

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Michael de Freitas Dutra

**ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS EM PRODUTOS  
OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO FDM:  
uma revisão sistemática**

Betim

2021

MICHAEL DE FREITAS DUTRA

ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS EM PRODUTOS  
OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO FDM:  
uma revisão sistemática

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso Bacharelado em  
Engenharia Mecânica do Instituto Federal  
de Minas Gerais - *Campus* Betim, requisito  
parcial para obtenção do grau de bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

Betim

2021

---

D978a

Dutra, Michael de Freitas.

Análise dos resultados de ensaios mecânicos em produtos obtidos por manufatura aditiva utilizando FDM: uma revisão sistemática. [manuscrito] / Michael de Freitas Dutra.. – Betim: Instituto Federal de Minas Gerais, 2021.

63 f.; il., color.

Orientador: Prof. André Fonseca Félix

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica.

1. Manufatura aditiva. 2. Processos de fabricação – Propriedades mecânicas. I. Félix, André Fonseca. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim. III. Título

CDU 658.62

---

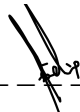
**Catálogo: Luciana Batista Neves - CRB-6/2000**

MICHAEL DE FREITAS DUTRA

**ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS EM PRODUTOS  
OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO FDM:  
uma revisão sistemática**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Betim, requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

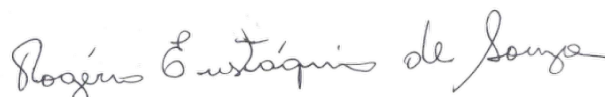
Aprovado em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_ pela banca examinadora:



Prof. Dr. André Fonseca Félix



Prof.ª Me. Nayara Aparecida Neres da Silva



Prof. Me. Rogério Eustáquio de Souza

## RESUMO

O processo de fabricação Manufatura Aditiva está em notável desenvolvimento tecnológico e econômico, enquanto o mercado exige cada vez mais produtos inovadores, em curto espaço de tempo e projetos flexíveis. A aplicação da tecnologia de Manufatura Aditiva mais utilizada, FDM – Modelagem por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*), em produtos finais não é totalmente consolidada, e uma das causas são suas propriedades mecânicas diferentes de outros processos de fabricação. Este estudo orienta-se, por meio de uma revisão sistemática direcionada a pesquisas que realizaram ensaios mecânicos em produtos obtidos através da FDM, a explorar o comportamento mecânico de produtos obtidos por essa tecnologia. Foram verificados a influência dos parâmetros de impressão, as normas utilizadas bem como o comparativo de comportamento com outros processos de fabricação. O forte caráter anisotrópico dos produtos obtidos por FDM é o principal fator da sua característica mecânica diferente. Foi constatado que a otimização de parâmetros de impressão pode resultar em produtos com características mecânicas similares a de outros processos de fabricação.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. FDM. Propriedades mecânicas

## **ABSTRACT**

The Additive Manufacturing process is undergoing remarkable technological and economic development, while the market demands more innovative products, in short time and flexible projects. The application of the most used Additive Manufacturing technology, FDM – Fused Deposition Modeling, in final products is not fully consolidated, and one of the causes is its different mechanical properties from other manufacturing processes. This study is oriented, through a systematic review directed to researches that performed mechanical tests on products obtained through FDM, to explore the mechanical behavior of products obtained by this technology. The influence of printing parameters, the standards used as well as the comparison of behavior with other manufacturing processes were verified. The strong anisotropic character of the products obtained by FDM is the main factor of its different mechanical characteristic. It was found that the optimization of printing parameters can result in products with mechanical characteristics similar to other manufacturing processes.

Keywords: Additive manufacturing. FDM. Mechanical properties.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Injetora plástica e os seus principais componentes .....	18
Figura 2 – Princípios de funcionamento do processo FDM .....	19
Figura 3 – Características do ensaio Charpy e Izod .....	25
Figura 4 – Condução das buscas de artigos e resultados .....	29
Figura 5 – Orientações de impressão utilizadas por Gao, Yu e Li (2020) .....	34
Figura 6 – Orientações de impressão utilizados por Huynh et al. (2020) .....	35
Figura 7 – Seções da amostra com diferentes espessuras de camadas .....	37
Figura 8 – Orientações de impressão utilizadas por Huynh et al. (2020) .....	41
Figura 9 – Orientações de impressão utilizadas por Song et al. (2017) .....	42
Figura 10 – Orientações de impressão utilizadas por Huynh et al. (2020) .....	45
Figura 11 – Orientações de impressão utilizadas por Balderrama-Armendariz et al. (2018) .....	52
Figura 12 – Orientações de camadas utilizadas por Balderrama-Armendariz et al. (2018) .....	52
Figura 13 – Morfologia da microestrutura de amostras obtidas por diferentes parâmetros de aquecimento auxiliar .....	54
Figura 14 – Superfície de fratura de amostras de ABS (a e b) e PLA (c e d), com diferentes processos de fabricação .....	54
Figura 15 – Presença de fibra de carbono na estrutura de amostras de PLA impressas (a: impresso em orientação 0°; b: impresso em orientação 90° e c: impresso em orientação +/-45°) e amostra de PLA puro .....	55
Figura 16 – superfície de fratura (a, b e c) e superfície lateral (d) de diferentes materiais submetidos a ensaios de tração .....	56
Figura 17 - Superfícies fraturadas em diferentes parâmetros de impressão e velocidade de impacto .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos selecionados.....	30
--------------------------------------	----



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
CAD – *Computer-aided design* ou desenho auxiliado por computador  
CNC – *Computer Numeric Control*  
DLP – Processamento digital de luz  
EBM – Fusão por feixe eletrônico  
FDM – Modelagem por fusão e deposição  
ISO - *International Organization for Standardization*  
LOM – Manufatura laminar de objetos  
MA – Manufatura Aditiva  
MEV – Microscópio eletrônico de varredura  
PA – Poliamida  
PC – Policarbonato  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PETG – Polietileno Tereftalato Glicol  
PLA – Ácido Polilático  
PP – Polipropileno  
PS – Poliestireno  
PVA – Poliacetato de Vinila  
SLA – Estereolitografia  
SLM – Fusão seletiva a laser  
SLS – Sinterização seletiva a laser  
Tg – Temperatura de transição vítrea  
Tm – Temperatura de fusão  
TPE – Elastômero Termoplástico

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
2.	OBJETIVOS .....	15
2.1	Objetivos gerais .....	15
2.2	Objetivos específicos .....	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
3.1	Processos de fabricação .....	17
3.1.1	<i>Injeção plástica</i> .....	17
3.1.2	<i>FDM</i> .....	19
3.2	Materiais utilizados na tecnologia FDM .....	20
3.2.1	<i>Ácido Polilático – PLA</i> .....	21
3.2.2	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS</i> .....	22
3.3	Propriedades Mecânicas .....	22
3.3.1	<i>Ensaio de tração</i> .....	23
3.3.2	<i>Ensaio de compressão</i> .....	23
3.3.3	<i>Ensaio de flexão</i> .....	24
3.3.4	<i>Ensaio de impacto</i> .....	24
3.3.5	<i>Ensaio de torção</i> .....	25
3.3.6	<i>Ensaio de cisalhamento</i> .....	25
4.	METODOLOGIA .....	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
5.1	Ensaio de tração .....	32
5.1.1	<i>Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob tração</i> .....	34
5.1.2	<i>Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob tração</i> .....	36
5.1.3	<i>Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob tração</i> .....	37
5.1.4	<i>Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob tração</i> .....	38
5.1.5	<i>Influência da temperatura de impressão no comportamento de amostras sob tração</i> .....	38

5.1.6	<i>Influência da velocidade de impressão no comportamento de amostras sob tração</i>	39
5.1.7	<i>Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob tração</i>	39
5.2	Ensaio de compressão	40
5.2.1	<i>Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob compressão</i>	41
5.2.2	<i>Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob compressão</i>	42
5.2.3	<i>Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob compressão</i>	42
5.3	Ensaio de flexão	43
5.3.1	<i>Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob flexão</i>	44
5.3.2	<i>Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob flexão</i>	45
5.3.3	<i>Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob flexão</i>	45
5.3.4	<i>Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob flexão</i>	46
5.3.5	<i>Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob flexão</i>	46
5.4	Ensaio de impacto	47
5.4.1	<i>Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob impacto</i>	47
5.4.2	<i>Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob impacto</i>	48
5.4.3	<i>Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob impacto</i>	49
5.4.4	<i>Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob impacto</i>	49
5.4.5	<i>Influência do padrão de preenchimento no comportamento de amostras sob impacto</i>	50

<b>5.4.6</b>	<b><i>Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob impacto</i></b> .....	<b>50</b>
<b>5.5</b>	<b>Ensaio de cisalhamento</b> .....	<b>51</b>
<b>5.6</b>	<b>Ensaio de torção</b> .....	<b>51</b>
<b>5.7</b>	<b>Observações microestruturais</b> .....	<b>53</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução da indústria a partir das tecnologias que a compõe é recorrente no passar dos anos. A necessidade de novos produtos, de maneira cada vez mais flexível, personalizada e em curto tempo de desenvolvimento, favoreceram o surgimento e o aperfeiçoamento de novos processos de fabricação. Entre as inovações tecnológicas com esse objetivo, destaca-se a Manufatura Aditiva, processo de fabricação considerada um dos pilares da Indústria 4.0 (ALBERTIN et al., 2017; SANTOS et al., 2020).

A Manufatura Aditiva - MA (*Additive Manufacturing - AM*) teve origem nos anos 80, com o desenvolvimento da Estereolitografia (SLA - *Stereolithography*) e, a partir da década de 90, outras tecnologias foram também desenvolvidas, caracterizando a diversificação da tecnologia MA. Há vários tipos disponíveis no mercado, tais como Modelagem por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*), impressão a jato de tinta, Sinterização Seletiva a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*), Processamento Digital de Luz (DLP - *Digital Light Processing*), Fusão Seletiva a Laser (SLM - *Selective Laser Melting*), Fusão por Feixe Eletrônico (EBM - *Electron Beam Melting*), Manufatura Laminar de Objetos (LOM - *Laminated Object Manufacturing*) etc (VOLPATO, 2017).

Manufatura Aditiva é o processo de fabricação cuja característica principal é o uso de dispositivos aptos para a criação de produtos mediante à adição sucessiva de material em forma de camadas, por meio de dados adquiridos de modelos geométricos computacionais 3D do componente, originário do sistema CAD (*Computer-Aided Design* ou desenho auxiliado por computador) (RODRIGUES et al., 2017).

O processo de Manufatura Aditiva, segundo Giordano, Zancul e Rodrigues (2016), tem como diferencial e característica principal, o número reduzido de etapas e processos na fabricação de um produto, o que pode resultar, conforme destaque de Wong e Hernandez (2012), na redução de tempo, custo, desperdício material, interação humana e, por fim, no ciclo de desenvolvimento do produto. Esse processo possibilita ainda, de acordo com Afrose et al. (2016), maior flexibilidade de projeto, o que permite as empresas transformarem concepções iniciais de design em dinâmicos protótipos a fim de futuramente tornarem produtos finais exitosos de maneira rápida e eficaz. Rodrigues et al. (2017) e Wiberg, Persson e Ölvander (2019) salientam que a

abordagem “camada por camada” é a base de todos os tipos de equipamentos de Manufatura Aditiva no mercado atual e o que difere dentre eles são fatores como material usado, propriedades do material, restrições de design e áreas de aplicação.

Giordano, Zancul e Rodrigues (2016) destacam que por causa do uso inicial para a criação de modelos e peças de protótipo, a nomenclatura aceita até recentemente foi “prototipagem rápida”. A técnica ficou popularmente conhecida como impressão 3D após a sua disseminação, devido à facilidade de transmissão de seu conceito fundamental. Porém, Manufatura Aditiva é a denominação mais usual e técnica adotada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Volpato (2017) completa que há ainda uma gama de variação terminológica para esse processo, como, manufatura por camada, manufatura rápida, manufatura de bancada, manufatura acrescentando material, manufatura digital direta, manufatura instantânea e fabricação de forma livre.

A Manufatura Aditiva tem avançado quanto a sua funcionalidade em razão de suas características e crescente desenvolvimento. Sendo assim, não mais restringe seu uso na produção de protótipos para visualização, mas chega até mesmo a ser utilizado em fabricação de produto final uma vez que vem se tornando apta para aplicações mais exigentes (VOLPATO, 2017).

Tudo isso faz com que a Manufatura Aditiva seja apontada, segundo Giordano, Zancul E Rodrigues (2016), como a tecnologia revolucionária dos processos produtivos das empresas e de alteração das estratégias de produção. São atualmente usadas, de acordo com Afrose et al. (2016), em diversas áreas, como nas indústrias aeroespacial, automobilística, de bioengenharia, de produtos elétricos e eletrônicos, nas joalherias, artes, engenharia civil, arquitetura dentre outros segmentos.

O crescente uso das tecnologias de Manufatura Aditiva é evidenciado por Zapparoli (2019) ao destacar que o consumo global de sistemas, insumos e serviços relacionados a essa tecnologia totalizou mais de US\$ 7,3 bilhões em 2017, após crescimento anual de 25% desde 2013. White (2015) também relata sobre o crescimento contínuo da Manufatura Aditiva como uma avançada técnica de fabricação, citando relatório da indústria de *Wohlers and Associates*, importante consultoria técnica americana, que indicou receita de US\$ 1,6 bilhão em peças, sistemas e outras indústrias de apoio em 2012, e previsão de crescimento para US\$ 10 bilhões em 2022. Já o relatório de mercado para a Manufatura Aditiva de 2020 do *Research and Markets*, consultoria de mercado irlandesa, aponta tamanho do

mercado de Manufatura Aditiva em 2019 de US\$ 8,35 bilhões, com tendência de crescimento para US\$ 23,75 bilhões até 2027.

No entanto, o uso da Manufatura Aditiva, principalmente do tipo FDM, como processo de fabricação para produto final ainda é visto como um desafio, no que se refere ao seu desempenho estrutural distinto, se comparado a outros processos. Volpato (2017) aponta como uma das desvantagens da Manufatura Aditiva, os produtos obtidos por esse processo não possuem as mesmas propriedades mecânicas de outros processos de fabricação, devido ao conceito camada por camada resultar em propriedades anisotrópicas, notando assim diferentes propriedades mecânicas em diferentes tipos e direções de solicitação.

Paginin e Barbosa (2020) afirmam que, mesmo com muitas pesquisas relacionadas a características mecânicas das peças produzidas por Manufatura Aditiva, o seu uso em aplicações funcionais ainda não é totalmente consolidado. Shanmugam et al. (2018) citam que a possibilidade de uso da Manufatura Aditiva na produção de produto final tem incentivado pesquisadores a encontrar soluções para estabelecer maior resistência em peças, visto que melhorias nas propriedades mecânicas são observadas a partir de variações e controle de parâmetro de impressão, seleção e qualidade de materiais, emprego de reforços materiais e técnicas de pós processamento.

Afrose et al. (2016) destacam que peças termoplásticas processadas por FDM, uma das tecnologias de Manufatura Aditiva mais utilizada, são aplicadas em um ritmo significativo nos campos da engenharia e da medicina, sendo importante o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais obtidos com esse processo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

O objetivo geral desse trabalho é analisar os resultados dos ensaios de comportamento mecânico divulgados nos artigos científicos, de produtos fabricados pela tecnologia de Manufatura Aditiva FDM, utilizando como matéria prima Ácido Polilático (PLA) ou Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desse estudo são:

- Fazer levantamento de artigo científico nas bases Science Direct e Capes, utilizando palavras-chave relacionadas com o tema, de trabalhos que realizaram ensaios mecânicos, pelo período de 2016 a 2021;
- Identificar os tipos de ensaios mecânicos, elencando por aparição nos artigos;
- Analisar os resultados dos ensaios realizados, por meio de comparação entre produtos obtidos por injeção plástica e produtos obtidos por FDM;
- Verificar a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas dos produtos obtidos por FDM.



### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

A definição do processo de fabricação para um produto é baseada principalmente na sua matéria prima. Para os polímeros os principais processos de fabricação são a extrusão e a moldagem por injeção. No entanto, recentemente a evolução da Manufatura Aditiva está despertando o interesse do mercado em geral, observado a partir do seu crescimento nos últimos anos.

A Manufatura Aditiva tem como diferencial o uso de materiais diversos e suas formas e técnicas para se obter componentes físicos em contraposição aos usuais métodos de fabricação pois não têm como princípio básico o uso de molde, ferramental moldante nem remoção de material (VOLPATO E COSTA, 2013).

Uma das principais tecnologias oferecidas pela Manufatura Aditiva é o FDM. O processo de fabricação por FDM utiliza principalmente materiais poliméricos como ABS e PLA entre outros. Os produtos fabricados por este processo utilizando estas matérias-primas estão apresentando características cada vez mais técnica, ou seja, com maiores exigências de desempenho, permitindo assim o uso destes produtos como materiais de engenharia, trazendo mais responsabilidade ao produto pela sua função de uso (VOLPATO, 2017).

Os subcapítulos abaixo discutirão o processo, as matérias primas e suas respectivas propriedades mecânicas.

#### **3.1 Processos de fabricação**

Processo de fabricação é definido por Groover (2016) como o uso de processos físicos e químicos para modificar a geometria, aparência e as propriedades de um material, por meio de maquinários, ferramentas ou trabalho manual. O objetivo dos processos de fabricação é obter uma peça ou produto, adicionando assim maior valor econômico para o material trabalhado.

Existem diversos processos de fabricação para produtos plásticos, a variação deste método se aplica de acordo com as características do produto final. Os processos mais comuns são: extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro, moldagem por compressão, rotomoldagem, além da Manufatura Aditiva. Os processos de fabricação de produtos poliméricos são baseados na ação da

temperatura de trabalho, fundamentada na temperatura de fusão de cada material, com o objetivo de processá-lo em estado fluido (DIAS, 2013; LIRA, 2017).

Esse estudo se propõe a comparar os produtos obtidos pela tecnologia de Manufatura Aditiva FDM aos produtos obtidos pelo processo de moldagem por injeção, portanto, os subcapítulos seguintes descrevem tais processos.

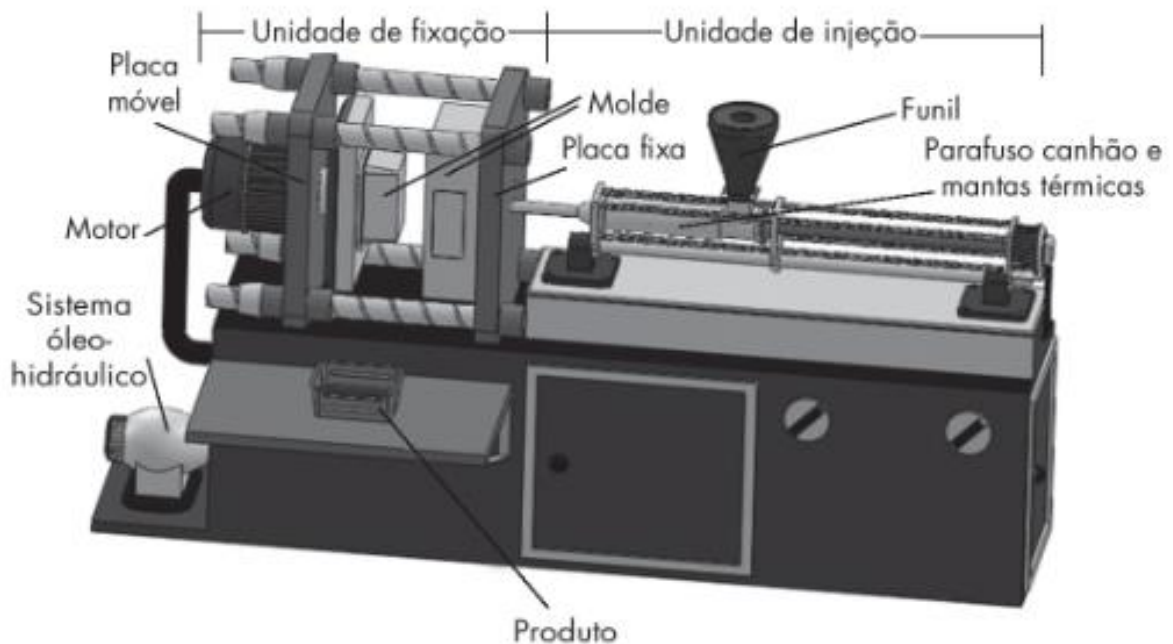
### **3.1.1 Injeção plástica**

O processo de moldagem por injeção plástica é um método de produção para grandes volumes que pode ser integralmente automatizado devido a sua simplicidade de operação cuja exigência dos procedimentos de acabamentos é mínima. O método possibilita a obtenção de peças de variadas dimensões e complexidade além de possuir relativo baixo custo de mão de obra (LIRA, 2017).

Opostos à operação descomplicada, a configuração e o processo envolvidos na injeção plástica são tecnicamente muito complexos, levando em consideração todas as variáveis que os envolve. A eficiência do processo e a qualidade do produto estão ligadas diretamente às configurações adequadas dos parâmetros de injeção como: temperatura de fusão, temperatura do molde, pressão de injeção, velocidade de injeção, tempo de injeção, pressão de retenção, tempo de retenção e tempo de resfriamento. Todas essas configurações influenciam nos produtos resultantes, tanto em suas propriedades mecânicas, quanto no surgimento de defeitos, por exemplo: empenamento, encolhimento, marca de afundamento, tensão térmica residual etc. e requisitos estéticos, como: acabamento superficial e rugosidade (FAROOQUE, ASJAD E RIZVI, 2021).

Os equipamentos de injeção plástica mais comuns diferenciam entre si por tamanho, capacidade produtiva e equipamentos, e são compostos por duas unidades principais, unidade de injeção e unidade de fechamento do molde ou unidade de fixação (figura 1). A unidade de injeção, que pode ser por pistão ou por rosca-pistão, é composta pelos componentes responsáveis pela injeção, onde é depositada a matéria-prima direcionada para ser homogeneizada e condicionada para ser injetada pelo torpedo, através do êmbolo ou da rosca sem fim que empurra o material em alta pressão nas cavidades do molde. A unidade de fechamento do molde é composta pelas placas, fixa e móvel, e onde é montado o molde, responsável pela forma final do produto devido as formas de suas cavidades (HARADA, 2004).

Figura 1 - Injetora plástica e os seus principais componentes.



Fonte: Lira (2017)

O molde de injeção é uma unidade completa com condições de produzir peças moldadas. Seus principais componentes são as placas de fixação, porta-extratores, suporte, impulsora e de montagem de postigos, os postigos, as cavidades e os extratores, além de buchas, colunas e guias. Sua fabricação é principalmente por meio de operações de usinagem. Os atuais produtos, devido a formas cada vez mais complexas, exigem construção de moldes cujos processos e equipamentos sejam mais tecnológicos, como usinagem de alta velocidade de corte, ferramentas específicas, materiais e revestimentos especiais (ALBANO, 2007; HARADA, 2004).

O ciclo de injeção é composto, em suma, pelas etapas a seguir: fechamento do molde, avanço da unidade de fechamento, injeção do material fundido no molde, recalque ou manutenção do molde fechado sob pressão controlada, recuo da unidade de injeção, dosagem do material do próximo ciclo e extração do produto. Com a injeção do material, inicia-se paralelamente o resfriamento, durando até a extração do componente (LIRA, 2017).

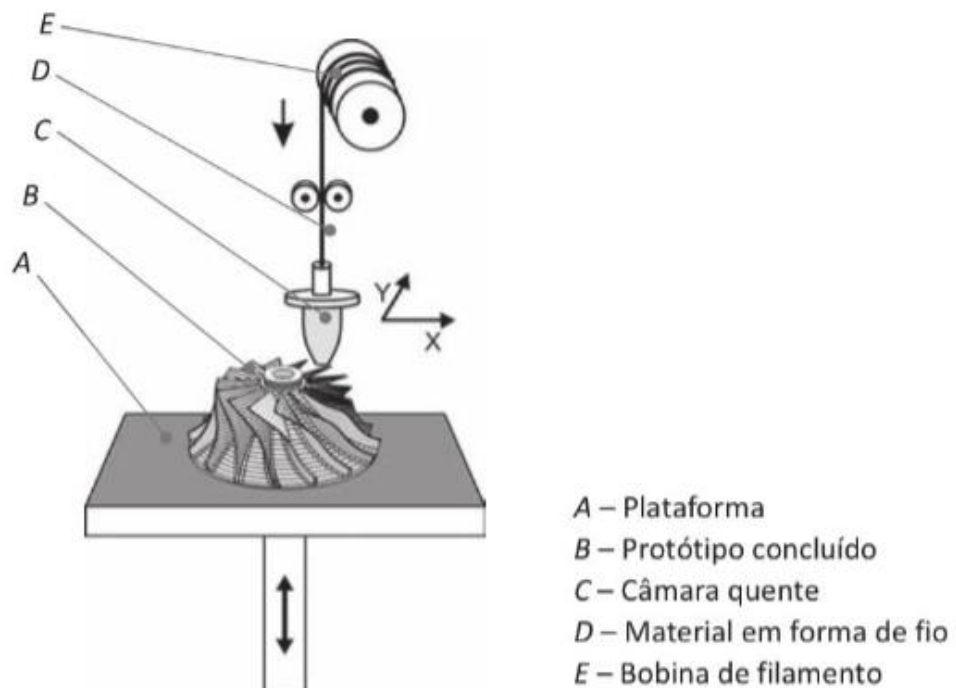
### 3.1.2 FDM

Dentre as tecnologias existentes na Manufatura Aditiva, destaca-se a FDM (Modelagem por Fusão e Deposição – *Fused Deposition Modeling*), tecnologia introduzida pela empresa *Stratasys* em 1991, e, segundo Afrose et al. (2016) é a técnica de maior abrangência e aceitação.

Wiberg, Persson e Ölvander (2019) e Rizzo (2016) descreveram o funcionamento da técnica como um dispositivo robótico controlado por CNC (Controle Numérico Computadorizado ou *Computer Numeric Control*) contendo uma cabeça de extrusão que se movimenta sobre uma mesa em duas direções principais de acordo com uma programação computadorizada que controla também o movimento dos filamentos, além de estabilizar a temperatura de aquecimento do material durante a deposição.

O dispositivo é composto por um conjunto extrusor seguido por uma matriz também aquecida que direciona o polímero para a base de impressão (suporte ou mesa) formando camadas (figura 2). A camada inicial é depositada sobre um suporte que tem a função de auxiliar na extração após o resfriamento, camadas posteriores são depositadas sobre a camada inicial formando o produto (LIRA, 2021).

Figura 2 - Princípios de funcionamento do processo FDM.



Como vantagens da técnica FDM, Rizzo (2016) aponta principalmente a facilidade de fabricação de produtos com geometrias complexas, além dos tempos de produção que são relativamente rápidos e os produtos mecanicamente estáveis. Lira (2021) complementa as vantagens desse processo, citando o fácil ajuste de parâmetros de impressão, a baixa geração de resíduos, a sobra de materiais, a rápida e fácil instalação e as trocas de materiais.

A configuração do processo em um dispositivo FDM é feito com ajustes de parâmetros de impressão. Entre os vários parâmetros de impressão 3D, os mais significativos, segundo Machado (2019), devido a maior influência no resultado da impressão, são a temperatura de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão e a orientação da peça no espaço de impressão. Outros parâmetros de impressão que também podem ser ajustados no processo são a distância entre os filamentos, a largura do preenchimento e do contorno, o percentual de preenchimento, os padrões de preenchimento, a orientação das camadas e a temperatura de aquecimento de mesa.

### **3.2 Materiais utilizados na tecnologia FDM**

O FDM utiliza como matéria-prima principalmente polímeros termoplásticos, que são apresentados na forma de filamentos enrolados em uma bobina. O termo termoplástico, segundo Ladchumananandasivam (2006), refere-se a materiais que se fundem ao serem aquecidos, ideais para a variedade de processos dependentes de temperatura, como moldagem, extrusão, além da Manufatura Aditiva. No entanto, Hall (2016) cita tecnologia patenteada pela empresa *Virtual Foundry*, capaz de permitir impressão de outros materiais como metal e cerâmica em equipamentos FDM. White (2015) ressalta a importância dos polímeros para a Manufatura Aditiva, indicando que esses representam a principal fonte de materiais imprimíveis, por meio de pesquisa realizada com usuários para avaliar necessidades de materiais de fabricação.

Os principais polímeros utilizados na tecnologia FDM, devido suas disponibilidades no mercado, propriedades mecânicas e facilidade de uso são o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polipropileno (PP), Polietileno Tereftalato Glicol (PETG), Poliamida (PA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Ácido Polilático (PLA), sendo os dois últimos comercialmente de maior uso no processo por causa da disponibilidade e dos preços dos filamentos, da facilidade de operação por

características físicas e térmicas, das melhores propriedades mecânicas, enfim, das satisfatórias características de acabamento e ambientais (SANTOS et al., 2018) (BESKO, BELYK e SIEBEN, 2017).

Outros polímeros apresentados em estudos com possibilidade de uso em equipamentos FDM são o Poliestireno (PS), o Policarbonato (PC), os flexíveis Elastômero Termoplástico TPE, TPN e TPC, o Poliacetato de Vinila (PVA) etc (SANTOS et al, 2018; BESKO, BELYK e SIEBEN, 2017; RIZZO, 2016).

### **3.2.1 Ácido Polilático - PLA**

O PLA é um polímero termoplástico, de característica semicristalina ou amorfa, composto de base biológica, obtido de recursos renováveis como amido de milho, cana de açúcar, trigo, beterraba, raízes de tapioca e amido de batata (BENWOOD et al, 2018; SANTOS et al., 2018; BESKO, BELYK e SIEBEN, 2017). Por ser uma fonte renovável, é extremamente vantajoso no quesito sustentável em relação à degradação na natureza. O tempo para sua decomposição é em média de 6 a 24 meses, o que ajuda na redução de volumes de aterro sanitário devido sua base biológica (SANTOS et al., 2018; PANG et al., 2010). Outras vantagens do PLA são destacadas por Pang et al. (2010) como o baixo consumo de CO<sub>2</sub> no seu processamento, enquanto Besko, Belyk e Sieben (2017) salientam que o PLA não é tóxico e, por ser inofensivo ao organismo humano, é usado na medicina em suturas e implantes cirúrgicos.

PLA tem potencial para substituir termoplásticos à base de petróleo e seu baixo ponto de fusão é um grande benefício, pois requer menos energia para impressão 3D em comparação com o necessário para o ABS e poliamidas (BENWOOD et al., 2018). Besko, Belyk e Sieben (2017) destacam a temperatura de impressão ser menor que outros polímeros e, portanto, não haver necessidade da mesa aquecida para a sua impressão. O PLA possui temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) de ~ 52,5° C e temperatura de fusão cristalina (T<sub>m</sub>) de ~ 150°C e pode ser processado como todos os outros polímeros termoplásticos usando extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro (KAMTHAI e MAGARAPHAN, 2015; PANG et al. 2010). No entanto, o material PLA puro tem aplicações reduzidas, devido às limitações de suas propriedades mecânicas, sendo considerado frágil, com baixa tenacidade, resistência ao impacto e flexibilidade (ELMRABET e SIEGKAS, 2020).

### **3.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS**

O polímero ABS é um copolímero padrão, obtido por meio de reações de três monômeros diferentes, sendo eles acrilonitrila, butadieno e estireno (BESKO, BELYK e SIEBEN, 2017). É derivado do petróleo e, conseqüentemente, não é um material biodegradável. Possui excelente tenacidade, boa estabilidade dimensional, facilidade de processamento, resistência química e térmica, ótima durabilidade e baixo custo. Necessita de maior temperatura para atingir seu ponto de fusão ( $T_m$ ), o mínimo de  $\sim 200^\circ\text{C}$ , enquanto para atingir sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é necessário atingir pelo menos  $95^\circ\text{C}$  (OLIVERA et al., 2016; SANTOS et al., 2018).

### **3.3 Propriedades Mecânicas**

As propriedades mecânicas de um material, conforme definição de Callister (2012), são suas características quanto ao tipo e magnitude da sua resposta a um estímulo específico que lhe é imposto, relacionando a deformação a uma carga ou força que lhe é aplicada, como o módulo de elasticidade (rigidez), a resistência e a tenacidade.

Ainda segundo Callister (2012), o desempenho de um material está relacionado com suas propriedades, assim como a estrutura do material está relacionado com o seu processamento, e essas relações definem a caracterização dos materiais em termos de projeto, produção e utilização.

Kumar, Singh e Farina (2018) descrevem que os componentes em geral são avaliados com base na durabilidade mecânica, além de performance funcional e, em algumas circunstâncias, na apresentação. A Manufatura Aditiva, como um processo de fabricação em expansão e evolução, tem como desafio, para os pesquisadores e cientistas, o avanço quanto a desempenho mecânico e térmico, fazendo com que o produto final seja resistente o suficiente para o seu uso atribuído.

Rizzo (2016) aponta que, para garantir a melhor estabilidade dimensional de componentes obtidos por Manufatura Aditiva, é necessário processar a impressão acima da temperatura de transição vítrea e abaixo do ponto de fusão do material, o que garante a permanência das propriedades mecânicas originais do material quando solidificado. Foi relatado que a orientação de construção, parâmetros de impressão e outras variáveis associadas podem afetar amplamente a conexão entre as camadas

durante a impressão 3D, portanto isso deve ser otimizado para melhorar propriedades mecânicas e térmicas.

Os mais importantes e, na prática, os mais significativos ensaios mecânicos são o ensaio de tração, o ensaio de flexão e o ensaio de compressão. O ensaio de torção, no entanto, tem pouca relevância para polímeros. Uma importante característica de produtos plásticos, principalmente os de aplicação industrial, é a tenacidade, devido a sua alta exposição a impactos. Portanto, em adição aos ensaios básicos já mencionados, existem vários outros métodos de ensaio, onde são incluídos os ensaios de impacto, além dos testes para a tensão de cisalhamento ou flexão de cisalhamento (GRELLMANN e SEIDLER, 2013).

### **3.3.1 Ensaio de tração**

O ensaio de tração é um dos testes mecânicos mais usados no mundo, segundo Grellmann e Seidler (2013), que o consideram como o ensaio fundamental em testes de materiais mecânicos. Esse ensaio se resume em aplicar uma carga uniaxial em um corpo de prova, forçando a sua deformação até atingir a ruptura, usando uma célula de carga específica ou uma máquina universal de teste de tração. Esse procedimento permite que se identifique a resistência à tração do material e quanto ele pode deformar antes da falha. Após a realização do ensaio de tração, é possível obter uma curva que relaciona a tensão e a deformação do corpo de prova testado e, a partir dele, muitas propriedades mecânicas do material testado podem ser obtidas, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de escoamento, força e alongamento para ruptura (PAGANIN e BARBOSA, 2020; WHITE, 2015).

### **3.3.2 Ensaio de compressão**

O teste de compressão é usado para avaliar o comportamento do material sob carga uniaxial de compressão. Para a realização desse ensaio pode ser utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos destrutivos, célula de carga ou prensas. Embora haja uma série de padrões diferentes, o teste de compressão não tem, com algumas exceções, a mesma significância que o teste de tração ou flexão, devida à relativa irrelevância do carregamento de compressão em problemas práticos em



polímeros. As normas que conduzem tal ensaio fornecem medição do módulo de compressão, tensão de escoamento compressiva, resistência à compressão na falha e deformação compressiva na falha e tem restrições geométricas para o diâmetro e altura da amostra (GRELLMANN e SEIDLER, 2013; WHITE, 2015).

### **3.3.3 Ensaio de flexão**

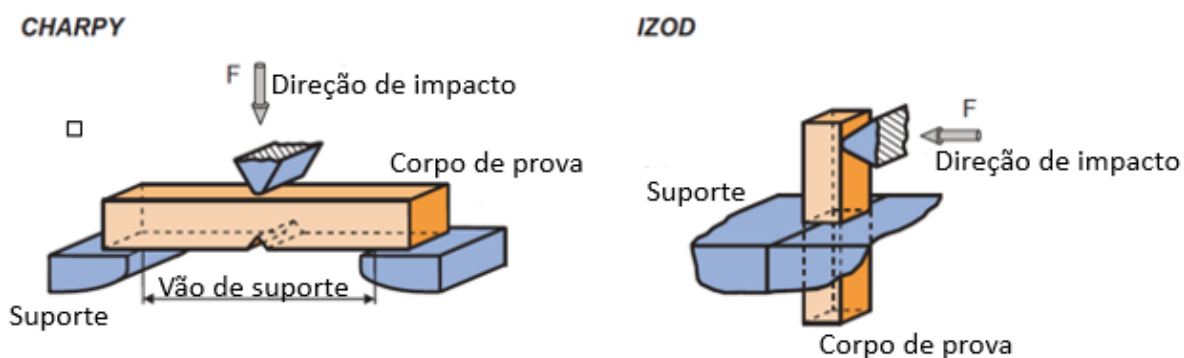
O teste de flexão foi feito para fornecer uma visão sobre a interação entre as condições de carregamento mistas de tensão e compressão, dado que a viga de flexão experimenta simultaneamente os dois cenários de carregamento (ZOLIN, 2010). As principais normas utilizadas para esse teste são ASTM D790-10 e ISO 178:2019, segundo White (2015), elas são equivalentes e utilizam um método de dobra de três pontos para medir o módulo de flexão, resistência à flexão, tensão de flexão e deformação na ruptura. Para situações em que a deformação excede 5%, ainda segundo White (2015), é indicado utilização do padrão ASTM D6272-17, que é um método de quatro pontos, usado para aumentar a chance de obter uma medição de falha, já que reduz a concentração de tensão associada ao rolo central dos demais testes de três pontos. O padrão não aborda os desafios específicos para Manufatura Aditiva, materiais que podem ter propriedades anisotrópicas (WHITE, 2015).

### **3.3.4 Ensaio de impacto**

Produtos à base de polímeros, principalmente os de uso industrial, estão sujeitos a solicitações de impacto, como em colisões, quedas, montagens, desmoldagens, entre outras situações. A carga de impacto resulta em aumento da taxa de deformação, alterando significativamente a resistência, resultando em ocorrências de quebra dos componentes. Para prever o comportamento de componentes sob tais condições, o ensaio de impacto avalia a tenacidade dos materiais e se resume em uma carga sendo aplicada rapidamente batendo na amostra com um golpe forte. As normas mais utilizadas no gerenciamento dos ensaios de impacto são ISO 179-1:2010, ISO 179-2:2020 e ASTM D6110-18 que descrevem o método para o ensaio de impacto Charpy, ISO 180:2000 e ASTM D256-10 (2018) que são os padrões para o ensaio de impacto Izod. De acordo com White (2015), as principais diferenças entre esses ensaios são o direcionamento do corpo de prova,

vertical para o Izod e horizontal para o Charpy, e o posicionamento do entalhe, no Izod voltado para o dispositivo de impacto e no Charpy no lado inverso (Figura 3). O teste de impacto Charpy ganhou a maior importância no controle de qualidade de plásticos devido à sua simplicidade metodológica, rapidez e relativo baixo consumo de materiais (GRELLMANN e SEIDLER, 2013; WHITE, 2015).

Figura 3 - Características do ensaio Charpy e Izod.



Fonte: Adaptado de: GRELLMANN e SEIDLER, 2013

### 3.3.5 Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento é realizado para verificar a resistência de materiais em resposta a forças que são aplicadas aos corpos na direção perpendicular do seu eixo longitudinal. Existem diversos testes padrão para medir o módulo e a resistência ao cisalhamento de materiais, porém, a resposta ao cisalhamento está diretamente ligada a geometria do produto, portanto, o ensaio de cisalhamento é frequentemente feito em produtos acabados, tais como pinos, rebites, parafusos, cordões de solda, barras e chapas. O ensaio é realizado em dispositivos, onde as amostras são inseridas entre duas partes móveis, que transmite à seção transversal do produto ensaiado uma força cortante, que se eleva até atingir a ruptura da amostra (WHITE, 2015).

### 3.3.6 Ensaio de torção

A torção ocorre quando atua, sobre um corpo, um torque, solicitação comum em eixos e sistemas de transmissão de movimento. O esforço por torção provoca uma

deformação elástica ao longo do comprimento do elemento, por meio de uma solitação de cisalhamento, a qual pode resultar em ruptura, sendo esse um dado importante para ser verificado. O ensaio de torção é comumente realizado em uma máquina de torção, onde o corpo de prova é fixado nas duas extremidades, sendo uma giratória, onde é aplicado o momento de torção. Do momento torsor e do ângulo de torção, obtém-se dados como tensão de escoamento, momento máximo, momento de ruptura, podendo, assim, identificar os limites dos materiais testados (ZOLIN, 2010).

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a condução dessa pesquisa foi a revisão bibliográfica sistemática, seguindo o roteiro especificado por Conforto, Amaral e Silva (2011). Os itens abaixo são um resumo da metodologia proposta no qual são explicadas as fases mais importantes:

1ª Fase – A entrada da pesquisa, que corresponde à definição do problema de pesquisa, palavras-chaves, critérios de busca etc.;

2ª Fase – O processamento das buscas, que corresponde ao uso das ferramentas e metodologia definidas anteriormente, com o uso das palavras-chave e refino dos resultados;

3ª Fase – A saída corresponde às análises dos resultados obtidos até o momento, lembrando a retroalimentação, cessando a pesquisa após atingir o volume satisfatório de resultados.

Em acordo com o roteiro exposto por Conforto, Amaral e Silva (2011), as buscas foram baseadas na discussão da seção 3 – Referencial Teórico e orientava-se em artigos que exploravam as propriedades mecânicas dos materiais ABS e PLA processados pela tecnologia de Manufatura Aditiva FDM. Foi utilizada, nas plataformas Science Direct e CAPES, a seguinte combinação de palavras-chave e operadores booleanos: "*manufacturing additive*" AND "FDM" AND "*injection molding*" AND "*mechanical properties*" AND ("abs" OR "pla") AND "*testing*" AND "*printing parameters*", além do filtro de data de publicação para o período de 2016 a 2021.

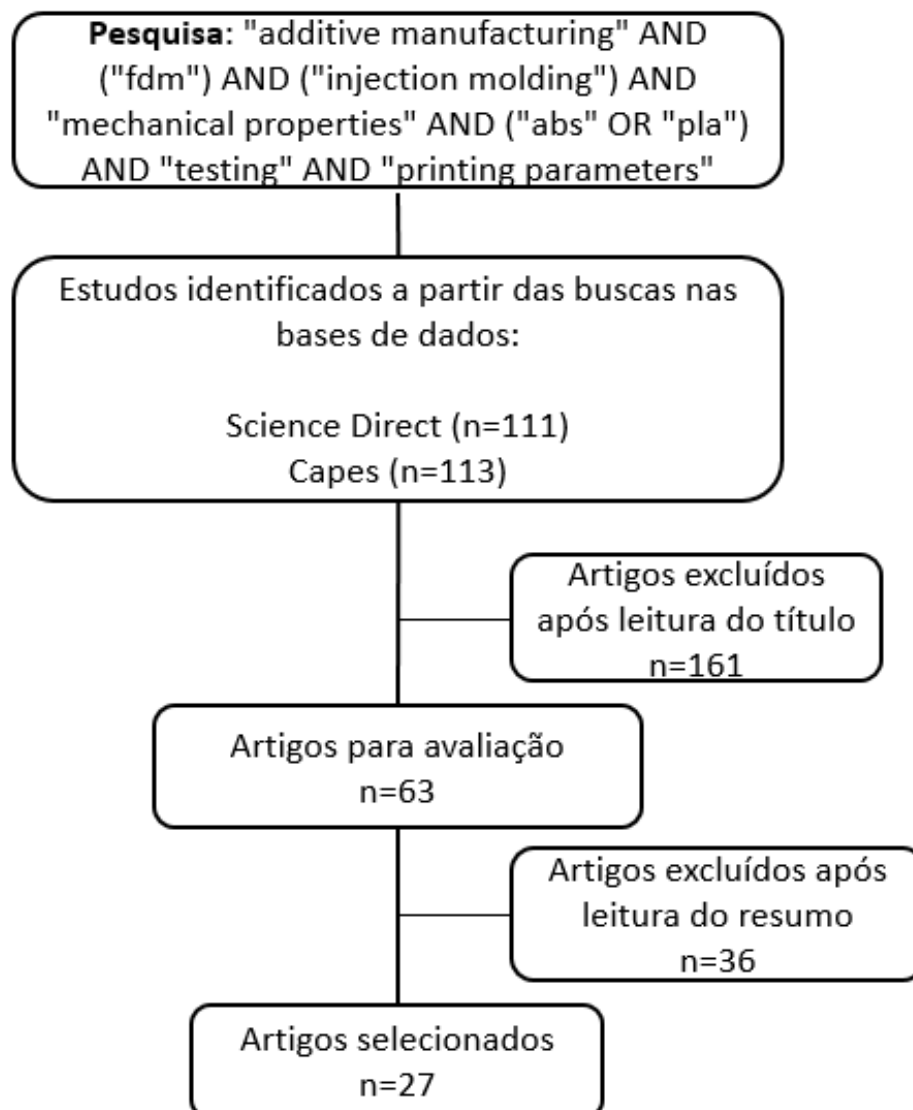
Eram esperados artigos que continham informações sobre os ensaios e normas utilizados; comparativo com outros processos de fabricação, como moldagem por injeção; comparativos entre os diversos parâmetros de impressão. Resumidamente, a busca idealizou artigos que investigaram resultados de ensaios mecânicos realizados em materiais provenientes de equipamentos FDM, com ênfase nas normas utilizadas e nos parâmetros de impressão. O único critério de qualificação aplicado a essa pesquisa foi a necessidade de o estudo a ser selecionado ter realizado os ensaios práticos.

A seleção dos estudos foi realizada, inicialmente, de acordo com os títulos e palavras-chave dos trabalhos, em seguida, uma nova seleção após a leitura do resumo de cada um dos trabalhos selecionados anteriormente e, por fim, os estudos selecionados foram lidos na íntegra. Os artigos que não atenderam os objetivos de busca e os critérios de inclusão foram eliminados da revisão.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condução das buscas seguiu a estrutura apresentada na seção 4 – Metodologia, em acordo com o roteiro idealizado por Conforto, Amaral e Silva (2011), conforme figura 4, que registra os resultados obtidos na pesquisa e as eliminações de artigos em cada etapa, até a seleção final.

Figura 4 - Condução das buscas de artigos e resultados.



Fonte: elaborada pelo autor.

Utilizando as ferramentas descritas na metodologia, foram selecionados 27 artigos, que foram organizados na tabela 1 da seguinte maneira: referência, com a menção dos sobrenomes dos autores e anos de publicação; materiais, onde foram citadas as matérias-primas utilizadas em cada pesquisa; ensaios, onde foram listados os ensaios realizados em cada pesquisa; normas, onde foram apontadas as normas de ensaio utilizadas em cada pesquisa selecionada e parâmetros de impressão, onde foram elencados os parâmetros de impressão investigados em cada estudo selecionado.

Tabela 1 – Artigos selecionados

REFERÊNCIA	MATERIAIS	ENSAIOS	NORMAS	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO
Gao, Yu e Li, 2020	PLA	Tração	ISO 527/2/1BA (2012)	Orientação de impressão; Temperatura auxiliar
Huynh et al., 2020	ABS	Tração, compressão e flexão	ASTM D638-14; ASTM D695-15; ASTM D790-17	Orientação de impressão
Bardiya, Jerald e Satheeshkumar, 2020a	PLA	Tração e flexão	ASTM D638-14 tipo V; ASTM D790-17	Altura camada; porcentagem de preenchimento;
Elmrabet e Siegkas, 2020	PLA	Tração e compressão	ISO 527:2019 Tipos 1A/ 1B; ISO 37: 2017 Tipo 2	Porcentagem de preenchimento;
Aloyaydi, Sivasankaran e Mustafa, 2020	PLA	Impacto	ISO 6603-2:2000	Padrão de preenchimento
Arbeiter e al, 2018	PLA	Impacto	ASTM D5045-99	Orientação de impressão
Bardiya, Jerald e Satheeshkumar, 2020b	PLA	Impacto	ASTM D256-10 (2018)	Espessura de camada; orientação de impressão; porcentagem de preenchimento
Ferreira et al., 2017	PLA	Tração e cisalhamento	ASTM D638-10; ASTM D3518-13	Orientação de impressão

Hadidi et al., 2019	ABS	Impacto	ASTM D695-15; ISO 179:1982	NA
Lay et al., 2019	ABS, PLA	Tração e impacto	ASTM D638-14; ASTM D4182-97 (2004)	NA
Ramezani Dana et al., 2018	ABS	Tração	ISO 527-2:2012	Orientação de impressão
Song et al., 2017	PLA	Tração, compressão e impacto	ASTM D5045-14	Orientação de impressão
Verbeeten, Lorenzo-Bañuelos e Arribas-Subiñas, 2019	PLA	Tração	ISO 527-2:2012	Velocidade de impressão; orientação de impressão; temperatura de aquecimento de mesa
Wang, Gramlich e Gardner, 2017	PLA	Impacto	ASTM D256-10	Espessura da camada; temperatura de aquecimento de mesa
Mishra et al., 2020	PLA	Impacto	ASTM D256-10	Padrão de preenchimento; porcentagem de preenchimento.
Tezel, Ozenc e Kovan, 2020	ABS, PLA	Impacto	ASTM D4812-19	Espessura da camada; orientação de impressão
Algarni, 2021	PLA	Tração	ASTM D638-14	Orientação de impressão
Paganin e Barbosa, 2020	ABS	Tração	ASTM F2971-13; ISO 527-1:2012	Orientação de impressão
Balderrama-Armendariz et al., 2018	ABS	Torção	ASTM D5279-13	Orientação de impressão
Benwood et al., 2018	PLA	Tração, flexão e impacto	ASTM D638-14; ASTM D790-17; ASTM D256-10 (2018)	Temperatura de aquecimento de mesa; orientação de impressão
Galeja et al., 2019	ABS	Tração e impacto	ISO 527-2:2012 1A; ISO 179-1:2010;	Orientação de impressão



Gupta et al., 2020	ABS	Tração	ASTM D 638-14	Espessura camada; orientação de impressão; largura do filamento; padrão de impressão;
Vidakis et al., 2020	ABS, PLA	Tração	ASTM D638-02	NA
Huang et al., 2018	ABS	Tração, flexão e impacto	ASTM D256-2006; GB/T 1040.2-2006; GB/T 9341-2008	Espessura da camada; velocidade de impressão; orientação de impressão.
Samykanó et al., 2019	ABS	Tração	ASTM D638 (2003)	Espessura camada; orientação de impressão; porcentagem de preenchimento
Mercado-Colmenero et al., 2019	PLA	Compressão	ISO 604:2002	NA
Luzanin et al., 2018	PLA	Tração	ISO 527-2:2012	Espessura da camada; temperatura de extrusão; velocidade de impressão; temperatura de aquecimento de mesa
Kaynak e Varsavas, 2018	PLA	Tração, flexão e impacto	ISO 527-2: 2012; ISO 178: 2010; ISO 13586: 2018	NA

Fonte: elaborado pelo autor

Os ensaios observados na revisão sistemática foram o de tração, de compressão, de flexão, de impacto, de cisalhamento e de torção, que terão seus resultados apresentados abaixo.

## 5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi investigado por 70% dos estudos selecionados nessa revisão, que utilizaram as normas ASTM D638 e ISO 527 ou equivalentes, como a GB/T 1040.2-2006 utilizada por Huang et al. (2018). White (2015) destaca que não existe uma norma específica para Manufatura Aditiva e que as normas utilizadas nos

estudos selecionados são para componentes poliméricos em geral, não considerando prováveis características específicas dos produtos obtidos por cada processo de fabricação.

Um comparativo do comportamento entre amostras obtidas por Manufatura Aditiva e moldagem por injeção submetidas a carregamento de tração foi realizado por Lay et al. (2019), utilizando PLA e ABS como matéria-prima. Foi observado que a resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura das amostras processadas pela tecnologia FDM foi em torno de, respectivamente, 48%, 50% e 48% menores em comparação com as amostras moldadas por injeção. Gao, Yu e Li (2020) e Ramezani Dana et al. (2018) também sinalizaram propriedades mecânicas inferiores das amostras de PLA e ABS impressas em comparação com as obtidas por moldagem por injeção plástica, quando submetidas à carga de tração. Song et al. (2017), no entanto, utilizando PLA como matéria-prima, demonstraram ser possível obter amostras impressas com comportamento mecânico superior a amostras moldadas, por meio de otimização dos parâmetros de impressão.

Ferreira et al. (2017) verificaram o efeito da adição de fibra de carbono na matéria-prima PLA, no comportamento sob tração. As fibras de carbono tinham comprimento de cerca de 60  $\mu\text{m}$  e foram adicionadas em uma proporção de 15% em peso. Para as amostras com carregamento de fibra de carbono, foi observado um grande aumento da rigidez, principalmente quando impressas na mesma orientação que a solitação, porém, não houve ganho significativo na resistência a tração.

Kaynak e Varsavas (2018) também verificaram o efeito da adição de reforços materiais no comportamento das amostras sob carregamento de tração. Nesse estudo, foram adicionados ao PLA, fibra de vidro para algumas amostras, elastômero termoplástico do tipo poliuretano em outras amostras e ambos os carregamentos em um terceiro conjunto de amostras para serem comparadas com amostras de PLA puro. Nenhum dos reforços adicionados foi eficaz quanto à resistência à tração, e somente as amostras com adição de fibra de vidro apresentaram melhoria do módulo de elasticidade.

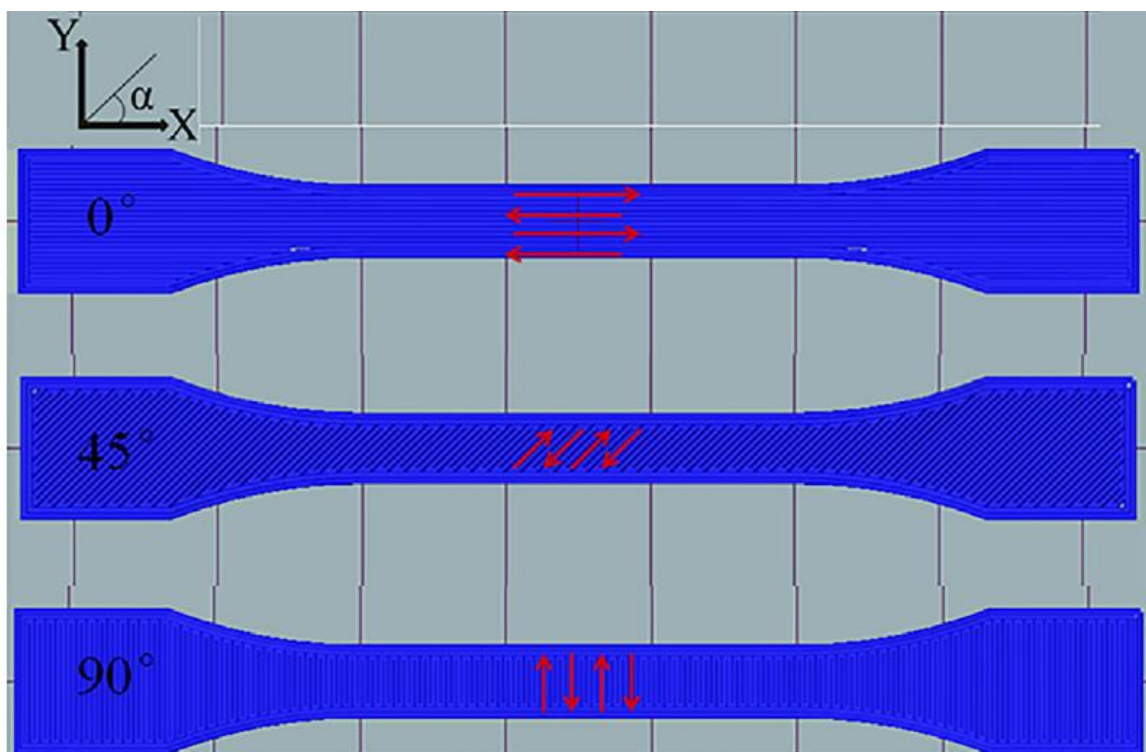
Foi observada grande influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas verificadas no ensaio de tração. Os principais parâmetros de impressão analisados foram orientação de impressão, espessura de camada, porcentagem de preenchimento, temperatura de aquecimento de mesa, temperatura de impressão e velocidade de impressão. Será discutida, nos subcapítulos a seguir, a

influência dos parâmetros de impressão verificados pelos estudos selecionados, no comportamento das amostras submetidas ao carregamento de tração.

### 5.1.1 Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob tração

A influência da orientação de impressão no comportamento de amostras de PLA obtidas por Manufatura Aditiva, sob solicitação de tração foi avaliada por Gao, Yu e Li (2020), que observaram resistência e ductilidade até cerca de 60% maior nas amostras com impressão orientada a  $0^\circ$  (figura 5), ou seja, na direção do carregamento, comparada a outras orientações de impressão.

Figura 5 – Orientações de impressão utilizadas por Gao, Yu e Li (2020)

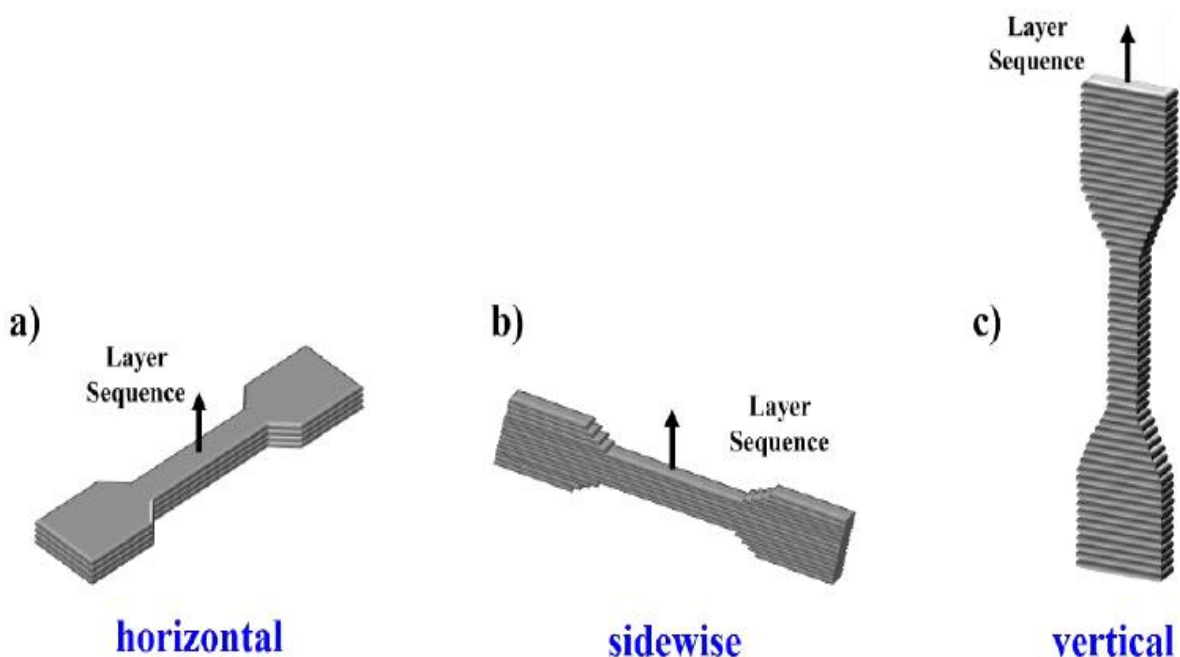


Fonte: GAO, YU E LI, 2020

Investigando também a influência da orientação de impressão, mas dessa vez, utilizando amostras de ABS obtidas por Manufatura Aditiva, Huynh et al. (2020) caracterizaram o comportamento das amostras sob tração a partir das métricas de módulo de elasticidade, tensão de escoamento, resistência máxima, tenacidade e deformação de ruptura. Foi observada grande influência da orientação de impressão

nos resultados obtidos de módulo de elasticidade, onde a amostra impressa orientada no sentido horizontal obteve o menor valor quando comparada com as outras direções experimentadas, vertical e lateral (figura 6). Já para a ductilidade e para a deformação de ruptura, o melhor comportamento foi para a amostra impressa no sentido horizontal, com diferenças significativas para as demais amostras. Os resultados para tensão de escoamento e resistência máxima foram semelhantes para todas as amostras.

Figura 6 - Orientações de impressão utilizados por Huynh et al. (2020)



Fonte: HUYNH et al. ,2020

Outros estudos selecionados também investigaram a influência da orientação de impressão, como Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a) e Benwood et al. (2018), que utilizando amostras de PLA impressas de modo multidirecional, observaram pouca influência da orientação de impressão no comportamento mecânico, assim como Ferreira et al. (2017), que também para o PLA, observaram pouca influência da orientação de impressão no módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. No entanto, Ramezani Dana et al. (2018) e Paganin e Barbosa (2020), utilizando amostras de ABS, Song et al. (2017), Verbeeten, Lorenzo-Bañuelos e Arribas-Subiñas, (2019) e Algarni (2021) utilizando PLA, verificaram influência da

orientação de impressão no comportamento mecânico. Tais diferenças foram mais significativas quando comparadas às amostras obtidas por impressão unidirecional, onde as impressas na direção da solicitação têm maior resistência que as amostras impressas na direção perpendicular à aplicação da força.

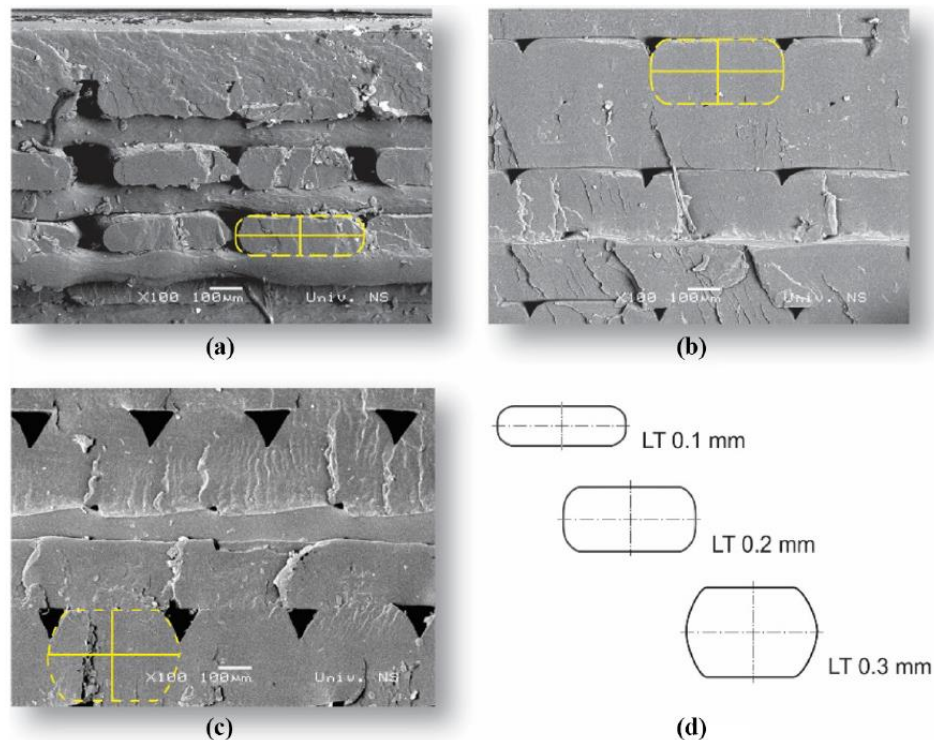
### **5.1.2 Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob tração**

A influência da espessura das camadas no comportamento mecânico das amostras submetidas ao carregamento de tração foi explorada por Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a), Gupta et al. (2020), Huang et al. (2018), Samykano et al. (2019) e Luzanin et al. (2018).

Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a), utilizando amostras de PLA e espessura de camadas de 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm, e Samykano et al. (2019), utilizando ABS como matéria-prima e espessura de camadas de 0,35mm, 0,4mm e 0,5mm, observaram melhoria do comportamento mecânico ao parametrizar a impressão com maior espessura de camada. Foi atribuído essa melhoria de comportamento à necessidade de menos camadas para a construção das amostras e, conseqüentemente, menos ciclos de aquecimento e resfriamento.

Gupta et al. (2020), Huang et al. (2018) e Luzanin et al. (2018), utilizando ABS e PLA sob tração, verificaram melhor comportamento mecânico em impressões com camadas de menor espessura, diferentemente dos primeiros estudos citados, e atribuíram ao fato da camada menor resultar em menos vazios e defeitos na estrutura das amostras. Foram utilizados por Gupta et al. (2020) as espessuras de camada de 0,1778mm e 0,254mm, enquanto Huang et al. (2018) e Luzanin et al. (2018) verificaram as espessuras 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm. Luzanin et al. (2018), por meio de análise microscópica, constataram que o formato da camada com espessura de 0,2mm favorece a diminuição de espaços vazios na impressão (figura 7), sendo essa a de melhor comportamento entre as testadas por esse estudo.

Figura 7 - Seções da amostra com diferentes espessuras de camadas



**Sources:** (a) LT = 0.1 mm; (b) LT = 0.2 mm; (c) LT = 0.3 mm; (d) schematic comparison of the resulting geometries

Fonte: Luzanin et al. (2018)

### 5.1.3 Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob tração

A porcentagem de preenchimento em amostras de PLA e ABS foi avaliada por Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a), Elmrabet e Siegkas (2020) e Samykano et al. (2019), que concordaram que o aumento desse parâmetro é benéfico para o comportamento das amostras sob carregamento de tração. A esse comportamento foi atribuído o fato de que, em amostras testadas com maiores preenchimentos, maiores quantidades de material são depositadas e, conseqüentemente, maiores densidades e menos vazios internos são observados. Essas são características favoráveis à resistência do material sob tração. Elmrabet e Siegkas (2020), porém, verificaram que essa dependência é menos significativa em amostras de menores dimensões, sugerindo assim que a geometria do produto também tem fator significativo no comportamento mecânico e atribuindo possivelmente isso ao efeito das paredes de contorno, que, em amostras menores, tem influência proporcionalmente maior.

#### **5.1.4 Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob tração**

A influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento mecânico de amostras de PLA sob carregamento de tração foi investigada por Verbeeten, Lorenzo-Bañuelos e Arribas-Subiñas (2019); Benwood et al., 2018 e Luzanin et al. (2018). Foi constatada melhoria nas propriedades mecânicas das amostras quando a temperatura de aquecimento de mesa era próxima à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), por aumentar a adesão entre as camadas, diminuir a quantidade de poros e, ainda, por não degradar o material, fato observado em temperaturas de aquecimento de mesa muito elevadas.

#### **5.1.5 Influência da temperatura de impressão no comportamento de amostras sob tração**

Benwood et al. (2018) analisaram a influência de diferentes temperaturas de impressão no comportamento de amostras de PLA sob tração. Os melhores comportamentos sob carregamento de tração foram obtidos em impressões realizadas a 200°C, nas quais foram observadas, em análises microscópicas, estruturas com menos vazios. A influência desse parâmetro de impressão no comportamento mecânico foi atribuída à força de ligação entre as camadas individuais do material impresso, em que a temperatura deve permitir a fusão parcial da camada aplicada, favorecendo, assim, a sua adesão às demais camadas.

Gao, Yu e Li (2020) sugeriram um dispositivo de aquecimento auxiliar, instalado no bico de extrusão, que fornece energia térmica ao material logo antes de ser depositado, com o intuito de melhorar a adesão entre as camadas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas das amostras, ao prolongar o tempo em que o material se mantém com temperatura acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). Houve aumento tanto na resistência à tração, quanto na deformação de ruptura para todas as amostras testadas com diferentes temperaturas de aquecimento auxiliar, quando comparadas com aquelas impressas sem esse dispositivo. Foi observado também diminuição do grau de anisotropia do material, quando diferentes orientações de impressão resultavam em resistência e ductilidade semelhantes, ao serem impressas com aquecimento auxiliar maior. A temperatura de aquecimento

auxiliar para o PLA que resultou em amostras com mais resistência e ductilidade em resposta a carregamentos de tração foi 130°C.

#### **5.1.6 Influência da velocidade de impressão no comportamento de amostras sob tração**

Verbeeten, Lorenzo-Bañuelos e Arribas-Subiñas (2019); Huang et al. (2018) e Luzanin et al. (2018) investigaram a influência da velocidade de impressão no comportamento mecânico de amostras de PLA e ABS submetidos a ensaio de tração. Foi observada a influência da velocidade de impressão, principalmente em conjunto com outros parâmetros, como a espessura da camada e controles de temperatura. Os autores destacaram que, em velocidades mais altas, o efeito da temperatura no material poderia ser menor, afetando assim a adesão com as camadas adjacentes, resultando também em menor cristalinidade do material.

#### **5.1.7 Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob tração**

Alguns estudos, além de realizar os ensaios mecânicos, caracterizando as amostras e verificando diferentes respostas aos carregamentos com diferentes combinações de parâmetros de impressão, também experimentaram diferentes pós-processamentos como formas de melhoria do comportamento mecânico das amostras testadas. Os pós-processamentos nos quais foi analisada a influência na resposta à tração foram tratamentos superficiais com epóxi e tratamentos térmicos de recozimento.

O processo de tratamento com epóxi foi testado por Huynh et al. (2020) e revelou ter três efeitos distintos no desempenho mecânico do ABS impresso, que inclui mudanças no módulo de elasticidade, parâmetros de força e deformação de ruptura. As amostras impressas na orientação horizontal tratadas com epóxi exibiram as mudanças mais significativas em comparação com as amostras sem pós-processamento, nas quais o módulo de elasticidade aumentou cerca de 34%, atribuídos à infiltração do epóxi na estrutura da amostra, diminuindo os poros e aumentando a seção transversal, enquanto a ductilidade e a deformação de ruptura



foram reduzidas em aproximadamente 75% respectivamente, atribuídas à degradação do material devido à diluição do epóxi nele.

Tratamento térmico de recozimento foi utilizado por Benwood et al. (2017) para verificarem possibilidade de melhoria de propriedades mecânicas de PLA obtidas por Manufatura Aditiva. Com o recozimento próximo à temperatura de transição vítrea do material, era esperado, além do relaxamento das tensões internas, um aumento no grau de cristalinidade e, conseqüentemente, melhor comportamento mecânico. As amostras foram recozidas em dois grupos, a 80°C e a 100°C, ambos durante uma hora. Foi observada melhoria no comportamento mecânico das amostras sob carregamento de tração, principalmente do módulo de elasticidade, atribuída principalmente ao aumento da cristalinidade do material.

## **5.2 Ensaio de compressão**

Os estudos selecionados que realizaram ensaios de compressão utilizaram as normas ASTM D695 e ISO 604, apontadas por White (2015) como os padrões aplicáveis para Manufatura Aditiva, mediante ajustes e orientações para medições de compressão. As normas fornecem medição do módulo de compressão, tensão de escoamento compressiva, resistência à compressão na falha e deformação compressiva na falha. Elas apresentam restrições geométricas para o diâmetro e altura da amostra. O baixo enfoque nesse tipo de ensaio pode ser visto nesta revisão, em que menos de 15% dos estudos selecionados efetuaram o ensaio de compressão, devido à relativa irrelevância do carregamento de compressão em problemas práticos em polímeros.

O comparativo com outros processos de fabricação foi explorado por Song et al. (2017), que evidenciaram comportamento superior dos corpos de provas obtidos por Manufatura Aditiva em comparação com os moldados por injeção plástica, quando submetidos à carga compressiva.

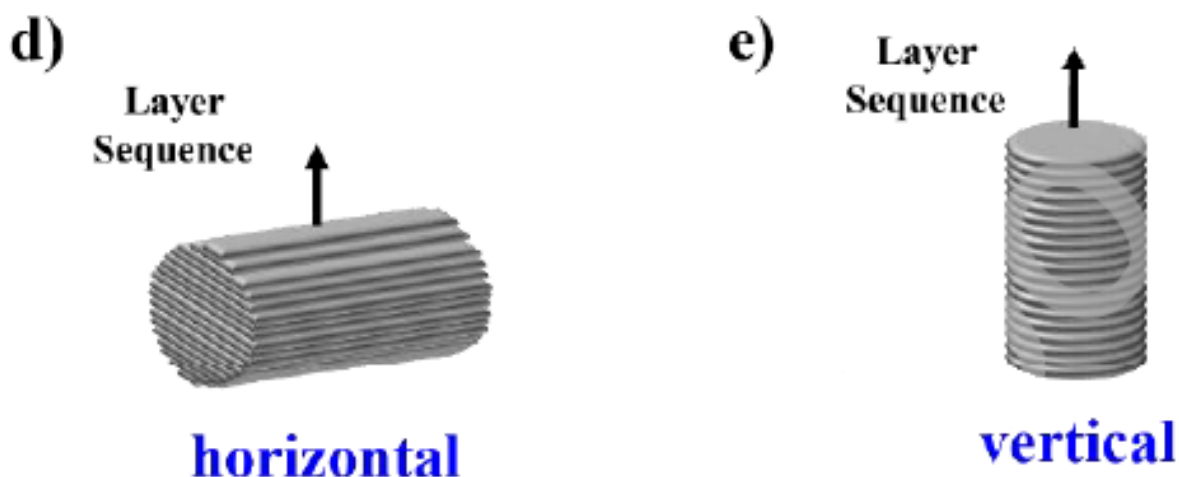
Mercado-Colmenero et al. (2019), executaram o ensaio de compressão através da norma ISO 604. Os dados obtidos nesse procedimento foram inseridos em softwares de simulação virtual. Um componente mecânico, obtido por Manufatura Aditiva, e um análogo, modelado em CAD, foram analisados fisicamente e por meio da simulação virtual. Os resultados obtidos foram semelhantes, validando assim o procedimento e os dados coletados baseados na norma em questão.

Os parâmetros de impressão verificados nos estudos selecionados que executaram ensaio de compressão foram apenas a orientação de impressão e a porcentagem de preenchimento. Esses parâmetros serão discutidos nos subcapítulos a seguir, quanto à influência no comportamento das amostras submetidas à carga de compressão.

### 5.2.1 Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob compressão

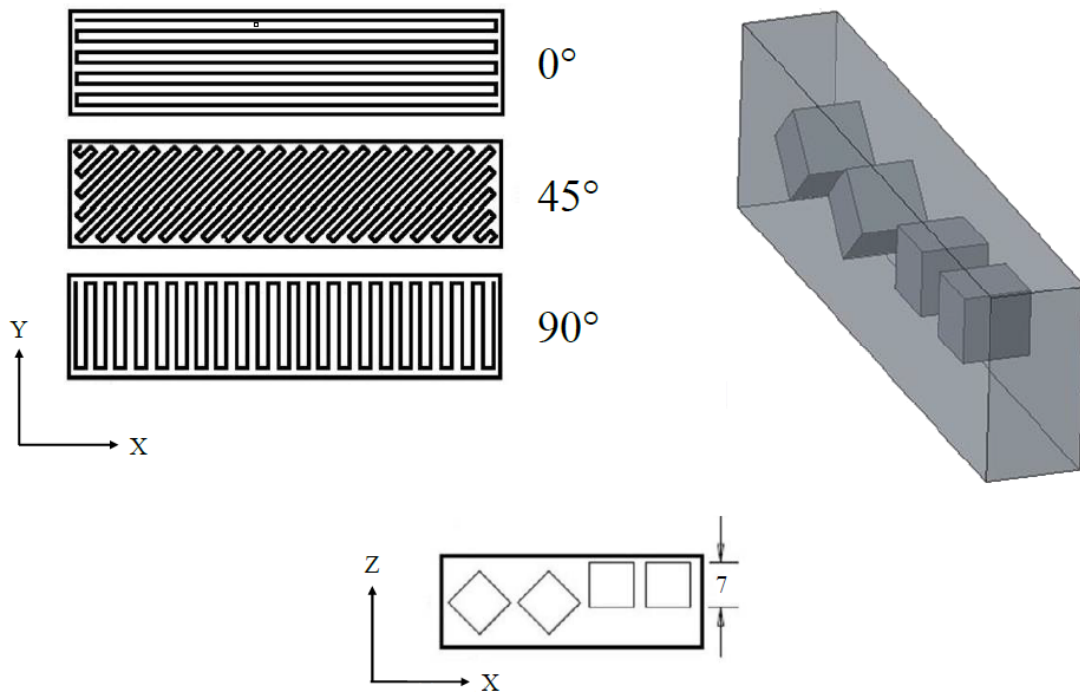
Huynh et al. (2020), utilizando ABS, verificaram que a orientação de impressão resultou em um efeito significativo no comportamento mecânico geral, ocorrendo uma mudança perceptível no módulo de elasticidade na compressão e resistência ao escoamento, quando impressas na orientação de  $0^\circ$  (figura 8). A resistência ao escoamento na compressão do ABS impresso verticalmente foi 18% maior do que o impresso horizontalmente. Song et al. (2017), utilizando PLA, obtiveram menores diferenças entre as orientações experimentadas, mas, ainda assim, as orientações a  $0^\circ$ , e a  $45^\circ$  (figura 9) de forma similar, alcançaram maiores valores para módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão máxima.

Figura 8 - Orientações de impressão utilizadas por Huynh et al. (2020)



Fonte: adaptado de HUYNH et al., 2020

Figura 9 - Orientações de impressão utilizadas por Song et al. (2017)



Fonte: adaptado de SONG et al., 2017

### 5.2.2 Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob compressão

Elmrabet e Siegkas (2020), utilizando PLA, verificaram que a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade na compressão do material divergiram consideravelmente com base na porcentagem de preenchimento, atingindo o seu máximo quando utilizado 100% de preenchimento. Os autores atribuíram essa condição a maior quantidade de material presente na amostra quando impressa com 100% de preenchimento, e conseqüentemente a maior consolidação.

### 5.2.3 Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob compressão

Alguns dos estudos selecionados verificaram a influência de diferentes processos de pós-processamento no comportamento das amostras sob carregamento de compressão.

O pós-processamento utilizado por Huynh et al. (2020), tratamento com epóxi, não surtiu efeito significativo no desempenho quando submetido ao ensaio de compressão, no qual os valores obtidos das propriedades investigadas permaneceram quase inalterados após o tratamento com epóxi diluído. Essa inalteração foi atribuída à camada relativamente fina depositada do epóxi diluído que resultou em área de seção transversal inalterada.

O pós-processamento utilizado por Song et al. (2017), um tratamento térmico de recozimento em temperatura logo abaixo à temperatura de transição vítrea, também não foi benéfico para as propriedades exploradas, obtendo uma diferença insignificante no ensaio de compressão.

### **5.3 Ensaio de flexão**

Os ensaios de flexão realizados nos estudos selecionados seguiram as normas ASTM D790 e ISO 178, que, segundo White (2015), são padrões equivalentes e que utilizam um método de dobra de três pontos para medir o módulo de flexão, resistência à flexão, tensão de flexão e deformação na ruptura. Huang et al. (2018) informaram terem utilizado a norma GB/T 9341-2008, também equivalente a ISO 178. Todas essas normas não abordam os desafios específicos para materiais processados por Manufatura Aditiva, que podem ter propriedades anisotrópicas. Grellmann e Seidler (2013) destacam que a carga de flexão é um dos tipos de carga mais comuns encontrados na prática, portanto, é altamente significativo para determinar os valores característicos de polímeros. No entanto, menos de 20 % dos estudos fizeram o ensaio de flexão.

Em comparativo com outros processos de fabricação, Benwood et al. (2018) exploraram a otimização dos parâmetros de impressão e aplicação de pós-processamento para obterem amostras de PLA com propriedades mecânicas comparáveis e, em alguns casos, superiores a amostras obtidas com moldagem por injeção plástica. Kaynak e Varsavas (2018) também verificaram semelhanças no comportamento de amostras de PLA impressas e moldadas quando submetidas à carga de flexão. Porém, para amostras de PLA com carregamento de fibra de vidro, foi observada grande influência do processo de fabricação, com as amostras obtidas por moldagem com comportamento superior às obtidas por impressão. Tal

comportamento foi atribuído à orientação das fibras no sentido perpendicular ao sentido de aplicação da força, obtida pela pressão aplicada no processo de injeção.

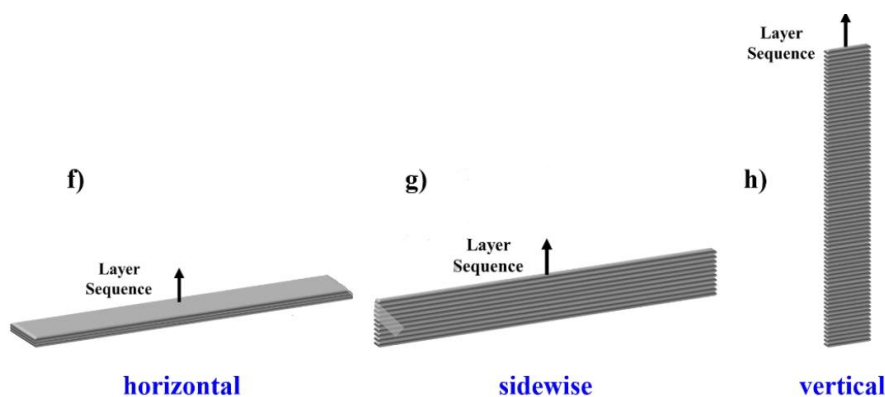
Kaynak e Varsavas (2018) analisaram o efeito da adição de reforços materiais no comportamento das amostras submetidas à flexão. Foram adicionados reforços materiais em três grupos diferentes de amostra: fibra de vidro para um grupo, elastômero termoplástico do tipo poliuretano em um segundo conjunto de amostras e ambos os carregamentos para o um terceiro grupo de amostras e comparadas com amostras em PLA puro. Foram observadas melhorias consideráveis no comportamento das amostras sob flexão quando reforçadas com fibra de vidro ou quando reforçadas com fibra de vidro em conjunto com o elastômero termoplástico do tipo poliuretano. As amostras reforçadas apenas com o elastômero termoplástico do tipo poliuretano alcançaram comportamento inferior quando comparadas às amostras em PLA puro.

Os parâmetros de impressão avaliados pelos estudos selecionados que executaram o ensaio de flexão foram orientação de impressão, porcentagem de preenchimento, espessura das camadas e temperatura de aquecimento de mesa, que serão discutidos nos subcapítulos a seguir.

### **5.3.1 Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob flexão**

A orientação de impressão foi discutida por Huynh et al. (2020) e mostrou influenciar nas propriedades mecânicas do ABS obtido por Manufatura Aditiva, ao ser submetido à flexão. Foram experimentadas três orientações de impressão, conforme a figura 10. As amostras impressas lateralmente, ou seja, com as camadas dispostas perpendiculares à aplicação de força, obtiveram os melhores resultados para módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão máxima e deformação até fratura.

Figura 10 - Orientações de impressão utilizadas por Huynh et al. (2020)



Fonte: adaptado de HUYNH et al., 2020

Benwood et al. (2018), em experimento com o PLA como matéria-prima e com impressões multidirecionais, observaram como ideal para as propriedades mecânicas de amostras sob solicitação de flexão a orientação de impressão a 45°, embora tenham atribuído impacto insignificante para esse fator. Assim como Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a), também em estudo com o PLA, que verificaram poucas alterações nos valores de resistência à flexão e tensão máxima de flexão.

### 5.3.2 Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob flexão

A porcentagem de preenchimento foi discutida por Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a) e demonstrou tendência de aumento na resistência à flexão quando aumentada a porcentagem de preenchimento, atribuída ao aumento da deposição de material nas amostras, alcançando conseqüentemente uma estrutura mais densa e compacta.

### 5.3.3 Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob flexão

Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020a), em ensaio com PLA e espessura de camadas de 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm, verificaram influência do aumento da espessura da camada no aumento da resistência à flexão, explicando que, assim, o componente

sofre menos processos de aquecimento e resfriamento, diminuindo as distorções causadas pelo acúmulo de tensão durante a formação do vínculo entre as camadas.

No entanto, Huang et al. (2018), utilizando ABS como matéria-prima e espessura de camadas de 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm, verificaram que camadas com espessuras menores apresentaram melhor comportamento sob flexão e atribuíram esse fato a menor quantidade de vazios internos que esse parâmetro favorece.

#### **5.3.4 Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob flexão**

Benwood et al. (2018) verificaram influência da temperatura de aquecimento de mesa que, com o seu aumento, melhorou claramente as propriedades mecânicas, mantendo-se principalmente acima da temperatura de transição vítrea para maximizar a força de ligação entre camadas depositadas. A influência da temperatura de impressão também foi avaliada por Benwood et al. (2018), com a qual o PLA demonstrou ter melhores resultados quando submetido à flexão, ao ser impresso a 200°C, evidenciando que temperaturas acima da temperatura de fusão não são benéficas para o material.

#### **5.3.5 Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob flexão**

Foram avaliadas, em alguns dos estudos selecionados, intervenções após processo de impressão, como tratamento superficial com epóxi e tratamento térmico de recozimento, com o objetivo de obter melhor comportamento mecânico das amostras sob carregamento de flexão.

Huynh et al. (2020) utilizaram como pós-processamento um tratamento superficial com epóxi em amostras de ABS, conforme já descrito em outros ensaios, e esse processo não apresentou melhorias no desempenho sob flexão. Para as amostras impressas verticalmente e horizontalmente, os valores de módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão máxima e deformação até a falha exibiram alterações insignificantes, enquanto a amostra impressa lateralmente obteve maiores variações, porém de forma negativa.

Benwood et al. (2018) verificaram a influência de recozimento no comportamento mecânico de amostras de PLA submetidas à flexão. A alta dependência dos parâmetros de impressão de características térmicas certificada por esses autores, os levaram a verificar se o tratamento térmico pós impressão ainda influenciaria as melhorias verificadas na cristalinidade do material e, conseqüentemente, no seu comportamento mecânico quando submetido à flexão. Foram observadas melhorias no módulo de elasticidade e na resistência à flexão nas amostras de PLA quando submetidas a recozimento a 80°C e, também, a 100°C durante uma hora. O recozimento, aliado à otimização de parâmetros, permitiu amostras impressas atingirem propriedades mecânicas comparáveis com amostras moldadas, superando inclusive os efeitos obtidos no controle de parâmetro de temperatura de aquecimento de mesa e temperatura de impressão.

#### **5.4 Ensaio de Impacto**

Dentre os estudos selecionados, aproximadamente 50% realizaram o ensaio de impacto. Foram utilizadas diversas normas para os ensaios, sendo mais usadas ISO 179 e ASTM D6110, que descrevem o método para o ensaio de impacto Charpy, e ISO 180 e ASTM D256, que são os padrões para o ensaio de impacto Izod.

Comparativo com outros métodos de fabricação foi investigado por Lay et al. (2019), que verificaram uma piora na resistência ao impacto do ABS e do PLA impressos quando comparados aos moldados por injeção plástica, assim como observado também por Galeja et al. (2019), ao avaliar somente o ABS. O ABS obteve resistência ao impacto aproximadamente 50% menor quando impresso, enquanto o PLA chegou a ser cerca de 70% menor também quando impresso. A redução da resistência ao impacto em amostras impressas foi atribuída à alta absorção de umidade e aos vazios internos ocasionados pela baixa difusão característica da Manufatura Aditiva.

Os estudos que realizaram ensaio de impacto avaliaram a influência dos parâmetros de impressão no comportamento das amostras submetidas a esse esforço. Os parâmetros de impressão avaliados foram orientação de impressão, espessura das camadas, porcentagem de preenchimento, temperatura de aquecimento de mesa e padrão de preenchimento, que serão discutidos nos subcapítulos a seguir.



#### **5.4.1 Influência da orientação de impressão no comportamento de amostras sob impacto**

A orientação de impressão foi investigada por Arbeiter et al. (2018) e Benwood et al. (2018), que não encontraram grandes diferenças na resistência ao impacto das amostras de PLA obtidas com diferentes orientações de impressão, apesar de notáveis diferenças nas características das fraturas. Tal semelhança no comportamento, mesmo com variação da orientação de impressão, foi vista como um indicativo de que é possível ter amostras homogêneas através de otimização dos outros parâmetros controlados.

No entanto, Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020b) verificaram influência da variação da orientação de impressão na resistência ao impacto em amostras de PLA. Conforme a orientação de impressão aumenta de 0° para 30°, a resistência ao impacto aumentou, e, em seguida, ao variar de 30° para 60°, a resistência diminuiu. Galeja et al. (2019) constataram também influência para amostras de ABS. Tais divergências podem ser atribuídas ao tipo de impressão de cada estudo, sendo que menores diferenças são observadas em impressões multidirecionais, e maiores diferenças são constatadas em impressões unidirecionais, por favorecerem, assim, o caráter anisotrópico característico da Manufatura Aditiva.

#### **5.4.2 Influência da espessura das camadas no comportamento de amostras sob impacto**

A variação de espessura de camada e, conseqüentemente, da quantidade de camadas na amostra, foram exploradas por Hadidi et al. (2019), Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020b) e Tezel, Ozenc e Kovan (2020). As conclusões foram divergentes para esse parâmetro. Hadidi et al. (2019) afirmam que amostras com um maior número de camadas resultam em maior resistência ao impacto, devido cada camada agir como uma barreira para a fratura, mitigando assim a energia cinética do processo. No entanto, Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020b) observaram que um valor mais alto de espessura de camada, resultando em menos camadas, contribui para o maior valor médio da resistência ao impacto das amostras de PLA.

Tezel, Ozenc e Kovan (2020) verificaram, para o PLA, que a alteração da espessura de camada resultou em baixas variações na resistência ao impacto,

considerando assim desprezível a influência da espessura da camada para o comportamento do PLA em resposta a impactos. Já para o ABS, foi observada grande influência da espessura da camada em conjunto com a orientação de impressão, resultando em diferentes comportamentos para diferentes configurações, com o melhor comportamento quando impresso com orientação igual a direção de impacto e com 0,3mm de camada.

#### **5.4.3 Influência da porcentagem de preenchimento no comportamento de amostras sob impacto**

Bardiya, Jerald e Satheeshkumar (2020b) também exploraram a influência da porcentagem de preenchimento na resistência ao impacto e concluíram que, quanto maior a porcentagem de preenchimento, maior a resistência ao impacto da amostra, o que pode ser atribuído à diminuição de espaços vazios no interior do material. No entanto, Mishra et al. (2020) verificaram melhoria na resistência ao impacto quando se aumentou a porcentagem de preenchimento até 85% e, desse valor até 100%, iniciou-se um decréscimo na propriedade. Esse comportamento foi atribuído à facilidade de propagação de trincas em preenchimentos acima de 85%, devido à alta ligação entre as camadas. O comportamento em preenchimentos de até 85%, diferentemente, por possuir vazio entre as camadas, favoreceu a não propagação das trincas, resultando em maior resistência a impactos.

#### **5.4.4 Influência da temperatura de aquecimento de mesa no comportamento de amostras sob impacto**

Wang, Gramlich e Gardner (2017) verificaram grande influência da variação de temperatura de aquecimento de mesa na resistência ao impacto de amostras de PLA. Quando parametrizada a temperatura de aquecimento de mesa a 160°C, obtiveram grande resistência ao impacto, se comparado com outras amostras impressas em temperatura de aquecimento de mesa a 30°C e até mesmo a amostras obtidas por moldagem por injeção plástica. Análises microscópicas revelaram que as amostras de PLA impressas com temperatura de aquecimento de mesa de 160°C produziram os menores poros internos, atribuídos a maior grau de difusão oferecido pela parametrização definida.

Benwood et al. (2018) obtiveram parecer semelhante, também ao verificarem influência da variação da temperatura de aquecimento de mesa para amostras de PLA em relação a resistência a impactos e atribuíram tal melhoria ao grau de cristalinidade que é aumentado ao se manter o material em alta temperatura por mais tempo quando depositado.

#### **5.4.5 Influência do padrão de preenchimento no comportamento de amostras sob impacto**

O padrão de preenchimento foi explorado por Aloyaydi, Sivasankaran e Mustafa (2020), e os resultados obtidos demonstraram que o tipo de padrão utilizado na impressão influenciou nas propriedades mecânicas das amostras de PLA. O padrão triangular alcançou maior absorção de impactos, quando comparado com outros padrões experimentados, e isso se deve ao fato de que o padrão triangular possuía melhor união entre as camadas e mais pontos de contato entre as camadas por unidade de área. No entanto, verificando também o padrão de preenchimento em amostras de PLA, Mishra et al. (2020) observaram maior absorção de impacto nos padrões linear e “zig-zag”, seguidos pelo padrão concêntrico, com diferenças significativas para os demais padrões (cruzado, concêntrico 3d, cruzado 3d, cúbico com subdivisões, octogonal, cúbico, triangular e hexagonal), o que pode estar relacionado com espaços vazios e união de camadas provenientes de cada padrão.

#### **5.4.6 Influência de pós-processamentos no comportamento de amostras sob impacto**

Em alguns estudos, foi avaliada a influência de pós-processamento no comportamento das amostras obtidas por Manufatura Aditiva em ensaio de impacto. Hadidi et al. (2019) investigaram o comportamento de amostras de ABS submetidas a um tratamento superficial chamado *shot peening*. O *shot peening* consiste em uma técnica que é feita em esferas de metal ou cerâmica descarregadas em alta pressão sobre o material a ser tratado, causando deformações e induzindo tensões compressivas sobre superfície e estrutura da amostra tratada. Foi constatado que o comportamento mecânico das amostras é altamente influenciado pela frequência de *shot peening* nas camadas da impressão. Os resultados sugerem que o *shot peening*

menos frequente fornece melhor comportamento de impacto. Essa melhoria foi atribuída à melhor compactação do material, favorecendo assim a sua resistência a impactos.

Amostras de PLA tratadas termicamente por recozimento foram analisadas por Benwood et al. (2018), que verificaram grande influência desse tratamento na resposta ao ensaio de impacto. Tal influência foi atribuída ao grau de cristalinidade, que aumentou com o pós-processamento analisado e, conseqüentemente, contribuiu para a melhoria da resistência ao impacto. Esse pós-processamento foi apontado como solução para problemas de heterogeneidade estrutural, comum em modelos de grandes dimensões, devido à grande variação de temperatura no decorrer do processo.

## **5.5 Ensaio de cisalhamento**

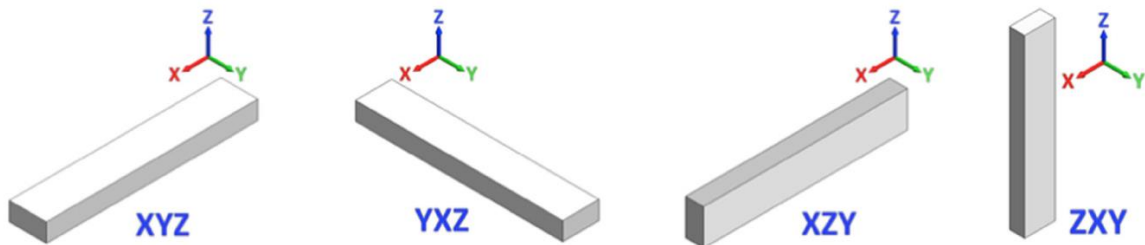
O ensaio de cisalhamento foi realizado por apenas um estudo, dentre os selecionados, onde Ferreira et al. (2017) avaliam a influência da adição de fibras de carbono nas propriedades de cisalhamento de amostras de PLA, utilizando como referência a norma ASTM D3518-13. White (2015) destaca que a norma ASTM D3518-13 é desenvolvida para polímeros reforçados com fibras de alta resistência ou têxteis com orientação específica de carregamento, salientando que não é uma norma aplicável diretamente para Manufatura Aditiva. White (2015) considera aplicável para Manufatura Aditiva, para ensaios de cisalhamento, apenas as normas ISO 15310:1999 e ASTM D4254, por permitirem testes em materiais anisotrópicos, embora não tenham orientação para construção das amostras por Manufatura Aditiva.

Ferreira et al. (2017) investigaram a influência da adição de fibras de carbono na resposta de cisalhamento do PLA obtido por Manufatura Aditiva. Foram adicionados na matriz de PLA, em proporção de 15% de peso, fibras de carbono de comprimento estimado de 60  $\mu\text{m}$ . O módulo de cisalhamento no plano para o PLA com adição de fibra foi cerca de 1,16 vezes maior do que a mesma propriedade para o PLA, e a tensão máxima de cisalhamento para o PLA reforçado com fibras foi cerca de 1,07 vezes maior que o constatado para o PLA. O baixo ganho nas propriedades de cisalhamento com a adição de fibra no PLA foi atribuído à fraca adesão entre as fibras e o PLA.

## 5.6 Ensaio de torção

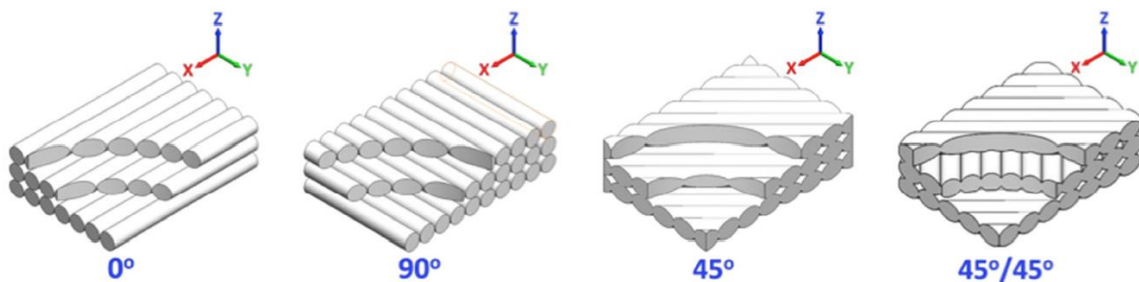
Utilizando a norma ASTM D5279-13, Balderrama-Armendariz et al. (2018) conduziram o único estudo dentre os selecionados com realização de ensaio de torção. Foram utilizadas, no ensaio, amostras de ABS obtidas por Manufatura Aditiva, com variações dos parâmetros de orientação de impressão (figura 11) e ângulo das camadas (figura 12), orientações mais comuns da norma ASTM F2921-11, além de amostras moldadas por injeção plástica.

Figura 11 – Orientações de impressão utilizadas por Balderrama-Armendariz et al. (2018)



Fonte: BALDERRAMA-ARMENDARIZ et al.,2018

Figura 12 – Orientação de camadas utilizadas por Balderrama-Armendariz et al. (2018)



Fonte: BALDERRAMA-ARMENDARIZ et al.,2018

Foi avaliada a influência de combinações de orientação de impressão e ângulos das camadas, para as propriedades módulo de cisalhamento, tensão de escoamento, tensão máxima e deformação de ruptura. A orientação YXZ com as camadas em 0° foi estabelecida como a combinação mais adequada identificada na análise de

otimização de resposta, considerando todas as propriedades de torção avaliadas, com resultados análogos ao obtido na amostra moldada por injeção plástica.

Os resultados para o módulo de cisalhamento, considerando todas as variações de parâmetro experimentadas, demonstraram grande semelhança. As combinações XYZ-0° e ZXY-45°/45° exibiram propriedades levemente superiores às demais. Não houve diferença significativa para o módulo de cisalhamento comparando amostras obtidas por Manufatura Aditiva e moldadas por injeção plástica.

A tensão de escoamento foi altamente influenciada pelo ângulo das camadas em interação com a orientação de impressão, observando resultados superiores para as combinações XYZ-0°, XZY-0°, YXZ-0° e ZXY-90° se comparadas com as outras combinações e inclusive com a amostra moldada por injeção plástica.

Para a tensão máxima, os parâmetros definidos e a interação entre eles através das diversas combinações demonstraram grande influência nos resultados. A combinação YXZ 0° obteve o melhor resultado, inclusive se comparado com a amostra moldada por injeção plástica, e diferenças significativas para as demais amostras. No entanto, a combinação YXZ 90° obteve a menor resistência, também com diferenças significativas para as demais amostras.

Todas as amostras obtidas por Manufatura Aditiva alcançaram resultados de deformação de ruptura sem diferenças significativas entre elas, porém consideravelmente abaixo quando comparadas com amostras obtidas por moldagem por injeção plástica. O comportamento inferior observado nessa propriedade foi atribuído por Balderrama-Armendariz et al. (2018) à capacidade do processo FDM em produzir componentes com propriedades elásticas semelhantes em torção, mas com menos ductilidade do que componentes de moldagem por injeção.

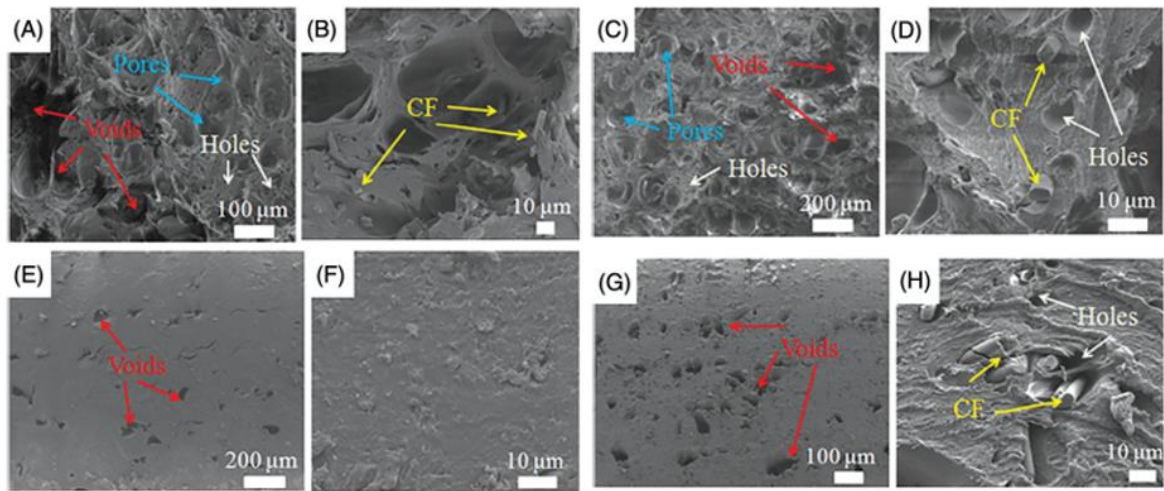
## **5.7 Observações microestruturais**

Alguns estudos selecionados suportaram suas avaliações em observações microestruturais, obtidas com análises microscópicas variadas. Tais análises possibilitaram verificar o comportamento estrutural das amostras impressas, por meio da identificação de vazios, poros, fibras.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi a principal ferramenta de análise e foi utilizado por mais de 50% dos estudos selecionados. O uso desse recurso permitiu visualizar diferenças estruturais para os diferentes parâmetros utilizados

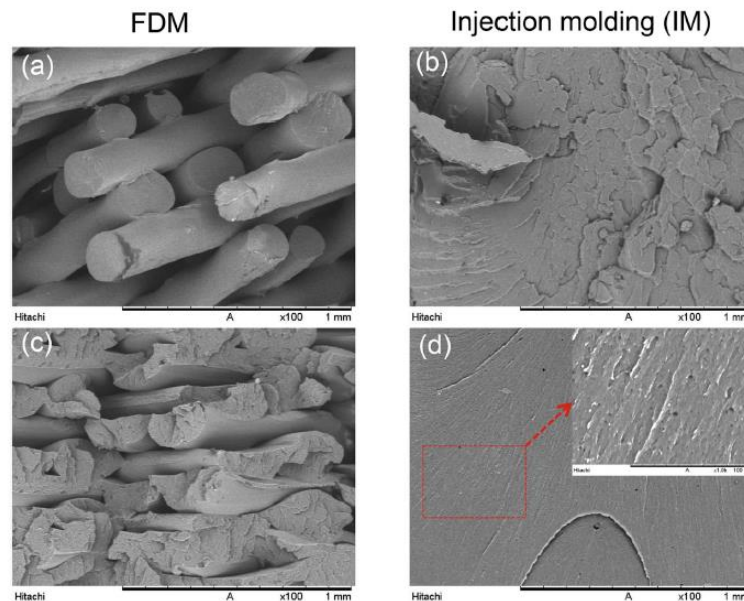
(figura 13), comparativo com outros processos de fabricação (figura 14), além de presença de reforços materiais como fibra de carbono (figura 15), e características da união entre as camadas nos diferentes polímeros explorados (figura 16).

Figura 13 – Morfologia da microestrutura de amostras obtidas por diferentes parâmetros de aquecimento auxiliar. (A) e (B): sem aquecimento auxiliar; (C) e (D): aquecimento auxiliar 60°C; (E) e (F): aquecimento auxiliar 130°C; (G) e (H): aquecimento auxiliar 200°.



Fonte: GAO, YU E LI, 2020

Figura 14 – Superfície de fratura de amostras de ABS (a e b) e PLA (c e d), com diferentes processos de fabricação.

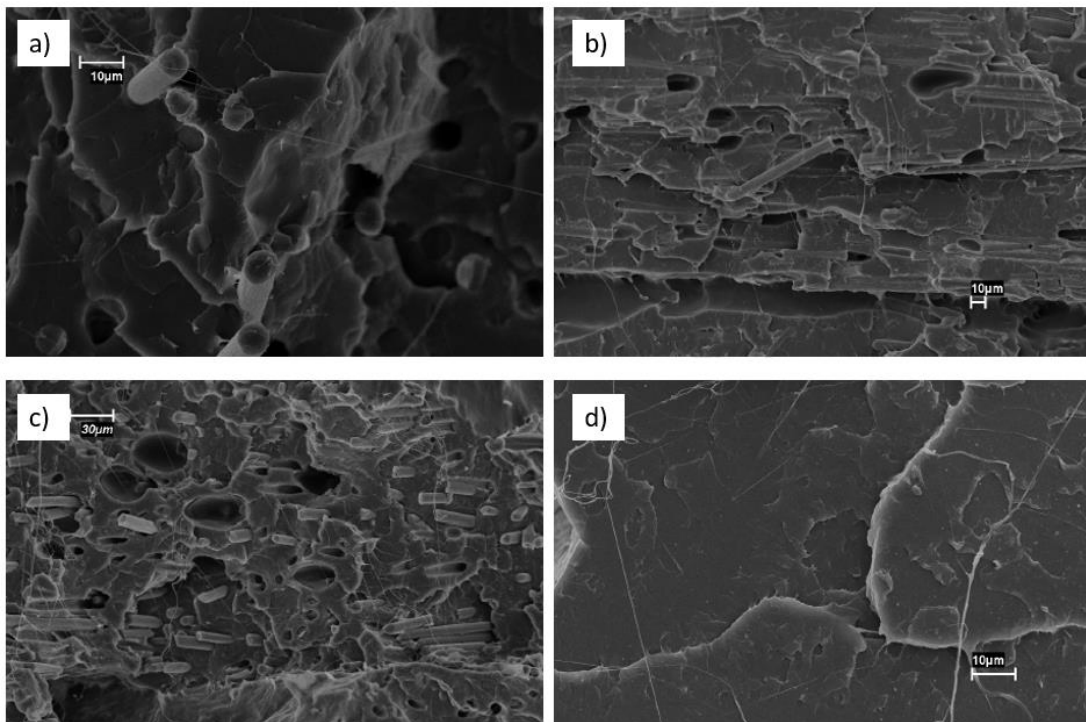


Fonte: LAY et al., 2019

Gao, Yu e Li (2020) esclarecem através de imagens obtidas por MEV (figura 13) os efeitos do uso de aquecimento auxiliar no processo FDM, podendo observar menos defeitos na estrutura, como poros e vazios, nas amostras impressas com aquecimento auxiliar de 130°C, quando comparadas às demais amostras.

Lay et al. (2019) expõem a microestrutura de amostras fabricadas em diferentes materiais, PLA e ABS, e também obtidas por diferentes processos de fabricação, Manufatura Aditiva e Injeção Plástica, em imagens obtidas por MEV (figura 14). É possível ver claramente diferenças entre os processos de fabricação, onde a microestrutura de amostras obtidas por Manufatura Aditiva apresenta vazios, defeitos e visível separação entre as camadas, enquanto as amostras obtidas por Injeção Plástica apresentam uma microestrutura mais limpa, demonstrando uma maior compactação do material.

Figura 15 – Presença de fibra de carbono na estrutura de amostras de PLA impressas (a: impresso em orientação 0°; b: impresso em orientação 90° e c: impresso em orientação +/-45°) e amostra de PLA puro.

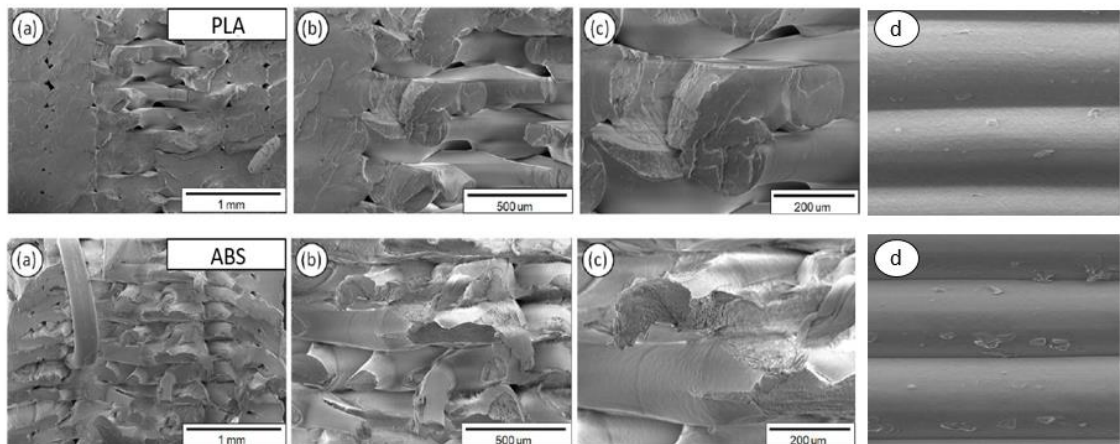




Na figura 15 Ferreira et al. (2017) demonstram que é possível visualizar vazios nas amostras reforçadas com fibra de carbono, diferentemente das amostras com PLA puro. A presença de vazios foi atribuída ao arrancamento das fibras durante as solicitações sofridas nos ensaios, devido à fraca adesão desse reforço material na matriz de PLA. Essa constatação colabora para as conclusões dos autores sobre a ineficiência da adição dos reforços materiais analisados na pesquisa em questão.

Vidakis et al. (2020) investigaram as superfícies fraturadas das amostras impressas de PLA e ABS, com o objetivo de obter informações sobre o processo e tipos de fratura, além de características da união entre as camadas e presença de defeitos. Podem ser observadas na figura 16 a interface entre as camadas das amostras com indícios de boa adesão, principalmente do PLA, demonstradas também nas superfícies de fratura.

Figura 16 – superfície de fratura (a, b e c) e superfície lateral (d) de diferentes materiais submetidos a ensaios de tração



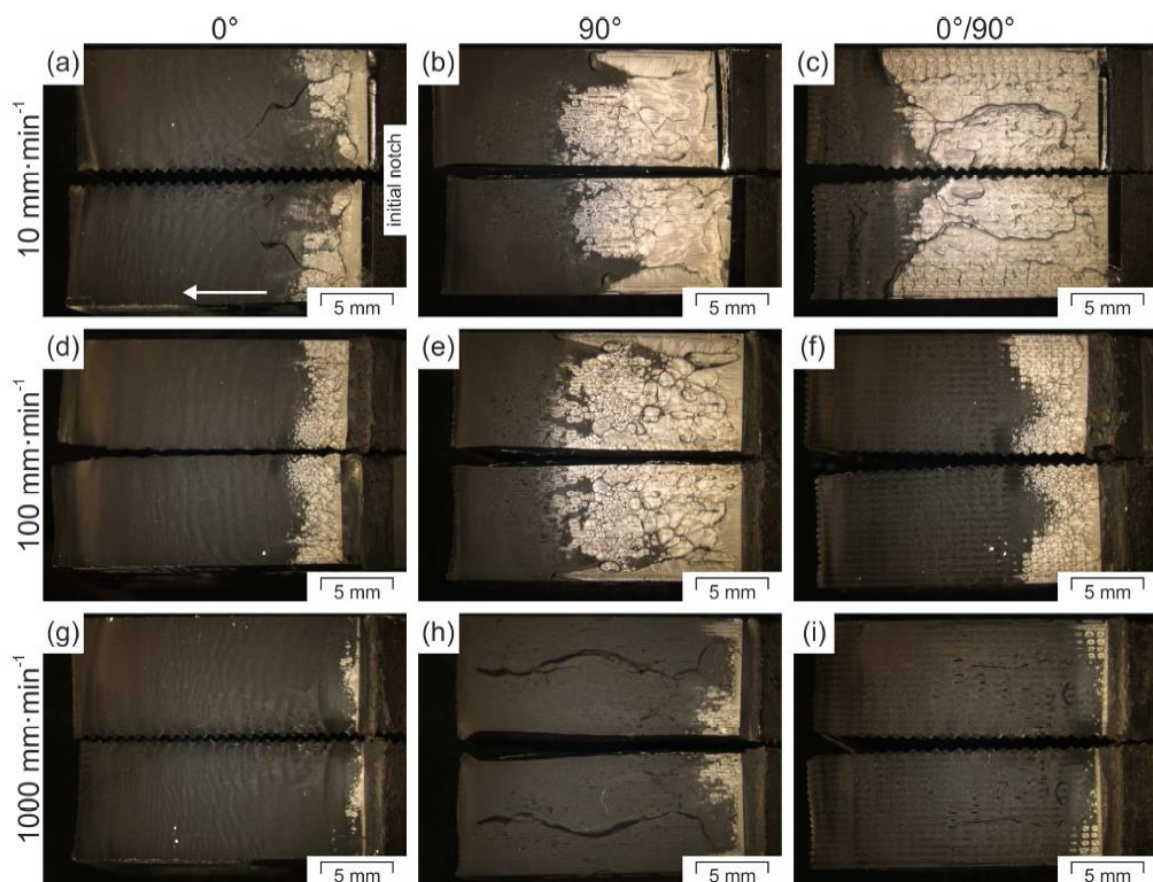
Fonte: adaptado de VIDAKIS et al. (2020)

Com o intuito de compreender melhor os mecanismos de falha e a influência dos parâmetros de impressão no comportamento das amostras, Ramezani Dana et al. (2018) ainda realizaram inspeção microscópica ótica e micro tomografia de raios-X, onde foi possível observar a direção de propagação da fratura, defeitos microestruturais em detalhes como tamanho da porosidade, forma, comprimento e orientação.

Utilizando microscópio, Arbeiter et al. (2018) verificaram as superfícies fraturadas das amostras de PLA submetidas ao ensaio de impacto. Foram observados

diferentes tipos de fratura na amostra, iniciando com fratura dúctil, nas regiões mais claras e com mais marcações, e finalizando em fratura frágil, caracterizada nas regiões mais escuras e de aspecto regular, por haver pouca deformação plástica no processo (figura 17). A influência das diferentes orientações de impressão e da velocidade de impacto utilizadas no ensaio pode ser observada pelos diferentes tipos de fratura resultantes.

Figura 17 - Superfícies fraturadas em diferentes parâmetros de impressão e velocidade de impacto.



Fonte: ARBEITERA et al., 2018

Luzanin et al. (2018) utilizaram a análise de Difração de Raio-X (DRX ou *X-Ray Diffraction* – XRD) e a análise por Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*) para verificarem o efeito de diferentes parâmetros de impressão no grau de cristalinidade de amostras de PLA. Foi observado que os parâmetros de impressão influenciam no grau de cristalinidade do material, que pode ser controlado com ajustes nos parâmetros. Porém não foi atribuída relação do aumento da cristalinidade com a melhoria do comportamento mecânico das amostras.

## 6.CONCLUSÃO

Esse estudo nos permitiu certificar que geralmente os produtos obtidos pela Manufatura Aditiva são mecanicamente mais frágeis se comparados aos desenvolvidos por outros processos tais como moldagem por injeção. Principalmente quando é considerado todo um conjunto de possíveis solicitações, vistas com os diferentes ensaios apurados. No entanto, quando se identifica as cargas a serem suportadas pelo componente e desde um considerável controle global de fatores apontados nesta revisão, como a determinação do material a ser utilizado, melhorias com pós-processamento e, principalmente, com a otimização dos parâmetros de impressão, é possível alcançar elementos com comportamento similar aos moldados.

As principais características descritas para o comportamento mecânico da Manufatura Aditiva ser diferente dos demais processos de fabricação é o seu caráter anisotrópico, devido sua construção camada a camada, e sua forte dependência térmica no processo que, à medida que o polímero fundido é colocado através do bico extrusor, tem sua temperatura de superfície, essencial para a adesão com as camadas adjacentes, diminuída rapidamente, ocasionando assim possíveis vazios internos e ligações comprometidas. Em contradição aos componentes obtidos por moldagem que são submetidos à alta pressão e temperatura em extensa duração, constitui, assim, partes de polímero com estrutura densa e alta cristalinidade. Portanto, os parâmetros de impressão com maior influência nas características mecânicas das amostras obtidas por Manufatura Aditiva são orientação de impressão e as relativas às temperaturas do processo, como temperatura de aquecimento de mesa e de impressão.

Os parâmetros de impressão estabelecem grande influência no comportamento mecânico de elementos obtidos por Manufatura Aditiva, sendo relevantes no direcionamento de projeto de componentes a serem produzidos pela Manufatura Aditiva. Assim como a utilização de pós-processamento, especialmente quanto aos tratamentos térmicos, tendendo a beneficiar as propriedades mecânicas de componentes formados a partir da Manufatura Aditiva.

Os principais ensaios realizados foram o de tração e o de impacto, observado tanto pela frequência utilizada nos estudos selecionados, quanto pela importância na investigação do comportamento em componentes poliméricos, devido a solicitações designadas na utilização.

O potencial da manufatura aditiva, incluindo a tecnologia FDM, como um processo de fabricação bem-sucedido pode ser considerado, visto que as características do processo são amplamente exploradas. O conhecimento dos efeitos das alterações nos parâmetros de impressão é um importante aspecto para o domínio do comportamento mecânico dos materiais obtidos por MA, e conseqüentemente para o avanço da sua utilização.

As normas utilizadas nos estudos selecionados não são específicas para a Manufatura Aditiva, portanto fornecem apenas direcionamentos para a condução dos ensaios. Uma vez que o caráter anisotrópico do processo possui importante impacto nas propriedades gerais dos materiais, sobretudo em produtos que recebem variados tipos e direções de solicitações mecânicas, o conhecimento de possíveis diferenças no comportamento torna-se importante. É sugerido para futuros estudos, aprofundamento nos procedimentos orientados pelas normas, a fim de alcançar metodologia ou adaptações ideais para a caracterização mecânica da MA, como exemplo, divulgação dos resultados com registro claro da direção de impressão testada ou orientação para ensaio em variadas direções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFROSE, Faujiya et al. **Effects of part build orientations on fatigue behavior of FDM-processed PLA material**. Progress in Additive Manufacturing. 2016.

ALBANO, Adilson Donizete. **Estudo comparativo de processos de usinagem de superfícies complexas**. São Paulo, 2007.

ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. **Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura**. XXIV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Contribuições Da Engenharia De Produção Para Uma Economia De Baixo Carbono: Bauru, 2017.

ALGARNI, Mohammed. **The Influence of Raster Angle and Moisture Content on the Mechanical Properties of PLA Parts Produced by Fused Deposition Modeling**. Polymers, 2021.

ALOYAYDI, Bandar; SIVASANKARAN, Subbarayan. MUSTAFA, Ammar. **Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid**. Polymer Testing, 2020.

ARBEITER, Florian et al. **Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication**. Polymer Testing, 2018.

BALDERRAMA-ARMENDARIZ, Cesar Omar et al. **Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.

BARDIYA, Shrikant; JERALD, J. SATHEESHKUMAR, V. **The impact of process parameters on the tensile strength, flexural strength and the manufacturing time of fused filament fabricated (FFF) parts**. Materials Today: Proceedings, 2020a

BARDIYA, Shrikant; JERALD, J. SATHEESHKUMAR, V. **Effect of process parameters on the impact strength of fused filament fabricated (FFF) polylactic acid (PLA) parts**. Materials Today: Proceedings, 2020b

BENWOOD, Claire et al. **Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)**. ACS Omega. 2018.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio. SIEBEN, Priscila Gritten. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, tecnologia e inovação. 2017.

CALLISTER JUNIOR; William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Traduzido por Sérgio Murilo Stamile Soares. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos, 2012.

CONFORTO, E. C.; SILVA, S. L.; AMARAL, D. C. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. Artigo desenvolvido para o 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CBGDP, Porto Alegre, 2011.

DIAS, João Paulo Salvador. **Estudo sobre eficiência energética em uma indústria de injeção plástica**. Guaratinguetá, 2013.

ELMRABET, Nabila; SIEGKAS, Petros. **Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts**. Polymer Testing, 2020.

FAROOQUE, Rehan; ASJAD, Mohammed, RIZVI, S.J.A. **A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review**. Materials today: proceedings, 2021.

FERREIRA, Rafael Thiago Luiz et al. **Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers**. Composites Part B, 2017.

GALEJA, Mateusz et al. **Static and Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS as a Function of Raster Angle**. Materials, 2020.

GAO, Xia; YU, Ning. LI, Jing. **Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive**. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components. Woodhead Publishing, 2020.

GIORDANO, Caio Mezzeti; ZANCUL, Eduardo de Senzi. RODRIGUES, Vinícius Picanço. **Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais**. Produção Online, 2016.

GRELLMANN, Wolfgang; SEIDLER, Sabine. **Polymer testing**. 2 ed. Munich: Hanser, 2013.

GROOVER, Mikell. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro, 1ª Ed. LTC, 2016.

GUPTA, Chhavi et al. **Microstructure and mechanical performance examination of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene thermoplastic parts**. Polymer, Engineering and Science, 2020.

HADIDI, Haitham et al. **Low velocity impact of ABS after shot peening predefined layers during additive manufacturing**. Procedia Manufacturing, 2019.

HALL, Nick. **New filament means you can print metal on any 3d printer**. 3d Print Industry. 01 jul. 2016. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/news/now-can-print-metal-3d-printer-85255/>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

HARADA, Julio. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

HUANG, Bai et al. **Study of Processing Parameters in Fused Deposition Modeling Based on Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Filament**. Polymer Engineering And Science, 2018.

HUYNH, Nha Uyen et al. **Property-Map of Epoxy-Treated and As-Printed Polymeric Additively Manufactured Materials**. International Journal of Mechanical Sciences, 2020.

KAMTHAI, Suthaphat; MAGARAPHAN, Rathanawan. **Thermal and mechanical properties of polylactic acid (PLA) and bagasse carboxymethyl cellulose (CMCB) composite by adding isosorbide diesters**. AIP Conference Proceedings. 2015.

KAYNAK, Cevdet; VARSAVAS, S Deniz. **Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites**. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018.

KUMAR, Ranvijay; SINGH, Rupinder. FARINA, Ilenia. **On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications**. PSU Research Review. 2018.

LADCHUMANANANDASIVAM, Rasiah. **Ciência dos polímeros e engenharia das fibras I**. Universidade Federal Do Rio Grande do Norte - Centro De Tecnologia Departamento de Engenharia Têxtil. Natal, 2006.

LAY, Makara et al. **Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding**. Composites Part B, 2019.

LIRA, Valdemir Martins. **Princípios de processos de fabricação utilizando metais e polímeros**. São Paulo: Blucher, 2017.

LIRA, Valdemir Martins. **Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D**. São Paulo: Blucher, 2021.

LUZANIN, Ognjan et al. **Impact of processing parameters on tensile strength, in-process crystallinity and mesostructure in FDM-fabricated PLA specimens**. Rapid Prototyping Journal, 2018.

MACHADO, Diogo Alexandre Antunes. **Desenvolvimento de impressora 3D para caracterização dos efeitos de parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PEEK**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2019.

MERCADO-COLMENERO, Jorge Manuel et al. **A numerical and experimental study of the compression uniaxial properties of PLA manufactured with FDM technology based on product specifications**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019.

MISHRA, Pradeep Kumar et al. **An investigation of study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts.** Composites communications, 2020.

OLIVERA, Sharon et al. **Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review.** Springer Science+Business Media: New York. 2016.

PAGANIN, L. C.; BARBOSA, G. F. **A comparative experimental study of additive manufacturing feasibility faced to injection molding process for polymeric parts.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020.

PANG, Xuan et al. **Polylactic acid (PLA):** Research, development and industrialization. Biotechnology Journal. 2010.

RAMEZANI DANA, H. et al. **Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties.** Journal of Manufacturing Processes, 2018.

RIZZO, Davide. **Proprietá meccaniche di componenti polimerici ottenuti via additive manufacturing.** Trabalho de Graduação – Università degli studi di Padova - Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, 2016.

RODRIGUES, Vinicius Picanço et al. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas: Bauru, 2017.

SAMYKANO, M. et al. **Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019.

SANTOS, Luana Machado et al. **Tipos de polímeros utilizados como materia prima no método de manufatura aditiva por fdm: uma abordagem conceitual.** XXXVIII encontro nacional de engenharia de produção: Maceió, 2018.

SHANMUGAM, Vigneshwaran et al. **Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials.** International Journal of Fatigue. 2018.

SONG, Y. et al. **Measurements of the mechanical response of unidirectional 3Dprinted PLA.** Materials & Design, 2017.

TEZEL, Tugce; OZENC, Murat. KOVAN, Volkan. **Impact properties of 3D-printed engineering polymers.** Materials today communications, 2020.

VERBEETEN, Wilco M.H. LORENZO-BAÑUELOS, Miriam. ARRIBAS-SUBIÑAS, Pablo J. **Anisotropic rate-dependent mechanical behavior of Poly (Lactic Acid) processed by Material Extrusion Additive Manufacturing.** Additive manufacturing, 2019.



VIDAKIS, Nectarios et al. **On the Strain Rate Sensitivity of Fused Filament Fabrication (FFF) Processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP Thermoplastic Polymers.** *Polymers*, 2020.

VOLPATO, Neri; COSTA, Carlos Alberto. **Competências e recursos da Rede de Manufatura Aditiva (RMA) no Brasil.** Itatiaia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânica. 7º Congresso Brasileiro de Fabricação, 2013.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** 1ª Edição digital, São Paulo: Blucher, 2017.

WANG, Lu; GRAMLICH, William M. GARDNER, Douglas J. **Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM).** *Polymer*, 2017

WHITE, Lilian. **Additive Manufacturing Materials, Standards, tests and aplicability.** New York: Nova publishers, 2015.

WIBERG, Anton; PERSSON, Johan. ÖLVANDER, Johan. **Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software.** *Rapid Prototyping Journal*. 2019

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. **A Review of Additive Manufacturing.** International Scholarly Research Network. ISRN Mechanical Engineering. 2012

ZAPAROLLI, Domingos. **O avanço da impressão 3D.** Pesquisa FAPESP, 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-avanco-da-impressao-3d/#:~:text=Dados%20da%20consultoria%20norte%2Damericana,7%2C3%20bilh%C3%B5es%20em%202017L>>. Acesso em: 18 Maio 2021.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas.** 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.