



VICTOR FÁVERO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS
MATERIAIS COPOLIÉSTER TRITAN, PETG E PLA
APLICADOS NO PROCESSO FDM**

**LAVRAS – MG
2022**

VICTOR FÁVERO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS MATERIAIS COPOLIÉSTER
TRITAN, PETG E PLA APLICADOS NO PROCESSO FDM**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Joelma Rezende Durão Pereira
Orientadora

Prof. Dr. Alex de Oliveira Ribeiro
Coorientador

**LAVRAS - MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus por ter dado saúde e força para superar todas as dificuldades encontradas no caminho para a conclusão do trabalho e atividades acadêmicas.

À minha família por sempre me apoiar de todas as formas possíveis durante minha graduação e execução deste projeto.

À todos professores que me ensinaram e acompanharam de perto meu crescimento, em especial minha Orientadora Dra. Joelma Rezende Durão Pereira, que sempre esteve ao meu lado na construção de todo trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, pela estrutura disponibilizada e pela oportunidade de aprender tanto profissionalmente, quanto pessoalmente.

Por fim, aos meus amigos e minha namorada que sempre estiveram comigo, me dando todo suporte emocional e incentivo para seguir com a graduação e seus desafios.

Muito obrigado!

RESUMO

Pretendeu-se, neste trabalho, elaborar corpos de prova dos copoliésteres TRITAN, PETG e PLA, conforme as respectivas normas, através da Manufatura Aditiva (MA), por meio do processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), para que fosse possível realizar os ensaios de tração para avaliação da performance dos materiais. Para a execução deste projeto, foi realizada uma análise bibliográfica, consolidando a compreensão dos testes de tração, além do embasamento para fabricação dos corpos de prova padronizados. Também foram descritos todos materiais e métodos utilizados, além dos equipamentos e locais de fabricação 3D para os corpos de prova e dos respectivos testes de tração. A partir dos resultados dos testes, realizou-se a análise estatística por meio de variâncias, regressão e desvios considerando a performance dos materiais para tensão à tração (MPa), deslocamento (mm) e a carga aplicada (N). Logo, os resultados das médias estatísticas obtidas foram comparados, obtendo assim o copoliéster com melhor resistência mecânica, o PLA, uma vez que apresentou maior resistência de tensão à tração (33,3245 MPa) e de carga máxima aplicada (1.299,6557 N). Por fim, vale destacar que o trabalho está considerando apenas as questões mecânicas dos materiais, ou seja, não está levando em consideração possíveis composições químicas e futuras aplicações dos copoliésteres.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. FDM. Resistência à Tração. Análises Estatísticas.

ABSTRACT

The aim of the present work was to elaborate specimens of TRITAN, PETG and PLA copolyesters, according to the respective standards, through Additive Manufacturing (AM), through the FDM (Fused Deposition Modeling) process. These process was realized in order to enable the mechanics tests to evaluate the performance of materials. For the execution of this project, a bibliographic analysis was previously carried out, in order to consolidate the understanding of the tensile tests, and also to base the process of manufacture of standardized specimens. All materials and methods used were also described, as also the equipment and 3D manufacturing locations for the specimens and the respective tensile tests. From the test results, it was possible to perform the statistical analysis considering the performance of the materials for tensile stress (MPa), displacement (mm) and applied load (N). Therefore, the results of the statistical averages obtained were compared, thus obtaining the copolyester with the best mechanical strength, PLA, since it presented the highest tensile strength (33,3245 MPa) and maximum applied load (1.299,6557 N). Finally, it is worth noting that the work is only considering the mechanical issues of the materials, which means that it is not taking into account possible chemical compositions and futur applications of copolyesters.

Keywords: Additive Manufacturing. FDM. Tensile Resistance. Statistical Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Protótipos e modelos fabricados a partir da MA	14
Figura 2.2 – Modelos de quatro tipos de métodos da Manufatura Aditiva	15
Figura 2.3 – Tecnologia FDM	16
Figura 2.4 – Processo FDM	16
Figura 2.5 – Modelos de filamentos para impressão 3D	17
Figura 2.6 – Tamanhos de bicos da extrusora	18
Figura 2.7 – Composição de materiais de bicos da extrusora	19
Figura 2.8 – Relação entre altura de camada e pressão	19
Figura 2.9 – Filamento Tritan HT – 1kg – 1,75mm	21
Figura 2.10 – Exemplo de filamento de PLA com suas características	22
Figura 2.11 – Exemplo de filamento de PETG com suas características	23
Figura 2.12 – Curvas tensão x deformação obtidas no ensaio de tração de diferentes tipos de polímeros	25
Figura 2.13 – Modelo de corpo de prova segundo a Norma ASTM D638	26
Figura 2.14 – Exemplo de modelo de corpo de prova segundo a Norma ISO 527	27
Figura 3.1 – Modelo de corpo de prova em CAD e do protótipo real aplicado nos testes	29
Figura 3.2 – Modelo de impressora 3D ZMORPH	30
Figura 3.3 – Modelo da máquina de ensaios mecânicos EMIC DL 3000 23-20	32
Figura 3.4 – Modelo do teste de tração aplicado aos corpos de prova com a máquina EMIC DL 3000 23-20 no Laboratório de Manufatura Aditiva do DEG	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Análise de variância a partir da tensão à tração	35
Tabela 4.2 – Análise das médias de tensão à tração para cada material	36
Tabela 4.3 – Análise de variância a partir do deslocamento	37
Tabela 4.4 – Análise das médias de deslocamento para cada material	37
Tabela 4.5 – Análise de variância a partir da carga aplicada	38
Tabela 4.6 – Análise das médias de carga aplicada para cada material	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo geral	10
1.2	Objetivos específicos	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Impressão 3D e suas aplicações	11
2.2	Métodos de impressão 3D	14
2.3	Tipos de materiais estudados e analisados	20
2.3.1	TRITAN	20
2.3.2	PLA	21
2.3.3	PETG	22
2.4	Ensaio destrutivo de tração com corpos de prova a partir de impressões 3D	24
2.5	Elaboração dos corpos de prova com as normas	25
2.5.1	Norma ASTM D638	25
2.5.2	Norma ISO 527	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Materiais utilizados	28
3.2	Delineamento experimental	28
3.3	Desenvolvimento dos corpos de prova	29
3.4	Dados técnicos da impressora 3D	29
3.5	Teste de tração	31
3.6	Análise estatística	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	Análise estatística da variável tensão à tração (MPa)	33
4.2	Análise estatística da variável deslocamento (mm)	35
4.3	Análise estatística da variável de carga (N)	36
5	CONCLUSÃO	38
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a necessidade de novas tecnologias vem desafiando o mercado e processos industriais, bem como novas descobertas, conceitos, ideias, projetos e pesquisas. Novos processos de fabricação são necessários para produção e desenvolvimento de certos componentes. Destaca-se assim a Manufatura Aditiva (MA), que seria um processo no qual ocorre a adição de material por meio de camadas sucessivas, utilizando a impressão 3D. É considerado um método de desenvolvimento de produto fundamental para definição do modelo, testes de intercambialidade, montagem de protótipos, amostras, moldes, entre outras possibilidades, permitindo assim ganhar tempo e reduzir custos.

Assim, pelas informações de um software em sistema CAD, essa tecnologia pode ser utilizada para fabricação de objetos complexos e simples, como modelos, peças reais, protótipos etc. Além disso, é válido ressaltar que essa inovação tecnológica é um processo muito eficiente, rápido, flexível, automatizado e, muitas vezes, mais acessível financeiramente.

A técnica de impressão 3D consiste em transformar um sólido digital construído utilizando um programa de CAD, para um arquivo especialmente fatiado na altura (Z) e com sua localização em X e Y. Este arquivo é comum para todas as impressões em 3D, cada qual com suas características de orientação de coordenadas X, Y e Z para cada tipo de impressora ou técnica de impressão 3D. Um arquivo de CAD comum deve ser transformado em um arquivo de impressão 3D para que suas coordenadas sejam correlacionadas ao modelo a ser impresso.

Um dos grandes diferenciais da técnica de impressão 3D é a possibilidade de construir peças complexas e personalizadas, e, quando comparadas às tecnologias em relação ao tempo gasto para construção de uma mesma peça, esse método se destaca.

Devido ao intenso uso da impressão 3D para a construção de componentes industriais e protótipos, necessita-se analisar o comportamento quanto às cargas mecânicas aplicadas através da tração, para obter o resultado do de qual filamento deve ser utilizado para cada necessidade.

Para alcançar os resultados comparativos de testes mecânicos a partir da fabricação dos respectivos corpos de prova, é necessário realizar análises estatísticas por meio de regressão e desvios, que serão discutidas durante o trabalho, podendo obter conclusões essenciais para a performance de resistência à tração dos copoliésteres.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste projeto é avaliar a resistência mecânica à tração de corpos de prova, dos materiais copoliéster TRITAN, PETG e PLA, amplamente utilizados na Manufatura Aditiva (MA).

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar os corpos de prova dos copoliésteres analisados, conforme as respectivas normas;
- Analisar os ensaios mecânicos de tração do comportamento de cada copoliéster, relacionando a Tensão à Tração (MPa) e a Carga (N) com a Deformação (mm) dos corpos de prova;
- Comparar os resultados obtidos mecanicamente e analisar estatisticamente para indicar o copoliéster que garanta maior resistência mecânica à tração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O termo Indústria 4.0 foi criado e disseminado pelos alemães no ano de 2011, durante uma importante feira de tecnologia, que contou com o apoio do governo e de indústrias do próprio setor. Esse termo faz parte de um conjunto de estratégias que desafiam as indústrias a realizarem uma espécie de “4ª Revolução Industrial”, de modo que todo o seu processo seria interconectado por meio de redes inteligentes, tornando a mais eficaz e competitiva, e em um segundo momento, permitindo que esses processos produtivos sejam capazes de governarem a si mesmos. Nesse contexto, um novo cenário industrial pode ser demandado, com a utilização de novas tecnologias como robôs, impressoras 3D e sensores trabalhando de maneira integrada, viabilizando a flexibilização da cadeia produtiva e possibilitando a criação de produtos personalizados, diminuindo a perda de materiais durante o processo por meio da manufatura aditiva (ZANCUL, 2016).

2.1 Impressão 3D e suas aplicações

A Manufatura Aditiva, traduzida do inglês *additive manufacturing* (AM) ou ainda Impressão 3D (termo usado popularmente) é um processo de fabricação caracterizado por meio da adição em camadas sucessivas de material a partir de um modelo geométrico 3D originado por um sistema de desenho assistido por computador (abreviação CAD em inglês), que permite a fabricação de componentes físicos utilizando uma infinidade de materiais, diferentes técnicas, formas e princípios (VOLPATO, 2018).

A partir de um modelo criado em CAD, o planejamento do processo segue para o “fatiamento” do mesmo em curvas de nível 2D, com a definição das estruturas que darão suporte à peça e o tipo de deposição de material que será utilizado, e só aí a peça começa a ser fabricada de fato. Com a peça pronta, inicia-se a fase final do processo, também chamada de pós processamento, onde a peça recebe um acabamento que costuma variar de acordo com o tipo de tecnologia utilizado para sua impressão. A origem dos princípios básicos dessa tecnologia remonta de tempos muito distantes, quando os egípcios já utilizavam a técnica de construção por sobreposição de camadas, utilizando blocos que eram empilhados em camadas sucessivas para construir suas pirâmides (RODRIGUES, 2016).

Já nos tempos atuais, a tecnologia de manufatura aditiva teve como suas precursoras a topografia e a fotoescultura, com importantes contribuições de nomes como Blather (1890), Zang (1964), Swainson (1968), Matsubara (topografia) e Ciraud (fotoescultura) em 1972, até

chegar em 1982 com Herbert da empresa 3M, que propôs um sistema de polimerização por meio de um feixe de laser ultravioleta, comandado por um sistema computadorizado. No final dos anos 80 começaram a surgir vários equipamentos de prototipagem rápida, popularmente conhecidas como impressoras 3D, cuja finalidade era produzir protótipos de produtos em três dimensões de forma rápida e generalizada. Dentro dessa proposta, a Estereolitografia foi a pioneira, tendo a sua primeira patente emitida em 1986 para Charles W. Hull (popularmente conhecido como Chuck Hull) sócio e fundador da 3D Systems, a primeira empresa a lançar essa tecnologia no mercado no ano de 1988 (ZANCUL, 2016).

Desde o início de sua comercialização em 1988 até a atualidade, houveram muitas variações de tipos no que diz respeito à forma como a manufatura aditiva é executada, seja pela tecnologia empregada ou pela matéria prima utilizada para a fabricação das peças, que podem ser líquidas, sólidas ou em pó. Dentre as mais de 30 opções de técnicas disponíveis no mercado atualmente, podemos destacar a Estereolitografia, a Fabricação com Filamento Fundido e a Sinterização Seletiva à Laser, sendo que a escolha de qual tecnologia é a melhor está diretamente ligada à finalidade da peça a ser fabricada, que pode ser desde um protótipo até itens que exigem um elevado grau de acabamento em seu produto final (BORGES, 2018).

As primeiras tecnologias de MA possibilitavam, principalmente, a obtenção de protótipos para visualização, com menores exigências em termos de materiais, precisão dimensional e desempenho (função). A ampliação da percepção do potencial de uso dessa tecnologia proporcionou um aumento da exigência por melhorias, tanto no que se refere aos processos e seus componentes, como dos materiais e funcionalidades (CARVALHO, 2019).

Isso fez com que essa tecnologia pudesse ser amplamente difundida em diversos segmentos, em especial nas pequenas produções. Desde acessórios femininos até a indústria automotiva, passando pela construção civil, moda e medicina, e mais uma infinidade de outras áreas passaram a ver na tecnologia de impressão aditiva uma oportunidade de inovar, algo tido atualmente como necessidade e importante capacidade competitiva. As barreiras para novos produtos e negócios se tornam cada vez menos significantes, já que se tem como principal recurso uma máquina capaz de criar uma grande variedade de itens e com alta qualidade (GIORDANO, 2016).

No mercado da moda, por exemplo, marcas de luxo mundialmente conhecidas como Versace e Chanel já lançaram roupas e acessórios cuja confecção foi feita a partir da tecnologia de impressão 3D. Já o seguimento de saúde tem apresentado importantes resultados no uso dessa tecnologia, com inovações que vão desde a impressão de medicamentos e próteses de membros para pacientes amputados, até projetos mais ambiciosos, como a criação de órgãos em

laboratório. Segundo uma reportagem publicada em abril de 2019 pela Revista Galileu, cientistas israelenses conseguiram produzir uma miniatura de um coração humano impresso em 3D, utilizando tecidos humanos. O procedimento utiliza a engenharia genética, que transforma células do tecido adiposo do paciente em células tronco, e a partir daí é criado o material genético utilizado tanto na impressão do músculo cardíaco quanto dos vasos sanguíneos. Para um dos pesquisadores envolvidos, a ideia é aprimorar essa tecnologia para substituir o transplante de órgãos, tornando a uma prática obsoleta (BORGES, 2018).

No entanto, o custo envolvido para aplicação dessa tecnologia em escala industrial era muito alto, principalmente na aquisição e operação dos equipamentos, além dos materiais e insumos, limitando o seu uso apenas na etapa de pesquisa e desenvolvimento de produtos. As organizações têm mostrado cada vez mais interesse sobre a possibilidade do uso da manufatura aditiva tanto em seu processo produtivo, quanto no armazenamento e na distribuição de produtos com diferencial competitivo. O uso dessa tecnologia também está associado à redução no tempo de espera por uma peça ou equipamento, além de colaborar para a redução dos estoques e diminuição do tempo entre um produto e sua entrega ao cliente, agregando valor nos processos de produção, distribuição e armazenamento (VOLPATO; CARVALHO, 2007).

No que diz respeito a matéria prima para fabricação das peças, é utilizado apenas a quantidade necessária para a sua produção. Isso quer dizer que há pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia, sendo que em alguns casos o volume utilizado para fabricar uma peça é equivalente ao seu peso depois de finalizada, ou seja, não há perda no processo dependendo da tecnologia utilizada. É o caso por exemplo, da impressão por sinterização seletiva à laser, em que é possível reutilizar quase que cem por cento da matéria-prima (pó) que sobra do processo (RODRIGUES, 2016).

Com relação à redução de custos na produção, a manufatura aditiva pode agilizar a confecção de peças protótipos para projetos, permitindo a sua representação física, tornando a confecção de peças de design complexo mais ágil e possibilitando a correção de eventuais falhas no produto final, aumentando a sua qualidade (SARTORI, 2015).

A Manufatura Aditiva é um processo de fabricação inerentemente versátil. Ao passo que possibilita um tempo relativamente curto de fabricação, baixo gasto de material, alto nível de complexidade e personalização, suas limitações não podem ser ignoradas, como baixa produtividade, tamanho máximo de peça restringido pela impressora e produto final com propriedades mecânicas indesejáveis (alto grau de anisotropia). Porém, inovações científicas têm se aproveitado cada vez mais das possibilidades latentes providenciadas pela MA (PADILHA, 2000).

Vale ressaltar que muitas das aplicações da impressão 3D, senão todas, têm como ponto de convergência o caráter personalizável e de alta complexidade dos produtos, possivelmente o maior atrativo desse processo. Em função dessa qualidade, o propósito original de peças produzidas por MA era a confecção de protótipos que facilitassem a visualização do produto final e de montagens. Nesse cenário, encontram-se também moldes e modelos para fundição. A Figura 2.1 exemplifica alguns desses usos (MEDINA e MEDEIRO, 2020).

Figura 2.1 - Protótipos e modelos fabricados a partir da MA.



Fonte: MEDINA e MEDEIRO (2020).

2.2 Métodos de impressão 3D

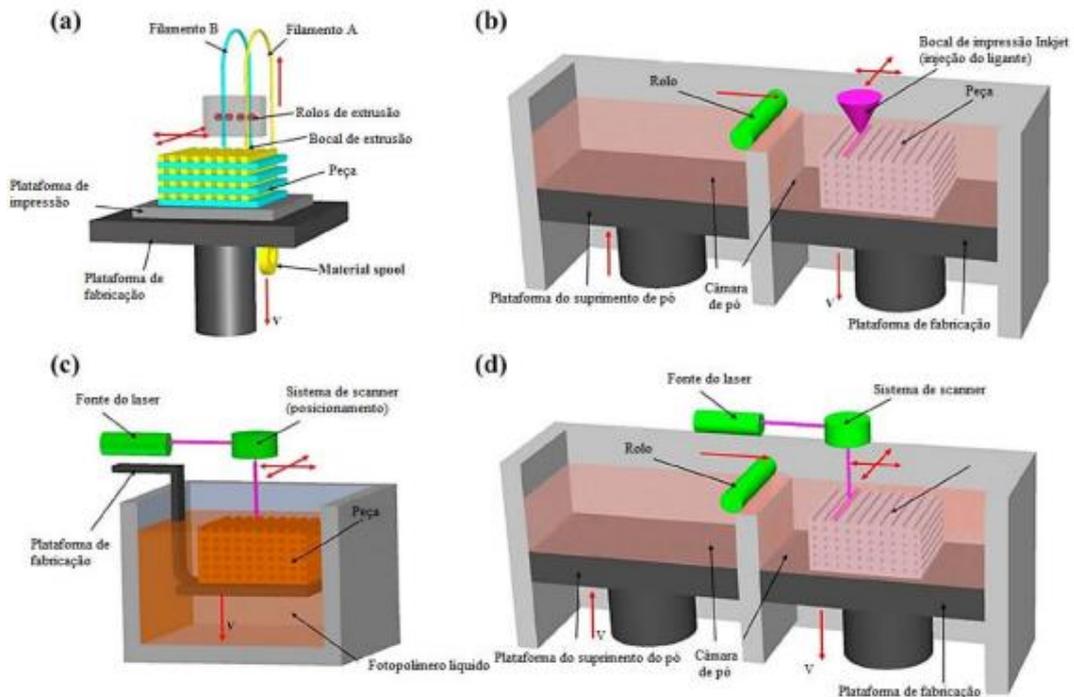
Existem técnicas de impressão 3D no qual um sistema todo pode ser fabricado de uma só vez, incluindo todas as partes móveis, e quando comparadas as precisões de fabricação, a tecnologia subtrativa ainda possui grande precisão devido a forma com que as ferramentas atuam sobre as peças. Porém, com a evolução da técnica aditiva, é possível que em alguns anos esse processo de fabricação possa ser equivalente ou melhor do que a técnica de fabricação subtrativa (ALCALDE, 2018).

Dentre os principais métodos, pode-se destacar:

- Estereolitografia (*Stereolithography* - SLA).
- Deposição por Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM).
- Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS).

Alguns métodos podem ser exemplificados e demonstrados para que o entendimento dos processos possam ficar mais compreensíveis, conforme constatado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Modelos de quatro tipos de métodos da Manufatura Aditiva

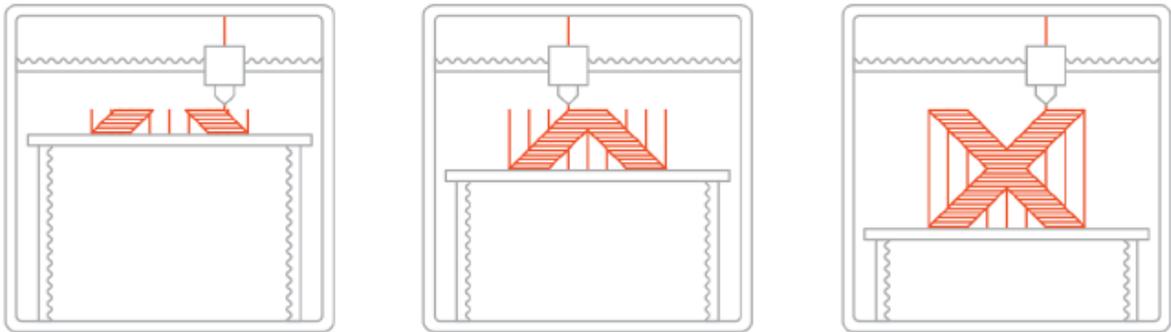


(a) Deposição por Material Fundido (FDM); (b) Impressão a jato de tinta; (c) Estereolitografia (SLA); (d) Fusão de cama de pó (*Powder Bed Fusion*).

Fonte: MEDINA e MEDEIRO (2020).

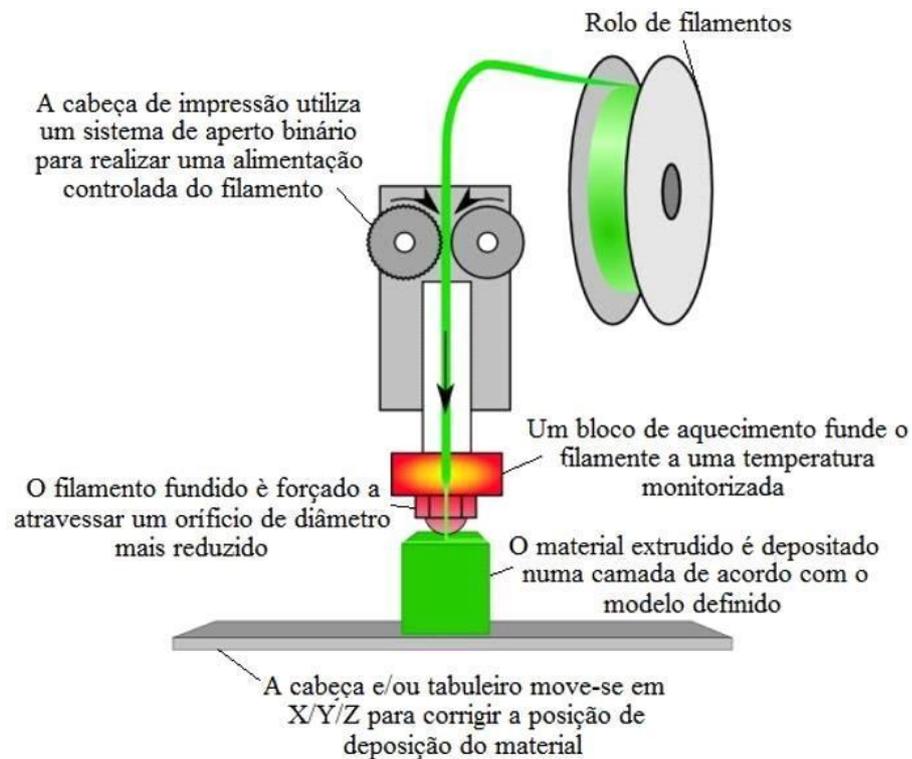
A técnica de Deposição por Material Fundido (FDM) apresenta o melhor custo referente ao equipamento, à manutenção e aos materiais. Por ser muito difundida, atraiu uma grande quantidade de empresas fabricantes fornecendo uma boa diversidade em materiais termoplásticos e várias opções de tipos de extrusoras. Assim sendo, o baixo custo operacional e de aquisição, além do fácil acesso a diversos tipos de materiais, fez da técnica FDM a mais adequada a esta pesquisa. Nas Figuras 2.3 e 2.4, pode-se observar exemplos do processo sendo aplicado com a tecnologia FDM (WILTGEN, 2018).

Figura 2.3 – Tecnologia FDM.



Fonte: WILTGEN (2018).

Figura 2.4 – Processo FDM.



Fonte: WILTGEN (2018).

O modelo consiste em derreter o filamento de um termoplástico (exemplificados na Figura 2.5) que é puxado por uma engrenagem e empurrado pelo bico extrusor, com temperatura entre 120° C e 220° C, no qual é responsável por derreter e diminuir seu diâmetro a fim de melhorar a qualidade da impressão 3D. Nesta técnica, a aplicação pode ter movimentos diferentes conforme a fabricação do produto ou a impressora utilizada, podendo haver deslocamentos para cima e para baixo (eixo Z) ou para os lados (eixos X e Y) (BORGES, 2019).

Figura 2.5 – Modelos de filamentos para impressão 3D.



Fonte: Filamentos 3D Brasil (2021).

O filamento fica na forma líquida, de tal forma que possa ser depositado na mesa de construção da impressora camada por camada para que o objeto seja construído. Após o material ser depositado sobre a mesa de impressão (aquecida ou não) se inicia o processo de transformação do termoplástico novamente para o estado físico sólido. As vantagens intrínsecas desta tecnologia permitiram o maior acesso às pessoas. Fácil e simples de ser construída, com o tempo surgiram vários modelos. Com a difusão da impressão 3D, surge também a difusão dos tipos de materiais e filamento disponíveis para confecção de peças impressas em FDM. Como exemplo de materiais utilizados na técnica FDM, destacam-se: materiais magnéticos, grafeno, borrachas, cerâmicas, silicone, copoliéster e metais. Esta expansão de tipos de materiais fomenta uma indústria sedenta por finalmente ser capaz de confeccionar peças que podem ser impressas de uma só vez com diferentes tipos de materiais e em uma só peça funcional, integrada via arquivo digital sem a necessidade de montagens, fixações ou integração de partes (VOLPATO; CARVALHO, 2018).

Outro ponto importante a ser analisado no processo são os tipos e tamanhos de bicos para a extrusora, conforme a Figura 2.6. O tamanho do diâmetro do bico afeta diretamente a qualidade e velocidade da sua impressão, sendo que, um diâmetro menor consegue produzir linhas menores e, portanto, mais qualidade, porém pode levar muito mais tempo, já um diâmetro maior possui menos qualidade e mais velocidade, onde (Acelera 3D, 2022):

- Bico 0.2 mm: imprime com mais qualidade, mas leva muito mais tempo;
- Bico 0.4 mm: imprime com boa qualidade e não demora muito (sendo o mais comum, e utilizado para o trabalho em questão);
- Bico 0.6 mm: imprime com um pouco menos de qualidade e leva bem menos tempo.

Figura 2.6 – Tamanhos de bicos da extrusora.



Fonte: Acelera 3D, 2022.

Além disso, a composição do material do bico também é relevante (Figura 2.7), onde para grande parte dos casos o latão é suficiente. A imensa maioria dos bicos vistos no mercado são feitos de latão, mas existem outros, e para cada um existem os materiais mais adequados para uso:

- Bico de Latão: o mais comum, mas tão bom quanto os outros, a diferença é que ele não suporta filamentos mais abrasivos;
- Bico de Aço Inox: suporta bem o uso de filamentos abrasivos (filamentos que brilham no escuro, fibra de carbono, filamentos especiais como os de madeira, cerâmica, latão, ferro e metal) seu único problema é que não suporta alto aquecimento;
- Bico de Aço Endurecido: suporta os mesmos materiais que o bico de aço inox, mas possui uma vida útil maior e sem os problemas de aquecimento. É recomendado para quem trabalha muito com filamentos abrasivos.
- Bicos especiais: bicos de tungstênio ou com ponta de rubi aguentam ainda mais o uso dos filamentos abrasivos, mas possuem preços bem elevados (Acelera 3D, 2022).

Figura 2.7 – Composição de materiais de bicos da extrusora.



Fonte: Acelera 3D, 2022.

A Figura 2.8 demonstra outra relação importante que envolver o bico: a altura da camada na impressão 3D, que é a espessura de uma linha para a próxima que vai fazer com que a impressão se mova no eixo Z. Quanto mais fina for a espessura da camada, mais fino será o detalhamento da peça no eixo Z e ela necessitará de mais camadas para chegar no resultado final, demandando um tempo maior de impressão (3D Fila, 2022).

Figura 2.8 – Relação entre altura de camada e pressão



Fonte: 3D Fila, 2022.

2.3 Tipos de materiais estudados e analisados

Se faz necessário entender também sobre cada tipo de material que será estudado e analisado no trabalho, aprofundando em suas composições, aplicações, vantagens, desvantagens e até preços de mercado.

2.3.1 TRITAN

Filamentos do tipo TRITAN são filamentos de copoliéster, ou seja, são filamentos de poliéster que sofreram modificações através da adição de moléculas buscando aprimorar as propriedades mecânicas do material. Quando a macromolécula do polímero é constituída de molécula (mero), ele é denominado copolímero (PADILHA, 2000).

O Tritan tem uma estrutura cristalina amorfa com aparência e claridade agradáveis, demonstrando boa transparência até em objetos de paredes grossas. As propriedades mecânicas do Tritan rivalizam diretamente com as dos policarbonatos. A temperatura recomendada de extrusão do Tritan em aplicações FDM vai de 255 a 302 °C (3DLAB, 2022).

Vale destacar ainda suas vantagens para impressão 3D: excelente tenacidade, alta resistência mecânica e ao impacto; excelente aderência e resistência entre as camadas depositadas; boa resistência química, térmica e estabilidade hidrolítica; tem baixa contração térmica e, portanto, baixa deformação; incrível aderência à mesa e pode ser trabalhado em impressoras abertas ou impressoras fechadas. Sendo utilizado principalmente nos seguintes utensílios: carcaças e recipientes para eletrodomésticos, como processadores de alimento; engrenagens e peças que precisam de alta resistência à tração; embalagens que tenham contato com comida e garrafas d'água; utensílios domésticos (LACERDA, 2020).

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, porém, em média, o valor é de R\$180,00 para 1kg de material (3D Fila, 2022). A Figura 2.9 demonstra um exemplo do Tritan para compra.

Figura 2.9 - Filamento Tritan HT – 1kg – 1,75mm



Fonte: 3D Fila, 2022.

2.3.2 PLA

Dos materiais citados anteriormente, pode-se comentar sobre o Poliacido Láctico ou PLA, que é um dos materiais mais utilizados em impressões 3D principalmente na técnica FDM, pois é um material de fácil impressão, composto de materiais biológicos como amido de milho e cana de açúcar. O PLA é um material resistente, porém não é tolerante ao calor como o ABS, por exemplo. É considerado um material muito promissor, sendo obtido por fermentação bacteriana de glicose extraída do milho. A decomposição do PLA é lenta em solo (mais de 80 dias) porém facilmente degradado em ambiente de compostagem (SOUZA, 2014).

Segundo um de seus fabricantes, o material pode ser utilizado com utensílios domésticos, brinquedos, protótipos e modelos arquitetônicos, e não é recomendado sua utilização em materiais em contato com alimentos, e em aplicações com longa duração em espaços exteriores, exposta a temperaturas superiores a 40° C (Ultimaker, 2018).

Para impressão deste material cada fabricante indica uma temperatura diferente devido ao processo de fabricação do filamento, mas, de modo geral, recomenda-se uma temperatura mínima para extrusão de 180° C e não há necessidade de uma mesa aquecida, se for utilizado basta estar com a temperatura baixa entre 40° C a 60° C. Um ponto importante na impressão 3D com PLA é a utilização de ventilação direta no bico da extrusora para ajudar na integração entre as camadas e o resfriamento do material para a colagem correta entre cada camada (WILTGEN, 2018).

Com essas propriedades, o PLA possui uma boa resistência à tração, que será demonstrada no tópico de resultados e discussões conforme comparativos de outros estudos atuais, combinado a uma boa qualidade superficial (resolução), fácil impressão, diversas opções de aplicação e cores, biodegradável, torna-se um dos materiais mais indicados para impressão 3D FDM. O custo do material varia de acordo com cada fabricante, utilizando como referência alguns fabricantes como 3D Fila, 3D Lab e Filamentos 3D Brasil, é possível encontrar o material por valores entre US\$ 20 a US\$ 40 cada 1 kg (3D Fila; 3D Lab; Filamentos 3D Brasil, 2022). A Figura 2.10 representa um exemplo do rolo de filamento de PLA com suas principais características (3D Prime, 2022).

Figura 2.10 – Exemplo de filamento de PLA com suas características.



Fonte: 3D Prime, 2022.

2.3.3 PETG

Já o Polietileno Tereftalato Glicol-Modificado ou PETG é muito conhecido na indústria. Material versátil com boa resistência térmica. Normalmente este material é translúcido e, segundo um de seus fabricantes, este material pode ser utilizado junto à alimentos (FILATECH, 2018).

Ao contrário do ABS, o PETG não se deforma e não produz gases no processo de impressão 3D FDM. Este material pode ser utilizado para impressão de brinquedos, caixas, garrafas e artigos esportivos. Para sua impressão a temperatura de extrusão é de 230° C, e a mesa deve ser aquecida a 70° C. As boas propriedades mecânicas deste material possibilitam imprimir objetos grandes. O material também apresenta boa resistência química a ácidos e à água (Filamentos 3D Brasil, 2021).

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, como 3D Fila, 3D Lab e Filamentos 3D Brasil, sendo possível encontrar o material por valores entre US\$ 25 a US\$ 35 cada 1 kg, sendo um material facilmente encontrado no mercado (3D Fila; 3D Lab; Filamentos 3D Brasil, 2022). A Figura 2.11 representa um exemplo do rolo de filamento de PETG com suas principais características (3D Prime, 2022).

Figura 2.11 – Exemplo de filamento de PETG com suas características.



Material:

- **PETG** (Politereftalato de etileno) derivado do petróleo, resistente, certa flexibilidade, baixa contração, aspecto brilhante e transparente, suporta altas temperaturas sem deformar.
- Indicado para peças mecânicas e funcionais e peças decorativas.

Temperaturas:

- Extrusor: 230/240°C
- Mesa: 70/80°C (com aplicação de adesivo a base de pvp)

Pesos e Medidas:

- Rolo: 1kg
- Peso líquido: 1kg
- Peso carretel: 120g
- Peso bruto: 1120g
- Comprimento:
- Espessura: 1.75mm
- Precisão dimensional: +/- 0,02mm (garantindo qualidade e estabilidade pra sua impressão)

Fonte: 3D Prime, 2022.

2.4 Ensaio destrutivo de tração com corpos de prova a partir de impressões 3D

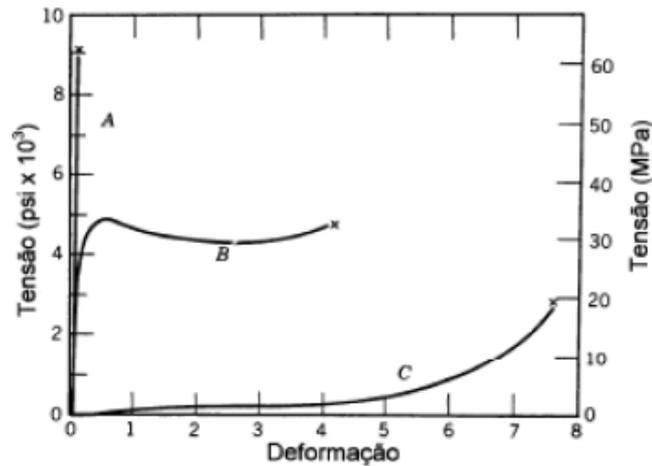
Um ensaio destrutivo consiste na aplicação de técnicas que visam caracterizar o comportamento das propriedades de um material por meio de uma amostra ou corpo de prova. As propriedades avaliadas podem ter caráter físico, químico, térmico, mecânico etc. Os métodos desse tipo de ensaio danificam o corpo de prova, buscando analisar os limites e as razões por trás da falha do material. Por isso, ao elaborar a metodologia dos experimentos, é importante considerar as técnicas empregadas além de estabelecer um controle sobre as condições dos testes e padronização dos parâmetros nos corpos de prova (PADILHA, 2000).

Quanto ao âmbito técnico, sobretudo na avaliação das propriedades mecânicas, é necessário decidir qual situação de carregamento e a respectiva resistência que se deseja estudar. Essas resistências podem ser à tração, compressão, cisalhamento, torção, impacto, fadiga ou fluência. É ainda possível realizar ensaios a partir do modo de fratura que se deseja obter (MEDEIRO, 2020).

O ensaio de tração, por exemplo, é um dos métodos mais comuns de ensaios mecânicos destrutivos em que se determina o módulo de Young e alongamento percentual de um material através da aplicação de uma tensão no corpo de prova, que tende a alongá-lo até ocorrer fratura. Os resultados desse teste indicam o limite de ruptura e de resistência para tensão normal de tração (σ) no substrato. Essa tensão relaciona-se com a carga de ruptura ($F_{Máx}$), a largura (b) e a espessura (d) do CP em milímetros, de tal forma que, dividindo $F_{Máx}$ pela multiplicação de d e b , tem-se o valor da tensão à tração (σ) (LEE, 2012).

Esse teste é registrado de forma digital, possibilitando o cálculo da tensão máxima, mais conhecida como limite de resistência. Essa propriedade servirá, por sua vez, de referência para avaliação da resistência mecânica em polímeros como um todo. Por isso, obter esse valor é de grande utilidade para fins comparativos. Na Figura 2.12, observa-se exemplos de comportamento da curva tensão x deformação, que são obtidas através dos ensaios de tração para diferentes corpos de prova (PADILHA, 2000).

Figura 2.12 – Curvas tensão x deformação obtidas no ensaio de tração de diferentes tipos de polímeros: comportamento frágil (A), comportamento dúctil (B) e comportamento elástico (C)



Fonte: PADILHA (2000).

2.5 Elaboração dos corpos de prova com as normas

Para a elaboração do corpo de prova e, conseqüentemente, dos testes práticos, é essencial seguir as orientações de procedimentos normatizados. No trabalho em questão duas normas foram utilizadas, a norma ASTM D638 para os corpos de prova do TRITAN, e a norma ISSO 527 para os corpos de provas dos materiais PLA e PETG.

2.5.1 Norma ASTM D638

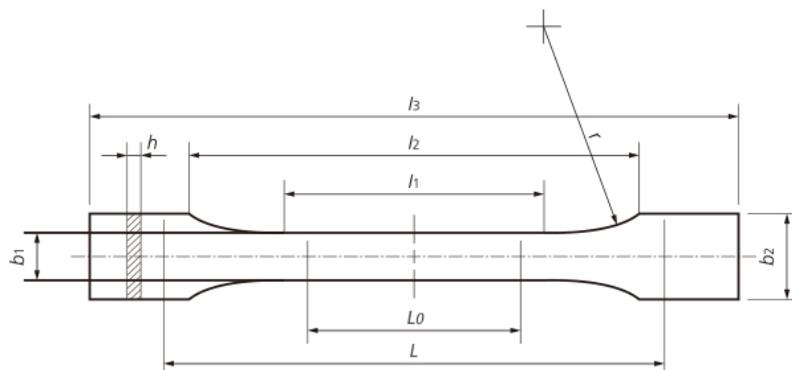
Este método de teste abrange a determinação das propriedades de tração de plásticos não reforçados e reforçados na forma de corpos de prova padrão em forma de haltere quando testados em condições definidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade da máquina de teste. É aplicável para testar materiais de qualquer espessura até 14 mm (0,55 pol.). No entanto, para testar amostras na forma de folhas finas, incluindo filmes com menos de 1,0 mm (0,04 pol.) de espessura, o padrão ASTM D882 é o método de teste preferido. Materiais com espessura superior a 14 mm (0,55 pol.) devem ser reduzidos por usinagem. Além disso, essa norma de teste inclui a opção de determinar a razão de Poisson à temperatura ambiente (ASTM *International*, 2022).

Vale ressaltar que esta norma e a ISO 527-1 tratam do mesmo assunto, mas diferem em conteúdo técnico. Este método de teste não se destina a cobrir procedimentos físicos precisos.

Reconhece-se que o tipo de teste de taxa constante de movimento da cruzeta deixa muito a desejar do ponto de vista teórico, que podem existir grandes diferenças entre a taxa de movimento da cruzeta e a taxa de deformação entre as marcas de medição na amostra e que as velocidades de teste especificadas disfarçam importantes efeitos característicos dos materiais no estado plástico. Além disso, percebe-se que as variações nas espessuras dos corpos de prova, que são permitidas por esses procedimentos, produzem variações nas relações superfície-volume de tais corpos de prova, e que essas variações podem influenciar os resultados dos testes. Assim, onde são desejados resultados diretamente comparáveis, todas as amostras devem ter a mesma espessura (ASTM *International*, 2022).

Ademais, pode ser usado para testar resina fenólica moldada ou materiais laminados. No entanto, onde esses materiais são usados como isolamento elétrico, esses materiais devem ser testados de acordo com os Métodos de Teste D229 e Método de Teste D651. Para propriedades de tração de compósitos resina-matriz reforçados com fibras orientadas contínuas ou descontínuas de alto módulo $>20\text{-GPa}$ ($>3,0 \times 10^6$ -psi), os testes devem ser feitos de acordo com o Método de Teste D3039/D3039M. Os dados de teste obtidos por este método de teste são úteis no projeto de engenharia. No entanto, é importante considerar as precauções e limitações deste método antes de considerar esses dados para o projeto de engenharia. Os valores indicados em unidades SI devem ser considerados padrão. Os valores indicados entre parênteses são apenas para informação. Esta norma não pretende abordar todas as preocupações de segurança, se houver, associadas ao seu uso. Sendo que é responsabilidade do usuário desta norma estabelecer práticas adequadas de segurança e saúde e determinar a aplicabilidade das limitações regulatórias antes do uso (ASTM *International*, 2022). Para o filamento TRITAN, utilizou-se esta norma, que leva em consideração o dimensionamento do corpo de prova conforme demonstrado na Figura 2.13, uma vez que é específica para este tipo de filamento.

Figura 2.13 – Modelo de corpo de prova segundo a Norma ASTM D638.



Fonte: Norma ASTM D638, 2022.

2.5.2 Norma ISO 527

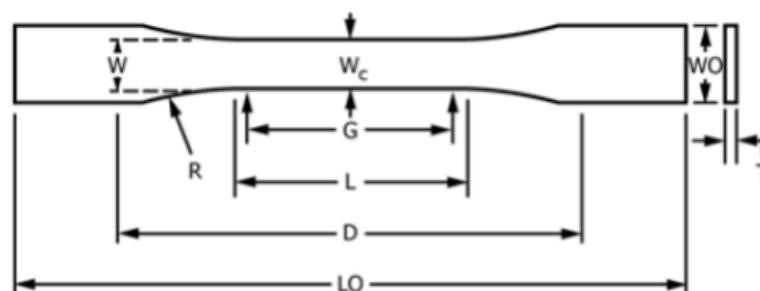
Esta norma especifica os princípios gerais para determinar as propriedades de tração de plásticos e compósitos plásticos sob condições definidas. Vários tipos diferentes de espécimes de teste são definidos para se adequar a diferentes tipos de material que são detalhados nas partes subsequentes da ISO 527 (ISO 527, 2022).

Os métodos são usados para investigar o comportamento à tração dos corpos de prova e para determinar a resistência à tração, módulo de tração e outros aspectos da relação tensão e deformação de tração nas condições definidas. Podendo ser utilizada para os seguintes materiais (ISO 527, 2022):

- Materiais termoplásticos rígidos e semi-rígidos para moldagem, extrusão e moldagem, incluindo compostos carregados e reforçados, além de tipos não preenchidos; chapas e filmes termoplásticos rígidos e semi-rígidos;
- Materiais de moldagem termoendurecíveis rígidos e semi-rígidos, incluindo compostos preenchidos e reforçados; chapas termoendurecíveis rígidas e semi-rígidas, incluindo laminados;
- Termofixos reforçados com fibras e compósitos termoplásticos que incorporam reforços unidirecionais ou não unidirecionais, como mantas, tecidos, mechas tecidas, fios picados, reforços combinados e híbridos, mechas e fibras fresadas; folha feita de materiais pré-impregnados;
- Polímeros de cristal líquido termotrópicos.

Os métodos normalmente não são adequados para uso com materiais celulares rígidos, para os quais a ISO 1926 é usada, ou para estruturas sanduíche contendo materiais celulares (ISO 527, 2022). Para os filamentos PLA e PETG, utilizou-se desta norma para construção dos corpos de prova, conforme a Figura 2.14.

Figura 2.14 – Exemplo de modelo de corpo de prova segundo a Norma ISO 527.



Fonte: Norma ISO 527, 2022.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no período de outubro de 2019 a maio de 2022. Os testes foram desenvolvidos no Laboratório de Manufatura Avançada e no Laboratório de Vibrações, no Departamento de Engenharia da UFLA.

O Núcleo de Engenharia Mecânica da UFLA recebeu uma demanda, no ano de 2019, para que fosse consertado um rotor do sistema de lavagem de gases do Departamento de Química da mesma universidade. Na ocasião, os engenheiros, pesquisadores e discentes responsáveis pela manutenção e fabricação de produtos para atender as necessidades da universidade, verificaram que a manutenção poderia ser feita com um projeto de fixação realizado e produzido com manufatura aditiva.

3.1 Materiais utilizados

A partir da demanda citada, observou-se a necessidade de analisar a melhor resistência mecânica de alguns filamentos que pudessem atender a solicitação do departamento, e fazer, conforme as respectivas normas de segurança, a construção de elementos de fixação para o conserto/manutenção do rotor. Após uma pesquisa, tanto mercadológica quanto técnica, foram analisados os seguintes filamentos: copoliéster TRITAN; Politereftalato de Etileno modificado com glycol (PETG) e Poliacido Lático (PLA).

3.2 Delineamento experimental

O Delineamento utilizado foi o Inteiramente Casualizado, utilizando como tratamento os filamentos: TRITAN, PETG e PLA. Para cada material fabricou-se 3 corpos de prova, ou seja, três repetições para cada tratamento. Sendo assim, houve um total de 9 ensaios de tração. Foram avaliados os seguintes parâmetros: tensão à tração (MPa); deslocamento (mm); carga aplicada (N).

3.3 Desenvolvimento dos corpos de prova

Uma vez determinados os tipos de filamentos a serem utilizados, fez-se a análise das normas para a construção dos corpos de prova, verificando que seria necessário diferentes normas para cada caso.

O corpo de prova feito através do filamento TRITAN, foi desenvolvido segundo a norma ASTM D638, já para os filamentos PLA e PETG, utilizou-se a norma ISO 527.

Para isso, primeiramente foi necessário desenvolver os corpos de prova no CAD TopSolid, utilizando as respectivas normas, chegando no resultado da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Modelo de corpo de prova em CAD e do protótipo real aplicado nos testes.



Fonte: O Autor, 2019.

3.4 Dados técnicos da impressão 3D

Os corpos de prova foram impressos utilizando a impressora 3D Z-Morph Printer VX (Figura 3.2), multifuncional da empresa Z-Morph – Polônia, com os seguintes parâmetros:

- **TRITAN**
 - 1) Temperatura de extrusão entre 260°C.
 - 2) Mesa aquecida em 110°C;
 - 3) *Retract*: 1,5mm;
 - 4) Fator de extrusão: 1,0 (100%);
 - 5) *Extrusion width*: 0,48mm (largura de extrusão padrão);
 - 6) *Quality*: 23%;
 - 7) *Infill*: 12%;
 - 8) *Cut off angle*: 45°.

- **PLA**

- 1) Temperatura de extrusão entre 210°C.
- 2) Mesa aquecida em 60°C;
- 3) *Retract*: 1,5mm;
- 4) Fator de extrusão: 1,0 (100%);
- 5) *Extrusion width*: 0,48mm (largura de extrusão padrão);
- 6) *Quality*: 23%;
- 7) *Infill*: 12%;
- 8) *Cut off angle*: 45°.

- **PETG**

- 1) Temperatura de extrusão entre 240°C.
- 2) Mesa aquecida em 85°C;
- 3) *Retract*: 1,5mm;
- 4) Fator de extrusão: 1,0 (100%);
- 5) *Extrusion width*: 0,48mm (largura de extrusão padrão);
- 6) *Quality*: 23%;
- 7) *Infill*: 12%;
- 8) *Cut off angle*: 45°.

Figura 3.2 – Modelo de impressora 3D ZMORPH.



Fonte: ZMORPH 3D, 2021.

Conforme o próprio fabricante da impressora 3D Z-Morph, tem-se diversas características técnicas relevantes que podem ser destacadas (ZMORPH 3D, 2021):

- Tecnologia: FDM/FFF, CNC, gravação a laser.
- Volume de construção: 250 x 235 x 165 mm (cabeçote específico).
- Resolução de camada: 25-400 microns.
- Diâmetro do material: 1,75 mm, 2,85 mm (cabeçote específico).
- Diâmetro do bico: 0,3 mm (*single*) e 0,4 mm (*single*, utilizado para o estudo).
- Nivelamento da plataforma: automático.
- Extrusora: Única, Dupla (cabeçote específico).
- Plataforma: Vidro borossilicato (Impressão 3D), Alumínio usinado com orifícios de fixação (CNC, Laser).
- Conectividade: USB, SD.
- Materiais aceitáveis: ABS e derivados, PLA e derivados, TRITAN, PETG, PVA, PET, ASA, Nylon, HIPS, TPU, materiais flexíveis (impressão 3D), madeira, policarbonato, HDPE, vidro acrílico, placa de modelagem, compósitos, laminados de cobre (para PCB), POM, espuma de PVC (corte/gravura CNC); madeira, couro, laminado de cobre (gravação a laser); papel, papelão, feltro, materiais finos (corte a laser), cerâmica (impressão robusta em pasta).
- Temperatura máxima da extrusora: 250 ° C.
- Temperatura máxima da plataforma: 120 ° C.
- Pacote de software: Voxelizer 2.0.
- Sistemas operacionais suportados: Mac OS X / Windows 7 e versões mais recentes.

3.5 Teste de tração

Os testes de tração foram realizados conforme as Normas ASTM D638 e ISO527 para cada filamento. A máquina utilizada para os ensaios foi a *EMIC DL 3000 23-20* (Figuras 3.4). Utilizou-se uma célula de carga de 2000 kgf, correspondendo a 19613,3 N, e uma taxa de deformação de aproximadamente 50 mm.min⁻¹. Para as medidas de deformações, estabeleceu-se no software *Tesc* em 50 mm de distância entre as garras de fixação dos corpos de prova, como também a largura de 25 mm e espessura de 3,04 mm, conforme as respectivas normas citadas. Para evitar erros causados por fatores ou condições externas, buscou-se controlar todas as

variáveis que pudessem afetar a realização do ensaio mecânico. Uma das condições foi a temperatura do ambiente no laboratório, que foi mantida a 20 °C.

Os ensaios mecânicos foram então realizados e as principais grandezas analisadas correspondem à: Tensão Máxima (MPa); Tensão de Ruptura (MPa); Módulo de Elasticidade Young (MPa) e Carga Máxima Aplicada (N).

Figura 3.4 – Modelo do teste de tração aplicado aos corpos de prova com a máquina *EMIC DL 3000 23-20* no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia da UFLA.



Fonte: O Autor.

3.6 Análise estatística

As análises de variância do experimento foram feitas utilizando o *software* SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2015), disponibilizado gratuitamente pela Universidade Federal de Lavras. Os dados foram analisados por meio de regressão e desvios para verificar a diferença entre os ensaios mecânicos de tração, através do método de *Tukey*, com nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pela análise estatística, pode-se obter resultados comparativos das principais características de cada corpo de prova, envolvendo tensão à tração, deslocamento e carga aplicada nos testes mecânicos. Vale destacar que os resultados obtidos e as discussões estão embasadas apenas nos valores comparativos de fatores mecânicos, ou seja, analisando a performance de resistência de cada material a partir da diferença entre os resultados estatísticos, sem considerar as questões químicas ou de aplicação futura dos materiais.

4.1 Análise estatística da variável tensão à tração (MPa)

Neste tópico, a variável em questão será a tensão à tração para os corpos de prova do TRITAN, PETG e PLA, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Análise de variância a partir da tensão à tração.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamentos	2	119,6917	59,8458	9,3950	0,0142
Erro	6	38,2217	6,3702		
Total Corrigido	8	157,9131			
CV (%)	8,56				
Média Geral	29,4830				

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir da Tabela 4.1, com a probabilidade (Pr) de 1,42%, pode-se observar que há diferença estatística entre os tratamentos, ou seja, 98,58% de confiança para obter esta divergência de resultados, uma vez que o valor de probabilidade (Pr) está abaixo dos 5% considerado como metodologia de análise de *Tukey* (SISVAR, 2015).

Em que:

- FV = Fator de variância;
- GL = Grau de liberdade;
- SQ = Variância geral nos tratamentos;
- QM = Quadrado médio;
- Fc = Fonte de variação;
- Pr = Probabilidade de diferença entre os tratamentos.

Sendo assim, a partir do método de *Tukey*, chegou-se ao valor de desvio padrão (DMS) de 6,3206, com 95% de confiança, em que pode-se obter a média harmônica do número de repetições para cada corpo de prova, com erro padrão de 1,4572, obtendo os resultados comparativos da Tabela 4.2 (SISVAR, 2015).

Tabela 4.2 – Análise das médias de tensão à tração para cada material.

Tratamentos	Médias	Resultados do Teste	
TRITAN	24,5822	a1	
PETG	30,5425	a1	a2
PLA	33,3245	a2	

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir dos resultados da Tabela 4.2, observa-se que, no teste de média entre os materiais TRITAN e o PETG (a1), e entre PETG e PLA (a2), há semelhança estatística das médias de tensão à tração, uma vez que o desvio não ultrapassou o limite máximo de 6,3206. Já para o comparativo entre TRITAN e PLA, não há semelhança estatística entre os resultados, sendo que a diferença das médias ultrapassa o valor de desvio encontrado pelo *software*.

Apesar de não haver diferença estatística entre os copoliésteres TRITAN e o PETG, conforme os valores das médias de tensão à tração, verifica-se que o copoliéster PETG apresentou melhores resultados. E, ao comparar PETG e PLA, observa-se que o PLA tem resultado de performance de tensão à tração melhor do que os demais materiais, visando apenas a questão mecânica nos testes, com valor médio de 33,3245 MPa.

Segundo Adeilton Fernandes *et al.* (2021), que realizou um comparativo mecânico entre os copoliésteres PLA e ABS, após a realização do teste de tração nos respectivos corpos de prova, o material PLA obteve 22,44 MPa, ou seja, comparado ao resultado encontrado neste trabalho (33,3245 MPa), há certa diferença no valor médio de tensão à tração, uma vez que algumas condições como, temperatura, ambiente, máquina utilizada para impressão dos corpos de prova e para o teste mecânico, podem influenciar no resultado final.

Outro resultado comparativo, obtido pelos testes mecânicos em corpos de prova do material PLA, de acordo Rodolfo Ramos *et al.* (2021), resultou em 33,93 MPa para tensão à tração do copoliéster, sendo uma média próxima ao valor obtido neste trabalho, uma vez que a diferença é de apenas 1,78% entre os resultados. Logo, com condições de experimento mais semelhantes, observa-se que os valores podem ser mais similares.

4.2 Análise estatística da variável deslocamento (mm)

Neste tópico, a variável em questão será o deslocamento para os corpos de prova do TRITAN, PETG e PLA, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise de variância a partir do deslocamento.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamentos	2	6,3680	3,1840	17,4860	0,0031
Erro	6	1,0925	0,1820		
Total Corrigido	8	7,4606			
CV (%)	6,26				
Média Geral	6,8127				

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir da Tabela 4.3, com a probabilidade (Pr) de 0,31%, pode-se observar que há diferença estatística entre os tratamentos, ou seja, 99,69% de confiança para obter esta divergência de resultados, uma vez que o valor de probabilidade (Pr) está abaixo dos 5% considerado como metodologia de análise de *Tukey* (SISVAR, 2015).

Sendo assim, a partir deste método, chegou-se ao valor de desvio padrão (DMS) de 1,0686, com 95% de confiança, em que pode-se obter a média harmônica do número de repetições para cada corpo de prova, com erro padrão de 0,2463, obtendo os resultados comparativos da Tabela 4.4 (SISVAR, 2015).

Tabela 4.4 – Análise das médias de deslocamento para cada material.

Tratamentos	Médias	Resultados do Teste
TRITAN	7,7274	a1
PETG	7,0140	a1
PLA	5,6967	a2

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir dos resultados da Tabela 4.4, pode-se observar que, entre os materiais TRITAN e o PETG (a1), há semelhança estatística das médias deslocamento, uma vez que o desvio não ultrapassou o limite máximo de 1,0686. Já para o comparativo entre TRITAN e PLA e entre PETG e PLA, não há semelhança estatística entre os resultados, sendo que a diferença das médias ultrapassa o valor de desvio encontrado pelo *software*.

4.3 Análise estatística da variável de carga (N)

Neste tópico, a variável em questão será a carga aplicada para os corpos de prova do TRITAN, PETG e PLA, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Análise de variância a partir da carga aplicada.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamentos	2	302971,7128	151485,8564	163,2430	0
Erro	6	5567,8494	927,9749		
Total Corrigido	8	308539,5622			
CV (%)	2,72				
Média Geral	1119,5071				

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir da Tabela 4.5, com a probabilidade (Pr) de 0,0%, pode-se observar que há diferença estatística entre os tratamentos, ou seja, 100% de confiança para obter esta divergência de resultados, uma vez que o valor de probabilidade (Pr) está abaixo dos 5% considerado como metodologia de análise de *Tukey* (SISVAR, 2015).

Sendo assim, a partir deste método, chegou-se ao valor de desvio padrão (DMS) de 76,2869, com 95% de confiança, em que pode-se obter a média harmônica do número de repetições para cada corpo de prova, com erro padrão de 17,5876, obtendo os resultados comparativos da Tabela 4.6 (SISVAR, 2015).

Tabela 4.6 – Análise das médias de carga aplicada para cada material.

Tratamentos	Médias	Resultados do Teste
TRITAN	867,7073	a1
PETG	1191,1584	a2
PLA	1.299,6557	a3

Fonte: SISVAR, 2015.

A partir dos resultados da Tabela 5.6, pode-se observar que, conforme os resultados a1, a2 e a3 dos testes, entre todos os materiais, não houve semelhança de resultados estatísticos mecânicos ao analisar a carga aplicada, uma vez que a diferença entre a média de todos os materiais foi maior que o desvio padrão de 76,2869 encontrado pelo *software*.

Havendo esta diferença estatística entre os copoliésteres TRITAN, PETG e PLA, verifica-se que, conforme os valores das médias analisadas, o copoliéster PLA tem maior resistência à carga aplicada, visando apenas a questão mecânica nos testes.

Um comparativo relacionado à carga aplicada no material de maior resistência, segundo Diego Garrido *et al.* (2021), a partir de testes em corpos de prova do copoliéster PLA, a força média obtida foi de 730,22 N, sendo menor do que o resultado alcançado para o PLA neste trabalho (1.299,6557 N). Esta diferença pode ser influenciada por diversos fatores, como: temperatura do local de teste; ambiente; máquina utilizada para impressão dos corpos de prova e para o teste mecânico, entre outros.

Já segundo Anna Kellssya *et al.* (2021), a média obtida da carga aplicada no copoliéster PLA após os testes mecânicos foi de 1496,49 N, sendo maior que o valor encontrado neste experimento, porém com uma diferença de 13,10%, podendo também ser justificada devido às condições de testes e fabricação dos corpos de prova.

5 CONCLUSÃO

A partir dos objetivos específicos, neste trabalho conclui-se que, a elaboração dos corpos de prova foi realizada utilizando os copoliésteres TRITAN, PETG e PLA, conforme as respectivas normas, através da Manufatura Aditiva (MA), por meio do processo FDM (*Fused Deposition Modeling*).

Através dos ensaios mecânicos, realizados na Universidade Federal de Lavras, foram obtidos os resultados necessários para as análises, visando a performance de cada material através das respectivas características de tensão à tração (MPa), deslocamento (mm) e a carga aplicada (N).

Ao comparar os resultados obtidos, através das análises estatísticas, observou-se que o material PLA tem maior resistência mecânica, ou seja, valores maiores para tensão à tração e carga máxima aplicada. Além disso, o comparativo também foi realizado utilizando artigos científicos, verificando que há diferença entre resultados experimentais, devido principalmente às condições adversas de ambiente, temperatura, fabricação dos corpos de prova, máquinas utilizadas, entre outros motivos.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados analisados estatisticamente tiveram como objetivo estudar apenas as questões mecânicas dos materiais, ou seja, o trabalho não está levando em consideração possíveis composições químicas e futuras aplicações dos copoliésteres. Logo, este assunto poderá ser tratado em um trabalho futuro que dará sequência ao Trabalho de Conclusão de Curso atual.

REFERÊNCIAS

3D FILA. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/>>. Acesso em 31 de outubro de 2021.

3D LAB. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/>>. Acesso em 31 de outubro de 2021.

Acelera 3D. Disponível em: <<https://acelera3d.com/qual-bico/>>. Acesso em 31 de outubro de 2021

ALCALDE, E. e WILTGEN, F. “Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro” Revista de Ciências Exatas, Universidade de Taubaté (UNITAU), v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

ARAÚJO, J. P., AGRAWAL, P., MÉLO, T. J. A., —Blendas PLA/PEgAA: avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfológica, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.10, n. 3, pp. 118-127, Aug. 2015.

ASTM D 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2000).

BORGES, L. Impressão 3D: o que é e quais seus tipos e benefícios? 2018. Disponível em: <<https://inteligencia.rockcontent.com/impressao-3d/>>.

BRANCO, Rodolfo Ramos Castelo et al. Caracterização da performance do material Polilático (PLA) manufaturado pela tecnologia de Modelagem de Fusão e Deposição (FDM). Research, Society And Development, Paraíba, v. 1, n. 1, p. 22-32, mar. 2021.

CARVALHO, I. No Met Gala 2019, a atração foram as roupas e acessórios feitos por impressoras 3D. 2019. Disponível em: <<https://www.startse.com/noticia/novaeconomia/64296/metgala20193d-startups>>.

FERNANDES, Adeilton et al. Impressão 3D de baixo custo: Comparação de aspectos mecânicos entre PLA e ABS. Engenharia no Século XXI, Belo Horizonte, v. 1, n. 2, p. 14-22, jun. 2021.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823.

FILAMENTOS 3D BRASIL. Disponível em: <<https://filamentos3dbrasil.com.br/#>>. Acesso em 31 de outubro de 2021.

GEBHARDT, A., Understanding Additive Manufacturing, 1st Edition, Hanser, 2011. HULL, C.W., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography - US Patent US4,575,330, 1984.

GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. S.; RODRIGUES, V. P. Análise dos Custos da Produção por Manufatura Aditiva em Comparação a Métodos Convencionais. Revista Produção Online. v. 16, n. 2, 2016.

INSTRON. EMIC DL 3000 23-20. Disponível em: <<https://www.emic.com.br/>>. Acesso em 19 de outubro de 2021.

LACERDA, Daniel. Filamento Tritan: saiba como imprimir esse material. 3D Lab Soluções em impressão 3D. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/filamento-tritan/>>. Acesso em 31 de outubro de 2020.

LEE, John; HUANG, Adam. Fatigue analysis of FDM materials. Mechanical Engineering, University Of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, Usa, p. 291-299, 8 mar. 2012. (A1)

LIU, K.; PIGGOTT, M. R.. Fracture Failure Processes in Polymers: mechanical tests and results. Advanced Composites Physics & Chemistry Group: Department of Chemical Engineering & Applied Chemistry University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A4 Canada, v. 38, n. 1, p. 60-68, jan. 1998. (A2)

MARTINS, K. Y. N. Metodologia para adoção de Sistemas de Gestão baseada na ISO 9001 em organizações de Manufatura Aditiva aplicadas à saúde. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia em Saúde) - Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campina Grande, 2015.

MEDINA, Matheus Santos; MEDEIROS, Natan do Nascimento. Análise do Efeito do Material nas Propriedades Mecânicas de Componentes Poliméricos Produzidos por Manufatura Aditiva. 2020. 93 f. Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Educação Superior, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – Cefet/Rj, Rio de Janeiro, 2020.

NGO, Tuan D. et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. Elsevier, Melbourne, Victoria 3010, Australia, p. 172-196, 12 dez. 2017. (A1)

PADILHA, Angelo Fernando. Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades. Hemus Livraria, Editora e Distribuidora S.A., 2000.

REVISTA GALILEU. Com tecido humano, cientistas imprimem coração em 3D pela primeira vez. 2019. Disponível em: <<https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2019/04/com-tecidohumanocientistasimprimemcoracao-em-3d-pela-primeira-vez.html>>.

RIGID.INK. Technical Data Sheet. Disponível em: < <https://rigid.ink/collections/pla-filaments>>. Acesso 26 de setembro de 2021.

RODRIGUES, L. F.; JESUS, R. A.; SCHÜTZER, K. Indústria 4.0 Uma Revisão da Literatura. Revista de Ciência & Tecnologia, v. 19, n. 38, p. 33 45, 2016.

SARTORI, A.; CASSEL, R. A. Impactos da Manufatura Aditiva na Cadeia de Suprimentos. In: SIMPÓSIO DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25, Bauru, 2018. Anais. Bauru: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2019. ISSN 1809 7189.

SOUZA, Leandro Rodrigues da Silva; STOPPA, Marcelo Henrique. PROCEDIMENTO PARA CONFECÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO A PARTIR DE TUBOS DE PVC. 2014. 9 f. Monografia (Especialização) - Curso de Eng. Mecânica, Lamot, Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.

TAULMAN 3D. Specification Blu Print. Disponível em: < <https://taulman3d.com/specifications.html>>. Acesso em 26 de setembro de 2021.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: MUNHOZ, A. L. J. et al. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2018.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Prototipagem rápida como processo de fabricação. In: AHRENS, C. H. et al. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

ZMORPH 3D. Disponível em: <<https://zmorph3d.com.br/>>. Acesso em 19 de outubro de 2021.