*” (FDM) que se fundamenta na fusão e consequente deposição do material fundido em camadas empregando um arquivo digital do objeto a ser produzido, como por exemplo um arquivo CAD 3D. O objetivo deste estudo é identificar e analisar as principais propriedades de polímeros empregados na manufatura aditiva via processo FDM e realizar um levantamento dos principais polímeros empregados na impressão 3D por esta técnica, com especial atenção ao PLA, mapear suas propriedades físicas e de processamento e, a partir deste estudo, entender melhor a relação entre as propriedades do material e o processo de impressão. Para isso será também realizado um estudo do processo de impressão por FDM de modo que suas características sejam mais bem conhecidas.

Palavras-chave: *Manufatura Aditiva, PLA, Fused Deposition Modeling, Impressão 3D.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Peça artística modelada em Software CAD .....	21
Figura 2 – Mapeamento da Superfície do Arquivo CAD .....	22
Figura 3 – Processos genéricos de MA .....	24
Figura 4 – Representação das principais etapas de MA .....	24
Figura 5 – Esquemática do processo de SLA .....	26
Figura 6 – Esquemática do processo de SLS .....	27
Figura 7 – Esquemática do processo de FDM .....	28
Figura 8 – Esquemática do processo FDM com dois bocais .....	29
Figura 9 – Abordagem visual de altura de camada .....	30
Figura 10 – Esquemática de padrões de preenchimento .....	31
Figura 11 – Esquemática da orientação de construção .....	32
Figura 12 – Visualização do ângulo raster ( $\theta$ ) .....	32
Figura 13 – Estruturas químicas do L-, meso- e D-lactídeos .....	37
Figura 14 – Monômeros constituintes do ABS .....	38
Figura 15 – Orientações de impressão por Chacón et al (2017).....	41



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens da Manufatura Aditiva .....	20
Quadro 2 – Características dos processos de Manufatura Aditiva .....	25

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Visão Geral .....	17
1.2 Objetivos .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 Manufatura Aditiva .....	19
2.1.1 Processo Genérico de MA.....	20
2.1.2 Tecnologias de MA .....	24
2.2 Parâmetros de Processamento FDM .....	28
2.2.1 Espessura de camada .....	29
2.2.2 Espessura de Parede .....	29
2.2.3 Padrão de Preenchimento .....	30
2.2.4 Densidade de Preenchimento.....	30
2.2.5 Orientação de Impressão .....	30
2.2.6 Ângulo Raster .....	31
2.2.7 Velocidade de Impressão .....	32
2.2.8 Temperatura do Bocal .....	32
2.2.9 Diâmetro do Bocal .....	32
2.2.10 Temperatura da Cama de Impressão .....	33
2.2.11 Amplitude de Extrusão.....	33
2.2.12 Taxa de Fluxo .....	33
2.2.13 Espaçamento de Ar .....	33
2.3 Polímeros .....	34
2.3.1 Propriedades Relevantes .....	34
2.3.2 Poliacido Láctico (PLA).....	35
2.3.3 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) .....	36

3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
4.1 Generalização de Resultados na Literatura .....	38
4.2 Precisão Dimensional.....	38
4.3 Propriedades Mecânicas.....	39
4.4 Seleção de Materiais Sustentáveis e Reciclagem.....	41
4.5 Estabilidade Térmica e.....	42
5. CONCLUSÃO .....	43
5.1 Perspectiva Integral.....	43
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	44
6. REFERÊNCIAS .....	46



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Visão Geral

Entende-se por Manufatura Aditiva (MA), a produção de um modelo, elaborado inicialmente através de um sistema CAD (Computer-Aided Design), de maneira direta sem a necessidade de planejamento de processo. A MA, em suma, simplifica o processo de produção de peças complexas, utilizando diretamente os dados CAD. Portanto, podemos definir a Manufatura Aditiva como o processo pelo qual um objeto pode ser fabricado pela deposição de um material a partir de um arquivo digital de um objeto tridimensional. A principal base de funcionamento é que as peças são produzidas por adição de material em camadas. Todo o maquinário de MA comercializado até o momento utiliza da abordagem por camadas, em que suas maiores diferenças estão nos materiais utilizados, no modo de formação de camadas e na adesão entre estas camadas.

Desde o início de sua utilização na década de 1980, a Manufatura Aditiva (MA) trouxe muitos processos e possibilidades para a produção industrial. A tecnologia de adição de camadas possibilitou inicialmente a fabricação de peças para protótipo, sendo extremamente visada neste ramo e completamente associada à prototipagem, sendo sinônimo de *“Rapid Prototyping”* (RP). Nas duas primeiras décadas dos anos 2000, novas tecnologias de adição de camadas foram introduzidas e aperfeiçoadas possibilitando a extensão de viabilidade de *“Rapid Prototyping”* para processo principal de produção, e associando MA agora com o termo Impressão 3D. Dentro do espectro de MA temos uma grande variedade de processos e materiais disponíveis tonando esta categoria de manufatura extremamente flexível e integrável em diversas linhas de produção. Atualmente, a MA é capaz de produzir produtos com todos os tipos de materiais: metais, polímeros, cerâmicas e compósitos. Tal versatilidade, de um ponto de vista de engenharia de materiais, representa a possibilidade de aplicação aos mais variados setores industriais.

O potencial contido na MA já era observado desde sua origem, porém na última década houve uma revolução no mercado, com o final das patentes principais e uma consequente aceleração tanto no mercado quanto nas pesquisas sobre AM e hoje estamos em um mercado em estado de amadurecimento. Muitos processos de manufatura aditiva estão disponíveis para uso de acordo com os requisitos dos

produtos: “Direct Metal Deposition”, “3D Printing”, “Selective Laser Sintering”, “Inkjet Modeling”, “Fused Deposition Modeling”, “Stereolithography”. Os processos de impressão possuem suas próprias capacidades de processamento de acordo com o método de deposição e os materiais que podem ser manufaturados. Dentre todos os modelos de manufatura por MA, “*Fused Deposition Modeling*” (FDM) é um dos processos mais acessíveis e baratos. Foi desenvolvido pela Stratasys Inc. nos Estados Unidos na década de 90 e é muito utilizado na manufatura de protótipos funcionais de termoplásticos. A respeito dos materiais disponíveis, o pilar de polímeros está em grande evidência atualmente e o uso de plásticos está amplamente espalhado pelo mundo, visto seu baixo peso, baixo custo, alta flexibilidade de formas, resistência à corrosão e força.

Através das duas últimas décadas, a produção anual de plásticos atingiu 245 milhões de toneladas (PLASTIC EUROPE, 2009). Ao continuar no cenário atual, há previsão de aumento na taxa de produção de 46.6% para os próximos dez anos (PLASTIC EUROPE, 2015). Muitas organizações ambientais relataram vários efeitos ambientais e problemas relacionados à saúde e agora muitos pesquisadores estão seriamente investigando a área de reciclagem e biodegradabilidade dos plásticos (PRABHU; DEVARAJU, 2020). Prabhu e Devareaju (2020) também destacam que a necessidade de polímeros recicláveis e biodegradáveis é essencial hoje em dia para salvar o planeta, resultando em um aumento na demanda pela identificação e desenvolvimento de polímeros biodegradáveis. Dentre os polímeros mais investigados para FDM na literatura destacam-se o ABS, PLA, PEEK, PC e PEI, nesta ordem (POPESCU et al, 2018). Dentre estes, o grande destaque se dá ao PLA, que está atualmente ganhando mais visibilidade neste meio e configura um material durável, reciclável e biodegradável.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo sobre os parâmetros relacionados com os polímeros empregados na manufatura aditiva via FDM e discutir sua relação com os processos de deposição.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva, resumidamente, pode ser descrita como a transformação de dados de um sistema CAD em um produto físico geométrico através da adição contínua de material na forma de camadas. Qualquer intervenção no projeto e geometria da peça final, deve ser feita no modelo CAD, possibilitando de maneira rápida e instantânea ajustar as dimensões do modelo para atender novas necessidades e customizações. Volpato (2017) traz uma sequência de vantagens e desvantagens do processo, resumidas no seguinte quadro:

**Quadro 1** – Vantagens e Desvantagens da Manufatura Aditiva

Vantagens	Desvantagens
Baixo desperdício de material	Limitação mecânica das peças por anisotropia
Rapidez na obtenção de peças complexas	Precisão e acabamento podem ser inferiores métodos convencionais
Liberdade geométrica	Possibilidade de distorções e empenamento do material
Possibilidade de variação das propriedades das peças durante seu processamento	Produção em larga escala mais lenta e cara em relação a métodos tradicionais
Não necessita de troca de ferramental	

Fonte: Volpato (2017) adaptado.

Em virtude das vantagens apontadas, o processo de MA se destaca para a prototipagem rápida (*"Rapid Prototyping"*), e foi nesta aplicação em que se consagrou inicialmente. Atualmente, estudos estão sendo conduzidos com o objetivo de entender as causas e atenuar as desvantagens do processo, trazendo mais abrangência para a MA.

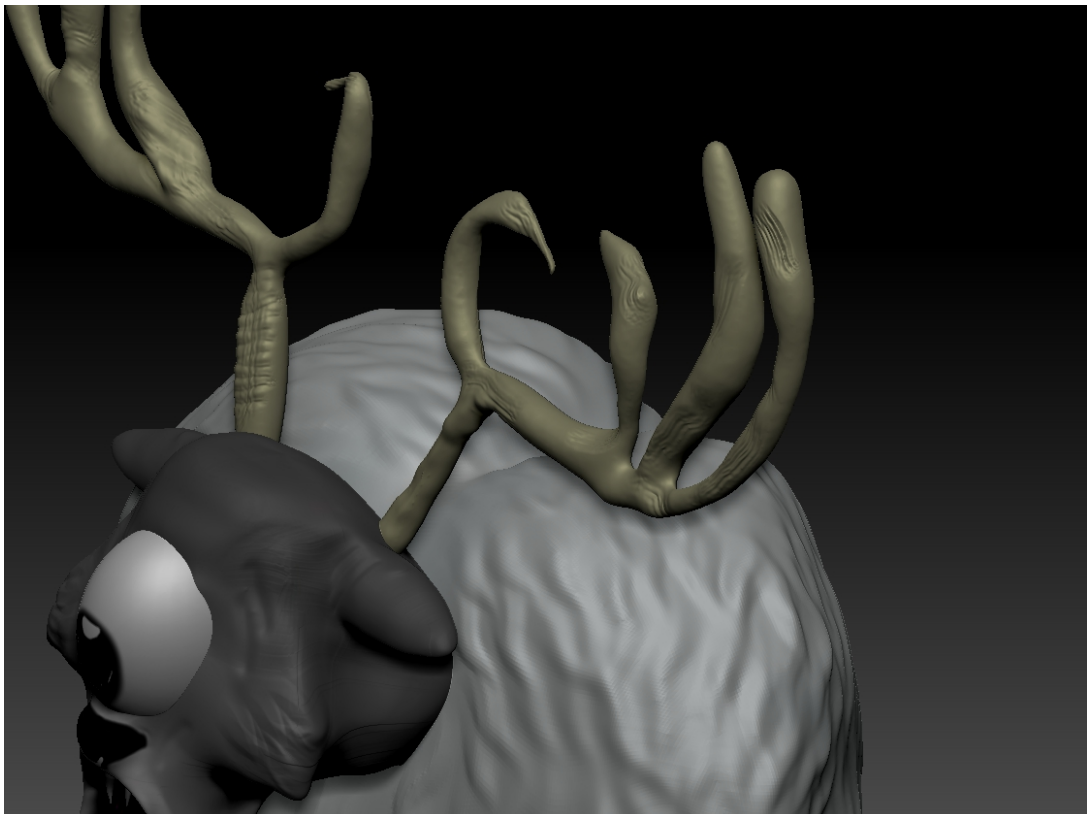
### **2.1.1 Processo Genérico de MA**

Gibson, Rosen e Stucker (2015) caracterizam o processo genérico de MA em uma sequência de 8 passos, exemplificados e descritos abaixo:

#### **2.1.1.1 CAD**

CAD é o nome genérico que se dá ao uso de sistemas de computação para auxiliar na criação, modificação, análise e desenvolvimento de design. O início de todas as peças de MA se dá através de um modelo de software que descreva a geometria da peça. Equipamentos de engenharia reversa podem ser utilizados para escanear a representação virtual do modelo.

**Figura 1** – Peça artística modelada em Software CAD.

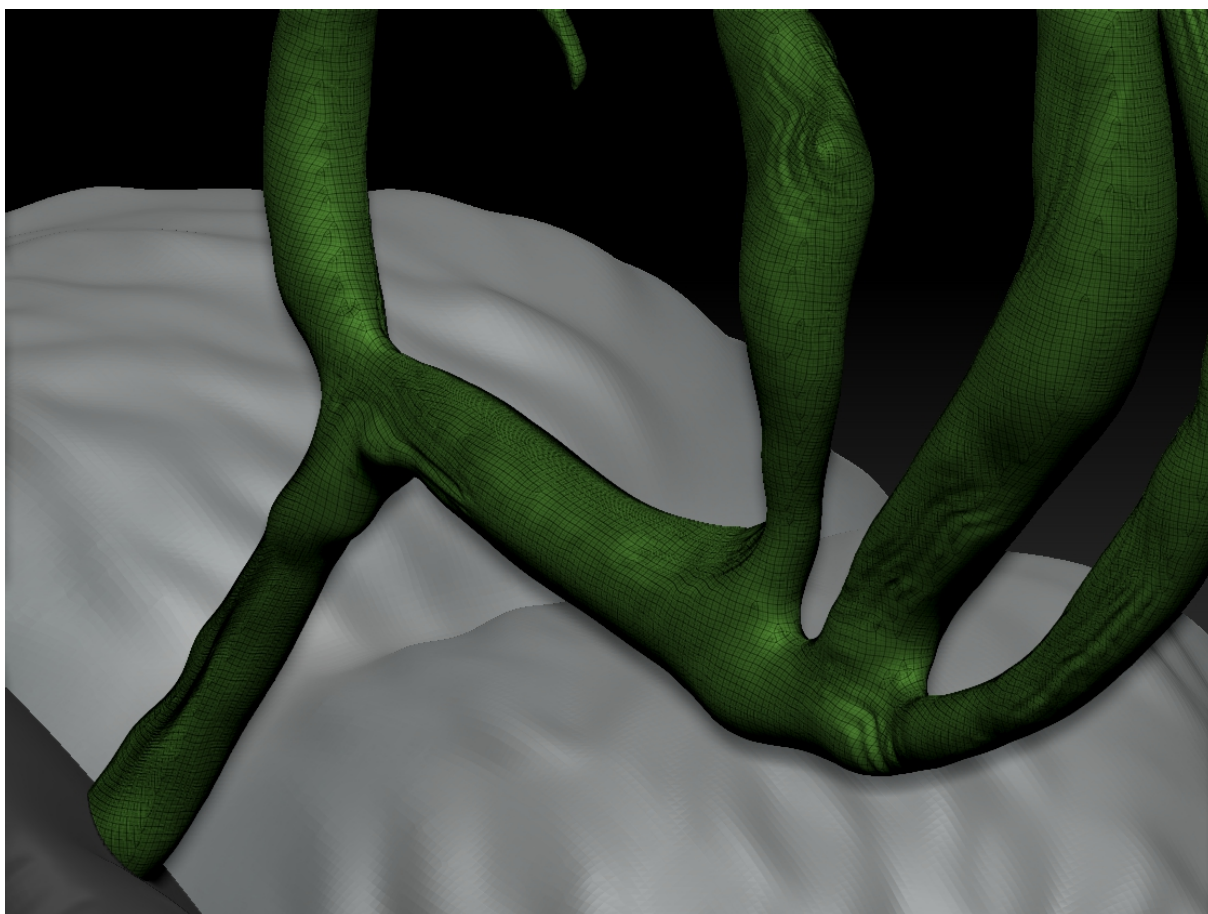


Fonte: Imagem capturada pelo próprio autor no software Zbrush.

### **2.1.1.2 Conversão para STL**

O formato STL se tornou padrão para os sistemas CAD, atendendo a praticamente todas as máquinas de MA. Este arquivo descreve as superfícies fechadas externas do modelo CAD original e forma a base para o cálculo dos cortes.

**Figura 2** – Mapeamento da Superfície do Arquivo CAD



Fonte: Imagem capturada pelo próprio autor no software *Zbrush*.

### **2.1.1.3 Transferência para maquinário de MA e Manipulação do arquivo STL**

O arquivo STL descrevendo a peça deve ser transferido para a máquina de MA. Neste ponto, pode ser necessária certa manipulação do arquivo para que se corrija o tamanho, posição e orientação de impressão.

#### **2.1.1.4 Configurações do Maquinário**

O maquinário de MA deve ser propriamente configurado de acordo com o processo de impressão. Tais configurações relacionam-se a parâmetros de impressão como fonte de energia, espessura de camada, limitações do material, etc.

#### **2.1.1.5 Impressão**

A impressão da peça trata-se de um processo automatizado e em geral é realizada sem supervisão. Apenas monitoramento superficial da máquina deve ser feito para garantir que nenhum erro possa ter ocorrido, tais como, esgotamento do material, falhas de software ou de energia.

#### **2.1.1.6 Remoção**

Assim que a máquina de MA tiver concluído a impressão, as peças devem ser removidas. Isto pode exigir interações com a máquina, que pode ter travas de segurança para garantir que a temperatura esteja suficientemente baixa ou que não haja nenhuma peça em movimento.

#### **2.1.1.7 Pós processamento**

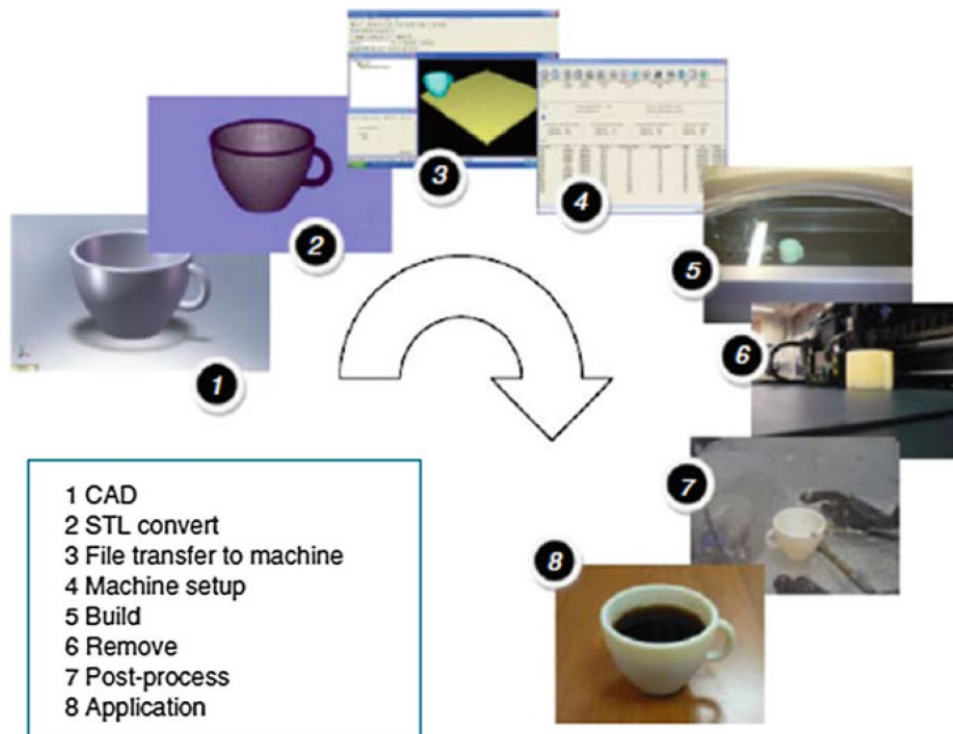
Uma vez removida da máquina as peças podem requerer um pouco de limpeza adicional antes de estarem prontas para o uso. As peças podem estar fracas neste momento ou podem ter recursos de suporte para serem removidos. Este processo às vezes requer tempo e manipulação manual experiente e cuidadosa

#### **2.1.1.8 Aplicação**

As peças agora podem estar prontas para uso. Entretanto, elas podem necessitar de tratamento adicional antes de estarem aceitáveis. Por exemplo, podem exigir preparação e pintura para uma textura e acabamento satisfatórios.




Os autores também destacam a importância da manutenção e manuseamento cuidadoso que muitos maquinários de MA e materiais. Os materiais brutos, segundo eles, utilizados em alguns processos de MA possuem tempo de prateleira limitado e pode ser necessário o armazenamento em condições que os previnam de reações químicas, exposição à umidade, excesso de luz e outros contaminantes.

**Figura 3** – Processos genéricos de MA



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015)

Volpato (2017) faz uma abordagem mais sintética dos processos, em 5 etapas e agrupando 2 grandes estágios de produção: Modelo Eletrônico 3D e Modelo Físico, de acordo com a Figura 4.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)		Planejamento de processo (fatiamento)	
Processamento por adição das camadas		Peça fabricada	
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato (2017).

## 2.1.2 Tecnologias de MA

Os processos de manufatura aditiva estão disponíveis para uso conforme os requisitos dos produtos e limitações dos materiais, como demonstrado na Figura 5, a partir dos 3 processos mais populares. Dentre os mais variados processos citados, serão revisados os pioneiros do desenvolvimento de MA, os mais utilizados atualmente e em especial processo de FDM cuja pertinência e associação ao PLA se dão como importante motivação para este estudo.

**Quadro 2** – Características dos processos de manufatura aditiva.

PROCESSO BASE	PROCESSO	APLICAÇÃO	PRINCIPAIS MATERIAIS
POLIMERIZAÇÃO	Esterolitografia (SLA)	Moldes, protótipos e peças artísticas finais	Resinas fotopolimerizáveis
“POWDER BED FUSION”	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	Protótipos e peças de uso final de alto desempenho (Design automotivo, dispositivos médicos, peças aeronáuticas)	Nylon 11, Nylon 12 e compósitos à base de Nylon
EXTRUSÃO DE FUNDIDO	Fused Deposition Modeling (FDM)	Moldes, protótipos e peças artísticas finais	Polímeros Termoplásticos

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

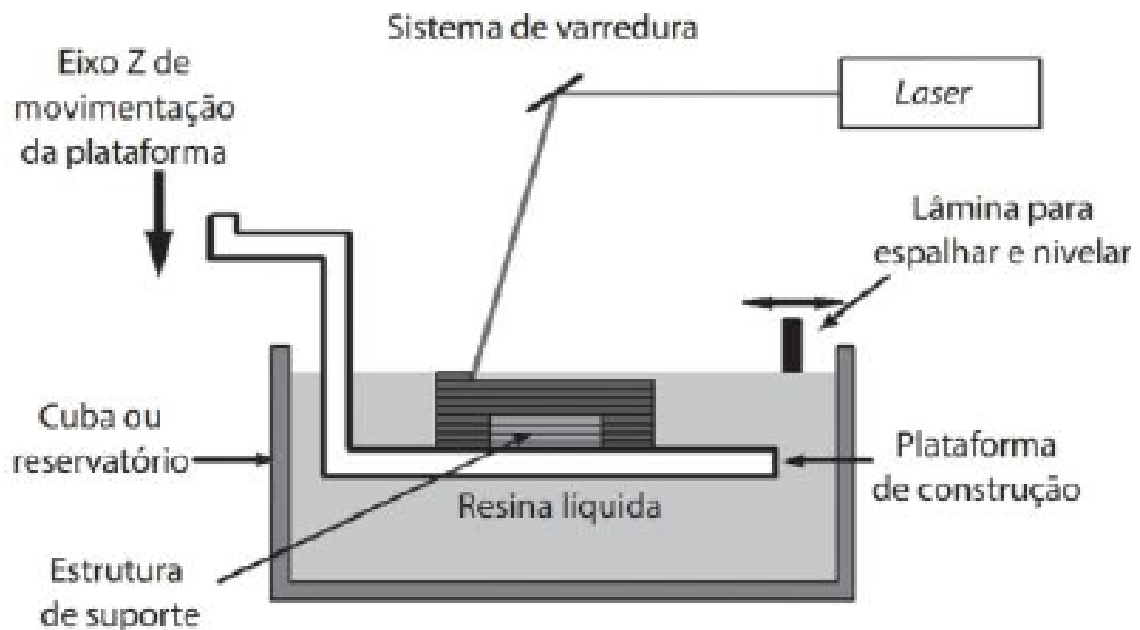
### 2.1.2.1 Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia aplica os conceitos de MA por meio da foto-polimerização. A funcionalidade do método consiste no uso de uma resina líquida foto polimerizável através de um feixe de luz laser ultravioleta (COSTATO, 2016). Desta forma, é direcionado laser ultravioleta para polimerização da resina camada por camada e para cada camada, o raio laser traça uma seção transversal do padrão da peça na superfície da resina líquida. Costato (2016) detalha que a exposição aos raios UV cura e solidifica o padrão traçado na resina e o conecta à camada inferior. Após o padrão ser traçado, o elevador da plataforma SLA desce a uma distância equivalente à espessura de uma camada, e então uma lâmina cheia de resina atravessa a seção transversal da peça, revestindo-a com material fresco. Nesta nova superfície líquida, o padrão da camada subsequente é traçado, conectando-se à camada inferior. O objeto tridimensional completo é formado por este processo. A tecnologia de



estereolitografia requer o uso de estruturas de suporte, que servem para acoplar a peça à plataforma de elevação e segurar o objeto. Estes suportes são removidos manualmente após a finalização da peça.

**Figura 5** – Esquemática do processo de SLA.



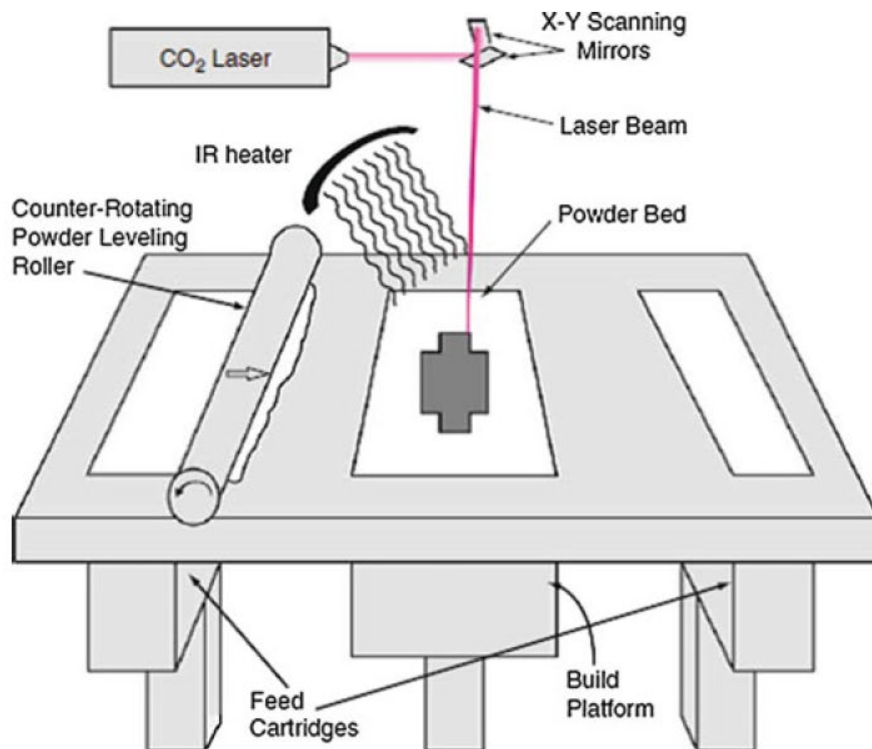
Fonte: Volpato (2017).

### 2.1.2.2 Sinterização a Laser Seletivo (SLS)

“*Selective laser sintering*” (SLS) é o método de MA pioneiro em “*Powder bed fusion*” (PBF). Desenvolvido na Universidade de Texas em Austin, EUA, foi o primeiro processo PBF a ser comercializado (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Wong e Hernandez (2012) descrevem, em seu artigo de revisão, como o processo de impressão tridimensional no qual um pó é sinterizado pela aplicação de um raio laser de dióxido de carbono. A câmara é aquecida até quase atingir o ponto de fusão do material e o laser funde o pó em localizações específicas para cada camada especificada pelo design. As partículas caem soltas na cama, controlada por um pistão, que abaixa à altura correspondente à espessura de camada cada vez que uma camada é concluída.

**Figura 6** – Esquemática do processo de SLS.



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015).

A princípio, todos os materiais que podem ser fundidos e resolidificados podem ser utilizados em processos PBF no geral.

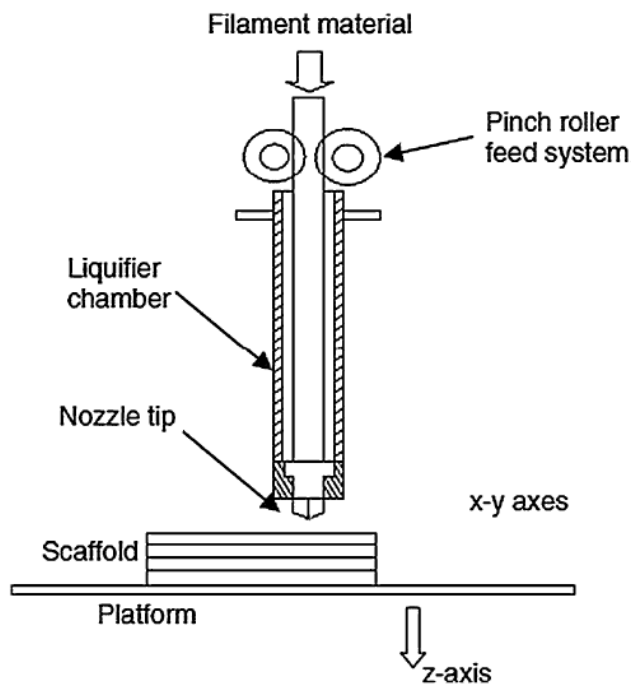
### **2.1.2.3 Modelagem por Fusão Deposição (FDM)**

Tecnologia à base de extrusão é atualmente a mais popular no mercado. Embora haja outras técnicas para criar a extrusão, o calor é normalmente utilizado para fundir o material bruto em uma pequena, câmara portátil. O material é empurrado por um sistema de alimentação por tração, que cria a pressão para extrusão (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

O método de “*Fused Deposition Modeling*” (FDM), patenteado pela Stratasys, consiste na extrusão de um termoplástico através de um bocal que traça a geometria da seção transversal da peça camada por camada. O material de impressão é geralmente fornecido na forma de filamento, mas raramente, algumas configurações industriais utilizam pelotas de plásticos alimentados por um funil de carga. O bocal contém aquecedores que mantêm o filamento plástico a uma temperatura um pouco acima de sua temperatura de transição vítrea, trazendo-o a um estado semi-fundido,

para que ele flua facilmente pelo bocal, que se move horizontalmente e forma a camada. Após fluir pelo bocal, o plástico semi-fundido endurece quase que imediatamente e adere à camada inferior. Assim que uma camada inteira é concluída, a plataforma desce à uma distância igual à espessura de camada atual e o processo se repete conforme a próxima camada é depositada (COSTATO, 2016).

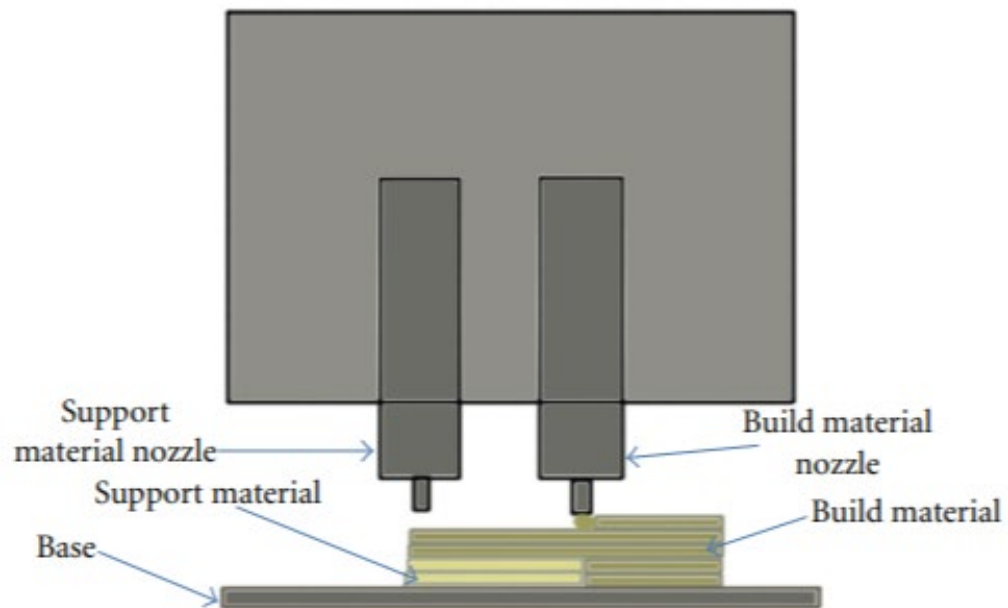
**Figura 7** – Esquemática do processo de FDM.



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2015).

Costato (2016) também ressalta a presença de mais de um bocal para a deposição de material destinado ao suporte da peça e que as camadas de suporte são usualmente feitas de materiais quimicamente solúveis, para facilitar a remoção após a conclusão da impressão: seja por banho químico (normalmente hidróxido de sódio e água em banho ultrasônico) ou através de desencaixe mecânico.

**Figura 8** – Esquemática do processo FDM com dois bocais.



Fonte: Wong e Hernandez (2012)

De acordo com Gibson, Rosen e Stucker (2015), o material mais popular para FDM é o ABSplus, que pode ser utilizado em qualquer maquinário FDM da Stratasys. Esta é uma versão melhorada da Acronitrila Butadieno Estireno (ABS), que foi desenvolvido anteriormente. Os autores também indicam que FDM funciona melhor com polímeros que são amorfos por natureza do que com os de alta cristalinidade, que são mais aptos à processos PBF. Isto se dá pois os polímeros que funcionam melhor são extrudados em forma de uma pasta viscosa, em vez de uma forma de baixa viscosidade. Em polímeros amorfos, não há ponto de fusão distinto, o material amolece de modo crescente e a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. A viscosidade em que estes polímeros podem ser extrudados sob pressão é alta o suficiente para que sua forma seja amplamente mantida após a extrusão, permitindo que solidifiquem rápida e facilmente.

## **2.2 Parâmetros de Processamento FDM**

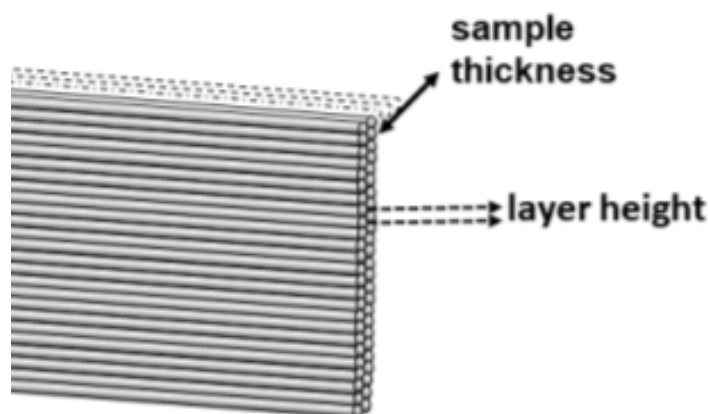
Em se tratando de FDM, existem diversos parâmetros de processamento que interferem direta ou indiretamente na estrutura e consequentemente nas propriedades da peça final. Sheoran e Kumar (2019) consideram que a simplicidade no custo incorrido do processo e a velocidade de impressão são os fatores mais benéficiais, ao mesmo tempo que Solomon et al. (2021) destacam que os parâmetros de processo

complexos que afetam diretamente a estrutura do componente são considerados fatores limitantes e não existem trabalhos suficientes disponíveis na literatura para se realizar uma análise ampla de todos os parâmetros. Solomon et al. (2021) afirmam que conseguir a otimização dos parâmetros para o processo generalizado é a maior área de preocupação de trabalho dos pesquisadores atualmente.

### 2.2.1 Espessura de camada

É um dos parâmetros mais abordados na literatura e possui grande influência no processo produtivo, em principal, na velocidade do processo e na qualidade do produto final. Trata-se da espessura, ou também chamada de altura, de cada camada medida conforme o eixo vertical (direção z) antes de extrudar uma nova camada acima da anterior, ou seja, em um único passo (COSTATO, 2016).

**Figura 9** – Abordagem visual de altura de camada.



Fonte: Micó-Vicent et al. (2019) adaptado.

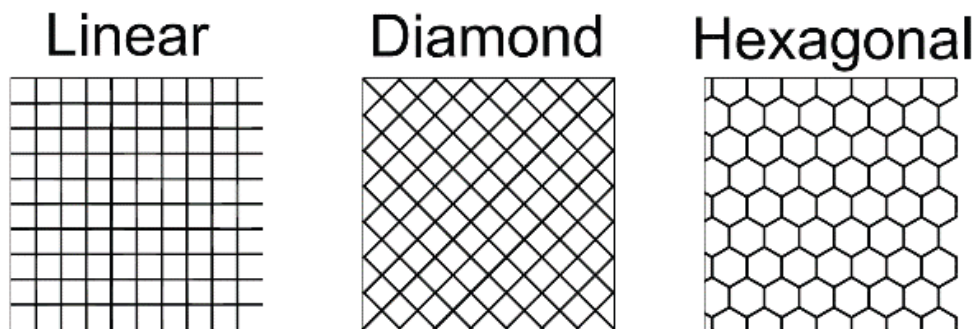
### 2.2.2 Espessura de Parede

A parede da estrutura se dá no limite do seu contorno, seu perímetro. Sampaio (2017) destaca a espessura de parede como uma das características mais importantes do objeto, configurando propriedades mecânicas de resistência à tração e compressão de acordo com o quão grossas são as paredes. A espessura de parede é caracterizada em quantidades de perímetros e de acordo com Costato (2016) não se costuma utilizar mais de três perímetros para reforçar a parede.

### 2.2.3 Padrão de Preenchimento

O padrão de preenchimento refere-se ao método empregado para imprimir a estrutura interna da peça (SOLOMON et al. 2020). Além dos padrões exemplificados na Figura 10, existem diversos padrões geométricos disponíveis para uso, como: retilíneo, triangular, concêntrico, cúbico, estrelado (SUTEJA, 2021).

**Figura 10** – Esquemática de padrões de preenchimento.



Fonte: Alafaghani et al. (2017)

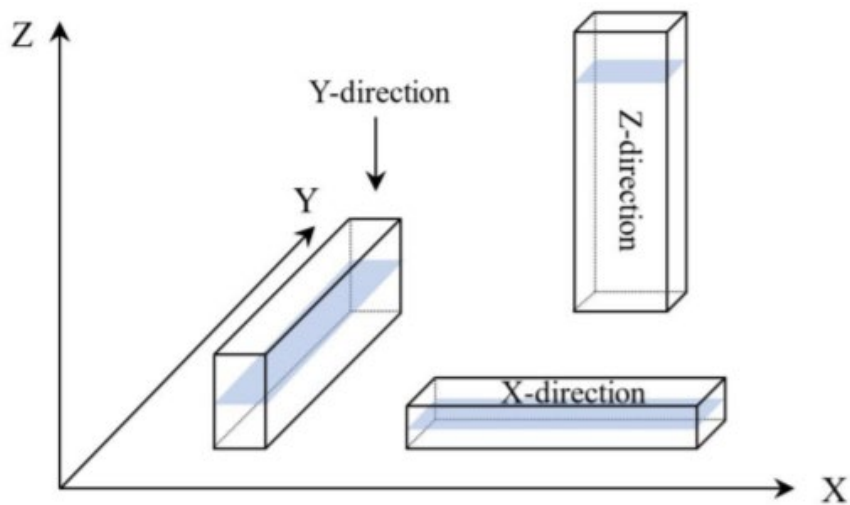
### 2.2.4 Densidade de Preenchimento

Solomon et al. (2020) definem a densidade de preenchimento como o volume de material impresso em determinado componente. Os autores também relacionam as propriedades da peça com a variação da densidade: componentes mais densos possuem melhores propriedades mecânicas, porém gastam mais tempo e mais material.

### 2.2.5 Orientação de Impressão

Descreve a posição na qual o dado componente é ajustado na cama de impressão para ser construído de acordo com os eixos do sistema tridimensional: X, Y e Z (SOLOMON et al. 2021). Segundo Sampaio (2017) a orientação de impressão tem grande impacto na isotropia da peça, e consequentemente na resistência mecânica do produto. Este parâmetro é determinante na configuração do processo, pois também determina o número de camadas e a quantidade de material de suporte a ser utilizado (VOLPATO, 2017).

**Figura 11** – Esquemática da orientação de construção.

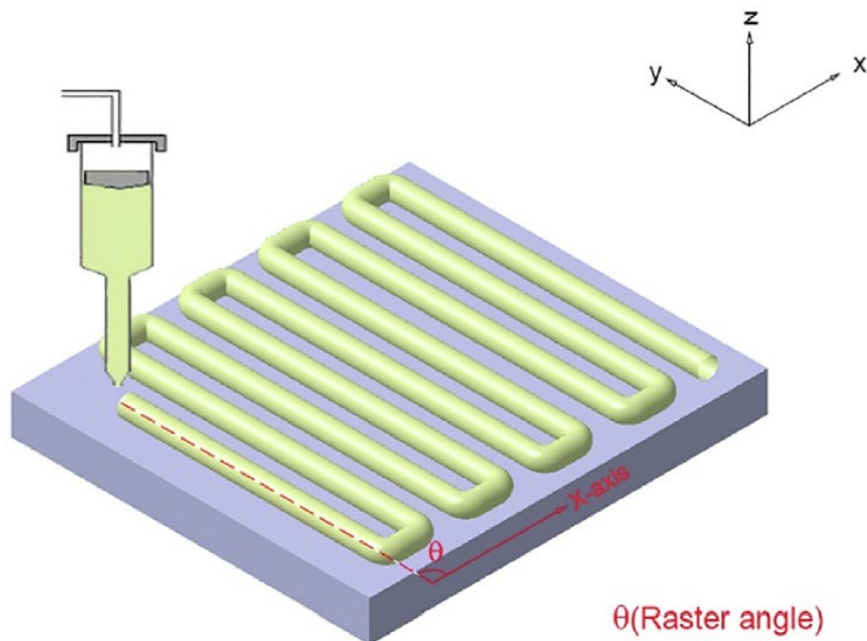


Fonte: Feng, Wang e Wei (2019).

### 2.2.6 Ângulo Raster

Também chamado de orientação raster, é o ângulo  $\theta$  entre a direção de deposição do material e a direção de carregamento ( $x$ ). Pode variar camada por camada. Diferentes orientações de ângulos raster afetam muito as propriedades mecânicas da peça, inclusive tornando-a mais isotrópica e/ou resistente (COSTATO, 2016).

**Figura 12** – Visualização do ângulo raster ( $\theta$ ).



Fonte: Wu et al. (2015).

### **2.2.7 Velocidade de Impressão**

Para Kaergis et al. (2019) a velocidade de impressão pode ser definida como a velocidade de travessia do bocal de impressão enquanto deposita o material na plataforma de impressão no plano XY. O tempo de impressão da peça é diretamente dependente da velocidade de impressão. A velocidade de impressão também possui impacto dominante na deformação do componente impresso.

Manen, Janbaz e Zadpoor (2017) afirmam que a ocorrência desta deformação se dá pela quantidade significativa de tensão residual produzida durante a deposição de material, que é resultado do processo de extrusão mais rápido. Entretanto, o efeito da velocidade de impressão é considerado insignificante ao imprimir camadas mais finas.

Costato (2016) destaca que a configuração da velocidade de impressão para estruturas de suporte pode ser de velocidades maiores, uma vez que estas estruturas serão removidas depois. O autor também aponta a necessidade de que a primeira camada da peça seja impressa a uma velocidade mais baixa, para evitar que o objeto se solte da cama de impressão.

### **2.2.8 Temperatura do Bocal**

Costato (2016) indica que temperatura do bocal deve ser configurada corretamente para permitir que o material entre em um estado semi-fundido e possa ser extrudado pelo bocal. Este é um dos principais parâmetros para garantir o derretimento adequado dos filamentos e também controlar o processo de solidificação do material (ABEYKOON et al., 2020). Solomon et al. (2021) relacionam o parâmetro ao efeito na viscosidade do material, em que se deve determinar e manter temperatura ótima para aumentar ou diminuir a fluidez da extrusão.

### **2.2.9 Diâmetro do Bocal**

O diâmetro do bocal possui papel importante na resolução da peça pois quanto menor o bocal, mais refinada será a impressão. Porém demorará mais tempo para ser concluída (COSTATO, 2016). A relação entre tempo de impressão e diâmetro do bocal é evidente, porém Solomon et al. (2021) sugere que sejam feitos mais estudos para estudar este comportamento e a influência de todos os fatores de processo, a fim de se obter um valor ótimo de diâmetro.



### **2.2.10 Temperatura da Cama de Impressão**

Durante a impressão o esfriamento do material se dá muito depressa, o que pode resultar em deformações. O controle da temperatura da cama de impressão cria uma superfície de resfriamento mais lento e uniforme, garantindo a integridade da peça (FERNANDES, 2016). A temperatura da cama, assim com a temperatura de bocal, tem alta dependência no material e suas propriedades térmicas.

### **2.2.11 Amplitude de Extrusão**

Também chamada de amplitude raster, ou de amplitude de estrada, denota a largura da gota de material a ser depositado pelo bocal de extrusão, e consequentemente a largura do caminho a ser feito pelo material na cama de impressão (COSTATO, 2016). Evidentemente, a amplitude de extrusão possui grande influência do diâmetro de bocal (SOLOMON et al. 2021).

### **2.2.12 Taxa de Fluxo**

A taxa de fluxo, explicitada por Costato (2016), refere-se ao volume de material extrudado pelo bocal por unidade de tempo, normalmente segundos, e pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$f = tws \quad (1)$$

Onde:

- $f$  é a taxa de fluxo.
- $t$  é a espessura de camada.
- $w$  é a amplitude de extrusão.
- $s$  é a velocidade de impressão.

### **2.2.13 Espaçamento de Ar**

Solomon et al. (2021) definem como o intervalo físico entre duas gotas de material depositado, gerando um valor de espaçamento de ar que pode ser positivo, negativo ou nulo. Para Costato (2016), é a distância, na direção vertical (Z) entre o material depositado e a estrutura de suporte. Em ambos os casos, um menor espaçamento resulta em uma peça mais robusta e resistente, ao custo de mais material e tempo de impressão.

## **2.3 Polímeros**

Polímeros são uma classe de materiais caracterizada por sua versatilidade. Atualmente, utiliza-se materiais poliméricos em diversos setores industriais, com destaque a embalagens, revestimentos e vestuário. Como já mencionado, anteriormente, o mercado de polímeros tem previsão de crescimento na taxa de produção de 46.6% desde 2015 até 2025 (PLASTIC EUROPE, 2015). Trata-se de um material de boa resistência mecânica, fácil processamento, resistente à corrosão e em geral, baixo custo. A aplicabilidade de polímeros atualmente ganha mais incentivo na área de polímeros sustentáveis e biodegradáveis. Seu grande potencial de reciclagem e a decomposição natural, chamam a atenção neste momento de grande preocupação com a sustentabilidade global. A baixa temperatura de processamento, que torna a técnica de FDM como sendo uma das mais versáteis, faz com que os polímeros sejam os materiais de escolha para a manufatura aditiva de baixo custo, inclusive de uso pessoal.

### **2.3.1 Propriedades Relevantes**

A estrutura polimérica conta com a repetição de várias unidades (monômeros), configurando uma macromolécula. Podem ser tanto naturais quanto sintéticos e possuem diversas formas de classificação, de acordo com sua estrutura química, métodos de preparação, características tecnológicas ou comportamento mecânico (PEREIRA, 2009). Para o processo de FDM, as características tecnológicas servem como principal ponto de seleção de materiais e podem ser divididos em duas categorias: termorrígidos e termoplásticos. A técnica FDM exige a utilização de polímeros termoplásticos uma vez que o material é aplicado no estado fundido como ocorre no processamento via extrusão, injeção ou outro similar. Os polímeros termorrígidos não são aplicados na técnica FDM, visto que uma vez reticulados não podem mais ser reprocessados no estado fundido.

Os polímeros são materiais que podem se apresentar como materiais amorfos e cristalinos, sendo que no segundo caso em geral são materiais semicristalinos, uma vez que o processo de cristalização a partir do fundido leva à formação de um material com uma fase amorfa que apresenta uma temperatura de transição vítrea e uma fase cristalina caracterizada por uma temperatura de fusão cristalina.

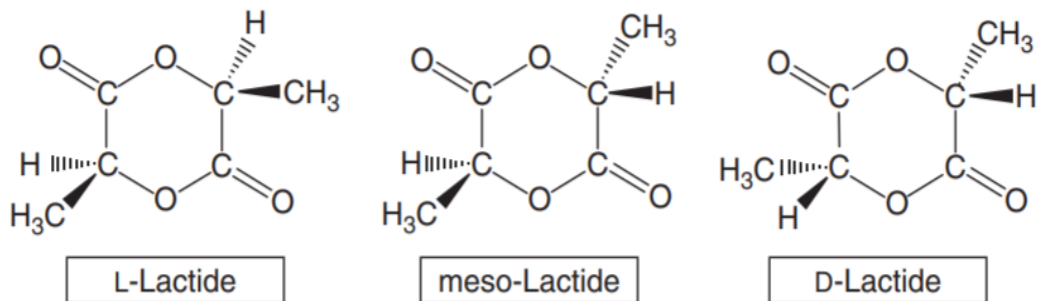
Solomon et al. (2021) ao estudar os efeitos da temperatura do bocal no processamento do material menciona o impacto deste parâmetro na viscosidade. Isso se dá pois os polímeros possuem características únicas na transição do estado sólido para líquido. Plásticos, dependendo de sua cristalinidade, não realizam esta transição de modo imediato em uma temperatura específica, e sim através de uma faixa de temperatura onde o material encontra-se em um estado semi-fundido. Logo, a temperatura onde o maquinário de FDM deve operar se encontra na faixa entre a Temperatura de Transição Vítrea ( $T_g$ ) e a Temperatura de Fusão cristalina ( $T_m$ ). A viscosidade, que pode ser entendida como a resistência ao fluxo, diminui acompanhando o aumento na temperatura neste intervalo. Prabhu e Devaraju (2020) identificam a viscosidade como propriedade essencial para técnicas de manufatura aditiva, e que o estudo do peso molecular e distribuição do peso molecular dos polímeros disponíveis é altamente considerável. Gibson, Rosen e Stucker (2015) destacam que no processo de FDM há preferência por polímeros amorfo, propriamente pois a viscosidade em que estes polímeros podem ser extrudados sob pressão é alta o bastante para que sua forma se mantenha após a extrusão, permitindo que a solidificação rápida e eficiente.

### **2.3.2 Polilactídeo (PLA)**

O Polilactídeo ou Polilactato, é um polímero biodegradável e tem sido alvo de intensa pesquisa e utilização na manufatura aditiva devido à esta propriedade. Seus filamentos estão disponíveis em grande variedade de cores. O PLA não é durável nem flexível como o ABS, porém há a possibilidade de reforço com fibra de carbono, de madeira e até pó metálico (COSTATO, 2016). A temperatura ótima de impressão para o filamento de PLA é de 215 °C (ABEYKOON et al., 2020).

O PLA é formado pela ligação entre monômeros de ácido láctico, que possuem duas configurações óticas ativas: Isômeros L- e D-, isto é, Levógiro e Dextrógiro. As diferentes estereoformas do lactídeo são resultado da combinação de duas moléculas L- e D-, resultando em LL-lactídeo, DD-lactídeo ou mesolactídeo (LD-lactídeo). As configurações óticas destas estereoformas garante níveis diferentes de cristalinidade e conseqüentemente, diferentes propriedades de processamento (AVÉROUS, 2008).

**Figura 13** – Estruturas químicas do L-, meso- e D-lactídeos.



Fonte: Áverous (2008).

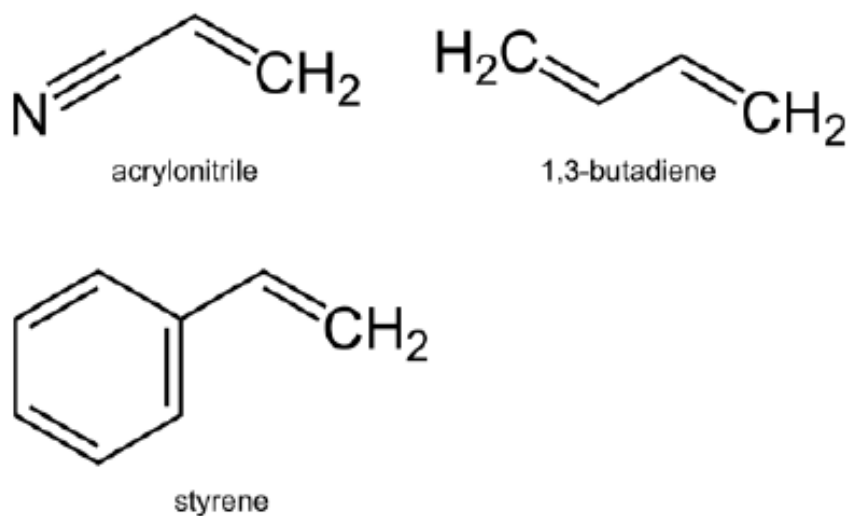
Saeidlou et al (2012) afirmam que o ponto de vista de cristalização, o PLA é melhor visto como um copolímero do ácido láctico L- e D- com PLLA e PDLA e Áverous (2008) define a cristalinidade do PLA entre 0% e 40% de acordo com a presença dos isômeros L- e D-, em que resinas contendo entre 50-93 por cento de ácido láctico L- são completamente amorfas. A capacidade de produzir estruturas completamente amorfas é extremamente benéfica para o processamento via FDM.

### 2.3.3 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

A Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um termoplástico derivado do petróleo formado pelos monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Este material já era utilizado na indústria por ter boas propriedades mecânicas, abrangendo diversos setores industriais (ALBURQUERQUE, 2014).

É o plástico mais popular na impressão 3D, e é amplamente utilizado em impressoras FDM de entrada em forma de filamento. Possui uma vasta variedade de cores e pode ser comprado em forma de filamento por diversas fontes, justificando sua popularidade (COSTATO, 2016). De acordo com Salinas (2014, apud ALBUQUERQUE, 2014), os filamentos de ABS são resistentes e flexíveis, apropriados para a produção de componentes mecânicos e o pós-processamento do ABS pode ser feito facilmente por lixamento e pintura. Entretanto durante o aquecimento, o material desencadeia monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, que possuem cheiro desagradável e são nocivos à saúde. O autor também ressalta que o ABS possui mais facilidade para empenamento, portanto é recomendável a utilização de cama de impressão aquecida.

**Figura 14** – Monômeros constituintes do ABS



Fonte: Alburquerque (2014)

Conforme Lefteri (2015, p.98, apud AMBRÓS, 2019) “O ABS é reciclável, mas, como é derivado do petróleo, não é uma opção sustentável, embora pesquisas em andamento estejam procurando criar um ABS “verde” usando a borracha natural como ingrediente [...]”.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste trabalho se apresenta a metodologia científica de revisão narrativa. Caracteriza-se pela busca e análise crítica da literatura descartando-se a necessidade de critérios explícitos e sistemáticos. Não há exigência de esgotamento de fontes de informações, nem de estratégias de busca sofisticadas.

As buscas por artigos foram realizadas através de plataformas acadêmicas como: Web of Science, Science Direct, SciELO, MDPI, Research Gate e também Google Scholar.

Os termos empregados nas pesquisas foram utilizados em diversas combinações das seguintes palavras-chave: “*3D Printing*”, “*Additive Manufacturing*”, “*PLA*”, “*ABS*”, “*FDM*” “*Fused Deposition Modeling*”, “*Review*”, “*State of Art*”, “*Processing Parameters*”, “*Mechanical Behavior*”, “*Rheology*”, “*Biodegradability*” e “*Properties*”.

Vale ressaltar que os termos equivalentes em português brasileiro também foram utilizados na pesquisa em suas diversas combinações, a fim de abranger maior quantidade de resultados e enriquecer a revisão narrativa em questão.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Generalização de Resultados na Literatura**

O estudo de grande relevância de Popescu et al (2018) inicia um debate interessante sobre a dificuldade em padronizar os parâmetros de processo em impressão 3D. Os autores reforçam a incerteza da obtenção de resultados otimizados ao transferir estes parâmetros, máquina/polímero/aplicação, para outra impressora. Deve-se atentar ao utilizar os resultados de pesquisa cuidadosamente, uma vez que há grande variedade de maquinário, materiais e produtores de materiais e não há padronização no método de teste. Solomon et al. (2020) trazem outro ponto em relação ao estudo de parâmetros de otimização: a existência de muitos fatores desconhecidos que ainda precisam ser explorados e que podem desempenhar papéis importantes na qualidade do produto e eficácia do processo. Os autores recomendam o aprofundamento no estudo de fatores baseados no ambiente, como: umidade, temperatura e fatores sonoros, visto que esta área não é amparada o suficiente na literatura.

### **4.2 Precisão Dimensional**

Na literatura, percebe-se a dependência das configurações de processamento em relação ao material escolhido e precisão dimensional, embora esta relação já se manifeste em outros processos produtivos. Zharylkassyn et al. (2021) evidenciam a existência de valores ideais de espessura e temperatura de extrusão diferentes, em que a precisão dimensional das peças impressas com espessura de camada entre 0,1 mm e 0,2mm é melhor para o PLA e o ABS, enquanto outros polímeros como o ASA e o Nylon possuem melhor performance com camadas de 0,3 mm. A orientação ideal de impressão ideal também difere dependendo do material. A maioria das publicações concluíram que uma orientação de 0° é ideal para maximizar a precisão dimensional de peças ABS, enquanto para PLA e ASA este valor é 90°.

Também se estabelece uma relação entre a temperatura de extrusão e a precisão dimensional: em temperaturas mais altas, há mais desvios dimensionais, até uma temperatura limite onde o desvio torna-se insignificante (ZHARYLKASSYN et al., 2021). Maiores temperaturas aumentam a fluidez do plástico, causando gotejamento e deposição adicional de material, justificando os erros de impressão. (SYRLYBAYEV et al., 2021).

Ainda se tratando de precisão dimensional, Alafaghani et al. (2017) concluíram que a precisão dimensional é mais afetada pela temperatura de extrusão, espessura de camada e orientação de impressão do que pelo padrão de preenchimento, densidade de preenchimento e velocidade de impressão.

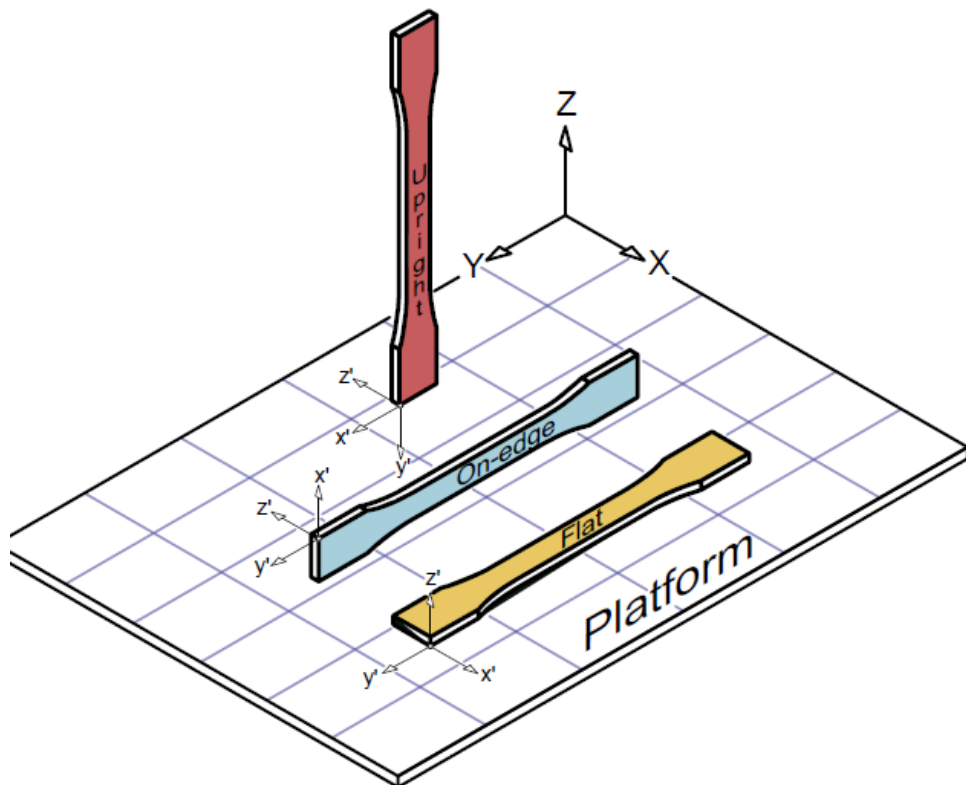
### **4.3 Propriedades Mecânicas**

De acordo com Popescu et al. (2018) otimizar as propriedades mecânicas é um procedimento complexo e não deve ser realizado focando apenas em estabelecer as configurações dos parâmetros de processo: deve-se considerar a complexidade da combinação polímero/imprensa/condições de manufatura.

A perda na performance mecânica em peças impressas em comparação com peças moldadas por compressão é cerca de 20-30%. O uso de reforço de fibra é recomendado para balancear o declínio nas propriedades (CARNEIRO et al., 2015).

As propriedades mecânicas das peças também são extremamente influenciadas pela orientação de construção, temperatura de extrusão e espessura de camada. Alafaghani et al. afirmam que para atingir melhores propriedades mecânicas gerais, deve-se utilizar maiores temperaturas de extrusão e maiores espessuras de camada, além de configurar uma orientação de construção que favoreça e alinhe a deposição das camadas e a direção de carga no mesmo plano. Para Chacón et al. (2017) deve-se selecionar a orientação de impressão “on-edge” (Figura 16) visando melhor performance mecânica em termos de resistência, rigidez e ductilidade. Se há interesse em comportamento dúctil, com otimização do tempo de impressão, os autores recomendam baixa taxa de fluxo em orientações “on-edge” e verticais. Para menor tempo de impressão, verificou-se que alta espessura de camada e alta taxa de alimentação otimizam este processo, embora ao custo da performance mecânica da peça.

**Figura 15** – Orientações de impressão por Chacón et al (2017).



Fonte: Chacón et al. (2017)

Dentre as propriedades mecânicas, a mais avaliada na literatura é a resistência à tração. Popescu et al. (2018) indicam que a resistência à tração é aumentada para menores valores de espessura de camada e amplitude de extrusão, além de melhorar as propriedades mecânicas em geral ao configurar um espaçamento de ar negativo.

O ângulo raster também influencia significativamente as propriedades mecânicas, especialmente a tensão de escoamento. Os valores mais altos de rigidez e tensão foram encontrados em amostras de  $0^\circ$ , isto é, quando a direção da extrusão do filamento é alinhada com a direção do carregamento (COSTATO, 2016).

A densidade de preenchimento possui um efeito dramático e linear nas propriedades mecânicas (CARNEIRO et al, 2015). Abeykoon et al. (2020) atestam que peças impressas com 100% de densidade de preenchimento providenciaram o maior módulo de Young dentre as amostras testadas. E confirmando a relação, a resistência das peças diminui conforme a densidade de preenchimento diminui. Rebenaque e González-Requena (2020) em seus ensaios verificaram que a resistência à flexão também aumenta quanto maior a densidade de enchimento.



Entretanto, quando maior a densidade de enchimento, maior o tempo de impressão, representando uma penalização em troca do ganho de resistência.

Quanto ao padrão de preenchimento, em sua investigação, Abeykoon et al. (2020) validaram o padrão de preenchimento linear como o mais resistente, resultando em mais módulo de tensão dentre os sete padrões estudados por eles. Isto se dá devido aos menores espaçamentos entre as camadas, que resultaram em menor porosidade da peça.

A respeito das propriedades referentes à taxa de alimentação, Abeykoon et al. (2020) encontraram otimização mecânica em tração e flexão na taxa de preenchimento de 90 mm/s. Nesta taxa foi observado melhor arranjo das camadas e menor porosidade.

O uso de fibras para reforço também é efetivo em impressão 3D (CARNEIRO et al., 2015). Abeykoon et al (2020) destacou o CRF-PLA (Carbon Reinforced Fiber – PLA) como o material mais forte, em termos de tensão, flexão e compressão, entre suas amostras: PLA, ABS, CFR-PLA, CFR-ABS-CFR e CNT-PLA. Os autores ainda recomendam mais estudos na área para explorar mais dos efeitos individuais do tipo, tamanho e forma dos reforços com os tipos de materiais.

Pouco foi encontrado sobre os efeitos da temperatura da cama de impressão, além de seu efeito contra o empenamento. A única relação encontrada foi que conforme a temperatura parcial da cama aumenta, a resistência à tração e à flexão também aumenta (KHATWANI; SRIVASTAVA, 2018).

Molina-osejos et al. (2019) relacionam a resistência do PLA de acordo com a massa, enquanto a resistência do ABS depende mais do tipo do padrão de preenchimento. Os autores também otimizam o custo de processo, em 28.3% para o PLA e 7.1% para o ABS, ao utilizarem padrões de preenchimento circulares. Porém, a resistência mecânica destas peças é inferior à de padrão diagonal, por exemplo.

#### **4.4 Seleção de Materiais Sustentáveis e Reciclagem**

Daya (2017) afirma que os materiais são selecionados com base em custo, performance e estética, mas raramente com base no impacto social ou ambiental. Além disso, pouca inovação ocorre durante o processo de seleção de materiais, materiais que são conhecidos anteriormente por funcionar e cumprir conformidades regulatórias são muitas vezes utilizados repetidamente para a menos que uma

mudança precise ocorrer. A sugestão de melhoria para este problema é integrar dados de sustentabilidade aos critérios de seleção de materiais, de forma visível e que preserve o workflow do usuário.

Dados importantes de sustentabilidade já estão sendo avaliados, como os efeitos da reciclagem na estrutura e propriedades mecânicas do PLA (HONG et al., 2020). A cristalinidade do material reciclável é relativamente menor, e, portanto, sua resistência à fratura também cai. Conforme o número de ciclos de reciclagem aumenta, há queda na resistência mecânica do PLA, há recomendação do valor limite de 3 ciclos de reciclagem (HONG et al., 2020).

#### **4.5 Estabilidade Térmica**

Matos et al. (2018) conferiram que após a extrusão os filamentos de PLA adquiriram um aspecto mais suave e homogêneo. Os autores também verificam que a estabilidade térmica tem como função a cor dos filamentos.

Para Coppola et al. (2018) a utilização de nanoargilas aumentaram a estabilidade térmica do PLA e para Weng et al. (2016) a estabilidade térmica do ABS também melhorou ao introduzir OMMT (Argila Montmorilonita). O compósito de ABS com OMMT também aumentou as propriedades mecânicas

#### **4.6 Adesão de Camada**

A adesão entre as camadas depositadas deve ser suficiente para que não ocorram deslizamentos nem porosidade. Ao investigar a adesão entre as camadas (na direção Z de construção), os componentes fabricados em PLA natural A apresentaram melhor qualidade de união do que os construídos com PLA amarelo, verificando a influência da pigmentação na qualidade do produto final (SANTANA, 2015). A adesão da primeira camada à cama de impressão é considerada de fundamental importância pois a primeira camada é a base de deposição. Esta necessidade incentiva uma relação de compatibilidade entre o material a ser fundido e o material da cama de impressão. A adesão também não pode ser muito intensa, pois, após concluída, a peça precisa se desprender da impressora sem ser danificada.

## **4.7 Característica do Polímero Empregado**

O processo de deposição via FDM deposita um filamento de polímero no estado fundido e, portanto, é muito afetado pelas propriedades reológicas do material como a resposta elástica do fundido. Ou seja, o balanço entre o comportamento viscoso e elástico do material, sua capacidade de relaxação são fatores que pode afetar efeitos como fratura do fundido e retração após deposição. Essas características estão intimamente relacionadas com a natureza química do material, como por exemplo: a viscosidade, cristalinidade, velocidade de cristalização e massa molar.

Na literatura foi relacionada principalmente a viscosidade ao processo de FDM. Uma alta viscosidade está diretamente ligada à dificuldade de extrusão enquanto que um material de baixa viscosidade permite maior deposição de material aumentando a chance de erros dimensionais da peça.

Visando a potencialização da viscosidade do material, as propriedades químicas do material que influenciam neste parâmetro devem ser investigadas e otimizadas, como a massa molar por exemplo. Um aumento na massa molar, para a maioria dos polímeros, resulta em maior viscosidade.

A cristalinidade do material após o processamento também é de grande importância para a qualidade da peça. A quantidade e tamanho dos esferulitos garantem diferentes propriedades mecânicas e, portanto, a taxa de cristalização de cada polímero influencia na escolha da temperatura da cama de impressão, que possui impacto direto na taxa de resfriamento. O resfriamento do material deve ser rápido o suficiente para que o fundido mantenha sua forma até solidificar, mas não pode ser rápido o bastante a ponto de causar empenamentos e retrações.

## **5. CONCLUSÃO**

### **5.1 Perspectiva Integral**

Diversos artigos sobre a otimização do processamento do PLA via FDM foram analisados neste trabalho. No que tange o processo de FDM, vemos que a quantidade parâmetros de processo é muito vasta e cada variação e/ou combinação de parâmetros para otimização resulta em peças com resultados distintos. Algumas conclusões nos artigos investigados convergiram para a mesma relação entre parâmetro e resultado, principalmente em parâmetros de processamento mais

investigados, como espessura de camada, taxa de preenchimento e orientação de construção. A literatura em sua maioria, ao buscar a otimização de parâmetros, seleciona apenas um número reduzido, a fim de explorar cada gradação entre os arranjos. Isto reflete em um processo investigativo mais lento, mas eficaz e minucioso.

A parte experimental, ainda, sofre com a falta de padronização dos ensaios. Não existem normas ou técnicas especificamente desenvolvidas para padronizar quais os parâmetros, materiais e métodos para teste e experimentos via FDM. Isto deixa em aberto os critérios de avaliação e verificação, dificultando a análise completa do processo FDM e suas particularidades. Acredito que enquanto não se estipular o padrão da metodologia, a otimização do processo nunca será realmente fundamentada.

Quanto aos materiais utilizados, não há dúvida que o PLA se destaca competitivamente entre os mais utilizados devido à sua biodegradabilidade. Ser a alternativa “verde” do FDM confere ao material mais motivação para ser aperfeiçoado e, embora seu desempenho mecânico e resistência ao desgaste sejam inferiores ao ABS no momento, o reforço com nanotubos e fibras de carbono em desenvolvimento trazem maior equivalência mecânica e perspectiva de consolidação no mercado.

Com relação aos parâmetros moleculares dos polímeros, como massa molar e cristalinidade, podemos concluir que o interesse maior para FDM neste momento é otimizar a viscosidade do material. A cristalinidade final da peça, embora afete as propriedades mecânicas do produto, não é tão comumente abordada na literatura como um grande objetivo para peças FDM. Evidentemente, estas propriedades são relevantes para a seleção dos parâmetros processo, mas não são vistas como principal necessidade. Embora haja efeito final na otimização da nucleação polimérica, acredito que a academia visa estabelecer uma relação direta entre parâmetros de processo e características funcionais da peça neste período de consolidação, para mais a frente analisar as variáveis moleculares.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Mais estudos avaliando a utilização de reforços de fibras e nanopartículas na produção de materiais são sugeridos. A literatura já validou a possibilidade destes materiais no processo FDM, porém uma análise geral se faz necessária investigando variações de composições e viabilidade de custo.

Na área de parâmetros de processo novas pesquisas devem ser realizadas com os parâmetros menos populares e impactantes. Embora, sejam menos significativos durante o processamento, é indispensável analisar as interações destes parâmetros na estrutura e propriedades das peças, por menor que seja sua variação.

## 6. REFERÊNCIAS

ABEYKOON, Chamil *et al.* Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, [S. l.], p. 284-297, 30 mar. 2020.

ALAFAGHANI, Ala'aldin *et al.* Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a Design-for-Manufacturing Approach. **Procedia Manufacturing**, [S. l.], p. 791-803, 10 out. 2017.

ALBURQUERQUE, Alberto Juan. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas**. 2014. 138 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería En Tecnologías Industriales, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2014.

AMBRÓS, Guilherme Silva. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA IMPRESSOS EM PLA UTILIZANDO MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2019.

ASHBY, Mike; JOHNSON, Kara. **Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design**. Third Edition. ed. [S. l.: s. n.], 2014. 391 p.

ÁVEROUS, L. Chapter 21 - Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications, **Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources**, p. 433-450, 2008.

CARNEIRO, O.S. *et al.* Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials and Design**, [S. l.], p. 768-776, 7 abr. 2015.

CHACÓN, J.M. *et al.* Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials and Design**, [S. l.], p. 143-157, 28 mar. 2017.

CHAUDHARI, Madhuri *et al.* Comparative Study of Part Characteristics Built Using Additive Manufacturing (FDM). **Procedia Manufacturing**, [S. l.], p. 73-78, 11 jan. 2018.

COPPOLA, Bartolomeo *et al.* 3D Printing of PLA/clay Nanocomposites: Influence of Printing Temperature on Printed Samples Properties. **Materials**, [s. l.], 11 out. 2018.

COSTATO, Luca. **Mechanical characterization of 3D printed thermoplastic material: from experimental investigation to design**. 2015. Dissertation (Master degree in Bioengineering) - Università degli Studi di Pavia Facoltà di Ingegneria Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, [S. l.], 2016.

DAYA, Tala. **Facilitating Sustainable Material Decisions: A Casa Study of 3D Printing Materials**. 2017. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering - Mechanical Engineering (Doctor of Philosophy in Engineering - Mechanical Engineering) - University of California, Berkeley, [S. l.], 2017.

DOROZHUKIN, K V *et al.* ABS and PLA sub-terahertz absorbers for 3D-printing technology. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], 11 jun. 2020.

FENG, Li; WANG, Yan; WEI, Qinya. PA12 Powder Recycled from SLS for FDM. **Polymers**, [s. l.], 22 abr. 2019.

FERNANDES, MIRANDA. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3d nas propriedades mecânicas do PLA**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. Second Edition. ed. [S. l.: s. n.], 2015.

GORDON, Rachel. **3D Printing Materials Markets: 2014-2025 - Trends, Key Players and Forecasts**. [S. l.: s. n.], 2015. Slideshow.

GÜMPERLEIN I, Fischer E, Dietrich-Gümperlein G, Karrasch S, Nowak D, Jörres RA, Schierl R. **Acute health effects of desktop 3D printing (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers**. *Indoor Air*. 2018 Jul;28(4):611-623. doi: 10.1111/ina.12458. Epub 2018 Mar 25. PMID: 29500848.

HONG, J.-H. *et al.* Repetitive recycling of 3D printing PLA filament as renewable resources on mechanical and thermal loads. **International Journal of Modern Physics B**, [S. l.], p. 1-5, 19 ago. 2020.

KAERGIS, Lucas *et al.* Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], 12 set. 2019.

KHATWANI, Jagdish; SRIVASTAVA, Vineet. Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Solidified PLA Parts Fabricated by 3D Printing Process. **Springer Nature Singapore Pte Ltd.**, [s. l.], 5 jun. 2018.

KUMAR, Ranvijay; SINGH, Rupinder; FARINA, Ilenia. On the 3Dprinting of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications. **PSU Research Review**, [S. l.], p. 115-137, 23 jul. 2018.

MANEN, Teunis van; JANBAZ, Shahram; ZADPOOR, Amir A. Programming the shape-shifting of flat soft matter. **Materials Today**, [s. l.], v. 21, ed. 2, 21 out. 2017.

MATOS, Bruna *et al.* Evaluation of commercially available polylactic acid (PLA) filaments for 3D printing applications. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], 15 jun. 2018.

MICÓ-VICENT, Bárbara *et al.* Maximization of FDM-3D-Objects Gonio-Appearance Effects Using PLA and ABS Filaments and Combining Several Printing Parameters: "A Case Study". **Materials**, [s. l.], 1 maio 2019.

MOLINA-OSEJOS, Jaime Vinicio *et al.* Mechanical capabilities of semi-rigid thermoplastics ABS and PLA from 3D printing. **International Journal of Materials and Product Technology**, [S. l.], p. 253-269, 8 out. 2019.

PEREIRA, Francisco Sávio Gomes. **Polímeros: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. [S. l.: s. n.], 2009.

PLASTICS EUROPE. An analysis of European plastics production demand and waste data. (Plastics Europe 2015; 21.)

PLASTICS EUROPE. Compelling facts about plastics. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008. (Plastics Europe 2009; 29.)

POPESCU, Diana *et al.* FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. **Polymer Testing**, [S. l.], p. 157-166, 17 maio 2018.

PRABHU, R.; DEVARAJU, A. Recent review of tribology, rheology of biodegradable and FDM compatible polymers. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 781-788, 22 out. 2020.



REBENAQUE, A. González; GONZÁLEZ-REQUENA, I. Study of bending test of specimens obtained though FDM process of additive manufacturing. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], p. 859-866, 9 mar. 2020.

RELVAS, CARLOS. **O mundo da impressão 3D e do fabrico digital**. 1. ed. Porto: Publin-dústria, Produção de Comunicação, Lda, 2018.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 12, nº 3, jul-set/2017, p. 1-34.

SAEIDLOU, Sajjad *et al.* Poly(lactic acid) crystallization. **Progress in Polymer Science**, [S. l.], p. 1657-1677, 10 fev. 2012.

SAMPAIO, Cláudio. **Guia maker de impressão 3D: teoria e prática consolidadas**. 03 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.makerlinux.com.br/ebook>>. Acesso em: 28 out. 2021.

SANTANA, Leonardo. **AValiação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015. Dissertação para obtenção do título de "Mestre" (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - UFSC, [S. l.], 2015.

SAYRE III, Robert. **A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer**. 2014. Requirements for the degree of MASTERS OF ENGINEERING (Major Subject: Mechanical Engineering) - Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut, [S. l.], 2014.

SHEORAN, Ankita J. KUMAR, Harish. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 23 dez. 2019.

SILVA, Pedro C. *et al.* Manufatura Aditiva: Revisão Sistemática da Literatura. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], p. 84502-84515, 3 nov. 2020.

SOLOMON, I. John. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 509-514, 13 jun. 2020.

SUTEJA, Jaya. Effect of Infill Pattern, Infill Density, and Infill Angle on the Printing Time and Filament Length of 3D Printing. **Rekayasa Mesin**, [s. l.], 12 jan. 2021.

SYRLYBAYEV, Daniyar *et al.* Fused deposition modelling: Effect of extrusion temperature on the accuracy of print. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 832-837, 9 fev. 2021.

VOLPATO, NERI. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2017.

WENG, Zixiang *et al.* Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. **Materials and Design**, [S. l.], p. 276-283, 16 abr. 2016.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 2012, 17 jun. 2012.

WU, Wenzheng *et al.* Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. **Materials**, [s. l.], 1 set. 2015.

YAO, Tianyun *et al.* A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. **Composites Part B**, [S. l.], p. 393-402, 3 jan. 2019.

YAO, Tianyun *et al.* Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. **Composites Part B**, [s. l.], 19 fev. 2020.

ZHANG, Peng *et al.* Friction and wear characteristics of polylactic acid (PLA) for 3D printing under reciprocating sliding condition. **Emerald Publishing Limited**, [S. l.], p. 533-539, 22 jun. 2019.

ZHARYLKASSYN, Beibit *et al.* Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 1307-1311, 15 jan. 2021.