

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDA DE JESUS GOMES

Análise da Vida Útil do Cames Fabricado por Impressão 3D Utilizado na Chave Elétrica da
Locomotiva U20

BELO HORIZONTE

2025

FERNANDA DE JESUS GOMES

Análise da Vida Útil do Cames Fabricado por Impressão 3D Utilizado na Chave Elétrica da
Locomotiva U20

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2025

FERNANDA DE JESUS GOMES

Análise da Vida Útil do Cames Fabricado por Impressão 3D Utilizado na Chave Elétrica da
Locomotiva U20

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 10/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Dr. Anderson Júnior dos Santos

Prof. Dr. Wellington Lopes

AGRADECIMENTOS

Ao CEFET-MG, por me proporcionar uma formação acadêmica técnica de qualidade, pelo incentivo e apoio à mobilidade acadêmica no Instituto Politécnico de Bragança – Portugal, onde pude viver experiências enriquecedoras que levarei para toda vida, em que tive a oportunidade de conhecer diversas pessoas, algumas das quais se tornaram amigas da vida.

Ao meu professor e orientador Carlos Eduardo dos Santos pela orientação de excelência, disponibilidade, cordialidade, treinamento em equipamentos e acompanhamento em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus pais por todo apoio, amor, incentivo, investimento e confiança em mim e na minha formação acadêmica. Para meus avós, Edna de Jesus e José de Jesus (*in memoriam*), que almejavam o meu sucesso acadêmico tanto quanto qualquer outra pessoa, aconselhando e motivando com muito carinho.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e de outros departamentos da instituição, agradeço os ensinamentos, auxílio, dedicação e paciência, em especial a Tatiana Leal Barros, Rodrigo Tomas Nogueira Cardoso (*in memoriam*), Ricardo Saldanha de Moraes, Ivan José de Santana, Joel Lima, Wellington Lopes, Sandro Renato Dias e André Rodrigues da Cruz.

Aos funcionários, técnicos e estagiários do DEMAT pela disponibilidade e colaboração ao auxiliar na execução de ensaios e esclarecer eventuais dúvidas. Bem como, aos colegas que agregaram no meu conhecimento prestando auxílio e apoio nas disciplinas através do programa de monitoria extraclasse do Departamento de Matemática e Física.

Aos amigos e amigas, desde o ensino fundamental até o curso de graduação, passando pelo grupo PET (COMPET) e pelo intercâmbio, que compartilharam comigo inúmeros desafios e superações. O espírito acolhedor e colaborativo que compartilhamos tornou meus dias mais felizes e significativos.

Para minhas amigas que estiveram ao meu lado desde o início da minha formação acadêmica amparando nos momentos mais desafiadores Lucilene Santos, Andreia de Fátima, Deise Silva, Marcela Paulino, Isabela Honorio, Isabela Auler, Gabriella Albuquerque e Rose Gomes.

“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos.”

Marie Curie

RESUMO

A crescente demanda por materiais e métodos de fabricação que aumentem a vida útil de componentes críticos levou ao desenvolvimento do cames utilizado na chave elétrica da locomotiva U20, visando reduzir custos e otimizar processos produtivos, objetos contínuos de estudo na área de desenvolvimento da engenharia. Vale ressaltar que, um dos maiores desafios da indústria é repor peças para reparar componentes, devido à diversas dificuldades, como alto *leadtime* de entrega do material ou encerramento da produção de um item pelo fornecedor; bem como, alto custo do processo com a manufatura convencional. Por conseguinte, a impressão 3D é uma opção para a elaboração de diversos projetos, proporcionando agilidade na confecção de itens, com geometria simples ou complexa. Assim sendo, nesse estudo realizou-se a análise do desgaste gerado no cames processado por manufatura aditiva aplicando as técnicas FDM (*Fused Deposition Modeling*) com polímero compósito 80PLA/20FC, e SLA (*Stereolithography*) com a resina fotopolimérica epóxi. A variabilidade dos parâmetros de impressão FDM demonstrou que quanto maior é o percentual de preenchimento das camadas internas das peças, maior será a resistência ao desgaste. Por outro lado, corpos de prova impressos com resina obtiveram uma tensão de ruptura média superior quando comparado às peças obtidas com 100% de preenchimento 80PLA/20FC. Concomitantemente, a constante elástica da mola empregada no interior da chave elétrica interferiu de forma significativa na vida útil e no comportamento mecânico do cames. Além disso, o custo de fabricação do cames com resina epóxi foi R\$0,05 centavos maior em comparação às peças produzidas com 100% de densidade de 80PLA/20FC.

Palavras-chave: Impressão 3D. Indústria. Locomotiva. Desgaste.

ABSTRACT

The growing demand for materials and manufacturing methods that increase the useful life of critical components led to the development of the cams used in the electric switch of the U20 locomotive, aiming to reduce costs and optimize production processes, continuous objects of study in the area of engineering development. It is worth mentioning that one of the biggest challenges in the industry is to replace parts to repair components, due to several difficulties, such as high lead time for delivery of the material or termination of production of an item by the supplier; as well as high process cost with conventional manufacturing. Therefore, 3D printing is an option for the elaboration of several projects, providing agility in the manufacture of items, with simple or complex geometry. Therefore, this study performed the analysis of the wear generated in the cams processed by additive manufacturing applying the FDM (Fused Deposition Modeling) techniques with 80PLA/20FC composite polymer, and SLA (Stereolithography) with epoxy photopolymer resin. The variability of FDM printing parameters demonstrated that the higher the percentage of filling of the internal layers of the parts, the greater the wear resistance. On the other hand, test specimens printed with resin obtained a higher average rupture stress when compared to parts obtained with 100% 80PLA/20FC filling. Concomitantly, the elastic constant of the spring used inside the electric switch significantly interfered in the useful life and mechanical behavior of the cams. In addition, the manufacturing cost of the cams with epoxy resin was R\$0.05 cents higher compared to parts produced with 100% density of 80PLA/20FC.

Keywords: 3D printing. Industry. Locomotive. Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquematização do processo FDM	16
Figura 3.2 – Processo de impressão 3D por SLA	25
Figura 3.3 – Desenho esquemático dos mecanismos de desgaste	30
Figura 3.4 – Resistência ao desgaste abrasivo para polímeros e metais	32
Figura 3.5 – Mecanismos de desgaste abrasivo	33
Figura 4.1 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho	36
Figura 4.2 – Modelagem 3D do cames da chave elétrica após fatiamento	38
Figura 4.3 – Desenho técnico do corpo de prova para ensaio de tração	40
Figura 4.4 – Bancada teste automatizada para executar o desgaste cíclico	41
Figura 4.5 – Chave elétrica com o cames impresso com resina epóxi	41
Figura 4.6 – Movimento angular do cames na chave elétrica	42
Figura 4.7 – Molas utilizadas na prática de desgaste	42
Figura 4.8 – Ensaio de compressão da mola	42
Figura 5.1 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C30	44
Figura 5.2 – Corpo de prova impresso com 30% de preenchimento após ensaio de tração	44
Figura 5.3 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C50	46
Figura 5.4 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C100	47
Figura 5.5 – Corpos de prova C50 após ensaio de tração	48
Figura 5.6 – Gráfico LRT x Densidade dos corpos de prova 80PLA/20FC	49
Figura 5.7 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova da resina epóxi	50
Figura 5.8 – Cames impresso com 100% de preenchimento após ensaio cíclico	52
Figura 5.9 – Amostras do cames impressas com 30% de preenchimento após ensaio cíclico	53
Figura 5.10 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C30 após ensaio cíclico	53
Figura 5.11 – Amostras do cames impressas com 50% de preenchimento após ensaio cíclico	54
Figura 5.12 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C50 após ensaio cíclico	54
Figura 5.13 – Amostras do cames impressas com 100% de preenchimento após ensaio cíclico	55
Figura 5.14 – Ponto de desgaste na área superficial da amostra C100 após ensaio cíclico	55
Figura 5.15 – Amostras do cames impressas com resina epóxi após ensaio cíclico	56
Figura 5.16 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C100 resina epóxi após ensaio cíclico	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades do filamento polimérico 80PLA/20FC	37
Tabela 4.2 – Propriedades da resina de epóxi	38
Tabela 4.3 – Parâmetros de impressão aplicados na técnica FDM	39
Tabela 4.4 – Parâmetros de impressão aplicados na técnica SLA	40
Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 30% densidade	43
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 50% densidade	45
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 100% densidade	46
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova da resina epóxi	49
Tabela 5.5 – Dados obtidos no ensaio de compressão para mola a) e b)	51
Tabela 5.6 – Relação entre materiais utilizados nas impressões das amostras e o custo por peça	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS: Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM: American Society for Testing and Materials
CAD: Computer Aided-Design
CDHM: Ciclohexanedimetanol
EMD: Electro-Motive Diesel
FC: Fibra de Carbono
FDM: Fused Deposition Modeling
GE: General Electric
GPa: Gigapascal
ISO: International Organization for Standardization
LRT: Limite de Resistência à Tração
MA: Manufatura Aditiva
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI: Índice de Fluidez
MPa: Megapascal
PET: Polietileno Tereftalato
PETG: Polietileno Tereftalato Glicol
PGA: Ácido Poliglicólico
PLA: Poli-Ácido-Lático
SAN: Estireno-Acrilonitrila
SLA: Stereolithography
SLS: Selective laser sintering
STL: Estereolitografia
Tg: Transição Vítrea
Tm: Ponto de Fusão
3D: Impressão Tridimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Manufatura Aditiva	14
<i>3.1.1 Modelagem por Deposição Fundida (Fused Deposition Modeling)</i>	15
<i>3.1.2 Polímeros Comumente Empregados na Manufatura Aditiva por FDM</i>	18
3.1.2.1 Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)	18
3.1.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	19
3.1.2.3 Ácido Poli-Lático (PLA)	20
<i>3.1.3 Polímero Poli-Ácido Lático (PLA)/Fibra de Carbono</i>	21
<i>3.1.4 Manufatura Aditiva por Estereolitografia</i>	23
<i>3.1.5 Resina Epóxi</i>	26
<i>3.1.6 Resinas Aplicadas Comumente na Técnica SLA</i>	27
3.2 Desgaste por Atrito de Materiais Poliméricos	29
<i>3.2.1 Desgaste por Atrito Abrasivo</i>	32
<i>3.2.2 Estudo do Comportamento Tribológico e Parâmetros de Processo em Impressão 3D de Polímeros</i>	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Fluxograma do Desenvolvimento dos Processos do Projeto	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 Análise dos Resultados dos Ensaios de Tração do Polímero 80PLA/20FC	43
5.2 Análise dos Resultados dos Ensaios de Tração da Resina Epóxi	49
5.3 Ensaio de Compressão das Molas	50
5.4 Desgaste Cíclico do Cames	51
5.5 Análise Comparativa de Custo dos Materiais Utilizados nas Impressões 3D	57

6 CONCLUSÃO	59
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

O termo da indústria 4.0 foi abordado durante a feira de Hannover na Alemanha em 2011. A partir do ano seguinte, alguns cientistas e pesquisadores da área produziram um relatório com possíveis inovações tecnológicas para o segmento da indústria (SEBRAE, 2022). Uma delas foi a manufatura aditiva (MA), um processo que permite a produção de componentes com geometria complexa sendo criados camada por camada em uma plataforma tridimensional por projeto auxiliado pelo computador *Computer Aided-Design* (CAD). Embora a tecnologia tenha sido empregada na década de 80, a popularidade da impressão 3D avançou nos anos 2000 com o desenvolvimento de inovações da MA.

O termo "aditivo" indica que as matérias-primas são adicionadas durante a construção, ao contrário da fabricação subtrativa, onde são removidas. Essa tecnologia tornou-se importante atualmente devido à agilidade, destacando-se pela capacidade de criar peças personalizadas com precisão. Dentre as diversas técnicas de manufatura aditiva, a modelagem por deposição fundida (FDM, do inglês *Fused Deposition Modeling*) é uma das mais populares devido ao custo acessível e facilidade de uso. No entanto, a resistência ao desgaste por atrito das peças fabricadas por FDM ainda representa um desafio significativo, especialmente para aplicações que requerem durabilidade e desempenho mecânico.

Devido a isso, de acordo com García (2019), Foltuț *et al.* (2022) e Khosravani *et al.* (2020), as aplicações dos polímeros reforçados com fibras curtas tornaram objeto no setor automotivo e aeronáutico devido a melhoria comparativa das propriedades mecânicas dos polímeros sem esta segunda fase. No entanto, há uma perda dessas propriedades mecânicas quando comparada ao monofilamento ou materiais injetados contendo fibras. Portanto, para Miller *et al.* (2017) e Benedetti (2021), ter conhecimento das principais propriedades (por exemplo, resistência à tração, resistência ao escoamento, tenacidade à fratura, resistência à fadiga) ou entender os aspectos de desempenho de peças estruturais impressas em 3D torna-se benéfico.

Para tanto, a técnica Estereolitografia (SLA, do inglês *Stereolithography*) está diretamente relacionada à precisão e exatidão, sendo amplamente utilizada em aplicações onde forma, encaixe e montagem são essenciais, como aponta a empresa 3D Systems (2024). As tolerâncias das peças produzidas por SLA são na ordem de 0,05 mm, proporcionando, em termos de acabamento, uma superfície com baixa rugosidade, em comparação as outras tecnologias da manufatura aditiva. Devido à sua qualidade, esse processo é indicado para a produção de padrões de alta precisão, como protótipos funcionais, modelos para apresentações e testes de forma e encaixe.

No setor ferroviário, a técnica de manufatura aditiva também tem espaço, para compreender sua aplicação, entender a grandeza de uma locomotiva traz justificativa para realização deste trabalho.

As locomotivas U20, SD70 e ES43BBi possuem características distintas, projetadas para atender a necessidades específicas. A U20, fabricada pela *General Electric* (GE) ou Siemens nas décadas de 1970 e 1980, é uma locomotiva de potência média, com aproximadamente 2.000 a 2.200 HP. Já a SD70, lançada em 1992 pela EMD (*Electro-Motive Diesel*), é mais potente, com uma faixa de 4.000 a 4.400 HP, sendo uma locomotiva diesel-elétrica de maior porte. A ES43BBi, parte da série *Evolution* da GE e lançada em 2014, oferece 4.300 HP, projetada com tecnologias avançadas para maior eficiência de combustível e conformidade com regulamentações ambientais. Sua versão "Bi" permite a adaptação a diferentes bitolas (largura do trilho), entre a métrica (1.000 mm) e a padrão (1.435 mm). Enquanto a U20 é indicada para ferrovias que requerem locomotivas mais leves, a SD70 e a ES43BBi são utilizadas em ferrovias de grande porte, sendo que estas máquinas podem apresentar diferentes tipos de problemas que podem levar a perdas de milhares de reais por falta de operação.

Diante da necessidade de solucionar um problema, a metodologia Motivo, Causa e Solução (MCS) é uma abordagem estruturada utilizada para identificar e resolver problemas, especialmente em contextos técnicos e industriais. A realização deste trabalho foi motivada pela falha da chave elétrica, causada pelo desgaste do cames interno, provocando a parada da máquina. Considerando que é uma chave obsoleta, e a peça para substituição não é mais fornecida pelo fabricante, optou-se por analisar e solucionar este problema através da manufatura aditiva produzindo um novo cames que tivesse as propriedades para reparar a chave elétrica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Análise da resistência ao desgaste do cames empregado na chave elétrica frota U20 - Locomotiva, fabricado por manufatura aditiva utilizando a técnica FDM com polímero compósito PLA/Fibra de Carbono, e a técnica SLA com resina fotopolimerizável de epóxi.

2.2 Objetivos Específicos

- Fabricar uma bancada de teste para realizar a análise do desgaste por atrito das peças produzidas;
- Analisar e comparar a estrutura superficial das peças fabricadas entre as técnicas FDM e SLA;
- Analisar e comparar o desgaste nas peças com molas de constante elástica diferentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manufatura Aditiva

Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021 manufatura aditiva pode ser definida como o processo de união de materiais para fabricar objetos a partir dos dados de modelos computacionais 3D, utilizando a sobreposição de camadas, em contrapartida a metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem tradicional. Ademais, Lanzotti (2025) cita que outros termos são utilizados na literatura para se referir ao mesmo processo, como “fabricação aditiva” ou “prototipagem rápida”, porém hoje em dia a nomenclatura mais utilizada é impressão 3D.

Atualmente, pode-se considerar a tecnologia de impressão 3D como um grande acelerador para projetos de baixo custo, pois permite a fabricação de peças variadas e de considerável complexidade geométrica, com apenas um equipamento. Dentre algumas vantagens da impressão 3D destaca-se o baixo desperdício, possibilidade de reciclagem e reaproveitamento do material, como declara Mikula (2021) e Zhu (2021), sendo a maior facilidade de personalização e adaptação do produto final capazes de serem aplicados nas mais diversas áreas da indústria, de acordo com Huang (2012).

Vale ressaltar que a impressão 3D se tornou conhecida a partir da década de 80, quando houve um crescente desenvolvimento de metodologias alternativas que possibilitaram a execução do processo, como por exemplo o caso da sinterização seletiva a laser (SLS), porém apenas em 1989 o método mais conhecido atualmente foi elaborado, a modelagem por material fundido FDM, criado por Scott Crump cofundador da empresa *Stratasys* LTDA. Segundo Lira (2021), esse é um processo que consiste na deposição de um material fundido em camadas para o objeto ser modelado em 3 dimensões.

Em 1990, a *Systems Corp.* foi a responsável por projetar a primeira máquina da técnica SLA, onde utiliza laser ultravioleta (UV) para o endurecimento das camadas de resinas fotopolimerizável, além disso a startup DMT criou as primeiras impressoras de SLS, com capacidade de construir objetos em 3 dimensões adicionando uma camada sobre a outra através de polímeros em pó (LIRA, 2021). Na época, Ishengoma (2024) recorda que a técnica denominada SLA, apresentava um custo elevado comparado as outras tecnologias da impressão 3D.

De acordo com Borah (2014) e Engrena Jr. (2020), diversas inovações foram introduzidas na manufatura aditiva, como a possibilidade de imprimir diferentes tipos de materiais, como por exemplo Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli-Ácido-Lático (PLA) e Polietileno Tereftalato Glicol (PETG), devido ao desenvolvimento de novos materiais, e a criação de impressoras modernas.

A MA tem sido utilizada em diversos setores, incluindo automotivo, aeroespacial, medicina, dentre outros. No âmbito da engenharia, a proposta da pesquisa em fusão da MA, possui relevância científica para a evolução da área, permitindo o aumento da flexibilidade construtiva e a redução do tempo de produção.

3.1.1 Modelagem por Deposição Fundida (Fused Deposition Modeling)

A FDM tornou-se uma tecnologia da manufatura aditiva popular devido à sua rápida produção, custo-benefício, facilidade de acesso, ampla adaptação de material e capacidade de produzir componentes com geometria complexa, de acordo com Masood (2004) e Marwah (2017).

Em 1988, a Crump patenteou a modelagem de deposição fundida e formou a *Stratasys* em 1989. O sistema inicial possuía aspectos fundamentais essenciais para a técnica, exceto pela possibilidade de gerar geometria complexa (VYAVAHARE, 2020). Entretanto, um período mais tarde, várias séries otimizadas foram introduzidas, como FDM *Titan*, FDM *Dimension*, FDM *Vantage*, FDM *Maxum*, FDM 3000 e FDM *Prodigy Plus*, ressalta Kumar (2012). A estrutura é criada tridimensionalmente sobre a placa de construção por projeto CAD usando filamento termoplástico. Uma vez que, a camada inicial é impressa, a mesa se desloca no eixo y, e a segunda camada é impressa sobre a camada anterior, e o processamento continua até finalizar a peça. Mohd (2018) informa que materiais como acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e ácido polilático (PLA) são os mais utilizados no FDM, pois suas propriedades térmicas e reológicas facilitam a fabricação de peças.

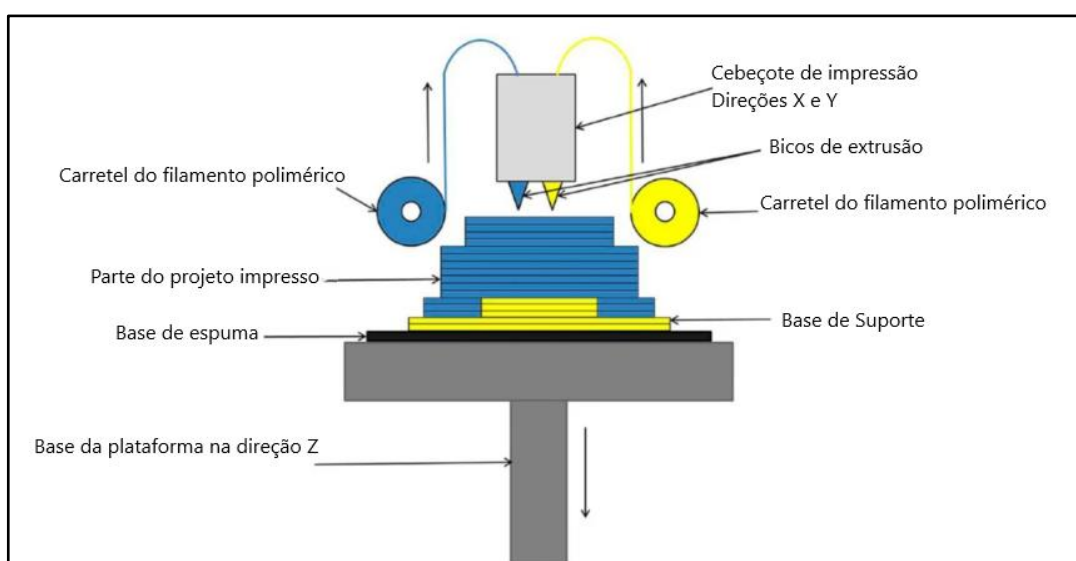
Segundo Rajan *et al.* (2022) os parâmetros de processamento da manufatura aditiva têm sido relatados como o fator crucial que determina a qualidade e o comportamento do produto de saída. Os diferentes parâmetros de processamento usados no processo FDM são: espessura da camada, padrão de preenchimento, densidade de preenchimento, ângulo *raster* (orientação do padrão de linhas de impressão que a impressora segue ao depositar o material camada por camada), largura *raster* (largura das linhas de impressão), velocidade de impressão, orientação

de construção, impressão e temperatura da mesa. As peças fabricadas em FDM são fortemente afetadas por propriedades mecânicas e anisotrópicas. Os autores observaram que a resistência à tração diminui com o incremento do ângulo *raster*, e aumenta com a espessura menor da camada.

Ademais, a tecnologia FDM demonstrou formar estruturas internas porosas no componente fabricado, caso não seja selecionado devidamente o percentual de preenchimento das camadas internas impressas, o que leva à resistência mecânica inadequada e ao efeito "escada-pisada", irregularidade, bem como outros problemas, por exemplo mau acabamento superficial, salienta Taufik (2020). Por outro lado, Rajan *et al.* (2022) afirmam que, esta tecnologia tem potencial para produzir produtos funcionais utilizando polímeros diversos, como PLA e PETG, e compósitos poliméricos para serem usados nesse processo.

A esquematização do processo FDM nas impressoras cartesianas é ilustrada na Figura 3.1. Nesse sistema, os filamentos são armazenados em um rolo e conectados diretamente ao bico de extrusão. O bico se movimenta nas direções X e Y, enquanto a plataforma de construção se desloca na direção Z. Um motor elétrico controla a movimentação do bico extrusor, e o filamento é diretamente ligado ao mesmo. Em alguns casos, dois tipos de filamentos são utilizados nesse processo: um para construção e outro para suporte. O diâmetro do filamento geralmente varia de 1,75 a 3,0 mm. Esta técnica de FDM envolve três etapas de produção: (1) pré-processamento, (2) produção e (3) pós-processamento.

Figura 3.1 – Esquematização do processo FDM



Fonte: Adaptado de RAJAN *et al.*, 2022.

Na fase (1) de pré-processamento, o *layout* do produto é criado utilizando *software* CAD e exportado no formato STL. Após isso, são consideradas configurações essenciais para o processo, como os parâmetros de fatiamento, a orientação de construção, e a condição de temperatura da máquina. Esses fatores são fundamentais para a impressão e influenciam nas propriedades mecânicas do produto final, apontam POPESCU *et al.* (2018).

Por conseguinte, em (2) após o pré-processamento, ocorre a produção, em que a matéria-prima conectada ao bico extrusor é regulada pela temperatura e aquecida até o estágio semilíquido. Ele gera a camada 2D sobre a plataforma de construção, formando uma camada sobre a outra até que os objetos 3D sejam criados, afirma Gkartzou (2017). O filamento é aquecido a uma temperatura entre 150°C e 300°C, e impresso sobre a placa com a precisão dimensional de 100 µm (BLOK, 2018). A base de suporte é inicialmente impressa antes que o objeto necessário seja impresso, então a plataforma de construção se move no eixo Z depois que cada camada seja confeccionada. Assim, o processo de extrusão é sustentado e o objeto impresso.

Por fim, (3) a técnica de pós-processamento é aplicada ao produto final, um passo crucial no FDM, pois as peças impressas não estão imediatamente prontas para uso. Após a impressão, o produto é removido da plataforma e as estruturas de suporte são eliminadas, passando pelo denominado pós-processamento. Essa fase é empregada para melhorar a qualidade da superfície do produto (LALEHPOUR, 2016; CHEN, 2019).

Kumbhar *et al.* (2018) relataram que as técnicas de pós-processamento são frequentemente utilizadas para aprimorar o acabamento superficial, sendo dividido em dois métodos: mecânico e químico. O método químico envolve pintura, revestimento, aquecimento e deposição de vapor. O método mecânico inclui usinagem, lixamento, abrasão, vibração e acabamento em tambor, visando melhorar a qualidade da superfície e as propriedades mecânicas das peças.

A escolha dos materiais poliméricos depende das aplicações e dos requisitos específicos. Entretanto, há uma disponibilidade limitada de tipos de polímeros para FDM, restringido a tecnologia. Além disso, materiais com de fusão acima de 300°C, não podem ser usados nesse processo, pois a capacidade de fusão das máquinas convencionais é abaixo dessa temperatura.

Sendo assim, devido a essas limitações, polímeros termoplásticos e diversos materiais com temperatura de fusão inferiores a 300°C são ideais para esse processo. Assim, várias tentativas têm sido feitas para melhorar a qualidade e as propriedades dos polímeros por meio da adição de cerâmicas, nanopartículas, metais e fibras de madeira, para criar os filamentos compósitos.

3.1.2 Polímeros Comumente Empregados na Manufatura Aditiva por FDM

3.1.2.1 Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)

Desde que foi patenteado pela primeira vez em 1941 por John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, o polietileno tereftalato (PET), um polímero termoplástico, tem demonstrado sua viabilidade como um material durável e versátil em várias indústrias, de acordo com Rex (1949). Uma nova iteração do PET resultou em um outro polímero, o polietileno tereftalatoglicol (PETG), que é sintetizado a partir da copolimerização do PET com ciclohexanedimetanol (CDHM) no lugar do etilenoglicol em sua espinha dorsal polimérica, salienta Chen (2016).

Devido ao volume do CDHM, sua inclusão na estrutura do polímero impede o próximo encaixe entre as cadeias poliméricas no PETG. Essa estrutura fornece ao PETG características significativas, como maior temperatura de transição vítrea (T_g), baixa capacidade de cristalização, maior resistência ao aquecimento, alta transparência e ductilidade. Essas qualidades conferem ao PETG considerável módulo de elasticidade e resistência para Guessasma (2019). No entanto, o PETG ainda pode exibir uma modesta propensão para aumento de tensões internas e possíveis quebras, como evidenciado por estudos que utilizaram tração para várias orientações de ângulo *raster* durante processos de fabricação, como a impressão tridimensional (3D), aborda Sepahi (2021). A fim de, melhorar seu módulo de elasticidade e resistência, materiais como negro de fumo, argila orgânica e ácido poliglicólico (PGA) têm sido utilizados para aumentar a resistência do PETG à ruptura.

De forma semelhante ao seu antecessor PET, o PETG tem uma temperatura do ponto de fusão (T_m) que varia de 245°C a 265°C. Em contraste, a T_g do PETG (85°C), é ligeiramente maior que a do PET (78°C). A T_g , em relação ao PETG, refere-se à temperatura em que o material se torna macio e maleável, facilitando o manuseio e a manipulação (NEWMAN, 2020). A T_g e a T_m do PETG permitem maior tolerância ao aumento de temperatura em comparação com polímeros de natureza semelhante.

Apesar disso, Selke (2019), aponta que o PET e o PETG ainda são insuficientes para resistir a condições de alto enchimento a quente. Isso se refere à sua capacidade de um polímero para resistir ao derramamento de um líquido quente sobre uma superfície. Este importante processo pode ser utilizado para remover bactérias presentes na superfície de um determinado dispositivo médico fabricado com PETG. Para garantir a esterilização adequada, considerando as

limitações das propriedades físicas desse material, outros métodos de tratamento, como o enchimento a frio ou a redução da temperatura do enchimento a quente do líquido, podem ser adotados.

Segundo Brydson (1999) o PETG tem uma química molecular irregular que é a base de sua natureza termoplástica amorfa, bem como sua substancial resistência química e transparência. A estrutura amorfa e linear do polímero faz com que seja um material notável para termoformagem e moldagem devido à sua habilidade de ser utilizado em uma ampla faixa de temperatura de trabalho. A copolimerização do polietileno tereftalato (PET) para formar PETG altera a estrutura cristalina do composto, reduzindo seu potencial de cristalização e aumentando a transparência. Essa adição de glicol para fazer PETG também fortalece suas propriedades térmicas, criando uma cadeia polimérica que apresenta uniformidade reduzida, já que as moléculas não se aglomeram tão facilmente. O rebaixamento do ponto de fusão reduz a tensão residual de resfriamento. Quando comparado com ABS e PLA, que são materiais comuns de impressão 3D de mesa, o PETG apresenta resistência superior ao calor, à umidade e à química afirma D'Estefano (2020).

3.1.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

Acrilonitrila Butadieno Estireno é um termoplástico de engenharia resistente a impactos, polímero amorfo e, portanto, não tem um verdadeiro ponto de fusão. Sua temperatura de transição vítrea ocorre em aproximadamente 105°C, a composição desse material é formada por três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno, com fórmula química $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Devido às suas propriedades físicas, tornou-se uma escolha para aplicações estruturais, dentre esses motivadores, Oliveira (2016) cita alta rigidez, resistência ao impacto, abrasão e deformação. O ABS é descrito como o candidato mais adequado para chapeamento, por ser possível depositar sobre ele um revestimento metálico aderente apenas pelo uso de um processo de pré-tratamento químico e sem o uso de qualquer abrasão mecânica. É amplamente utilizado em carcaças eletrônicas, autopeças, produtos de consumo, e acessórios para tubos.

Para tanto, vale ressaltar que o polímero apresenta alta tenacidade (mesmo em condições frias), rigidez adequada, boa estabilidade térmica, alta resistência ao ataque químico e ao *stress cracking* ambiental. Outras propriedades significativas do ABS incluem baixo custo, durabilidade e baixo coeficiente de expansão térmica (SZEWCZYK, 2023). A facilidade de moldagem permite a fabricação de peças em ABS dimensionalmente estáveis com qualidade de

superfície superior. Entretanto, a resistência ao impacto otimizada do ABS pode ser alcançada controlando o tamanho, a distribuição e a microestrutura das partículas do material. A maior tenacidade é obtida pelo aumento do teor do butadieno e peso molecular da fase SAN não enxertada.

A fase contínua estireno-acrilonitrila ou SAN é um determinante das propriedades químicas do produto ABS. Em alguns casos não é afetada por ácidos, alcalinos ou soluções aquosas de sais. Mas, o ABS é hidrofóbico e o ângulo de contato entre o polímero e a água aproxima-se de $81,0 \pm 0,6^\circ$. O material apresenta uma quantidade de absorção de até 1,5 % de água após o armazenamento em meio aquoso devido à presença de emulsificante residual e à polaridade dos grupos laterais nitrílicos. A fase SAN do ABS é solúvel em hidrocarbonetos halogenados, aromáticos, ésteres e cetonas. Agarwala (2003) declara que o craqueamento sob tensão ambiental do ABS é baixo e pode ser reduzido aumentando o teor de acrilonitrila e a massa molecular da fase SAN.

Ainda sobre o estudo de Agarwala (2003), quando submetido a condições de calor, luz e intempéries, observa-se amarelamento e acinzentamento da superfície do ABS, bem como redução das características de tenacidade, como resultado da presença de ligações duplas na fase do butadieno. A cadeia polimérica decompõe-se a temperaturas superiores a 300°C . Medidas severas de processamento aplicadas também podem destruir as fases do polímero e da matriz.

3.1.2.3 Ácido Poli-Láctico (PLA)

A primeira tentativa de desenvolvimento do PLA ocorreu em 1932 utilizando a polimerização e despolimerização de lactídeos oligoméricos, e a patente posterior foi depositada pela Du Pont em 1954, recorda Dorgan (2006). Por volta da década de 1960, o PLA de alto peso molecular foi preparado modificando as técnicas, que têm propriedades comparáveis aos plásticos derivados do petróleo. Mas, esse método de produção não era econômico, a produção comercial de PLA foi iniciada em 1997, após o desenvolvimento do processo pela Cargill Dow Corporation em que nesta técnica de fusão sintetizou PLA ao invés da solução.

Para tanto, a primeira produção contínua de PLA foi em 2002 em Blair, Nebraska, com uma capacidade de 300 libras anuais. A produção do material em larga escala acabou reduzindo drasticamente o custo de produção do polímero. O material de base biológica tem a propriedade

de biodegradabilidade inerente e biocompatibilidade, sendo amplamente utilizado para aplicações de embalagem de alimentos. De acordo com Jem, o mercado de PLA está aumentando globalmente e a demanda dobra a cada 3-4 anos (BAJPAI, 2013; JEM, 2020).

Ademais, um polímero termoplástico alifático derivado de recursos renováveis como cana-de-açúcar, milho, mandioca e etc. requer baixo consumo de energia e produz o mínimo de gases de efeito estufa durante sua produção. As muitas propriedades vantajosas do PLA (biodegradabilidade, boa disponibilidade, *eco friendly*, propriedade antibacteriana e boas propriedades mecânicas e térmicas) o tornam um polímero promissor para produtos sustentáveis. Alguns deméritos do PLA também são relatados, como baixa tenacidade, baixas propriedades de barreira, baixa resistência térmica, baixa temperatura de transição vítrea.

Diante disso, é importante comentar que o material pode ser fundido e moldado em várias formas complexas, e remodelado para diferentes aplicações. Além dessas propriedades, possui resistência a óleos e graxas em baixas temperaturas. Ranakoti (2022) declara que a aparência desse material o torna apropriado para eletrodomésticos como garrafas, copos, bandejas, dentre outros. Como também, pode ser amorfo, semicristalino ou altamente cristalino com uma temperatura de transição vítrea de 60°C e pontos de fusão de 130 - 180°C, pode ser resistente ao calor suportando temperaturas de 110°C (Cramer *et al.*, 2010; STOLT, 2002), e seu módulo de elasticidade varia entre 3,0 - 4,0 GPa.

De acordo com Delair *et al.* (2003), há possibilidade do ácido polilático ser utilizado com fibra para a maioria dos termoplásticos e através de muitas melhorias para alterar suas propriedades mecânicas, como recozimento, formando compósitos com fibras ou nanopartículas e estendendo a sua cadeia.

Garlotta (2001) complementa que o PLA de alto peso molecular é incolor, brilhante, rígido, com propriedades semelhantes ao poliestireno, e pode ter uma degradação no ambiente variando de 6 meses a 2 anos. As propriedades de tração do PLA variam muito, dependendo se é recozido ou orientado, do seu grau de cristalinidade, se é solúvel em solventes, benzeno quente, tetraidrofurano ou dioxano.

3.1.3 Polímero Poli-Ácido Lático (PLA)/Fibra de Carbono

O Poli-Ácido Lático (PLA) tornou-se conhecido por sua extrema rigidez, permitindo maior detalhamento nas peças produzidas. No que se refere a propriedades, o PLA possui boa coalescência, apesar de ter um índice de fluidez (MFI) moderado, (entre 3 e 15 g/10 min), e

uma baixa viscosidade de fusão, por essa razão, apresenta baixa pressão de processamento. Ainda, quando submetido a um pequeno aumento de temperatura, a sua viscosidade diminui. Diferentemente do ABS, o PLA está disponível em cores brilhantes e opacas, incluindo opções translúcidas (LOPES *et al.*, 2018).

Por outro lado, apresenta desvantagem, tal como baixa resistência à tração, sendo um material quebradiço, impossibilitando a utilização em aplicações que necessitem de deformações plásticas como por exemplo, elementos de fixação aponta Rasal (2010). Para modificar as capacidades do PLA virgem, os pesquisadores têm se esforçado para investigar compósitos reforçados com matriz polimérica PLA adicionando fibras naturais ou sintéticas, metais, cerâmicas em PLA, ressalta Rajpurohit (2018). No entanto, o surgimento desses novos compósitos PLA traz novos desafios para a impressão FDM de componentes funcionais com propriedades mecânicas satisfatórias.

O compósito reforçado com fibras é feito pela adição das partículas de fibra nos polímeros termoplásticos fundidos. Nas palavras de Ferreira (2019), ao processar um filamento reforçado com fibra, torna-se essencial monitorar a orientação da fibra, a sua porcentagem da mistura e o tamanho ideal da mesma para evitar problemas indesejados, como obstrução da extrusora durante a impressão, que afeta as propriedades mecânicas do produto final.

Estudos sobre a análise de PLA reforçado com de fibra de carbono têm atraído muita atenção. Uma das pesquisas trabalha técnicas de análise experimental e numérica para explorar o efeito do reforço de fibra de carbono com PLA (OLIVEIRA, 2020), encontrando um aumento na rigidez e deslocamento para frequências naturais mais altas. Maqsood *et al.* (2021) avaliaram a análise dos compósitos PLA, observaram resultados significativos devido à inclusão de fibras de carbono, bem como maior amortecimento e melhores propriedades de dissipação de energia através de técnicas de análise modal. Ao realizarem um estudo examinando os efeitos da variação do teor de fibra de carbono sobre as mesmas amostras do material, verificaram aumento da rigidez e amortecimento que trouxeram maiores frequências naturais e melhores características de desempenho.

Diante disso, vale ressaltar que as fibras de carbono sendo conhecidas por sua alta rigidez e resistência, podem aumentar a dureza e resistência do material composto. Isso porque as fibras de carbono são capazes de transferir carga e fornecer reforço à matriz polimérica, resultando em um material mais resistente e rígido. Para tanto, a adição de fibra de carbono pode melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz polimérica, já que as fibras de carbono (FC) têm uma alta energia de superfície e conseguem formar fortes ligações químicas com a

matriz polimérica. Essa adesão evita que as fibras se retirem da matriz, aumentando a tenacidade e a durabilidade do material compósito.

A adição de fibra de carbono também pode otimizar a estabilidade térmica e a resistência à deformação do material compósito. Devido terem um alto ponto de fusão, e dissiparem calor de forma mais eficaz do que a matriz polimérica, evitando que o material se deforme sob altas temperaturas (Khosravani *et al.*, 2020).

Segundo Senthamaraikannan *et al.* (2023) o comportamento de vibração de placas compostas de PLA reforçadas com fibra de carbono mostrou potencial para aplicações sensíveis à vibração. O reforço de fibra de carbono ofereceu uma redução na amplitude juntamente com boa qualidade de amortecimento, e um aumento substancial na resistência à tração e à flexão em comparação com os compósitos virgens. Além disso, a resistência à flexão foi maior em compósitos reforçados com fibra curta de carbono do que em materiais puros, melhorando ainda mais o comportamento de amortecimento. Vale salientar que, a fibra de carbono (FC) tem boa condutividade térmica, propriedades elétricas, resistência à corrosão, desgaste e umidade.

3.1.4 Manufatura Aditiva por Estereolitografia

A Estereolitografia (SLA) trata-se da polimerização em cuba mais antiga, desenvolvida por Charles Hull em 1986. Segundo Afridi *et al.* (2024) a técnica baseia-se no princípio da fotopolimerização e utiliza uma fonte de laser ultravioleta (UV) para desencadear reações de polimerização em material fotossensível. A resina fotopolimérica consiste em precursores (monômeros ou oligômeros), aglutinantes, fotoiniciadores (PI), absorvedores, aditivos e agentes de transferência de cadeia. Os precursores são os principais elementos da resina que se solidifica devido à reticulação.

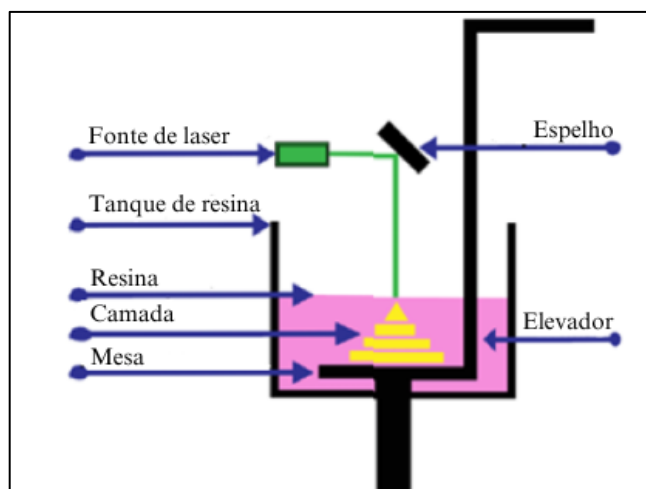
De acordo com Afridi *et al.* (2024) os fotoiniciadores se transformam em radicais quando expostos à luz, o que auxilia na reticulação entre os monômeros/oligômeros, resultando em cadeias poliméricas. Além disso, aditivos na forma de nanopartículas e cores são incorporados para melhorar as propriedades ou personalizar o objeto impresso. Por ser uma reação de fóton único, o processo ocorre na superfície da resina, resultando na formação de estrutura camada por camada. A precisão e a exatidão da fonte de luz afetam substancialmente o produto final, portanto, os scanners galvano são usados para manter a precisão e a velocidade de impressão do laser.

A estereolitografia evoluiu significativamente além de seu uso inicial de prototipagem e modelagem, está expandindo suas capacidades na fabricação de projetos altamente complexos. A gama de materiais evoluiu de polímeros tradicionais para compósitos, metais e cerâmicas. Essa versatilidade aprimorada de materiais proporcionou oportunidades para a criação de produtos sob medida para indústrias como aeroespacial, robótica, sensores, implantes médicos, componentes de armazenamento de energia dispositivos microfluídicos.

No entanto, Afridi *et al.* (2024) afirmam que se torna essencial observar que o SLA envolve principalmente a estruturação de um único material por vez. A cinética da reação e do processo de cura também é intrincada e multifacetada. Em comparação com outras técnicas de manufatura aditiva, o SLA oferece resolução superior (tão baixa quanto 10 μm) e qualidade de superfície aprimorada, embora em troca de um custo de fabricação mais alto.

Husna *et al.* (2024) explicam o processo da impressão 3D por SLA, onde uma máquina de aparelho de estereolitografia parte do método de solidificação induzida por fotopolimerização de resina líquida. Esse processo ilustrado na Figura 3.2, envolve a utilização de um laser ultravioleta (UV) direcionado a uma profundidade específica em uma cuba contendo resina líquida fotossensível. O laser provoca a polimerização localizada da resina, ou seja, ele inicia a solidificação da substância exatamente no ponto onde incide, solidificando a resina camada por camada. À medida que a luz UV do laser atravessa a resina, ela endurece as áreas expostas, criando uma estrutura sólida que segue o padrão previamente programado. Para garantir a uniformidade do processo, uma lâmina de nivelamento é utilizada para redistribuir a resina após cada camada ser curada, criando uma nova camada de material. Esse ciclo de cura e deposição de resina continua até que a peça tridimensional seja completamente formada e solidificada. Assim, a impressão ocorre de forma progressiva, com cada nova camada se aderindo à camada anterior, resultando na construção de um objeto sólido final.

Figura 3.2 – Processo de impressão 3D por SLA



Fonte: Adaptado de HUSNA *et al.*, 2024.

Husna *et al.* (2024) declaram que a estereolitografia é vantajosa em termos de velocidade, status econômico, adaptabilidade e precisão. Devido a isso, pode ser um processo essencial para a criação de modelos e protótipos que ajudam a desenvolver e validar conceitos em vários campos, incluindo o design de dispositivos médicos, com alta qualidade de forma rápida e acessível. O SLA é limitado apenas pela largura do feixe do laser concentrado, e oferece resolução superior a outras técnicas 3DP (20m vs. 50–200m para outras tecnologias de fabricação).

Dentre as desvantagens do emprego da técnica SLA, pode-se considerar o custo das resinas fotossensíveis, que tendem a ser mais caras comparadas aos filamentos utilizados em processos como FDM. Isso pode tornar o processo mais caro, especialmente para produções em larga escala ou para protótipos de baixo custo.

Bem como, a velocidade de impressão por SLA pode ser relativamente lenta, principalmente quando se trata de peças grandes ou com geometria complexa. Cada camada precisa ser curada individualmente, e o tempo necessário para solidificar a resina com precisão pode aumentar o tempo total de impressão. Para tanto, a estereolitografia exige um extenso pós-processamento. Em que é necessário remover os suportes, realizar a limpeza da peça (normalmente com álcool isopropílico 70% para retirar resíduos de resina não curada), e a cura adicional em uma câmara UV para garantir a máxima resistência e estabilidade do material. Esses passos podem aumentar o tempo total de produção.

Por fim, as peças modeladas para serem impressas por SLA não são selecionadas entre distintas estruturas internas complexas, como no caso das impressoras FDM, onde os preenchimentos podem ser escolhidos para economizar material e reduzir o tempo de

impressão, ou ainda para formar estruturas internas mais densas. No caso da SLA, a resina líquida é curada diretamente na forma desejada, e o processo de impressão por camadas não requer cavidades internas para otimizar o uso de material, portanto, as peças podem ser impressas com 100% de material sólido.

3.1.5 Resina Epóxi

A resina epóxi entrou em produção comercial pela primeira vez em 1947, trata-se de polímero termoendurecível, caracterizado pela presença de um anel epóxi na estrutura química. O grupo epóxi pode ser capaz de reagir com polímeros de alto peso molecular formado cataliticamente ou alguns agentes de cura correspondentes para formar a rede de reticulação densa através de três dimensões como aborda Petrie (2006).

Jin *et al.* (2011) relatam que a quantidade de grupos epóxi e outros grupos químicos em cada molécula determina a funcionalidade das resinas epóxi. Dentre as propriedades das resinas epóxi incluem alta resolução e acabamento superficial, durabilidade, baixo encolhimento de cura, isolamento elétrico, resistência mecânica, à corrosão e química.

De acordo com Kumar *et al.* (2018) devido às propriedades projetadas por diferentes formulações com agentes de cura específicos, as resinas epóxi e seus compostos são amplamente aplicados em diversas áreas. O mercado global desse material é impulsionado pelo crescimento da demanda nos setores aeroespacial, químico, construção civil, automotivo, saúde, elétrico e marítimo.

Segundo Petrie (2006), durante a cura da resina epóxi, existem duas vias de anel de abertura, aniônica e catiônica, e duas vias de polimerização, reação de poliadição e homopolimerização, que envolvem a reação do grupo epóxi e a formação da estrutura de reticulação, respectivamente. No mecanismo aniônico, os grupos epóxi podem ser abertos de diferentes maneiras para gerar ânions que são substâncias ativas capazes de reagir ainda mais. No mecanismo catiônico, o grupo epóxi pode ser aberto por hidrogênio reativo para formar novas ligações e grupos hidroxila.

Lohse (1986) afirma que as resinas epóxi podem reagir com uma variedade de agentes de cura ou consigo mesmas, por meio de catalisadores, para formar materiais reticulados sólidos com adesão e resistência cruciais. Essa transição, exotérmica, é frequentemente chamada de endurecimento ou cura. A maior natureza das resinas epóxi é a capacidade de transição de um

líquido de baixa viscosidade, ou estado termoplástico, para um estado termoendurecível duro e resistente.

No que se refere a aplicação da resina epóxi na impressão SLA, trata-se de um material fotossensível que se solidifica quando exposto a uma fonte de luz UV. Essa resina é uma das opções mais comuns em processos de impressão 3D, devido à sua capacidade de gerar peças de alta resolução e excelente acabamento superficial. Sendo composta por uma combinação de monômeros epóxis e fotoiniciadores, que, quando irradiados por luz UV, sofrem uma reação de polimerização (ou cura), transformando o líquido em um material sólido na mesa de impressão.

3.1.6 Resinas Aplicadas Comumente na Técnica SLA

Na Estereolitografia os materiais que são empregados consistem em resinas fotopoliméricas líquidas capazes de se curarem sob a luz UV. Essas, podem variar em propriedades, como flexibilidade, dureza e resistência ao impacto, permitindo a fabricação de peças com características específicas. Ademais, as resinas respondem a comprimentos de onda determinados, entre 250 - 400 nm.

Conforme cita Magalhães (2024) as resinas fotossensíveis são compostas de um pré-polímero fotossensível, um fotoiniciador (ou fotossensibilizador) e um diluente.

O pré-polímero fotossensível, também denominado oligômero, é um composto de baixo peso molecular capaz de sofrer fotocura, com um peso molecular geralmente variando entre 1.000 e 5.000 a.m.u. Ele serve como material base para a fabricação de resinas fotossensíveis, sendo um fator crucial para determinar o desempenho final desses materiais. Os principais tipos de pré-polímeros fotossensíveis incluem resinas epóxi modificadas com acrilato, poliésteres insaturados, poliuretanos e sistemas de resina fotopolimerizável à base de tioleno.

Fotoiniciadores e fotossensibilizadores desempenham papéis semelhantes no início da polimerização durante o processo de cura, mas com algumas diferenças. Os fotoiniciadores participam diretamente da reação, gerando espécies ativas, como radicais livres ou cátions, ao absorverem energia luminosa, sendo consumidos durante o processo. E, os fotossensibilizadores, atuam mais como catalisadores, transferindo energia sem se consumirem.

Os fotoiniciadores podem ser classificados em três tipos, de acordo com seu mecanismo de iniciação: tipo radical livre, tipo catiônico e tipo híbrido (capaz de incorporar ambos os mecanismos). Um exemplo de fotoiniciador de radical livre é o 2-hidroxi-2-metil-1-fenil-1-propanona (CAS-1173), enquanto fotoiniciadores catiônicos comuns incluem sais de ferrocênio

e iodínio. O mecanismo de ação dos fotossensibilizadores envolve a transferência de energia, abstração de hidrogênio e a formação de complexos de transferência de carga. Entre os principais fotossensibilizadores, pode-se destacar o benjoim, a cetona de Michler, a tioxantona e os derivados de benzofenona.

Por fim, os diluentes reativos são compostos epóxi de baixo peso molecular, que contêm grupos epóxi capazes de fazer a reação de cura das resinas epóxi, integrando-se à estrutura da rede reticulada do epóxi curado. Dependendo do número de grupos funcionais reativos por molécula, os diluentes reativos podem ser classificados em monofuncionais, difuncionais e polifuncionais. Exemplos de diluentes incluem os monofuncionais, como estireno (St), N-vinil pirrolidona (NVP), acetato de vinil (VA), acrilato de butila (BA), acrilato de 2-etilhexila (EHA), e (met)acrilato de hidroxietil (HEA, HEMA, HPA); os difuncionais, como diacrilato de 1,6-hexanodiol (HDDA), diacrilato de tripropilenoglicol (TPGDA) e diacrilato de neopentilglicol (NPGDA); e o polifuncional triacrilato de trimetilolpropano (TMPTA), entre outros.

Ainda de acordo com Magalhães (2024) quanto maior o número de grupos funcionais de um diluente, mais rápida será a taxa de fotopolimerização. Além disso, quanto maior o grau de reticulação, melhor será a dureza e a resistência ao desgaste, embora isso também aumente a taxa de encolhimento. Os principais tipos de grupos funcionais incluem acrilóiloxi, metacrilóiloxi, vinil e alil, sendo que a reatividade na fotopolimerização diminui na seguinte ordem: acrilóiloxi > metacrilóiloxi > vinil > alil.

Para Magalhães (2024) as resinas fotossensíveis podem ser classificadas em diferentes tipos com base em vários métodos de categorização, como por exemplo solvente, propriedades e aplicações específicas. Como também, podem ser divididas em dois grupos principais: à base de solvente e à base de água. As resinas à base de solvente são hidrofóbicas e dissolvem-se apenas em solventes orgânicos, enquanto à base de água são hidrofílicas e podem ser dispersas ou decompostas em água.

Em conformidade, quanto a classificação por propriedade tem-se a resina fotopolímero transparente, utilizada para acabamento de alta qualidade e verificação visual, permitindo acabamentos detalhados. A resina fotopolímero de cor sólida, sendo ideal para verificação estrutural e acabamentos finos, podendo ser polida ou pintada. Resina fotopolímero de alta tenacidade, capaz de oferecer maior flexibilidade e resistência à quebra, sendo útil para componentes de precisão. Resina rígida são mais robustas e oferecem maior durabilidade e resistência ao impacto. Resina moldável para fundição de precisão, utilizada em fundição de modelos de cera, apresentando baixa expansão e alta precisão. Resina flexível, com maior resistência ao desgaste e pode ser esticada repetidamente, adequada para peças como

dobradiças. Resina de alta temperatura, projetada para resistir a temperaturas elevadas, ideal para aplicações na indústria automotiva e aeroespacial. Resina biocompatível, que atende aos padrões de segurança para uso em aplicações médicas e odontológicas. Resina cerâmica, para criar peças cerâmicas densas após sinterização, suportando temperaturas acima de 1700°C.

3.2 Desgaste por Atrito de Materiais Poliméricos

Segundo Silva (2017) o termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. O termo para Jost (1990) pode ser definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados”.

Assim sendo, a tribologia estuda os assuntos e as práticas relacionadas com o atrito, o desgaste e a lubrificação, sendo uma área de interesse econômico, científico e tecnológico. Os estudos científicos da tribologia e muitas das leis básicas do atrito, como a proporcionalidade entre a força normal e a força de atrito, foram desenvolvidos desde o século XV. O desgaste e os princípios do atrito são questões complexas que requerem investigação experimental avançada, utilizando técnicas como microscopia eletrônica de varredura e microscopia de força atômica como considera Stachowiak (2007) e Dowson (1979).

A tribologia tornou-se a principal área da ciência que realiza análises operacionais de problemas com grande relevância econômica, como a confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos na interação de partes móveis, tais como engrenagens, rolamentos, acoplamentos, vedações, cames, embreagens e outros componentes. Sendo que, o desgaste é a razão para a perda de material e desempenho mecânico, enquanto o atrito é a causa do desgaste e da dissipação de energia, de acordo com os autores Czichos (1978), Stachowiak (2007) e Dowson (1979).

Para certas condições de deslizamento de superfícies metálicas secas num regime de desgaste moderado, Archard (1956) descobriu uma regra empírica, explicitada na Equação 1, segundo a qual o volume de material removido é diretamente proporcional à carga aplicada à superfície e à distância de deslizamento, e inversamente proporcional a dureza da superfície mais macia que interage.

$$q = \frac{k}{H} \cdot F \cdot s \quad (1)$$

Em que deve ser considerado:

q (mm³): O volume de material removido;

k (adimensional): O coeficiente de desgaste;

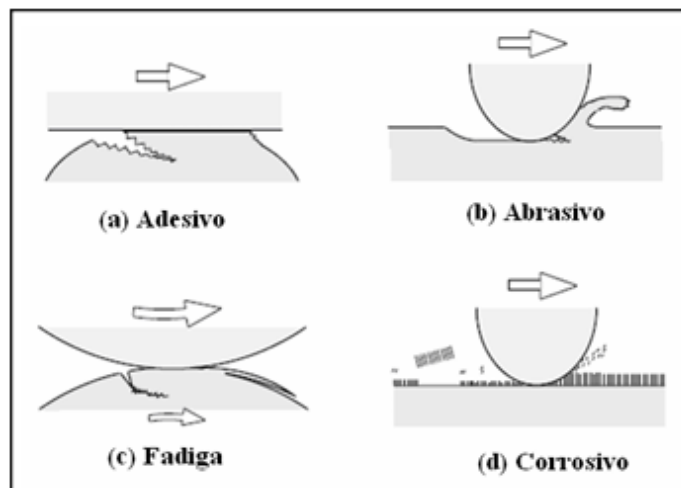
H (N/mm²): A dureza do material;

F (N): A carga normal aplicada;

s (mm): A distância de deslizamento.

Silva (2017) salienta que quando Archard publicou a regra empírica de desgaste a seco, um estudo classificou os principais mecanismos físicos de desgaste, de acordo com esta classificação, pelo menos quatro mecanismos físicos principais foram distinguidos: desgaste adesivo; desgaste abrasivo; desgaste corrosivo; desgaste por fadiga (CZICHOS, 1978; BURWELL, 1957). Estes quatro mecanismos estão ilustrados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Desenho esquemático dos mecanismos de desgaste



Mecanismos: a) Adesivo; b) Abrasivo; c) Fadiga; d) Corrosivo

Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

Entretanto, Silva (2017) afirma que os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Esses são descritos pelas considerações de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante.

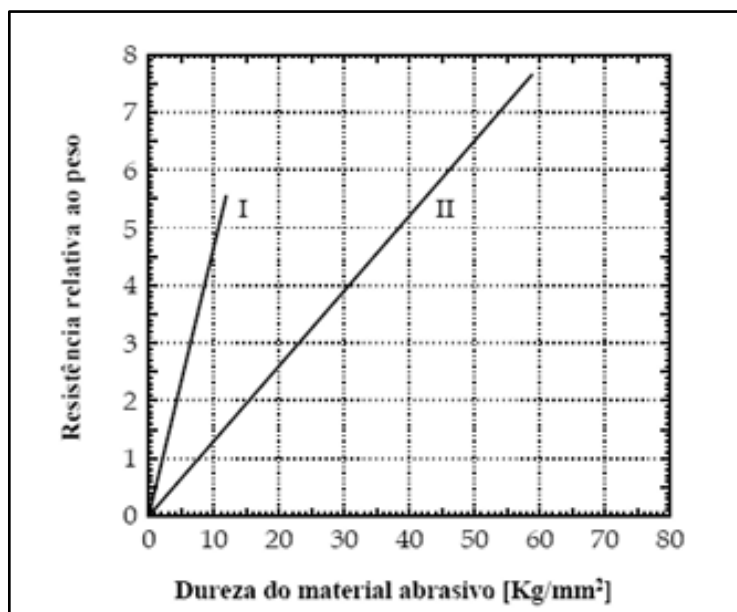
Para tanto, foram mais de trezentos modelos de desgaste e equações desenvolvidas durante o último século, modelos baseados em relações empíricas, mecânica de contato e em mecanismos de falha dos materiais. Um dos modelos mais relevante foi proposto por Archard em 1956, apesar de alguns autores não concordarem com o uso da equação de Archard para materiais poliméricos, ela tem sido usada na literatura para este tipo de material através de adaptações, devido à impossibilidade de determinar a dureza dos materiais poliméricos (HUTCHINGS, 1992; DOWSON, 1979).

Silva (2017) explica que o desgaste é um fenômeno que pode ser determinado por testes em tribosistemas, onde parâmetros como propriedades da superfície, composição química do material, distância de deslizamento, velocidade e carga aplicada, devem ser analisados para uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste.

A equação de Archard é a forma mais comum de calcular a taxa de desgaste em um sistema. Porém, em materiais poliméricos, é difícil determinar o valor de k , devido à impossibilidade de determinar o valor da dureza H (as deformações que ocorrem durante o processo de medição da dureza ocultaram negativamente os resultados). Os polímeros apresentam baixos valores de tensão, deformação e resistência ao desgaste, comparados aos metais de mesma dureza, o que favorece mais o desgaste por microcorte do que por microsulcamentos.

Os polímeros, embora macios, podem ter um grau surpreendentemente elevado de resistência ao desgaste abrasivo, comparados com um metal de mesma dureza. A maior durabilidade dos polímeros pode ser atribuída à elevada resistência à abrasão por arrancamento de grãos e à incapacidade de fraturar grãos formando novas arestas de bordas afiadas, comparados aos metais. A resistência ao desgaste por abrasão relativa dos polímeros e metais de mesma dureza é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Resistência ao desgaste abrasivo para polímeros e metais



(I) Polímeros; (II) Metais

Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

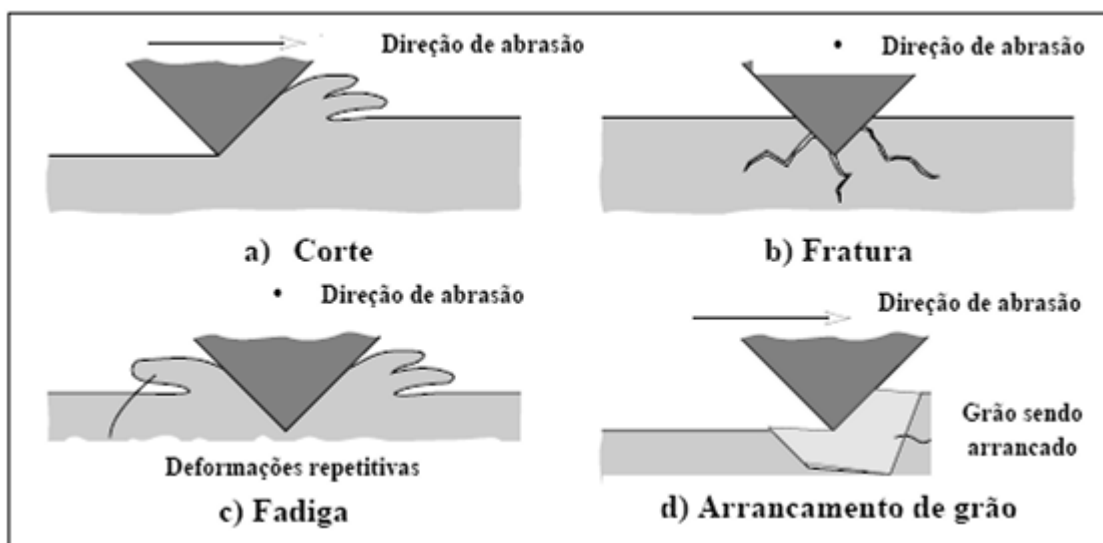
Para Franco *et al.* (2005), o aumento da dureza dos polímeros apesar de não contribuir para mudanças visíveis nos mecanismos de desgaste, pode ocorrer perdas de resistência ao desgaste abrasivo. Provavelmente essas perdas ocorreram devido à influência nas propriedades de alongamento do material, sabendo que o aumento da resiliência e do alongamento máximo na ruptura colaboraram para um aumento na resistência ao desgaste abrasivo. A propriedade de resistência ao rasgo do material tornou-se uma propriedade secundária, devido à predominância de microcorte como mecanismo de desgaste principal. Isto se dá porque está mais relacionado com a capacidade de deformação elástica e de devolução de energia (resiliência) do material para o tribossistema.

3.2.1 Desgaste por Atrito Abrasivo

O desgaste abrasivo acontece quando um objeto sólido se movimenta contra partículas de um material cuja dureza é igual ou superior à da superfície do objeto sólido. Um exemplo típico desse problema são os cabos revestidos com polímeros usados em ambientes industriais, em que podem desgastar-se abrasivamente quando arrastados sobre superfícies ásperas ou através de conduítes que contêm partículas abrasivas. Sendo assim, mesmo que o material seja considerado macio, a presença de algumas partículas duras pode causar desgaste.

Segundo Silva (2017), a base da resistência ao desgaste abrasivo dos materiais é a dureza, na maioria das vezes, os materiais duros proporcionam um desgaste bem mais lento comparado aos materiais macios. Para avaliar a resistência de um material ao desgaste abrasivo, é necessário considerar a dureza a grandes tensões e não a dureza relacionada às deformações plásticas.

Figura 3.5 – Mecanismos de desgaste abrasivo



Mecanismos: a) Corte; b) Fratura; c) Fadiga; d) Arrancamento de grão

Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

O mecanismo ilustrado na Figura 3.5 a) apresenta um modelo de desgaste, onde a aspereza ou o grão duro corta a superfície macia, e o material removido é denominado como resíduo do desgaste. Na Figura 3.5 b), o material é frágil, como os materiais cerâmicos, e a superfície se desgasta por fratura frágil, com resíduos de desgaste resultantes da convergência de trincas. Na Figura 3.5 c), um grão que perdeu a capacidade de corte (grão cego) atrita contra um material duro, resultando em desgaste por deformações cíclicas em vez de corte.

O último mecanismo, representado pela Figura 3.5 d), mostra a retirada dos grãos, que são descartados como resíduos de desgaste. Este mecanismo ocorre principalmente em materiais cerâmicos onde o espaçamento dos grãos é relativamente pequeno. Grande parte dessa visão mais complexa do desgaste abrasivo é relativamente recente, pois, assim como outras formas de desgaste, os mecanismos do desgaste abrasivo nem sempre são visíveis a olho nu. Até recentemente, demonstrações diretas desse mecanismo eram praticamente inexistentes. Com a criação do microscópio eletrônico de varredura (MEV), o detalhamento dos mecanismos

de desgaste abrasivo, que antes era praticamente impossível, tornou-se viável (STACHOWIAK, 2007).

Stachowiak (2007) reforça que a aplicação de lubrificante é um fator importante, pois influencia no corte por partículas abrasivas. Com lubrificação, o corte ocorre com um menor raio de penetração do grão em comparação com situações sem lubrificação. Isso significa que, se um grão estiver rigidamente fixo, por exemplo, incorporado em um metal macio, e submetido a uma carga contra um metal mais duro, na presença de um agente lubrificante, é mais provável que ocorra um menor desgaste por microcorte do que na ausência de lubrificante.

3.2.2 Estudo do Comportamento Tribológico e Parâmetros de Processo em Impressão 3D de Polímeros

No estudo de desgaste abrasivo de dois corpos, Dangnan (2020) observou uma superfície de contato mais dura, o que ocasionou microcortes e aração nas asperezas da superfície mais macia. Por outro lado, o desgaste abrasivo de três corpos envolve a interação sinérgica de um terceiro corpo que atua como um meio erosivo em ambas as superfícies de contato. Em ambos os casos, junções de desgaste adesivo são formadas durante o processo de fricção e cisalhamento na interface de contato real, produzindo partículas na faixa de tamanho micrometro. Um filme de transferência é posteriormente formado na superfície do contador e, se estável o suficiente, contribui para uma redução no coeficiente de atrito.

Devido ao contato direto entre o filme de transferência e o material polimérico, ele age como duas superfícies de polímero atritando uma contra a outra em um contato polímero-sobre-polímero. No entanto, novas micropartículas são constantemente formadas e cisalhadas no processo, levando ao aumento da taxa de desgaste e a um maior coeficiente de atrito, declaram Myshkin *et al.* (2005).

Trabalhos têm focado na melhoria da precisão dimensional (SOOD, 2009), na caracterização da resistência do material (HE *et al.*, 2008; SHI, 2011) e no refinamento da rugosidade superficial (AHN, 2009), tudo para melhorar o comportamento tribológico na interface de contato (HE *et al.*, 2008; SHI, 2011). Como exemplo de pesquisa desenvolvida, o trabalho executado pelos autores Dawoud *et al.* (2015), em que, segundo esses, ocorre um aumento no comportamento de atrito de peças de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) impressas em 3D fabricadas pela FDM quando um gap *raster* positivo foi introduzido (um aumento na distância entre dois filamentos adjacentes, depositados no mesmo plano de

impressão). Posteriormente, demonstraram que esse aumento se devia à natureza independente da estrutura depositada dentro do corpo modelador do filamento, contribuindo para elevar o coeficiente de atrito.

Em experimento semelhante, houve um aumento na taxa de desgaste do ABS impresso em 3D quando uma lacuna positiva é usada durante a fabricação. Sood (2009) observou que ao usar de uma lacuna positiva, ocorreu a criação de buracos na superfície de desgaste. Ademais, Gaya *et al.* (2015) revelaram que o espaçamento entre as camadas impressas ao longo do eixo X não influenciou de modo significativo nas propriedades mecânicas. O maior efeito sobre o módulo de relaxação foi observado ao longo do eixo y. No entanto, o efeito desses parâmetros sobre o desempenho tribológico ainda precisa ser adequadamente explorado.

Maguluri *et al.* (2023) demonstraram o impacto dos parâmetros de processo na taxa de desgaste com corpos de prova impressos utilizando técnica FDM com PLA. Os autores observaram que a taxa de desgaste diminui com o aumento da densidade de preenchimento. Com 100% de densidade de preenchimento, a peça é totalmente sólida, não há espaço perceptível entre as camadas depositadas, tornando-se mais rígida. Com isso, o material suporta a carga aplicada, produzindo extrema resistência a essa taxa de densidade. Além disso, como a densidade de enchimento é máxima, o fluxo de ar é mínimo devido ao menor espaço entre os dois *rasters* adjacentes. Como resultado, a transferência de calor é desprezível, aumentando a cristalinidade do material impresso (HIKMAT, 2021).

Para tanto, a pesquisa de desgaste do Maguluri *et al.* (2023) relatam que o valor da taxa de desgaste diminui à medida que a temperatura de extrusão aumenta. Já que, em temperaturas de extrusão mais altas, o material depositado é suficientemente líquido e moderadamente degradado. Dessa forma, à medida que a temperatura de extrusão aumenta de 180°C para 200 °C, durante o experimento analisado, a taxa de desgaste do material PLA impresso diminui parcialmente à medida que a liquidez e a resistência de união entre as camadas depositadas aumentam. Quando a temperatura aumenta de 200°C para 220°C, pode-se observar que a taxa de desgaste diminui ainda mais, isso se deve à liquidez e resistência adesiva entre as camadas depositadas serem suficientes para produzir um melhor acabamento superficial do material impresso (WANG, 2020; MAGULURI *et al.*, 2021). Em contrapartida, identificou-se que o aumento da velocidade do bico extrusor aumenta a taxa de desgaste, por consequência dos *rasters*, pois através do tempo de contato menor, causa redução no processo de cristalização (RENGANATHAN, 2021; MAGULURI *et al.*, 2022).

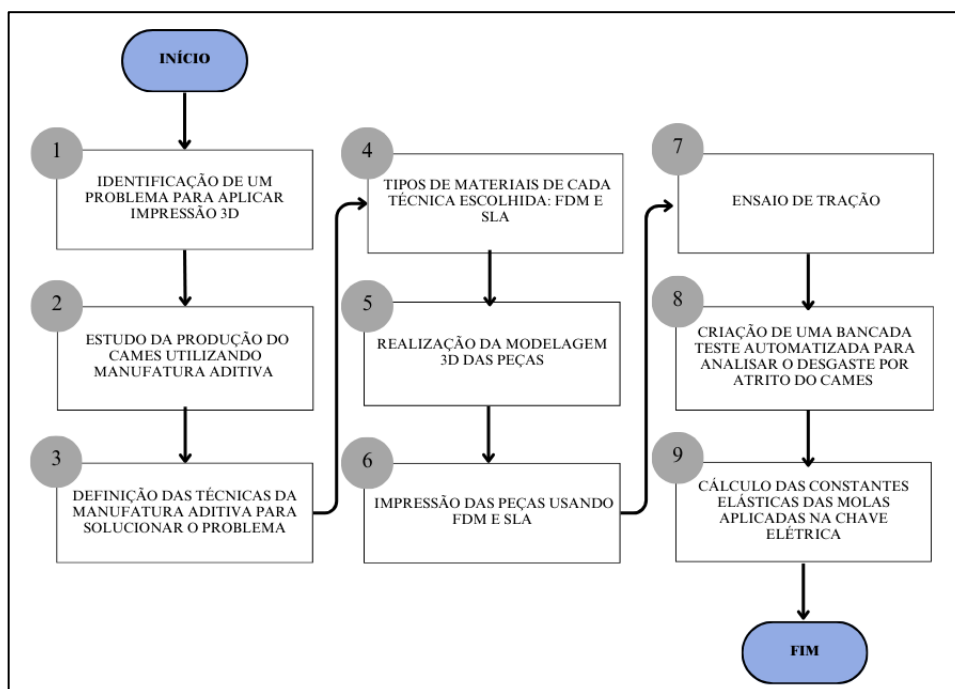
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fluxograma do Desenvolvimento dos Processos do Projeto

Para desenvolver este trabalho, foi aplicada a metodologia Motivo-Causa-Solução (MCS), utilizada na identificação e solução de problemas. O método MCS envolve três etapas principais: identificar o motivo do problema, analisar a causa raiz e propor soluções adequadas. Vale ressaltar que, essa técnica não se concentra apenas nos sintomas, mas busca entender profundamente a origem dos problemas para implementar ações corretivas eficazes.

O fluxograma construído desde a fase inicial do trabalho encontra-se ilustrado na Figura 4.1, em que desdobra o passo a passo realizado para a execução do trabalho.

Figura 4.1 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na fase inicial do trabalho (1), identificou-se em uma empresa do ramo ferroviário a falta de materiais para reparar peças de locomotivas de frotas antigas. Dessa forma, a manufatura aditiva teria um papel significativo para produzir esses itens retirados de linha pelo fornecedor, oferecendo um *lead time* de produção da peça de acordo com a demanda necessária da empresa.

Nessa prerrogativa, houve a construção de uma lista de peças de locomotivas para estudo da aplicação da impressão 3D no processamento das mesmas, citado na fase (2). Todo o conteúdo da lista era crítico para execução atender a fila de locomotivas na oficina, ou seja, peças não encontradas no mercado, e que sem elas não seria possível liberar a máquina para o trecho. Sendo assim, foi escolhido para desenvolvimento e estudo desse trabalho a confecção do cames da chave elétrica, devido à existência de um tribossistema que envolve o cames no interior da chave.

A fase (3) consistiu em escolher as técnicas apropriadas da manufatura aditiva que se enquadravam nas requisições ideias para fazer o cames, nesse caso com objetivo de ter peças mais resistentes ao desgaste abrasivo, tendo maior vida útil ao emprego de pelo menos 2000 mil ciclos completos para o desgaste inicial. Com isso, selecionou-se a técnica FDM, por ter uma disponibilidade de filamentos especiais com propriedades específicas para produzir projetos diversos, e a SLA em que detêm de resinas capazes de conferir a peça impressa alta dureza e resistência mecânica, com geometria bem definida e precisa.

A definição do material utilizado citado na etapa (4), levou em conta a resistência mecânica que o produto deveria ter, uma vez que o cames possui comportamento cíclico, assim o filamento 80PLA/20FC, possui fibra de carbono reforçando a estrutura do PLA (matriz), o que proporciona maior rigidez e resistência à flexão e compressão. Embora o PLA comum seja fácil de imprimir, o PLA com fibra de carbono mantém essa característica, sendo relativamente simples de usar em impressoras 3D com uma boa qualidade de impressão, mesmo com a adição do reforço de fibra, comparado a outros tipos de polímeros, como ABS. Para tanto, a Tabela 4.1 apresenta as propriedades do filamento polimérico.

Tabela 4.1 – Propriedades do filamento polimérico 80PLA/20FC

Propriedade	Valor
Peso líquido	1 quilograma
Diâmetro	1,75 mm
Temperatura do bico de impressão	200 – 220°C
Temperatura da mesa de impressão	50 – 70°C
Tolerância dimensional	± 0,05mm

Fonte: Próprio autor, 2025.

No que diz respeito à técnica SLA, a escolha da resina de epóxi decorreu devido a sua resistência à compressão, tornando-a ideal para produzir materiais como cames, que sofrem forças repetitivas e exigem alta resistência estrutural. Essa resina oferece uma durabilidade

superior, sendo capaz de suportar cargas sem deformações significativas, tendo excelente habilidade de adesão entre camadas impressas, além de apresentar um baixo índice de encolhimento durante a cura, o que minimiza o risco de deformações durante o processo de impressão. Na Tabela 4.2 são demonstradas as características da resina de epóxi utilizada.

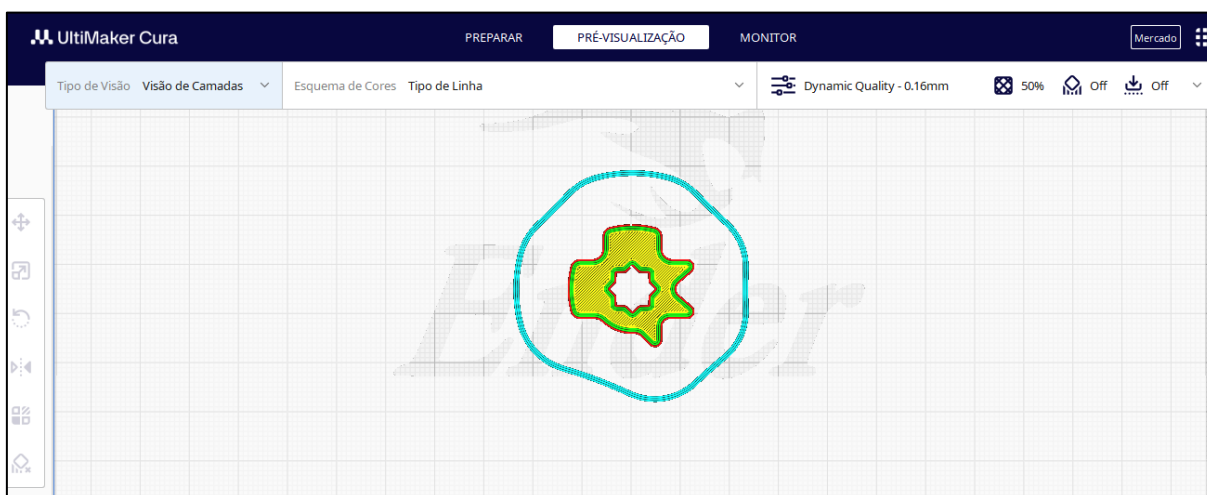
Tabela 4.2 – Propriedades da resina de epóxi

Propriedade	Valor
Peso líquido	1 litro
UV	405nm
Cumprimento da onda da impressão	380 – 440nm

Fonte: Próprio autor, 2025.

A etapa (5) do fluxograma destaca a modelagem tridimensional do cames. Para isso, inicialmente utilizou-se o *software Autodesk AutoCAD*, versão 2024 estudantil, para a elaboração do desenho técnico da peça. Em seguida, foi empregado o *AutoDesk Inventor*, versão 2024 estudantil, para a modelagem 3D. Posteriormente, a peça foi fatiada utilizando a plataforma *Ultimaker CURA*, versão 5.8.1. A Figura 4.2 apresenta o cames após o processo de fatiamento.

Figura 4.2 – Modelagem 3D do cames da chave elétrica após fatiamento



Fonte: Próprio autor, 2025.

Para o processamento das peças na fase (6), foi utilizada a impressora *Creality Ender-3 V3 Se*, fabricada em 2021, que possui mesa com movimento nos eixos X e Y, além de cabeçote de impressão com movimento no eixo Z, do tipo *Direct Drive*. Ao todo, foram impressas 18 peças, empregando a técnica FDM, distribuídas em diferentes densidades: 6 unidades com 30%

de densidade, 6 unidades com 50% de densidade e 6 unidades com 100% de densidade. Ademais, para a realização do ensaio de tração, foram impressos 9 corpos de prova, seguindo a distribuição de 3 corpos de prova com 30% de densidade, 3 com 50% de densidade e 3 com 100% de densidade. Para todas as amostras impressas, foram modeladas 3 camadas na parede de impressão. Os parâmetros de engenharia de impressão definidos estão apresentados na Tabela 4.3, na qual a primeira coluna registra as peças com seus respectivos códigos: C30, correspondendo à peça impressa com 30% de preenchimento; C50, referente à peça impressa com 50% de preenchimento; e C100, representando a peça impressa com 100% de preenchimento.

Tabela 4.3 – Parâmetros de impressão aplicados na técnica FDM

Código peça	Preenchimento	Arquitetura interna	Altura da camada	Velocidade de impressão	Temperatura de impressão	Temperatura mesa impressão
C30	30%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C30	30%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C30	30%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C50	50%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C50	50%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C50	50%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C100	100%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C100	100%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C
C100	100%	Giróide	0,1 mm	65 mm/s	200°C	50°C

Fonte: Próprio autor, 2025.

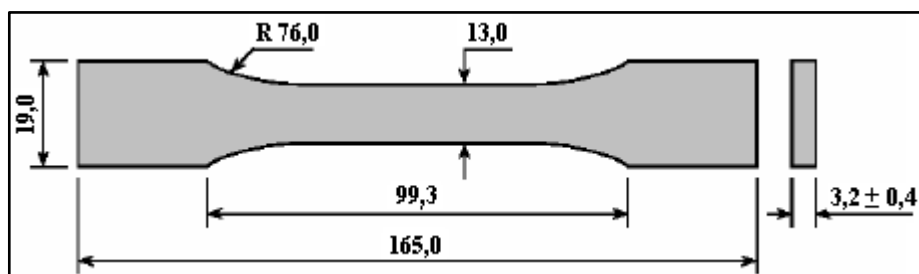
Para a impressão SLA, foi utilizada a impressora *Elegoo Mars 2PRO* do Laboratório de Polímeros do CEFET-MG, fabricada no ano 2021, com resolução da tela de 2K, capacidade de curar resinas por 2 segundos/camada, com comprimento de onda 405nm, e velocidade de impressão 30 – 50mm/h. Após impressão de 12 peças, antes de realizar a cura, ocorreu a remoção dos resíduos de resina não curadas com álcool isopropílico 70%, em seguida as peças foram inseridas na máquina de cura *Wash&Cure 2.0*, por 20 minutos para cada interface do cames. Os parâmetros de impressão para a técnica SLA foram definidos no software de fatiamento *CHITUBOX Basic V2.1*, como citado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de impressão aplicados na técnica SLA

Parâmetro	Valor
Exposição da base	5 segundos
Tempo de exposição da camada	2,5 segundos
Altura da camada	0,05 mm
Quantidade das primeiras camadas	5
Preenchimento	100%

Fonte: Próprio autor, 2025.

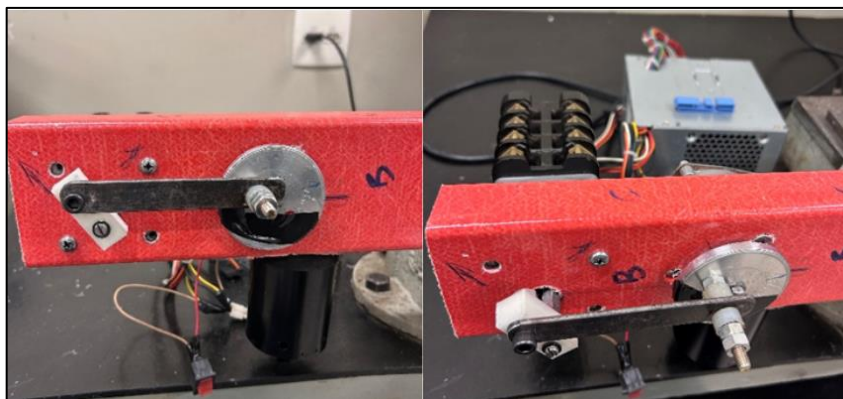
Ademais, o passo (7) decorreu do ensaio de tração dos materiais selecionados, com a máquina universal de ensaios mecânicos da marca SHIMADZU AG-X 10kN, levando em consideração as especificações da norma ASTM D638-14, tanto para corpos de prova 80PLA/20FC, quanto para os corpos de prova de resina epóxi, dessa forma seguindo a norma, as peças foram impressas de acordo com o desenho técnico ilustrado na Figura 4.3. A velocidade de tração aplicada nos corpos de prova para o material 80PLA/20FC foi de de 2mm/min, e 0,5 mm/min nas amostras da resina epóxi.

Figura 4.3 – Desenho técnico do corpo de prova para ensaio de tração

Fonte: ASTM D638-14, 2014.

Por conseguinte, na etapa (8) sucedeu do desenvolvimento de uma bancada teste automatizada para realizar os ensaios de desgaste por atrito no cames. Para isso, foi necessária a construção: um motor de para-brisa de carro universal 2 velocidades, uma fonte de alimentação 10A 110V, uma coluna de material polimérico para montar o mecanismo, uma biela feita com barra de aço, e um botão liga/desliga. A Figura 4.4 demonstra a bancada teste montada depois de realizar o primeiro ensaio. Vale ressaltar que, a peça se movimentava no ângulo de 140° graus da esquerda para direita, girando entre os 3 picos do cames, e cada minuto correspondia a 95 ciclos.

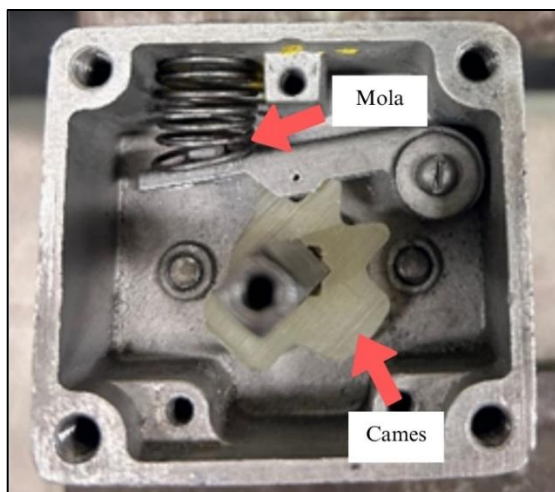
Figura 4.4 – Bancada teste automatizada para executar o desgaste cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

A Figura 4.5 ilustra a chave elétrica com o cames impresso pela técnica SLA com resina epóxi, antes de iniciar o ensaio de desgaste cíclico. Para tanto, foram realizados 18 ensaios, 9 deles com 10 minutos, e 9 com 30 minutos para peças impressas em 30, 50 e 100 % de preenchimento. Quanto os cames de resina, foram 4 ensaios, 3 para 10 minutos, e 1 tentativa para 30 minutos.

Figura 4.5 – Chave elétrica com o cames impresso com resina epóxi



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na Figura 4.6, é possível observar o movimento angular que faz o cames girar em 140° graus. A princípio ocorre o primeiro passo de giro em que executa a partida da locomotiva, o segundo passo realiza a marcha fazendo com que a máquina inicie à tração, e por fim o terceiro passo de giro desempenha o isolamento da tração.

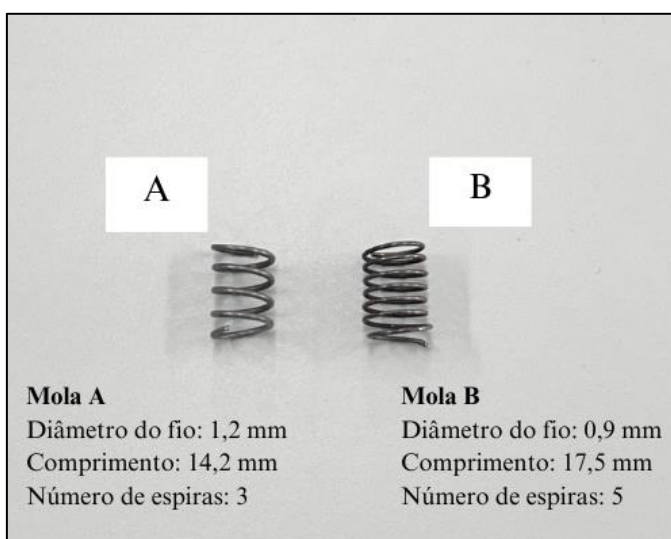
Figura 4.6 – Movimento angular do cames na chave elétrica



Fonte: Próprio autor, 2025.

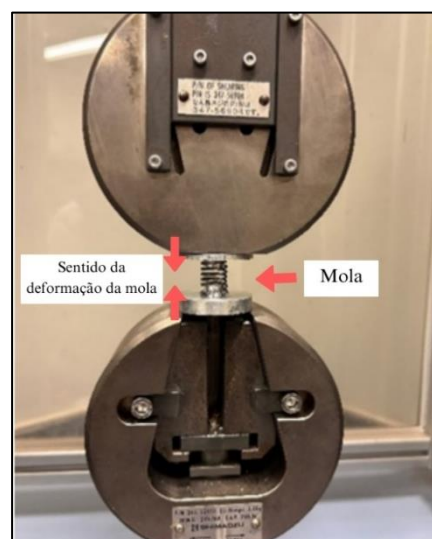
Por fim, na última fase (9), tornou-se crucial realizar o ensaio de compressão de 2 molas, a original que já estava na chave elétrica, e outra com constante elástica menor para reduzir a pressão sob o cames. Na Figura 4.7 consta a ilustração das molas, em que a mola a) estava instalada na peça, e a b) foi inserida posteriormente para obter dados comparativos entre as duas.

Figura 4.7 – Molas utilizadas na prática de desgaste



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 4.8 – Ensaio de compressão da mola



Fonte: Próprio autor, 2025.

O ensaio de compressão foi realizado na máquina universal de ensaios mecânicos da marca SHIMADZU AG-X 10kN, comprimindo as molas 3 vezes, em 1, 2 e 3 mm de deformação, obtendo assim os valores da força exercida sob a mola, como evidenciado na Figura 4.8.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos Resultados dos Ensaio de Tração do Polímero 80PLA/20FC

O ensaio de tração foi realizado utilizando nove corpos de prova fabricados com filamento 80PLA/20FC, por meio da técnica FDM, e três corpos de prova confeccionados em resina epóxi, impressos pela técnica SLA. Como a máquina universal de tração utilizada não portava do extensômetro para medir a deformação, para obter os resultados de deformação das amostras foi necessário dividir o deslocamento pelo comprimento útil do corpo de prova.

Na Tabela 5.1 contém os resultados obtidos para os ensaios efetuados com três peças, constituídas por 30% de preenchimento do material 80PLA/20FC. A média do limite de resistência à tração (LRT) considerando os 3 testes foi $15,8 \pm 0,3$ MPa, que deve estar atrelado ao percentual de preenchimento das peças, uma vez que com preenchimento menor, a adesão entre as camadas do polímero é menos eficiente, sendo as áreas de contato entre as linhas de impressão menores, o que pode resultar em pontos de falha sob a tensão deformação, levando a uma menor resistência à tração. Em preenchimentos maiores, as camadas estão mais densamente interligadas, proporcionando melhor coesão e resistência.

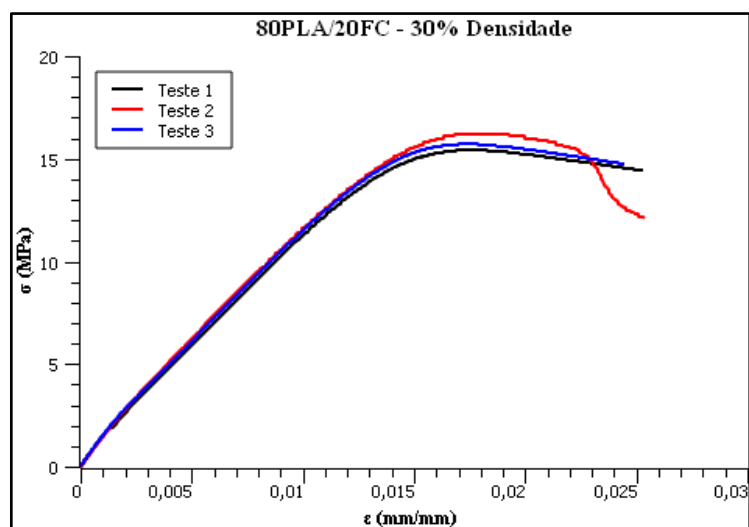
Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 30% densidade

	LRT (MPa)	Deformação convencional (mm/mm)(%)
Teste 1	15,4	2,5
Teste 2	16,2	2,5
Teste 3	15,7	3,5
Média	15,8	2,8
Desvio Padrão	0,3	0,5

Fonte: Própria autor, 2025.

A Figura 5.1 ilustra o gráfico tensão deformação convencional do ensaio para os corpos de prova C30, onde pode-se observar que as curvas atingem a força máxima acima do limite de resistência à tração 15 MPa.

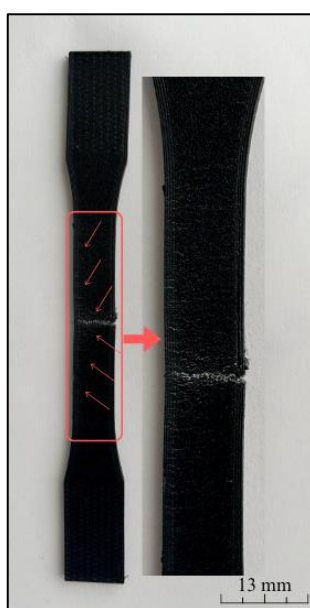
Figura 5.1 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C30



Fonte: Próprio autor, 2025.

A área transversal do corpo de prova C30 tem pontos esbranquiçados, indicando descamação do material durante o estiramento do ensaio de tração. Se a adesão interlaminar das camadas de impressão não for suficiente, ocorrendo espaços vazios entre as camadas impressas, a resistência diminui, resultando na descamação ilustrada na Figura 5.2, onde as setas vermelhas apontam as microfissuras brancas formadas em boa parte do comprimento útil do corpo de prova. Logo, quanto mais baixo o percentual de preenchimento de material nas peças impressas, menor será a resistência à tração.

Figura 5.2 – Corpo de prova impresso com 30% de preenchimento após ensaio de tração



Fonte: Próprio autor, 2025.

O ensaio realizado com os corpos de prova preenchidos com 50% do filamento polimérico 80PLA/20FC, não teve um aumento significativo do limite de resistência à tração médio comparado aos corpos de prova C30, mesmo aumentando em 20% o preenchimento do material entre as linhas de impressão. Na Tabela 5.2 há o registro dos dados do ensaio de tração para os corpos de prova C50, em que o LRT para dessas peças alcançou uma média de $16,7 \pm 0,07$ MPa. A resistência à tração do PLA é baixa, segundo Rasal (2010). O autor destaca o polímero como material quebradiço, impossibilitando a utilização em aplicações que necessitem de deformações plásticas. Logo, mesmo com um aumento no preenchimento, o PLA ainda pode ser o principal fator limitante na resistência à tração.

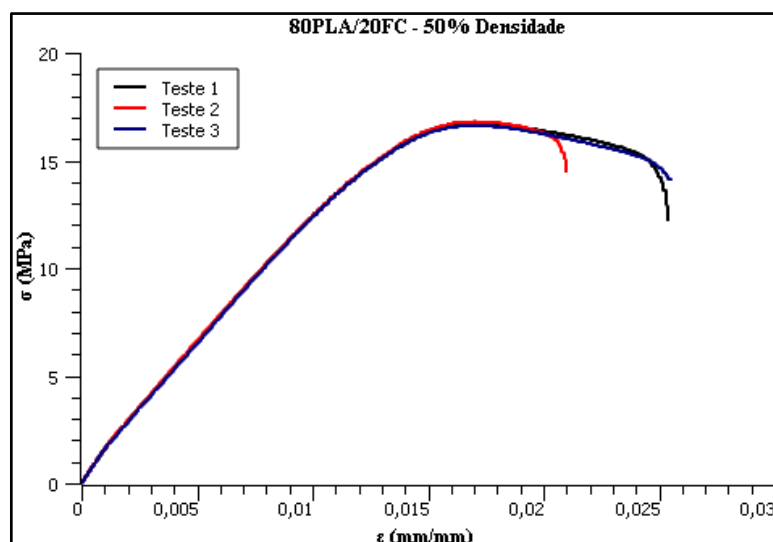
Embora as fibras de carbono aumentem a rigidez e resistência do PLA, o efeito não é linear. O reforço das fibras pode ser mais significativo para resistir a deformações, mas não necessariamente para a resistência à ruptura. Isso resultou em uma diferença pequena nas tensões de ruptura entre 30% e 50% de preenchimento. Vale salientar que a quantidade de fibras inseridas no processamento do material também tem um efeito limitado, dependendo da distribuição e alinhamento das fibras. Se as fibras de carbono não estiverem bem orientadas nas regiões de maior carga, o aumento na resistência não será tão expressivo, ou se a quantidade de fibra não for suficiente para formar uma rede de reforço eficiente, o aumento de resistência à tração pode ser marginal.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 50% densidade

	LRT (MPa)	Deformação convencional (mm/mm)(%)
Teste 1	16,7	2,5
Teste 2	16,8	2,1
Teste 3	16,6	2,5
Média	16,7	2,4
Desvio Padrão	0,07	0,2

Fonte: Próprio autor, 2025.

O gráfico com as curvas tensão deformação convencional dos 3 testes para os corpos de prova com 50% de preenchimento é ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C50

Fonte: Próprio autor, 2025.

Concluindo os ensaios de tração para o polímero compósito 80PLA/20FC, foram analisados os corpos de prova C100, ou seja, com 100% de preenchimento. A Tabela 5.3 detém os valores encontrados nos testes de tração para as peças, dessa forma, é nítido o aumento significativo do limite de resistência à tração médio, em comparação às peças C30 e C50. Sendo assim, no LRT médio foi registrado $23,9 \pm 1,0$ MPa.

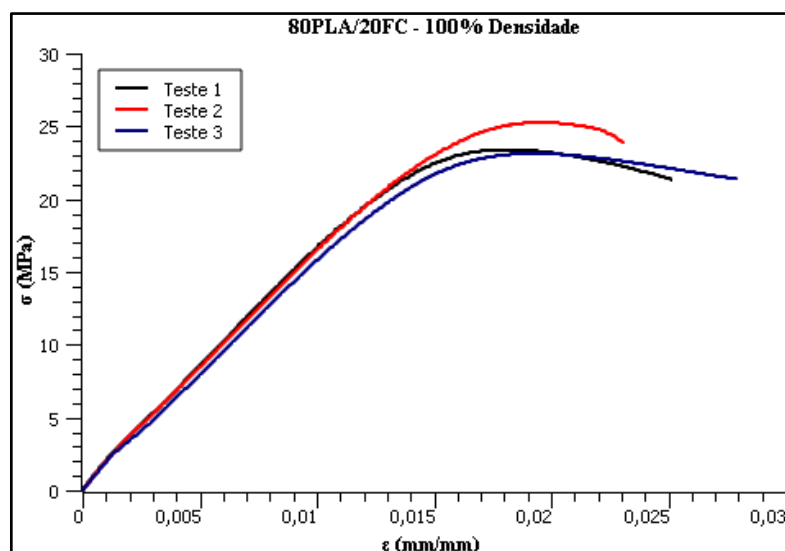
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com 100% densidade

	LRT (MPa)	Deformação convencional (mm/mm)(%)
Teste 1	23,4	2,5
Teste 2	25,3	2,3
Teste 3	23,1	2,8
Média	23,9	2,5
Desvio Padrão	1,0	0,2

Fonte: Próprio autor, 2025.

As curvas tensão deformação convencional para as amostras C100 estão contidas no gráfico da Figura 5.4, em que é possível verificar o aumento do pico máximo em relação às outras curvas encontradas para as peças C30 e C50.

Figura 5.4 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova C100



Fonte: Próprio autor, 2025.

O resultado para os testes das peças C100 ficaram abaixo de resultados dos ensaios de tração realizados com o filamento do material encontrados pelas empresas 3DLAB e SLIM3D. A 3DLAB obteve a tensão de resistência à tração de 46 MPa para filamento PLA puro, concomitantemente a SLIM3D que forneceu o 80PLA/20FC, informa que o LRT do filamento compósito é 56 MPa, vale ressaltar que ambas as empresas utilizaram a norma ASTM-D638 (2014) para imprimir os corpos de prova.

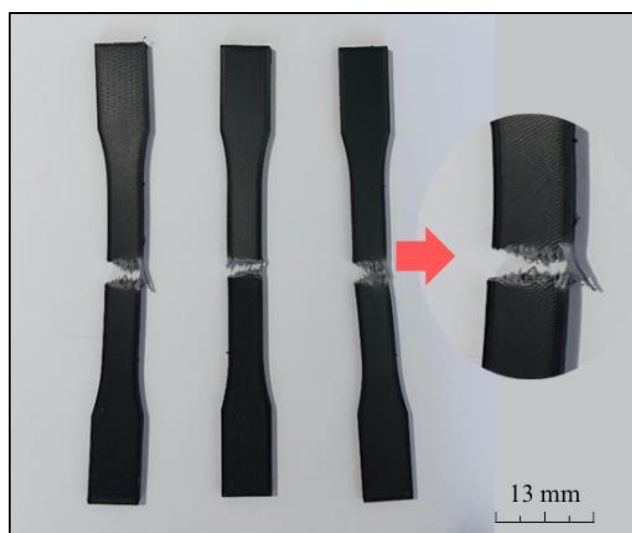
Levando em consideração as variáveis da manufatura aditiva, da técnica FDM, interligadas as propriedades do material aplicado, como por exemplo velocidade de impressão, temperatura do bico extrusor e temperatura da mesa de impressão, todas essas foram devidamente selecionadas de acordo com o estabelecido pela literatura. Sendo assim, a distinção entre os valores encontrados pelas empresas e os ensaios dos corpos de prova desenvolvidos neste trabalho, podem ser justificados por ter sido fundido e solidificado o material novamente com a técnica FDM, sendo assim a temperatura utilizada no bico extrusor da impressora 3D pode ter afetado a resistência à tração.

Quando há uma segunda fase incorporada ao polímero, torna-se comum ocorrer variabilidade nos resultados encontrados, devido à heterogeneidade do material com a adição das fibras de carbono. De acordo com Canevarolo (2002), a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, bem como a presença de uma segunda fase dispersa na matriz sentirá o esforço aplicado no conjunto por um todo. Portanto, a distribuição das fibras de carbono da matriz implica diretamente no resultado da resistência,

a presença de sulcos entre as camadas de impressão causadas por uma má dispersão das fibras, diminuem a resistência à tração das peças.

A evidência da composição do PLA com fibra de carbono é demonstrada na Figura 5.5, em que é possível perceber as fibras no ponto de ruptura da área transversal dos corpos de prova C50 indicado pela seta vermelha. A ruptura do material expõe as fibras de carbono que estavam embutidas na matriz de PLA. Isso sugere que, durante a falha, a matriz polimérica se rompeu primeiro, enquanto as fibras resistiram por mais tempo antes de romperem. Esse comportamento é típico da matriz de um material compósito, onde o reforço (fibras) carrega uma parte significativa da carga até romper.

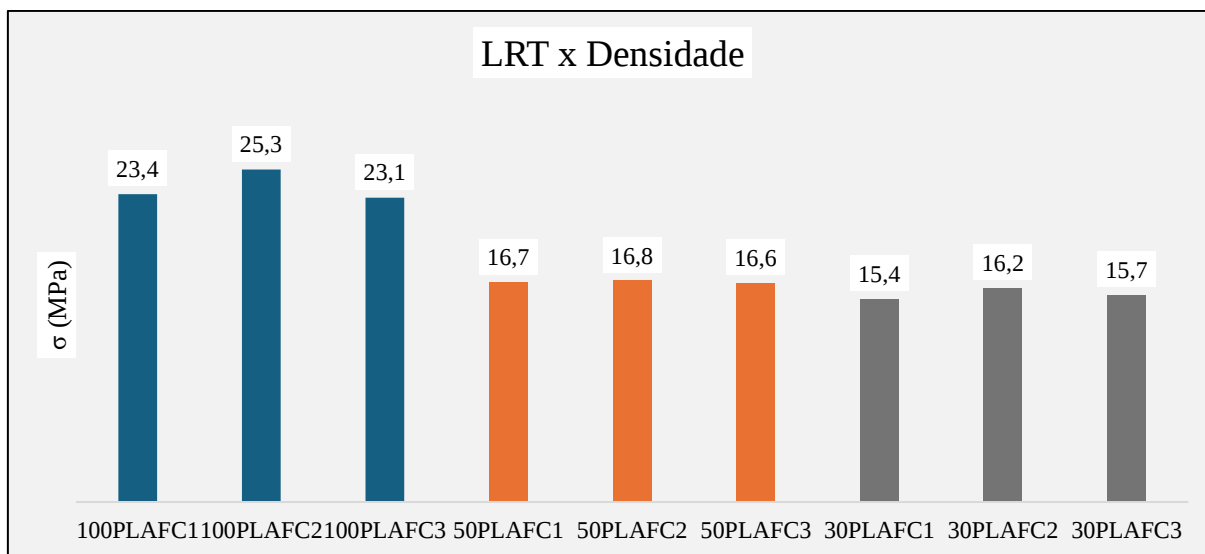
Figura 5.5 – Corpos de prova C50 após ensaio de tração



Fonte: Próprio autor, 2025.

À luz dessas considerações, o gráfico da Figura 5.6 evidencia a diferença adquirida no LRT das amostras ao alterar a densidade de preenchimento das peças. Souza (2022) após analisar corpos de prova com 50% e 100% de preenchimento, notou que a quantidade de material depositado está associada com o aumento da resistência e com a capacidade de deformação das peças. Dessa forma, quanto maior a densidade do material, maior a carga que o objeto pode suportar antes de fraturar, e maior a deformação que pode ocorrer sem ruptura.

Figura 5.6 – Gráfico LRT x Densidade dos corpos de prova 80PLA/20FC



100PLAFC1: Preenchimento 100% 80PLA/20FC (Teste 1); 100PLAFC2: Preenchimento 100% 80PLA/20FC (Teste 2); 100PLAFC3: Preenchimento 100% 80PLA/20FC (Teste 3); 50PLAFC1: Preenchimento 50% 80PLA/20FC (Teste 1); 50PLAFC2: Preenchimento 50% 80PLA/20FC (Teste 2); 50PLAFC3: Preenchimento 50% 80PLA/20FC (Teste 3); 30PLAFC1: Preenchimento 30% (Teste 1); 30PLAFC2: Preenchimento 30% (Teste 2); 30PLAFC3: Preenchimento 30% (Teste 3).

Fonte: Próprio autor, 2025.

5.2 Análise dos Resultados dos Ensaios de Tração da Resina Epóxi

Os resultados obtidos para as amostras da resina epóxi foram registrados na Tabela 5.4, sendo o LRT médio $35,5 \pm 7,4$ MPa. O valor elevado do desvio padrão, 141,90 N, sugere que houve alta variabilidade nos resultados, o que pode ter sido causado por fatores como a heterogeneidade da resina, a qualidade da impressão, ou falhas no processo de cura. Esse dado é observado constantemente em materiais como as resinas epóxi, que podem apresentar diversidades nas propriedades devido a pequenas diferenças na formulação ou no processo de cura.

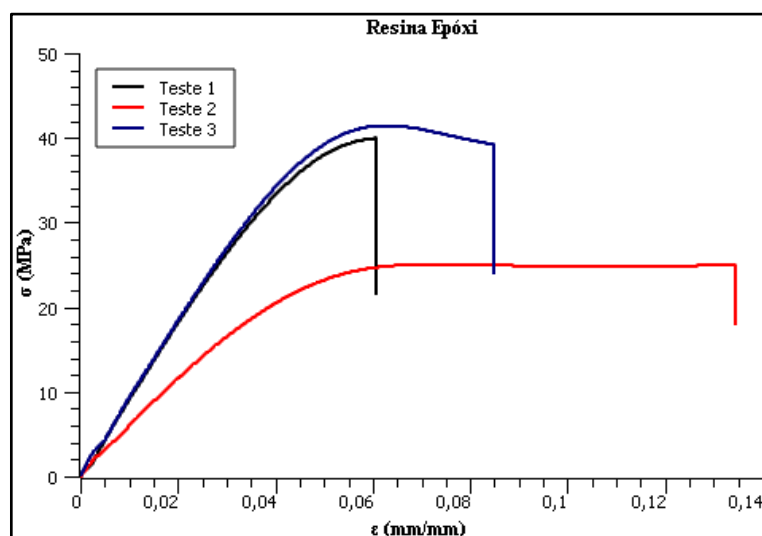
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova da resina epóxi

	LRT (MPa)	Deformação convencional (mm/mm)(%)
Teste 1	40,0	6,1
Teste 2	25,1	13,5
Teste 3	41,4	8,5
Média	35,5	9,3
Desvio Padrão	7,4	3,1

Fonte: Próprio autor, 2025.

O gráfico ilustrado na Figura 5.7 demonstra que a resina epóxi apresentou maior resistência à ruptura, se for comparado aos resultados obtidos com o polímero 80PLA/20FC. A curva do teste 2 registrou um comportamento mais dúctil que as outras amostras, bem como menor tensão de ruptura. Sendo assim, houve uma variabilidade nos resultados das amostras, devido à uma possível inconsistência no processo de cura das peças, ou ainda influência de resíduos de resina não curados na superfície da peça.

Figura 5.7 – Gráfico Tensão x Deformação Convencional para os corpos de prova da resina epóxi



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.3 Ensaio de Compressão das Molas

Como a mola no interior da chave elétrica exerceu pressão expressiva sob o came a cada giro, foi necessário substituir por outra mola com constante elástica menor. Assim, realizou-se o ensaio de compressão das duas molas empregadas no desgaste cíclico das peças, a fim de identificar o resultado da constante elástica das molas. A Tabela 5.5 contém os dados obtidos, para as duas molas, em que MA, faz referência à mola que estava instalada na chave quando recebido, e MB, a mola utilizada para obter dados comparativos.

Tabela 5.5 – Dados obtidos no ensaio de compressão para mola a) e b)

Mola	Deslocamento (mm)	Força (N)	Constante K (N/m)
MA	2	5,48	2.740
MA	3	5,45	1.816
MA	4	6,51	1.627
MB	1	0,95	950
MB	2	0,86	430
MB	3	0,84	280

Fonte: Próprio autor, 2025.

A partir dos valores da força e do deslocamento adquiridos no ensaio de compressão, houve a aplicação da Equação 2 da constante elástica, um parâmetro físico capaz de mensurar a rigidez de uma mola.

$$F_e = k * \Delta x \quad (2)$$

Em que deve ser considerado:

F_e : força elástica medida em Newtons;

K : constante elástica medida em Newtons/metro;

ΔX : comprimento, medida em metros ou milímetros.

Dessa forma, para a mola MA encontrou-se o valor de $k_{média} = 2.061,39$ N/m, no entanto para a MB foi obtido $k_{média} = 553,33$ N/m. Sendo assim, há conclusão de que a mola MA apresenta uma constante elástica significativamente maior do que a mola MB. Onde a constante elástica de MA é aproximadamente 3,7 vezes maior do que a de MB, 2.061,39 N/m em comparação com 553,33 N/m. Indicando que a mola MA é mais rígida, e oferece maior resistência à deformação quando comparada à mola MB, que é mais flexível. Com isso, ao empregar na chave elétrica mola com maior constante elástica, ocorrerá consequentemente aumento do desgaste superficial da peça.

5.4 Desgaste Cíclico do Cames

5.4.1 Análise do Desgaste por Atrito das Amostras 80PLA/20FC

O desgaste cíclico do cames foi executado em dois tempos, 10 e 30 minutos, para cada intervalo de tempo foram ensaiados 3 cames. Na identificação da peça criou-se um código que

começa com o tempo empregado, e em seguida a densidade de preenchimento da amostra, por exemplo 10MINC30, 10 minutos e cames impresso com 30% de preenchimento. Nessa perspectiva, vale comentar que para cada 1 minuto de ensaio a amostra executava 95 ciclos, sendo que o motor fazia a chave girar em 140° graus. A repetição desses esforços provocou uma falha, desgaste por fadiga, com uma tensão muito menor do que o limite de resistência estática do material.

No teste inicial houve a tentativa com a mola A, que possui constante elástica maior, logo deposita sob o cames uma pressão considerável. Sendo assim, o cames processado com 100% de preenchimento foi inserido na chave elétrica, e ao iniciar o desgaste cíclico na bancada teste, o cames resistiu apenas 16 segundos, e rompeu diversas camadas do pico central e da esquerda do cames, impossibilitando a continuidade do funcionamento da chave elétrica, como mostra a Figura 5.8.

Figura 5.8 – Cames impresso com 100% de preenchimento após ensaio cíclico



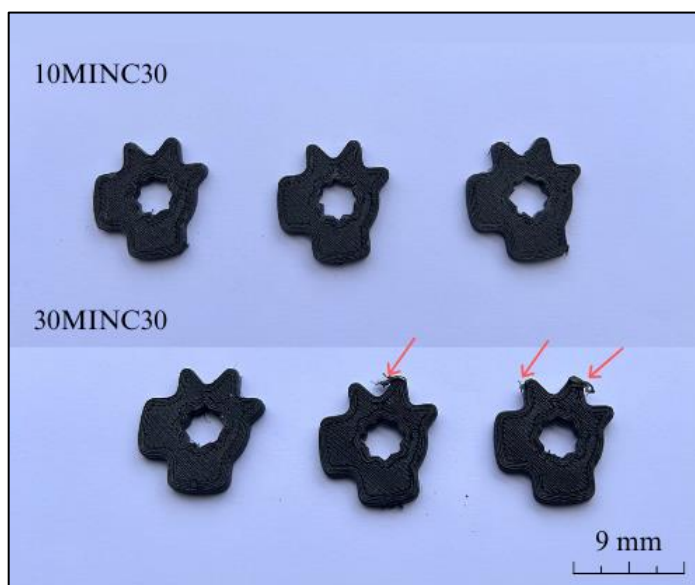
Fonte: Próprio autor, 2025.

Devido à baixa resistência da peça com a mola A com amostra de 100% de preenchimento, peça que possui maior resistência comparada as outras com densidade inferior, concluiu-se que a constante elástica dessa mola incapacitava o emprego das amostras impressas pela técnica FDM. Com isso, a abordagem dos testes foi continuada com a mola B, que tinha menor constante elástica, e consequentemente aplicou menor pressão sob o cames a cada giro.

Sendo assim, o ensaio evidenciado na Figura 5.9 ocorreu com a mola B. As peças com código 10MINC30 não tiveram desgaste evidente nos picos da peça. No entanto, ao visualizar as amostras com identificação 30MINC30, é nítido que alguns picos obtiveram descamação superficial, sinalizados pelas setas vermelhas. Ou seja, o aumento de estresse ocasionou

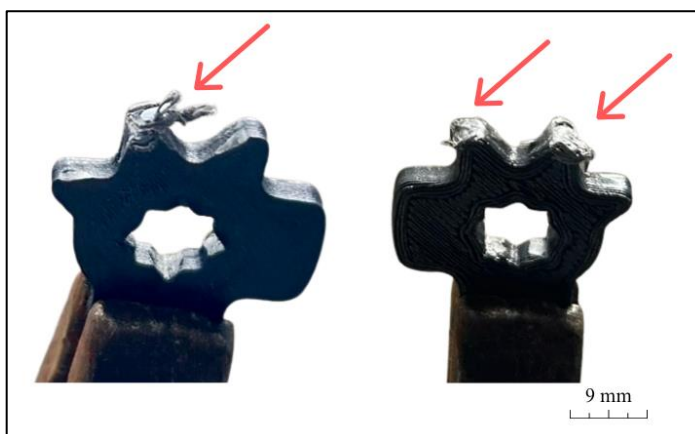
desgaste por atrito para densidade 30% de preenchimento. Os pontos de descamação indicados pelas setas vermelhas observados na área superficial da amostra, foram ampliados na Figura 5.10.

Figura 5.9 – Amostras do cames impressas com 30% de preenchimento após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

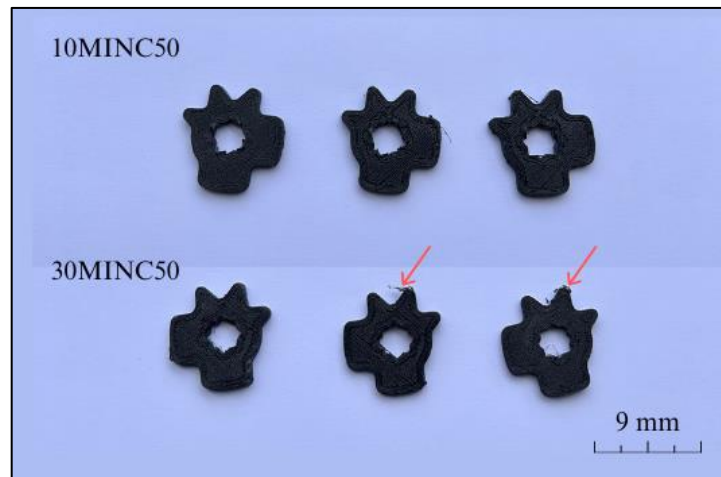
Figura 5.10 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C30 após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

Em seguida, foram ensaiados os corpos de prova impressos com 50% de preenchimento. Para 10MINC50 não houve pontos de desgastes, porém nas peças 30MINC50 dois picos centrais sofreram leve descamação da camada de impressão, que podem ser evidenciados na Figura 5.11, porém esse desgaste foi menor do que o observado no teste 30MINC30. Na Figura 5.12 consta a área com os desgastes sinalizados pelas setas vermelhas.

Figura 5.11 – Amostras do cames impressas com 50% de preenchimento após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

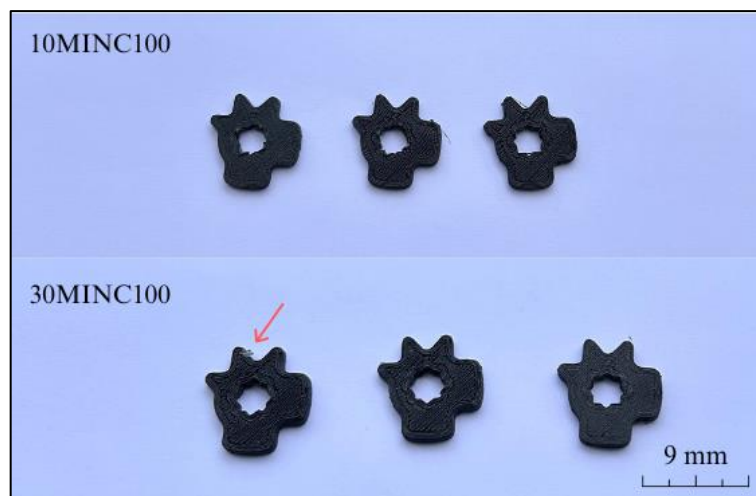
Figura 5.12 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C50 após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

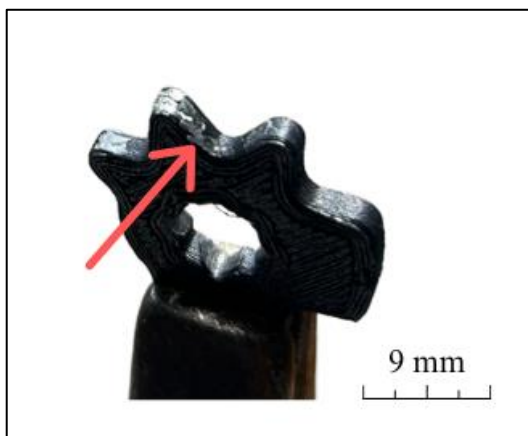
Por fim, ao exercer o desgaste cíclico nas amostras processadas com 100% de preenchimento das camadas de impressão, para 10 minutos de atrito nas peças, não ocorreram alterações na superfície, e para 30 minutos em umas das peças foi observado o desprendimento pequeno da camada em um dos picos da primeira amostra, no entanto os outros dois cames não tiveram modificações superficiais e permaneceram uniformes após o ensaio, como ilustra a Figura 5.13. Com isso, a Figura 5.14 ilustra o desprendimento constatado em um dos picos do corpo de prova.

Figura 5.13 – Amostras do cames impressas com 100% de preenchimento após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 5.14 – Ponto de desgaste na área superficial da amostra C100 após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.4.2 Análise do Desgaste por Atrito das Amostras da Resina Epóxi

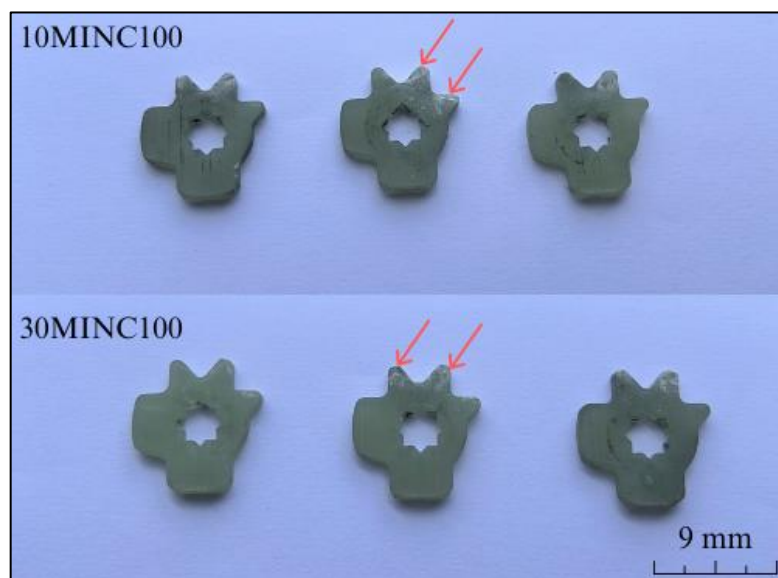
As amostras dos cames impressos com resina epóxi são codificadas considerando 100% de preenchimento, pois foram processadas peças com estrutura densa e sem áreas vazias. Ao optar por 100% de preenchimento, garante-se uma superfície sólida e bem definida. Sendo assim, indo ao contrário dos corpos de prova impressos na tecnologia FDM, que possibilita o uso de preenchimentos com diferentes porcentagens (por exemplo, 20%, 50% ou 100%), a impressão em SLA geralmente visa produzir peças mais sólidas e precisas, com uma alta densidade de material.

Para tanto, a Figura 5.15 ilustra os cames ensaiados por 10 minutos (10MINC100), bem como por 30 minutos (30MINC100), aplicando a mola B, com menor constante elástica, pois não foi possível executar o teste na mola A, sendo o cames de resina epóxi mais resistente à deformação, logo ao tentar fazer o giro no primeiro passe, a chave não girou, uma vez que o material sob alta pressão da mola A, não sofreu a deformação para girar. Portanto, não obteve nenhum giro com a resina epóxi associada a mola A, constatando alta integridade estrutural das peças com preenchimento 100%, garantindo uniformidade na distribuição de tensões e aumento de resistência.

Entretanto, ao alterar a mola, o ensaio pôde ser realizado normalmente. Na Figura 5.15 observa-se que as peças sofreram lascamentos superficiais tanto para 10 minutos, e em 30 minutos ocorreu desprendimento de pequenas lascas na superfície. A uniformidade entre os picos do cames se mantiveram intactas, houve apenas a formação de um pó branco, pois a abrasão da superfície pode resultar na liberação de partículas finas do material, que, ao se soltar, formam um pó branco visível, conhecido como Debris. A Figura 5.16 demonstra os pontos da área superficial que tiveram os lascamentos.

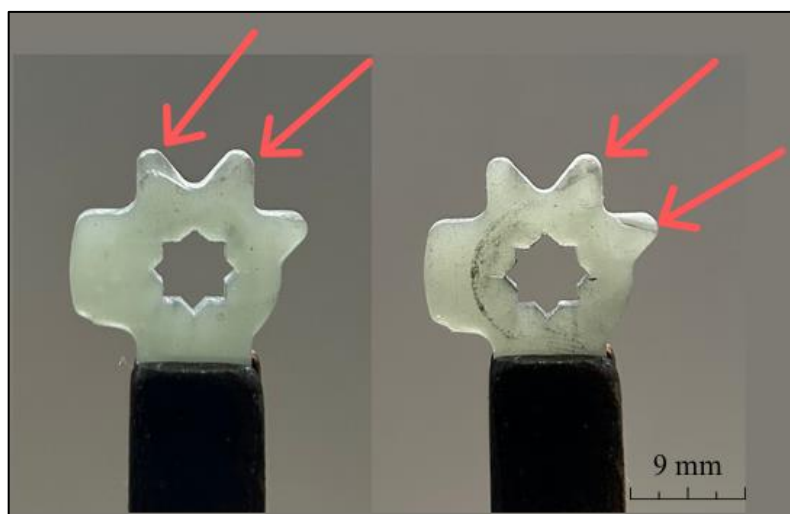
A resina epóxi, quando não modificada para ter melhor resistência ao desgaste (como no caso de resinas reforçadas com fibras), está mais propensa a degradar-se sob esforços repetidos, principalmente em condições de fricção contínua. O desgaste cíclico contribui para a formação de microabrasões e no surgimento de microfissuras, onde o material pode romper e transformar em pó.

Figura 5.15 – Amostras do cames impressas com resina epóxi após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 5.16 – Pontos de desgaste na área superficial das amostras C100 resina epóxi após ensaio cíclico



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.5 Análise Comparativa de Custo dos Materiais Utilizados nas Impressões 3D

Para determinar os custos de fabricação de cada peça, considerando os polímeros utilizados, foi realizado o cálculo do custo por unidade impressa, levando em conta o peso das amostras e o valor em reais (R\$) dos materiais aplicados. Nesse contexto, destaca-se que o rolo de filamento 80PLA/20FC de 1 quilograma tem o custo de R\$200,00, enquanto o pote de 1 quilograma de resina epóxi custa R\$253,80.

Os resultados dos cálculos podem ser visualizados na Tabela 5.6, que apresenta a massa das peças com 30%, 50% e 100% de preenchimento impresso na técnica FDM, bem como as peças com 100% de densidade produzidas pela técnica SLA. A última coluna da tabela indica o custo de produção das peças, de acordo com o preenchimento utilizado na fabricação dos corpos de prova.

Tabela 5.6 – Relação entre materiais utilizados nas impressões das amostras e o custo por peça

Material	Preenchimento (%)	Peso massa (g)	Tempo de impressão (min)	Custo (real)
80PLA/20FC	30	1,07	20	0,21
80PLA/20FC	50	1,14	23	0,23
80PLA/20FC	100	1,29	28	0,26
Resina Epóxi	100	1,24	53	0,31

Fonte: Próprio autor, 2025.

Considerando que a composição de um trem da frota U20, que traciona 20 vagões, é formada por duas locomotivas, e que, a cada trecho percorrido, o maquinista gira a chave elétrica duas vezes (em viagens normais, sem paradas emergenciais), o cames produzido neste trabalho, com 100% de densidade no 80PLA/20FC e resina epóxi, seria capaz de suportar até 2.850 ciclos antes de apresentar os primeiros sinais de desgaste superficial. Esses resultados foram observados nos ensaios de 30 minutos, nos quais cada minuto correspondia a 95 ciclos. Com base nesses dados, e considerando que o trem realize viagens regulares, o cames teria uma vida útil de aproximadamente 1.425 viagens, ou cerca de 3 anos e 9 meses.

Entretanto, um ponto importante a ser considerado na aplicação do cames produzido neste projeto é a constante elástica da mola utilizada na chave elétrica. Molas com constante elástica elevada não são recomendadas, pois exercem uma carga excessiva sobre as peças, o que pode comprometer à resistência ao desgaste.

6 CONCLUSÃO

O trabalho realizou a análise da vida útil do cames fabricado por impressão 3D para adaptar na chave elétrica da locomotiva U20, aplicando duas técnicas da impressão 3D, FDM e SLA. Durante o estudo, foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistência a tração das amostras produzidas com filamento 80PLA/20FC e resina epóxi, bem como a performance do cames sob diferentes constantes elásticas das molas inseridas no interior do componente que exercia pressão sob as amostras a cada passe de giro. Sendo assim, a fabricação da bancada de teste foi fundamental para garantir o registro de dados de forma precisa e segura dos corpos de prova.

Os testes de tração revelaram quais parâmetros da impressão 3D selecionados influenciaram diretamente na tensão de ruptura. Observou-se que o cames fabricado com 100% de preenchimento teve um desempenho superior em comparação às amostras com 30% e 50% de densidade. A resina epóxi apresentou uma tensão de ruptura média superior à das amostras com 100% de 80PLA/20FC, com valores de $35,5 \pm 7,4$ MPa, enquanto o filamento polimérico obteve $23,9 \pm 1,0$ MPa, resultando em uma resistência mecânica da resina 48,4% maior.

A análise comparativa das superfícies das amostras após os ensaios de desgaste cíclico mostrou que a variação no percentual de preenchimento na técnica FDM impactou diretamente a resistência das peças aos esforços aplicados. Quanto menor a densidade interna das peças impressas, menor foi a resistência ao desgaste. No caso da resina epóxi, observaram-se lascamentos na superfície do cames, além da formação de um pó branco, denominado Debris, resultado do atrito entre o cames e a alavanca dentro da chave elétrica.

A mola A, com maior constante elástica, gerou uma pressão que impediu a continuidade dos ensaios, causando desgaste na amostra de 100% preenchimento 80PLA/20FC em apenas 16 segundos. Por outro lado, o cames fabricado com resina epóxi, quando submetido à mola A, não girou no interior da chave, devido à maior resistência à deformação da resina. No entanto, com a mola B, os testes prosseguiram nos ensaios de 10 e 30 minutos, e a análise da vida útil do cames foi realizada.

As peças produzidas com 100% de densidade com 80PLA/20FC e resina epóxi, apresentaram os desgastes superficiais iniciais com 30 minutos de ensaio cíclico, ou seja, em 2.850 ciclos. Se for alterada a mola no interior da chave elétrica com a constante MB, considerando viagens regulares com a locomotiva U20, em que o maquinista gira a chave duas

vezes (para iniciar e encerrar o trajeto) o cames fabricado nesse percentual de preenchimento podem ter uma vida útil de aproximadamente 1.425 viagens.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de aprimorar o estudo a cerca da fabricação do cames, propõe-se para trabalhos futuros:

- A análise do desgaste do cames impresso a partir de resinas especiais;
- A análise do desgaste do cames impresso com nylon empregando variações dos parâmetros de impressão;
- Analisar a vida útil do PLA com fibra de carbono a partir dos ensaios tribológicos: Pino sobre disco, para obter a resistência ao desgaste, a taxa de desgaste e o comportamento do material sob condições de atrito dinâmico; Bem como, o Coeficiente de Fricção, determinando como o material se comporta sob fricção e entender seu impacto no desgaste e na eficiência operacional;
- Realizar o teste de Microscopia Eletrônica de Varredura, para adquirir imagens com resoluções amplificadas das peças impressas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DLAB. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/?srsltid=AfmBOorbNgLJaJcUVT4dWjbPQKjIIsEHmuPWvdffdiHb6VTDX8nJOJ5e>. Acesso em: 3 jan. 2025.

3D Systems. **Estereolitografia.** Disponível em: <https://br.3dsystems.com/stereolithography>. Acesso em: 7 dez. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 638 - 14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2014.

AFRIDI, A.; RASHID, A.; KOÇ, M. **Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges.** Journal Bioprinting 43 (2024) e00360. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360>. Acesso em: 7 dez. 2024.

AHN, D.; KWEON, J. H.; KWON, S.; JUNGIL, S.; LEE, S. **Representation of surface roughness in fused deposition modeling.** J Mater Process Technol, 209 (2009), 5593-5600 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013609002039>. Acesso em: 7 dez. 2024.

ARCHARD, J. F; HIRST, W. **The Wear of Metals Under Unlubricated Conditions** Proc. Roy. Soc., London, (A 236) 1956. 397 p.

AGARWALA, R.V. **Electroless alloy/composite coatings: a review.** Sadhana Vol 28, 2003, 475–493 p. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02706445>. Acesso em: 29 nov. 2024.

BAJPAI, P. K.; SINGH, I.; MADAAN, J. **Development and characterization of PLA-based green composites: a review.** J. Thermoplast. Compos. Mater., 2013, 1-30 p. Doi: 10.1177/0892705712439571. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0892705712439571?journalCode=jtca>. Acesso em: 7 dez. 2024.

BENEDETTI, M.; PLESSIS, A.; RITCHIE, R. O.; DALLAGO, M.; RAZAVI, N.; BERTO F. **Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication.** Vol 144, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X21000012>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BLOK, L.G.; LONGANA, M. L.; YU, H. Woods BKS (2018) **An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites.** Addit Manuf 22:176–186 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417305687>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BORAH, S. **3D printer filament length monitor.** International Journal of Science, Technology and Society. V. 2, N. 5, 2014. 129-132 p. Disponível em:

<https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ijsts.20140205.16>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BURWELL, J. T. **Survey of Possible Wear Mechanisms**. Wear; Vol 1, 1957, 119 p.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043164857900054>.
Acesso em: 10 jun. 2024.

CALLISTER Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**. 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros** – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2002.

CHEN, G.; CHEN, N.; WANG, Q. **Fabrication and Properties of Poly(vinyl alcohol)/ β -Tricalcium Phosphate Composite Scaffolds via Fused Deposition Modeling for Bone Tissue Engineering**. Composites Science and Technology, 2019, Vol 172, 17–28 p.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353818328094>.
Acesso em: 25 mar. 2024.

CHEN, T.; ZHANG, J.; YOU, H. **Photodegradation behavior and mechanism of poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) random copolymers: correlation with copolymer composition**. Journal RSC Advances, Vol 6 (104), 2016, 102778-102790 p. Disponível em:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra21985c>. Acesso em: 20 mar. 2024.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. - São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CRAMER C. J; FIORE, L. G.; JING, F.; YOUNG, G. V.; HILLMYER, A. M. **High Tg Aliphatic Polyesters by the Polymerization of Spirolactide Derivatives**. Polymer Chemistry. Vol 1, 2010, 870-877 p. Disponível em:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/py/c0py00029a>. Acesso em: 30 mar. 2024.

CZICHOS, H. **Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**. Amsterdam, Oxford e New York; Elsevier; Book Series Tribology Series, Vol. 1, 1978. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/tribology-series/vol/1/suppl/C>. Acesso em: 25 mar. 2024.

DANGNAN, F.; ESPEJO, C.; LISKIEWICZ, T.; GESTER, M.; NEVILLE, A. **Friction and Wear of Additive Manufactured Polymers in Dry Contact**. Version of Record, Vol. 59, 238-247 p., 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S152661252030640X>. Acesso em: 14 mai. 2024.

DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S.J. **Effect of Processing Parameters and Graphite Content on the Tribological Behaviour of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene**. Materials Science 46 (12), 2015, 1185-1195 p. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/286412188_Effect_of_processing_parameters_and_graphite_content_on_the_tribological_behaviour_of_3D_printed_acrylonitrile_butadiene_styrene. Acesso em: 9 jun. 2024.

DELAIR, T.; TRIMAILLE, T.; PICHOT, C.; ELAÏSSARI, A.; FESSI, H.; BRIANÇON, S. **Poly(d,l-lactic acid) nanoparticle preparation and colloidal characterization.** Colloid and Polymer Science. Vol. 281, 2003, 1184–1190 p. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-003-0894-1>. Acesso em: 2 jun. 2024.

DESTEFANO, V.; KHAN, S.; TABADA, A. **Applications of PLA in modern medicine.** Engineered Regeneration, Vol. 1, 2020, 76-87 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666138120300098>. Acesso em: 15 mai. 2024.

DORGAN, J.R.; BRAUN, B.; WEGNER, J.R.; KNAUSS, D.M. **Poly(lactic acids): a brief review.** Degradable Polymers and Materials, Vol. 939, 2006, 102-125 p. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/bk-2006-0939.ch007>. Acesso em: 10 mai. 2024.

DOWSON, D. **History of Tribology.** Longman Group Limited; 1979.

ENGRENA JR. **MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D.** 2020. Disponível em: <https://engrenarjr.com.br/blog/materiais-para-impressao-3d/>. Acesso em: 30 mai. 2024.

FERREIRA, I.; MACHADO, M.; ALVES, F.; MARQUES, A.T. **A review on fibre reinforced composite printing via FFF.** Rapid Prototyp J Vol 25(6), 972–988 p., 2019. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rpj-01-2019-0004/full/html>. Acesso em: 15 mai. 2024.

FRANCO S. D.; MORAES J. O.; NETO F. F. R; PIZA M. T. P. **Efeito das Propriedades Mecânicas no Desgaste Abrasivo de Poliuretanos MDI-BD.** Anais do XV POSMEC: Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia – Minas Gerais, 2005.

FOLTUȚ, D.; E. VĂLEAN, E.; DZITAC, L.; MARSAVINA, L. **The influence of temperature on the mechanical properties of 3D printed and injection molded ABS.** Materials Today Proceedings, Vol. 78, 2022, 210-213 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/364967951_The_influence_of_temperature_on_the_mechanical_properties_of_3D_printed_and_injection_molded_ABS. Acesso em: 12 jun. 2024.

GARCÍA, E.; LÓPEZ, N. J. P.; CAMINERO, A. M.; CHACON, M. J. **Analysis of PLA Geometric Properties Processed by FFF Additive Manufacturing: Effects of Process Parameters and Plate-Extruder Precision Motion.** Polymers, Vol. 11(10), 2019, 1581 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336086557_Analysis_of_PLA_Geometric_Properties_Processed_by_FFF_Additive_Manufacturing_Effects_of_Process_Parameters_and_Plate-Extruder_Precision_Motion. Acesso em: 9 mai. 2024.

GARLOTTA, D. **A Literature Review of Poly(Lactic Acid).** Journal of Polymers and the Environment. Vol. 9, 2001, 63-84 p. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020200822435>. Acesso em: 9 mai. 2024.

GAYA, P.; BLANCO, D.; PELAYO, F.; NOREIGA, A.; FERNÁNDEZ, P. **Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat Polyjet Manufactured Parts Pro**

Inst Mech Eng B. Procedia Engineering. Vol 132, 2015, 70-77 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289997049_Analysis_of_Factors_Influencing_the_Mechanical_Properties_of_Flat_PolyJet_Manufactured_Parts. Acesso em: 4 mai. 2024.

GKARTZOU, E.; KOUMOULOS, E. P.; CHARITIDIS, C. A. **Production and 3D Printing Processing of Bio-based Thermoplastic Filament.** Manufacturing Rev, Vol. 4, 2017. Disponível em: https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/full_html/2017/01/mfreview160010/mfreview160010.html. Acesso em: 4 mai. 2024.

GUESSASMA, S.; BELHABIB, S.; NOURI, H. **Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling.** Polymers, Vol 11, 2019, 1220 p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1220>. Acesso em: 10 mai. 2024.

HE, B.; CHEN, W.; WANG, J. Q. **Surface texture effect on friction of a microtextured poly(dimethylsiloxane) (PDMS).** Tribology Letters, Vol 31, 2008, 187-197 p. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-008-9351-0>. Acesso em: 20 mai. 2024.

HIKMAT, M.; ROSTAM, S.; AHMED, Y.M. **Investigation of Tensile Property-based Taguchi Method of PLA Parts Fabricated by FDM 3D Printing Technology.** Results Engineering, Vol 11, 2021, Article 100264. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123021000657>. Acesso em: 4 mai. 2024.

HUANG, S.H.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; HOU, L. **Additive Manufacturing and its Societal Impact: a Literature Review.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, 2012, 1191–1203 p. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4558-5>. Acesso em: 14 mai. 2024.

HUSNA A.; ASHRAF S.; TOMAL A.; TULI N.; RASHID A. **Recent advancements in stereolithography (SLA) and their optimization of process parameters for sustainable manufacturing.** Journal Hybrid Advances, Vol. 7, 2024, Article 100307. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773207X24001684>. Acesso em: 7 dez. 2024.

HUTCHINGS I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** 1ª Edição, Edward Arnold; Londres; 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION, **ASTM 52900:2021 Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and Vocabulary**, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2021.

ISHENGOMA, R. F.; MTAHO, B. A. **3D Printing: Developing Countries Perspectives.** International Journal of Computer Applications, Vol. 104, Ed. 11, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1410.5349>. Acesso em: 11 abr. 2024.

JEM, K. J.; TAN, B. **The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid).** Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Vol. 3, 2020, 60-70

p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300026>. Acesso em: 11 abr. 2024.

JIN, F. L.; LI, X.; PARK, S. J. **Synthesis and application of epoxy resins: a review**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 29, p. 1-11, 2015. Disponível em: Synthesis and application of epoxy resins: A review - ScienceDirect. Acesso em: 14 jan. 2025.

JOST, P. H. **Tribology-origin and future**. Wear, Vol. 136,1-17 p., 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004316489090068L>. Acesso em: 9 abr. 2024.

KHOSRAVANI, M.; BERTO, F.; AIATOLÁ, M.; REINICKE, T. **Fracture behavior of additively manufactured components: A review**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 109, 2020, artigo 102763. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844220303396>. Acesso em: 12 jun. 2024.

KUMAR, P.; AHUJA, S. I.; SINGH, R. **Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting - A review**. International Journal of Materials Engineering Innovation, Vol. 3, p. 204–227, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264838129_Application_of_fusion_deposition_modelling_for_rapid_investment_casting_-_A_review. Acesso em: 22 jun. 2024.

KUMAR, S.; SAMAL, S. K.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. **Recent development of biobased epoxy resins: a review**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 57, n 3, p. 133-155, 2018. Disponível em: Recent Development of Biobased Epoxy Resins: A Review: Polymer-Plastics Technology and Materials: Vol 57 , No 3 - Get Access. Acesso em: 14 jan. 2025.

KUMBHAR, N. N; MULAY, A.V. **Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2018, Vol. 99, p. 481–487. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40032-016-0340-z>. Acesso em: 12 jun. 2024.

LALEHPOUR, A.; BARARI, A. **Post processing for fused deposition modeling parts with acetone vapour bath**. IFAC, Vol. 49, p. 42–48, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316328300>. Acesso em: 13 mai. 2024.

LANZOTTI, A.; GRASSO, M.; STAIANO, G.; MARTORELLI, M. **The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer**. Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, n. 5, p. 604–617, 2015. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rpj-09-2014-0135/full/html>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LIRA, M. V. **Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudos de caso e projeto de impressora 3D**. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

LOPES, A.; PADILHA, A.; BRANCO, E.; ANGREWSKI, E.; MENTA, E.; WEINGÄRTNER, G.; MATTOS, S.; DARRONQUI, S.; MACHADO, S. **Impressão 3D: imaginar, planejar e materializar**. 2018. Disponível em:

http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impressao_3d.pdf
Acesso: 18 mai. 2024.

LOHSE, F.; ZWEIFEL, H. **Photocrosslinking of epoxy resins**. *Advances in Polymer Science*, ISSN 00653195, p. 61-81, 1986. Berlin Heidelberg, Berlin – Alemanha.

MAGALHÃES, R. **COMPRACO. Materiais de resina fotossensível: tipos e composição revelados**. 2024. Disponível em: https://compraco.com.br/blogs/industria/materiais-de-resina-fotossensivel-tipos-e-composicao-revelados?srsltid=AfmBOorSow_0cNld_ISIUiNEJD_5ory3HJffB5IfbvQqeMZhuYcqZSOO. Acesso em: 7 dez. 2024.

MAGULURI, N.; SURESH, G.; RAO, V. K. **Assessing the effect of FDM processing parameters on mechanical properties of PLA parts using Taguchi method**. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 36, n 4, 2021. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/08927057211053036>. Acesso em: 13 mai. 2024.

MAGULURI, N.; SURESH, G.; SRINIVAS, C. L. **Assessing the wear performance of 3D printed polylactic acid polymer parts**. *Materials Today: Proceedings*, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323024963>. Acesso em: 10 mai. 2024.

MAGULURI, N.; SURESH, G.; SITARAMANJANEYA, R. G. **Effect of printing parameters on the hardness of 3D printed poly-lactic acid parts using DOE approach**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Doi: 10.1088/1757-899X/1248/1/012004, 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1248/1/012004>. Acesso em: 12 mai. 2024.

MASOOD, S. H.; SONG, W. Q. **Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modeling**. *Materials & Design*, Vol. 25, n 7, p. 587–594, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306904000378>. Acesso em: 23 jun. 2024.

MAQSOOD, N.; RIMAŠAUSKAS, M. **Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling**. *Composites*, Vol. 4, 2021, Article 100112, ISSN 2666-6820. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682021000074>. Acesso em: 19 jun. 2024.

MEMARZADEH, A.; SAFAEI, B.; TABAK, A.; SAHMANI, S.; KIZILORS, C. **Advancements in additive manufacturing of polymer matrix composites: A systematic review of techniques and Properties**. *Materials Today: Communications*, Vol. 36, Article 106449, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492823011406>. Acesso em: 29 jun. 2024.

MIKULA, K.; SKRZYPCZAK, D.; IZYDORCZYK, G.; WARCHOŁ, J.; MOUSTAKAS, K.; CHOJNACKA, K.; KROWIAK, A. **3D printing filament as a second life of waste plastics—a review**. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 28, n. 10, p. 12321–12333, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-10657-8>. Acesso em: 27 mai. 2024.

MILLER, T. A.; SAFRANSKI L. D.; SMITH E. K.; SYCKS G. D.; GULDBERG E. R.; GALL, K. **Fatigue of injection molded and 3D printed polycarbonate urethane in solution**. Polymer, Vol. 108, p. 121-134, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386116310588>. Acesso em: 10 mar. 2024.

MOHD, P. N.; ABDUL, H. R. H.; MOHD, N. H.; ABDULLAH, H. Z.; IDRIS, M. I.; LEE, T. C. **Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications**. Materials Today: Proceedings, Vol. 29, p. 228–232, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.535>. Acesso em: 13 mai. 2024.

MYSHKIN, N.; PETROKOVETS, M.; KOVALEV, A. **Tribology of polymers: adhesion, friction, wear, and mass-transfer**. Tribology International, Vol. 38, n. 11–12, 910-921 p., 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X05001891>. Acesso em: 10 mai. 2024.

NEWMAN, A.; ZOGRAFI, G. **Commentary: Considerations in the measurement of glass transition temperatures of pharmaceutical amorphous solids**. AAPS PharmSciTech, Vol. 21, 1-13 p., 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1208/s12249-019-1562-1>. Acesso em: 10 mar. 2024.

OLIVEIRA, S.; MURALIDHARA, H. B.; VENKATESH, K.; GOPALAKRISHNA, K.; VIVEK, C. S. **Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review**. Journal of Materials Science, Vol. 51, p. 3657–3674, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-015-9668-7>. Acesso em: 13 mai. 2024.

PETRIE, E.M. **Epoxy Adhesive Formulations**. McGraw-Hill Chemical Engineering, ISBN-13, 1ª Edition. New York – EUA, 2006.

POPESCU, D.; ZAPCIU, A.; AMZA, C.; BACIU, F.; MARINESCU, R. **FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review**. Polymer Testing, Vol. 69, p. 157–166, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>. Acesso em: 08 jun. 2024.

RAJAN, K.; MAHENDRAN, S.; KADIRGAMA, K.; HARUN, W. S. W.; RAHMAN, M. M. **Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], Vol. 120, p. 1531–1570, n. 5-6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>. Acesso em: 10 mai. 2024.

RAJPUROHIT, R. S.; DAVE, K. H. **Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part**. Rapid Prototyping Journal, Vol. 24, n. 8, p. 1317–1324, 2018. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rpj-06-2017-0134/full/html>. Acesso em: 10 mai. 2024.

RANAKOTI, L.; GANGIL, B; MISHRA, K. S.; SINGH, T.; SHARMA, S.; ILYAS, R.; KHATIB S. **Critical review on polylactic acid: properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites**. Materials, Vol. 15, n. 12, 1-30, p. 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9228835/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

RASAL, R.M.; JANORKAR, A.V.; HIRT, D. E. **Poly(lacticacid) modifications**. Polymer Science, Vol. 35, n. 3, p. 338-356, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670009001154>. Acesso em: 9 mar. 2024.

RENGANATHAN, S.; SARITHA, D. **Effect of fill pattern and printing speed on friction characteristics of FDM printed polylactic acid Polymer**. Advances in Materials and Processing Technologies, Vol. 8, p. 1-10, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/2374068X.2021.1948707>. Acesso em: 16 jun. 2024.

REX, W. J.; TENNANT, D. J. **Polymeric linear terephthalic esters**. Patents US-2465319-A. United States (1949).

SANEI, R. H. S.; POPESCU, D. **3D-Printed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: A Systematic Review**. Journal of Composites Science, Vol. 4, p. 98, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/4/3/98>. Acesso em: 9 mar. 2024.

SEBRAE. **Quando surgiu a Indústria 4.0?**. 2022. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/quando-surgiu-a-industria-40,4542c009cbce3810VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acesso em: 28 jun. 2024.

SELKE, S.; HERNANDEZ, R. **Packaging: polymers for containers**. Materials Science and Materials Engineering, p. 6646-6652, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02167-6>. Acesso em: 12 abr. 2024.

SENTHAMARAIKANNAN, C.; PARTHAASARATHY, B.; SURYA, S.; RAJAN, S.T. **Study on the free vibration analysis and mechanical behaviour of 3D printed composite I shaped beams made up of short carbon fiber reinforced ABS and PLA materials**. Materials Today: Proceedings, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.141>. Acesso em: 12 mai. 2024.

SEPAHI, T. M.; ABUSALMA, H.; JOVANOVIC, V.; EISAZADEH, H. **Mechanical Properties of 3D-Printed Parts Made of Polyethylene Terephthalate Glycol**. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 30, n. 9, p. 6851-6861, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-021-06032-4>. Acesso em: 10 mai. 2024.

SILVA, V. A. **Desgaste de Poliuretano por Erosão Úmida: Desenvolvimento de um Ensaio Tecnológico**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – Minas Gerais, 2017. Disponível em:

<https://www.repositorio.ufop.br/items/ba13e4fd-1be9-4879-9081-6a8f03891ff9>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SLIM 3D. **Filamento PLA Premium Carbon Fiber 1kg - Slim 3D**. Disponível em: <https://www.slim3d.com.br/filamentos-premium/filamentos-de-engenharia/fibra-de-carbono/filamento-pla-premium-carbon-fiber-1kg>. Acesso em: 3 jan. 2025.

SOOD, K. A.; OHDAR, K. R.; MAHAPATRA, S. S. **Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method**. Journal of Engineering Manufacture, Vol. 224, n. 1, 135-144 p., 2009. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1565>. Acesso em: 3 mar. 2024.

SOUZA, Hellen. **A impressão 3D como processo industrial**. [S. l.]: Aranda, 16 maio 2019. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2019/05/19/a_impressao_3d_como_proceso_industrial.html. Acesso em: 16 jan. 2025.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Department of Mechanical and Materials Engineering, University of Western Australia, 769 páginas, Australia, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123970473/engineering-tribology>. Acesso em: 10 mar. 2024.

STOLT, M.; SÖDERGÅRD, A. **Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition**. Progress in Polymer Science, Vol. 27, 1123-1163 p., 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670002000126>. Acesso em: 4 mai. 2024.

SZEW CZYK D.; KRIVCHIKOV A.I.; BARABASHKO M.S.; DOLBIN A.V.; VINNIKOV N.A.; BASNUKAEVA R.; CHAJEWSKI G.; JEZOWSKI A. **Universal behavior of low-temperature heat capacity of acrylonitrile-butadiene-styrene thermoplastic polymer and its composite with graphene oxide**. Low Temperature Physics, Vol 49, n. 5, 649 p., 2023. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/ltp/article-abstract/49/5/593/2891359/Universal-behavior-of-low-temperature-heat?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 14 abr. 2024.

VYAVAHARE, S.; TERAIIYA, S.; PANGHAL, D.; KUMAR, S. **Fused deposition modelling: a review**. Rapid Prototyping Journal, Vol. 26, n. 1, p. 176–201, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>. Acesso em: 23 jun. 2024.

WANG, S.; MA, Y.; DENG, Z.; ZHANG, S.; CAI, J. **Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials** Polym. Polymer Testing, Vol. 86, Article 106483, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941820301793>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SHI, X.; NI, T. **Effect of groove textured of fully lubricated sliding with cavitation**. Tribology International, Vol. 44, n. 12, p. 2022-2028, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X11002374>. Acesso em: 4 abr. 2024.

ZOLIN, I. **Ensaaios Mecânicos e Análises de Falhas**. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 3. Ed., Santa Maria-RS, p. 36 – 85, 2011.

ZHU, C.; LI, T.; MOHIDEEN, M. M.; HU, P.; GUPTA, R.; RAMAKRISHNA, S.; LIU, Y. **Realization of circular economy of 3D printed plastics: a review**. Polymers, Vol. 13, n. 5, p. 744, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/744>. Acesso em: 23 mai. 2024.