

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM**

LUCAS LEON BRINCAS RAMOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS CAMADAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM
PLA E PETG A PARTIR DA IMPRESSÃO 3D**

JOINVILLE

2023

LUCAS LEON BRINCAS RAMOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS CAMADAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM
PLA E PETG A PARTIR DA IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo De Medeiros

JOINVILLE

2023

LUCAS LEON BRINCAS RAMOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS CAMADAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM
PLA E PETG A PARTIR DA IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo De Medeiros

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Membros:

Profa. Dra. Daniela Becker
UDESC/CCT

Prof. Me. Rafael Beck
UDESC/CCT

Joinville, 06 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de deixar meus agradecimentos ao meu orientador Ricardo de Medeiros, o qual prestou todo o auxílio necessário para a conclusão desse trabalho e teve paciência com o meu ritmo de desenvolvimento. Também sou muito grato aos meus pais, Airton Ramos e Sulamir Machado Brincas Ramos, que jamais mediram esforços para garantir o meu bem-estar.

Reconheço a participação de meus professores Rafael Beck, Daniela Becker e Guilherme de Faveri, assim como de meus colegas Kelvin Masakazu Kuroki Iwasaki e Luis Guilherme Silva Rosa, os quais se mantiveram disponíveis durante a trajetória deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) pelo suporte financeiro (FAPESC - 2017TR1747, 2019TR779 e 2021TR843).

Por fim, não ignoro a presença de Deus na vida de todos os seres vivos e agradeço profundamente o seu amparo em todos os momentos de minha vida.

RESUMO

Na última década, houve um interesse significativo na utilização de termoplásticos para aplicações industriais, construção e vários componentes automotivos. Por outro lado, a impressão 3D é uma tecnologia de fabricação em evolução que se mostra promissora na redução dos custos de produção e na redução dos tempos de ciclo de desenvolvimento do produto quando comparada aos métodos tradicionais de fabricação. Os rápidos avanços na tecnologia de impressão 3D abriram novas oportunidades para os pesquisadores aprimorarem processos, otimizarem parâmetros e melhorarem as propriedades dos produtos impressos. Este estudo visa comparar as propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados com a tecnologia de impressão 3D, com foco em dois materiais específicos: PLA e PETG. As amostras foram impressas em três orientações diferentes: 0°, +/-45° e 90°. Os parâmetros de impressão incluíram uma velocidade de 60 mm/s, 100% de densidade de preenchimento e o padrão de linhas sem paredes. Cinco amostras foram produzidas para cada combinação de material e orientação de impressão. Para PLA, as temperaturas de impressão e leito foram fixadas em 195 °C e 60 °C, respectivamente, enquanto que para PETG, as temperaturas correspondentes foram de 230 °C e 80 °C. Os testes de tração foram conduzidos seguindo o padrão ASTM D638 nas orientações planas das amostras. Correlação de imagem digital (DIC) foi usada para analisar as diferenças observadas nas características de deformação desses materiais sob carga de tração uniaxial para as orientações de impressão investigadas. Após a ruptura das amostras, um microscópio óptico foi utilizado para examinar não apenas a adesão, mas também os possíveis modos de falha. Os resultados do teste de tração revelaram que o PLA exibiu uma resistência à tração máxima 21,1% maior do que o PETG na orientação de impressão de 0°. No entanto, para as orientações de impressão de 90° e +/- 45°, o PETG demonstrou desempenho superior com resistência à tração máxima de 13,7% e 12,3% maior do que o PLA, respectivamente. Para ambos os materiais, a resistência à tração da orientação de 0° foi maior que a de +/- 45°, que por sua vez ficou acima da orientação de 90°. Por fim, esta pesquisa contribuiu para os esforços contínuos no avanço da tecnologia de impressão 3D e na otimização da seleção de materiais para diversas aplicações industriais e de engenharia.

Palavras-chave: Impressão 3D; PLA; PETG; Resistência à tração; Módulo de elasticidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do funcionamento do processo de impressão 3D por FFF	18
Figura 2 - Ilustração de orientação de construção.....	22
Figura 3 - Dois tipos de corpos de prova diferentes ensaiados (A e B).....	24
Figura 4 - Foto das falhas características das quatro orientações ensaiadas ...	24
Figura 5 - Indicação das orientações de (a) 0°, (b) 90° e (c) 45°, na fabricação dos corpos de prova.....	26
Figura 6 - Resultados para os ensaios de tração nas três direções estudadas	27
Figura 7 - Ilustração da estrutura gerada por impressão 3D utilizando FFF	30
Figura 8 - Representação gráfica do método da secante para o cálculo do módulo de elasticidade de materiais.....	32
Figura 9 - Fluxograma	34
Figura 10 - Torres de temperatura de PLA e PETG	35
Figura 11 - Visualização aproximada dos andares visualmente melhor impressos das torres de temperatura de PLA (b) e PETG (a).....	36
Figura 12 - Impressora utilizada para a impressão dos corpos de prova	37
Figura 13 - Dimensões (mm (in.)) do corpo de prova escolhido para a realização dos ensaios.....	37
Figura 14 - Representação das três orientações para os corpos de prova no software Ultimaker Cura: (a) 0°, (b) ±45° e (c) 90°.....	40
Figura 15 - Corpos de prova agrupados e prontos para os ensaios	42
Figura 16 - Equipamento de ensaio de tração e compressão INSTRON EMIC 23-100	43
Figura 17 - Estereoscópio utilizado para a captura de imagens das falhas nos CDPs.....	43
Figura 18 - Amostra ensaiada	44
Figura 19 - Curvas tensão-deformação da condição PLA 0°.....	45
Figura 20 - Curvas tensão-deformação de cisalhamento da condição PLA ±45°	45
Figura 21 - Curvas tensão-deformação da condição PLA 90°.....	46
Figura 22 - Curvas tensão-deformação da condição PETG 0°.....	46

Figura 23 - Curvas tensão-deformação da condição de cisalhamento PETG $\pm 45^\circ$	47
Figura 24 - Curvas tensão-deformação da condição PETG 90°	47
Figura 25 - Gráficos dos módulos de elasticidade do PETG: (a) PETG - CDP 1 (0°), (b) PETG - CDP 5 ($\pm 45^\circ$) e (c) PETG - CDP 4 (90°).	50
Figura 26 - Gráfico dos resultados de tensão máxima para o PLA e PETG... ..	54
Figura 27 - Gráfico dos resultados de módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento para o PLA e PETG	54
Figura 28 - Falhas características de cada condição para o PLA e PETG	55
Figura 29 - Falhas com aumento óptico de amostras em PETG: (a) 90° , (b) 0° e (c) $\pm 45^\circ$	56
Figura 30 - Falhas com aumento óptico de amostras em PLA: (a) 90° , (b) 0° e (c) $\pm 45^\circ$	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros definidos na impressão dos corpos de prova	22
Tabela 2 - Resultados médios de ensaios de tração em corpos de prova de PLA	23
Tabela 3 - Parâmetros de ensaio para a impressão de corpos de prova de tração em PETG	24
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova tipo A e B	25
Tabela 5 - Parâmetros utilizados nas impressões dos corpos de prova em PLA e PETG	28
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração em corpos de prova em PLA e PETG	29
Tabela 7 - Parâmetros definidos para a impressão de todas as amostras	38
Tabela 8 - Medidas dos CDPs de PLA	41
Tabela 9 - Medidas dos CDPs de PETG	41
Tabela 10 - Tensão e deformação máxima de cada condição ensaiada	48
Tabela 11 - Módulo de elasticidade de cada condição ensaiada	51
Tabela 12 - Tensão máxima para PLA	52
Tabela 13 - Tensão máxima para PETG	52
Tabela 14 - Módulo de elasticidade para PLA	52
Tabela 15 - Módulo de elasticidade para PETG	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
MA	Manufatura Aditiva
PLA	Poli(ácido) Lático
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
CDP	Corpo de Prova
DMLS	Sinterização Direta de Metal a Laser
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
Udesc	Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão (Pa)
F	Força (N)
A	Área (m ²)
ϵ	Deformação (mm/mm)
l_0	Comprimento inicial (m)
Δl	Varição de comprimento (m)
τ	Tensão de cisalhamento (Pa)
γ_{xy}	Deformação de cisalhamento no plano xy (mm/mm)
ϵ_x	Deformação na direção x (longitudinal) (mm/mm)
ϵ_y	Deformação na direção y (transversal) (mm/mm)
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
°	Graus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	MANUFATURA ADITIVA	16
2.2	FABRICAÇÃO COM FILAMENTO FUNDIDO (FFF)	16
2.3	POLÍMEROS: PLA E PETG.....	18
2.4	ANÁLISE DE ESTRUTURAS IMPRESSAS	27
2.5	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1	METODOLOGIA CIENTÍFICA	32
3.2	MATERIAIS.....	32
3.3	MÉTODOS.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5	CONCLUSÕES.....	55

1 INTRODUÇÃO

Com o grande avanço tecnológico das últimas décadas, a necessidade de se otimizar os processos de fabricação tornaram-se uma constante no meio científico e industrial, possibilitando o surgimento de tecnologias cada vez mais aprimoradas. Visando redução de custos, tempo de fabricação e aumento da qualidade da produção, a Manufatura Aditiva [MA] é um processo de fabricação que vem continuamente se desenvolvendo para atender as novas necessidades do mercado. A MA é um conjunto de tecnologias que tem como objetivo a construção de um sólido através da adição de material em camadas produzidas de forma subsequente (FERNANDES et al., 2022).

O mercado de manufatura aditiva cresceu 75% por ano na última década, sendo que os principais países investidores dessa tecnologia são China, EUA, Japão e Alemanha. Devido ao rápido avanço no desenvolvimento dessa tecnologia, observou-se a necessidade de estudos mais aprofundados relacionados às propriedades dos materiais manufaturados e definição dos parâmetros desse processo de fabricação, a fim de permitir a otimização dos projetos que fizerem uso dessa tecnologia (KLING et al., 2021).

Considerando toda a perspectiva ao redor da impressão 3D, é compreensível a importância de se estudar cada vez mais os parâmetros e propriedades que podem ou não influenciar o resultado das impressões. Assim, fazem-se necessárias análises detalhadas e estudos respectivos a fim de proporcionar maior compreensão desses parâmetros.

É possível observar que na literatura há uma falta de convergência de resultados quando é analisada a orientação de impressão. Devido a essa carência de resultados concordantes, assim como do grande número de parâmetros que influenciam o processo, entende-se que mais pesquisas, com possíveis novas abordagens, devem ser impulsionadas.

Espera-se, num contexto hipotético, que a orientação de 0° seja a detentora da maior resistência à tração, assim como de módulo de elasticidade, ao passo que a orientação de 90° deve apresentar os menores valores para esses dois parâmetros, ou seja, que apresente comportamento de um material anisotrópico. Além disso, espera-se que os modos de falha para as orientações

sejam diferentes entre si, afetados principalmente pela orientação das impressões.

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo acerca do efeito da direção de impressão das camadas nas propriedades mecânicas. Como objetivos específicos desse trabalho, tem-se a definição dos parâmetros de impressão, realização da impressão dos corpos de prova e ensaio dos mesmos, processamento e análise dos dados dos ensaios e avaliação dos modos de falha. Os corpos de prova serão construídos com PLA (poli(ácido láctico)) e PETG (Politereftalato de Etileno Glicol), que são dois dos materiais mais comercializados atualmente no meio da FDM (*Fused Deposition Modeling*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

O início da manufatura aditiva se deu na década de 1980 com a invenção da estereolitografia, processo no qual se utiliza um laser ultravioleta para curar com precisão as seções transversais de fotopolímero, permitindo-o solidificar rapidamente. A estereolitografia foi inventada por Chuck Hull, cofundador e diretor de tecnologia da 3D Systems (AMZA *et al.*, 2021).

A partir de seu nascimento, essa tecnologia vem revolucionando a indústria como um todo, pois é um processo que permite a fabricação de peças de geometria complexa, dificilmente obtidas pelos processos de fabricação já consolidados. Por esse motivo a manufatura aditiva é considerada um dos pilares da indústria 4.0, assim como da prototipagem rápida (HARTMANN *et al.*, 2022).

Além da estereolitografia citada, outras ramificações da manufatura aditiva são a sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização direta de metal a laser (DMLS) e a modelagem por fusão e deposição (FDM) (HARTMANN *et al.*, 2022).

Aplicações avançadas dessa tecnologia também incluem a produção de protótipos, grande poder de personalização dos projetos e a produção de qualquer arquivo CAD de código aberto. Por esses motivos e outros, o uso da impressão 3D teve grande crescimento em áreas como aeroespacial, automotiva, indústria de alimentos, saúde em geral, arquitetura, moda e eletrônica (KUMAR *et al.*, 2022).

Quanto aos tipos de impressoras 3D que existem atualmente, Razgriz (2020) aponta cinco modelos distintos. Dentre os cinco, estão as impressoras cartesianas, coreXY e delta. Impressora cartesianas, utilizam os três eixos cartesianos independentes para realizar a movimentação. Já o tipo coreXY possui duas dessas coordenadas conjugadas e apenas um eixo independente. O tipo delta é o modelo mais complexo dos três, mais que pode entregar velocidade superiores aos modelos anteriores. Nesse caso, os três eixos de movimentação são conjugados e simétricos entre si, os quais se movimentam sobre guias verticais, sempre formando um ângulo agudo com elas.

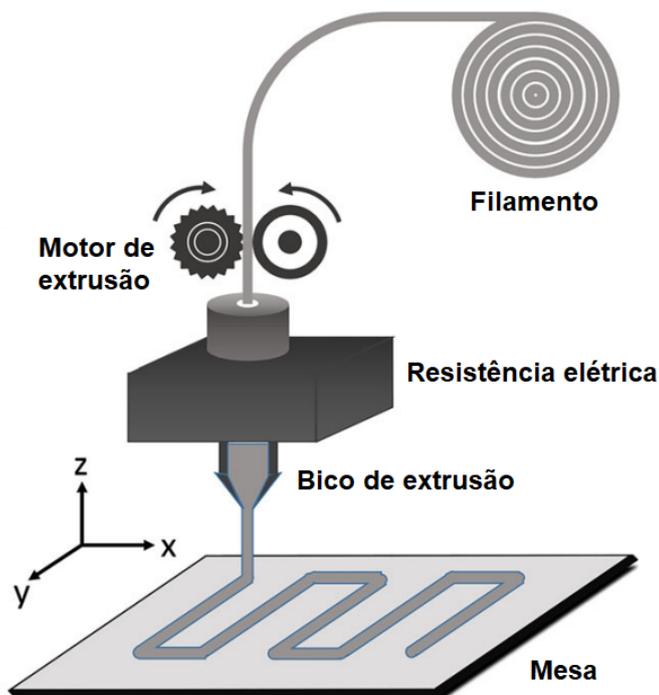
2.2 FABRICAÇÃO COM FILAMENTO FUNDIDO (FFF)

A Fabricação com Filamento Fundido (FFF) é uma ramificação da tecnologia de manufatura aditiva que se concentra na construção do sólido camada por camada, as quais são construídas através da deposição de um filamento fundido do material escolhido (PETROV *et al.*, 2021).

A manufatura pelo processo de FFF se dá pelas etapas de extrusão, fusão e deposição do filamento de material termoplástico e os parâmetros desses processos tem um grande impacto nas propriedades do produto final (DOSHI *et al.*, 2021)(DJOKIKJ *et al.*, 2022).

A Figura 1 ilustra anteriormente princípio de funcionamento do processo, onde o filamento é puxado de seu carretel pelo motor responsável pela extrusão do polímero (*Driving Gear*), fundido pelo sistema de aquecimento (*Heater*) e, por fim, depositado através do bocal (*Nozzle*), o qual acompanha a trajetória determinada pelo código G que descreve a construção da peça (LIU *et al.*, 2019).

Figura 1 – Ilustração do funcionamento do processo de impressão 3D por FFF.



Fonte: LIU *et al.*, 2019.

Sendo o processo de FFF uma das tecnologias de Manufatura Aditiva mais amplamente difundidas, devido a ser acessível e de ter baixo custo de operação e de manutenção (a faixa de custo do mercado é ampla, existindo preços relativamente baixos para sua aquisição), a relação que há entre os parâmetros dos processos e as propriedades mecânicas do produto final vem se tornando um tópico de pesquisa no meio científico (DJOKIKJ *et al.*, 2022).

2.3 POLÍMEROS: PLA E PETG

O PLA é um poliéster alifático, linear, termoplástico e semicristalino ou amorfo, sendo essas duas últimas características dependentes da temperatura de resfriamento do material. Refere-se a um polímero produzido a partir de fontes orgânicas renováveis como açúcar de milho, batata e cana de açúcar, através de biconversão e polimerização. Possui propriedades interessantes no campo das aplicações mecânicas, químicas e físicas, tais como biodegradabilidade, biocompatibilidade, absorção biológica, fácil processamento, possuindo também relativa grande resistência à tração e alta rigidez (SANTANA *et al.*, 2018; HANON, 2021).

A resistência à tração do PLA entre 50 e 70 MPa, enquanto apresenta módulo de elasticidade de 3,0 a 4,0 GPa, propriedades essas que dependem principalmente da massa molar e da composição química do material. O PLA possui uma temperatura de transição vítrea entre 55 e 65 °C, e quando semicristalino evidencia uma temperatura de fusão de 170 a 180 °C (SANTANA *et al.*, 2018).

Apesar das qualidades, o PLA também apresenta algumas limitações, como hidrofília, baixa dureza, além de ser um material frágil. Apesar disso, o PLA é atualmente um dos polímeros biodegradáveis mais extensivamente utilizados em inúmeras aplicações, tais como embalagens, indústria de eletrônicos, indústria automotiva, fabricação de próteses e etc., substituindo com bons resultados os polímeros a base de petróleo (HANON, 2021).

Entre a grande maioria dos usuários da tecnologia de impressão 3D por FFF, o PLA é característico por ser um dos materiais mais populares, o qual é facilmente encontrado em diversas cores e apresenta-se como um material de

impressão mais simples do que outros também amplamente utilizados, como PETG e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) (SANTANA *et al.*, 2018).

Comparativamente com o ABS, um polímero a base de petróleo extensivamente utilizado em escala industrial, o PLA possui melhores propriedades termomecânicas, resultando em maior resistência mecânica e menor coeficiente de expansão térmica, melhorando sua capacidade de impressão e reduzindo problemas como empenamento da peça durante o seu processo de construção (SANTANA *et al.*, 2018).

Com relação ao PETG, o material que vem ganhando bastante espaço entre na comunidade de impressão 3D, assim também como os produtores de filamento, este se trata de uma escolha mais apropriada quando a peça a ser impressa deve possuir qualidades como maior durabilidade e flexibilidade [4]. Nesta situação, o PETG é o material mais adequado, pois apresenta o que há de melhor no ABS, como a sua resistência e ductilidade, somado com a facilidade de impressão que é encontrada no PLA. O PETG pode ser definido como uma versão modificada do amplamente conhecido PET, no qual o “G” adicional na sigla se refere a “glicol modificado”, sendo essa substância adicionada à composição do polímero durante a sua polimerização (SANTANA *et al.*, 2018).

O resultado dessa adição é um material mais transparente, amorfo, menos rígido e mais fácil de ser processado na impressão 3D do que seria na sua forma anterior, o PET, uma vez que a adição de glicol diminui a sua temperatura de fusão. Além de seu uso já declarado, também é aplicado na produção de garrafas de água, embalagens de alimentos, assim como outros itens plásticos (SANTANA *et al.*, 2018).

De uma forma geral, o PETG é um polímero com temperatura de transição vítrea de aproximadamente 80 °C, sendo possuidor de propriedades mecânicas semelhantes ao PET, mas com as principais vantagens de ter uma grande tenacidade, flexibilidade e alta capacidade de processamento (SANTANA *et al.*, 2018).

Santana *et al.* (2018) apresentaram estudos desenvolvidos por KL *et al.* (2004) que mostraram que o PETG possui uma resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente, de 25 MPa e 1,6 GPa. Já os estudos de Focke *et al.* (2009), para os mesmos dados, apresentam valores de 50,4 MPa e 2,02 GPa.

Quando a direção de construção é observada, a qual é um parâmetro avaliado nesse trabalho, o estudo promovido por Khosravani *et al.* (2022), concluiu que a resistência à tração do PLA em corpos de prova construídos na orientação de 0° (alinhada à direção do carregamento) aumentou em 89,2% quando comparada a resistência à tração de corpos de prova construídos na orientação de 90° (90° com relação à direção do carregamento), enquanto que nessa mesma avaliação a orientação de $\pm 45^\circ$ apresentou um aumento de 48,1% em relação à orientação de 90°, sendo ambos os corpos de prova impressos com um preenchimento de 100% e velocidade de impressão de 20 mm/s. Para uma velocidade de impressão de 80 mm/s, estando todos os outros parâmetros preservados, o aumento na resistência à tração foi de 95,2% entre as orientações de 0° e 90°. Novamente entre as orientações de $\pm 45^\circ$ e 0°, esse aumento foi de 45,9%.

No estudo de Zhang *et al.* (2023), o qual avaliou as propriedades mecânicas de corpos de prova impressos em PLA nas orientações longitudinal e transversal de construção (0° e 90°), em três diferentes áreas de seção transversal, entre outros polímeros também, foi observado que para os corpos de prova com área de seção transversal de 190 mm², a orientação a 0° apresentou uma resistência à tração de 47,91 MPa, enquanto a orientação a 90° resultou em um valor de 15,71 MPa. Para os corpos de prova com uma área de seção transversal de 18 mm², a resistência à tração, respectivamente para as direções a 0° e a 90°, foram de 51,42 MPa e 34,72 MPa. Por fim, para a situação análoga as anteriores, porém com a área transversal dos corpos de prova sendo 3,18 mm², as respectivas resistências à tração foram de 48,89 MPa e 41,57 MPa. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para a impressão dos corpos de provas desse estudo.

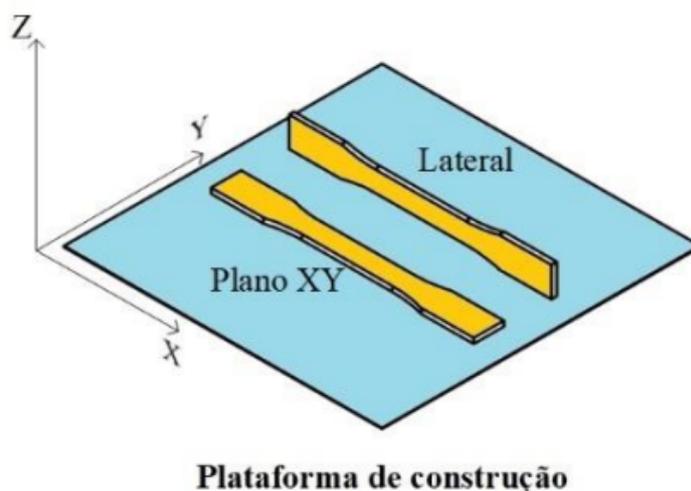
Tabela 1 – Parâmetros definidos na impressão dos corpos de prova.

Parâmetros	PLA
Temperatura do bico (°C)	200
Temperatura da mesa (°C)	60
Porcentagem de preenchimento (°C)	100
Orientação (°)	0 e 90
Espessura de camada t (mm)	0,2
Velocidade de impressão (mm/s)	60

Fonte: ZHANG *et al.*, 2023.

Santana *et al.* (2018) apontou alguns resultados interessantes também, onde, de acordo com a Figura 2, amostras de PLA foram fabricadas em algumas configurações que dentre elas, estão a de $\pm 45^\circ$, impressão na representação “Plano XY” e 0° , representada na representação “Lateral”. Nesse caso em específico, as amostras impressas na orientação longitudinal apresentaram uma resistência à tração média de 49,34 MPa, enquanto para as amostras impressas na orientação $\pm 45^\circ$, esse valor foi de 43,50 MPa, demonstrando um aumento de 13,4% da orientação de $\pm 45^\circ$ para a de 0° . Nesse trabalho também foram avaliados os módulos de elasticidade nos ensaios, os quais respectivamente para as orientações de 0° e $\pm 45^\circ$, resultam em 3,59 GPa e 3,30 GPa, ou seja, uma diferença de 8,8% com relação a orientação de $\pm 45^\circ$.

Figura 2 – Ilustração de orientação de construção.



Fonte: SANTANA *et al.*, 2018.

Nesse mesmo estudo foram realizados ensaios com PETG nas mesmas condições de corpo de prova que o PLA. A resistência à tração média e módulo de elasticidade, respectivamente das orientações de 0° e $\pm 45^\circ$, foram de 41,10 MPa, 1,92 GPa, 32,15 MPa e 1,55 GPa. Com relação à orientação de $\pm 45^\circ$, houve uma diferença de 27,8% na resistência à tração e 23,8% no módulo de elasticidade Santana *et al.* (2018).

O trabalho de Letcher e Waytashek (2015), o qual avaliou as propriedades mecânicas do PLA em 3 orientações diferentes com a orientação de 45° sendo apenas positiva, tem seus resultados resumidos na Tabela 2. Para os respectivos ensaios, um preenchimento de 100% e uma velocidade de extrusão de 100 mm/s foram utilizados.

Como pode ser visto na Tabela 2, os corpos de prova que em média apresentaram a maior resistência à tração foram os construídos na orientação de 45° , os quais também tiveram, em média, o maior módulo de elasticidade (LETCHER, 2015).

Tabela 2 – Resultados médios de ensaios de tração em corpos de prova de PLA.

Orientação θ ($^\circ$)	Tensão máxima média (MPa)	Deformação média na ruptura (%)	Média do módulo de elasticidade (GPa)
0	58,45	2,02%	3,33
45	64,03	2,50%	3,60
90	54,01	4,14%	3,49

Fonte: LETCHER e WAYTASHEK, 2015.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de ensaios para o PETG obtidos de Dolzyk e Jung (2019). Foram ensaiadas além das 3 direções principais mais abordadas, 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° , também corpos de prova na orientação de somente 45° , semelhante ao estudo de Letcher e Waytashek (2015), porém, neste estudo com PETG.

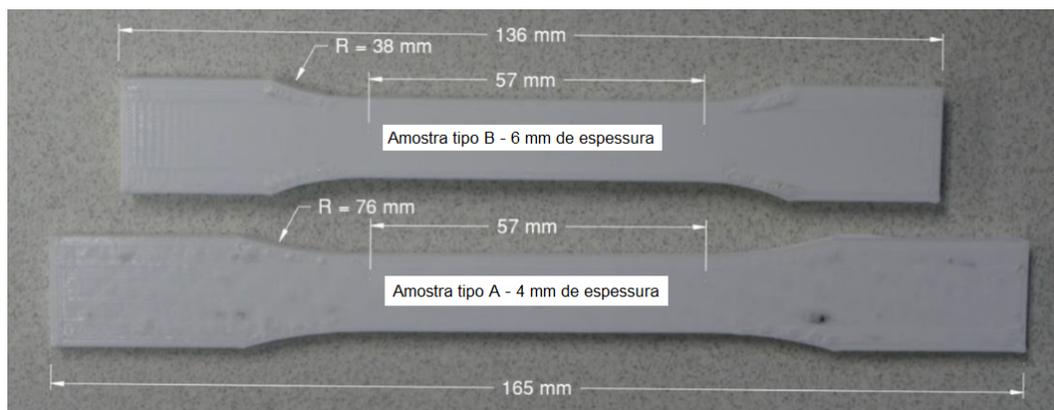
Tabela 3 – Parâmetros de ensaio para a impressão de corpos de prova de tração em PETG.

Parâmetros de impressão	Valor
Espessura de camada	0,2 mm
Porcentagem de preenchimento	100%
Padrão de preenchimento	lines
Temperatura de impressão	265 °C
Velocidade de impressão	40 mm/s
Temperatura da mesa	107 °C

Fonte: DOLZYK e JUNG, 2019.

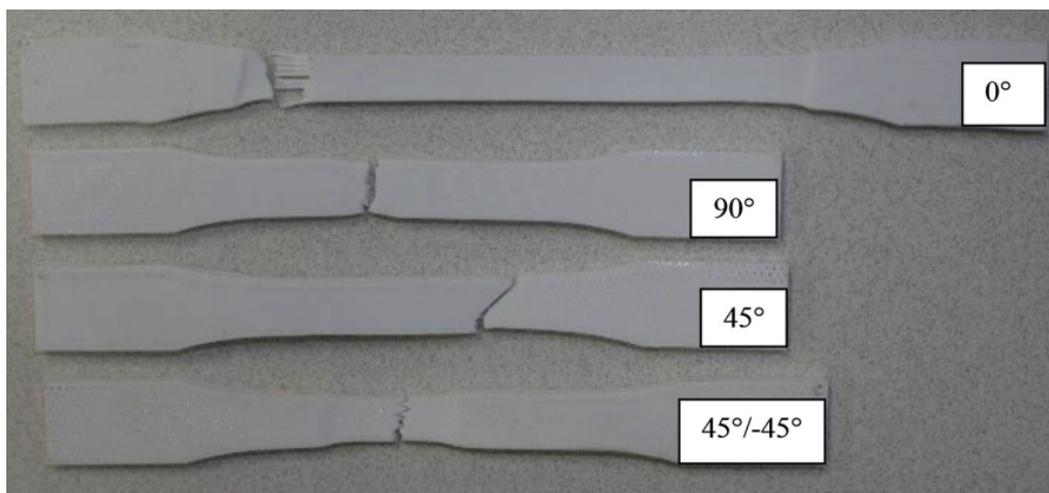
Dois tipos de corpos de prova com dimensões diferentes foram testados, tipo A e tipo B, os quais podem ser verificados na Figura 3. Na sequência, a Figura 4 apresenta a falha característica de cada orientação de corpo de prova (DOLZYK, 2019).

Figura 3 – Dois tipos de corpos de prova diferentes ensaiados (A e B).



Fonte: DOLZYK e JUNG, 2019.

Figura 4 – Foto das falhas características das quatro orientações ensaiadas.



Fonte: DOLZYK e JUNG, 2019.

Os resultados dos ensaios, os quais podem ser conferidos na Tabela 4 mostram que, para os corpos de prova do tipo A, apesar de a orientação 0° apresentar a maior resistência à tração, todas as orientações tiveram um resultado próximo, onde a orientação de 90° apresenta um resultado 3,5% menor do que a orientação de 0° nesse parâmetro avaliado. Nos corpos de prova do tipo B, a dispersão nos resultados foi um pouco maior e a orientação de 0° se manteve com o maior resultado para a resistência à tração, apresentando um valor de 48,04 MPa. Contudo, o módulo de elasticidade, a orientação de 0° resultou nos maiores valores, para ambos os tipos de corpo de prova (DOLZYK, 2019).

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova tipo A e B.

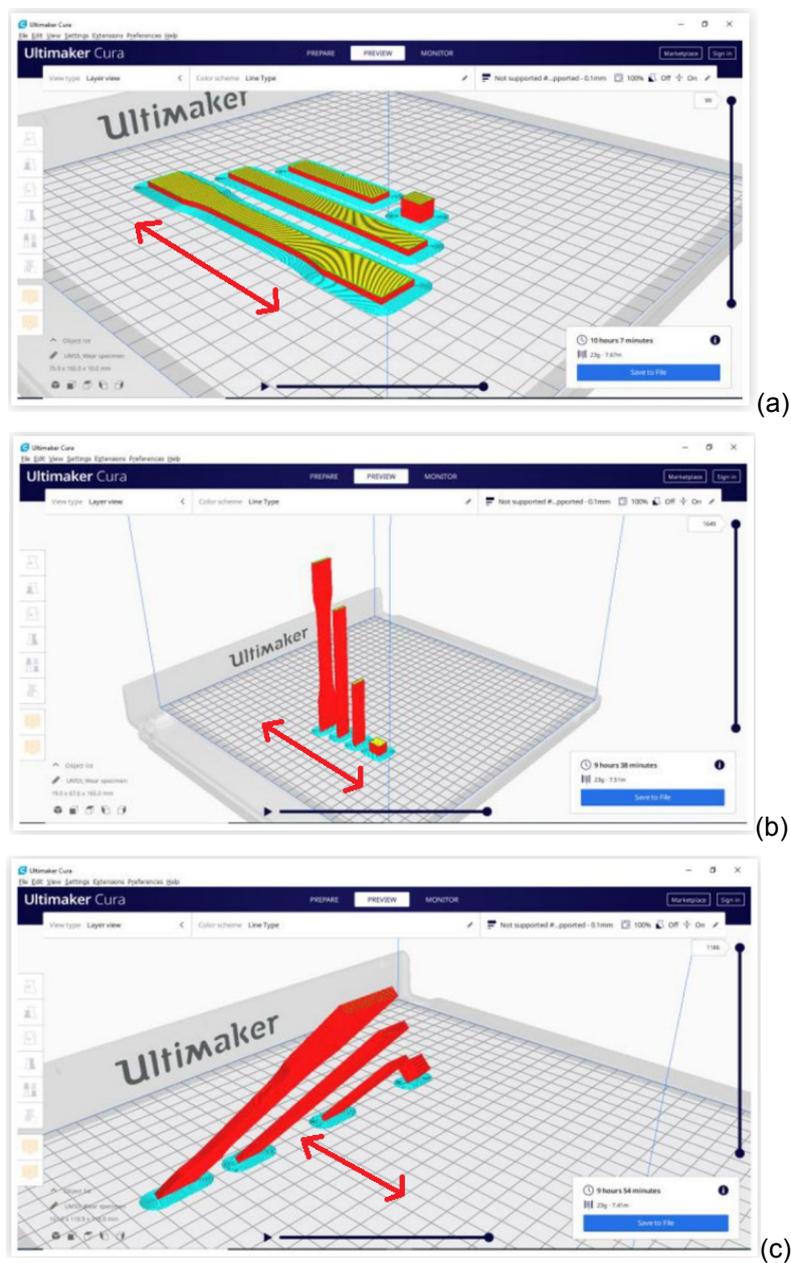
Orientação	Tensão máxima média (MPa) (SD)	Tensão máxima média (MPa) (SD)	Média do módulo de elasticidade (MPa) (SD)	Média do módulo de elasticidade (MPa) (SD)
	A	B	A	B
Tipo de amostra				
Transversal (90°)	44,12 (0,73)	44,60 (0,12)	1559,86 (40,77)	1468,88 (11,11)
Diagonal (45°)	41,58 (2,0)	41,89 (0,98)	1575,59 (71,09)	1572,32 (25,4)
Cruzada (45/— 45°)	41,70 (0,76)	44,84 (0,04)	1481,02 (62,73)	1566,81 (52,29)
Longitudinal (0°)	45,71 (0,61)	48,04 (0,40)	1621,03 (41,52)	1623,28 (29,7)

Fonte: DOLZYK e JUNG, 2019.

Ranganathan *et al.* (2020) imprimiu corpos de prova em PETG em diferentes porcentagens de preenchimento, 50%, 75% e 100%, considerando

uma velocidade de 100 mm/s, das três orientações de impressão ensaiadas, as de 45° e 90° tiveram uma construção não usual, onde o filamento foi depositado transversalmente ao plano o corpo de prova, e não paralelamente. A Figura 5 apresenta essa diferença dos corpos de prova na orientação 45° e 90°.

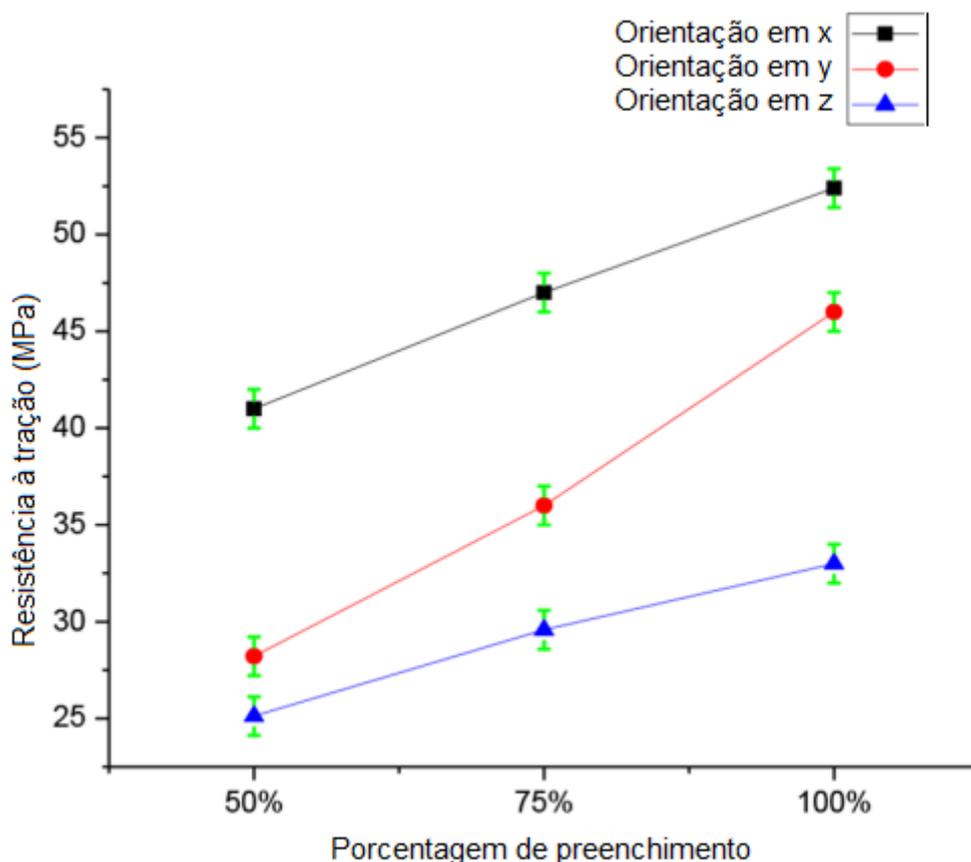
Figura 5 – Indicação das orientações de (a) 0°, (b) 90° e (c) 45°, na fabricação dos corpos de prova.



Fonte: RANGANATHAN *et al.*, 2020.

Para os parâmetros já especificados, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 6. Nela, pode-se verificar que a resistência à tração média dos corpos de prova impressos na orientação longitudinal foi a maior para todas as porcentagens de preenchimento ensaiadas. Além disso, nota-se que para qualquer porcentagem de preenchimento ensaiada, os corpos de prova impressos na orientação 0° resultaram, para a resistência à tração, valores maiores que os respectivos da orientação de 90°, relação essa que se repete quando comparadas as orientações de 90° e 45°. A orientação de 90°, em todos os casos, apresentou maiores valores para a resistência à tração que a orientação de 45° (RANGANATHAN *et al.*, 2020).

Figura 6 – Resultados para os ensaios de tração nas três direções estudadas.



Fonte: RANGANATHAN *et al.*, 2020.

Outro trabalho que desenvolveu uma análise extensa na caracterização de corpos de prova impressos em impressora 3D foi o de Sepahi *et al.* (2021), o

qual avaliou os polímeros PETG, ABS e PLA, ensaiando corpos de prova impressos em cinco orientações diferentes, que foram as de 0°, 90°, 0°/90°, 45° e ±45°. A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados para as impressões.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas impressões dos corpos de prova em PLA e PETG.

Parâmetros	PETG	PLA
Temperatura de impressão	240 °C	200 °C
Velocidade de impressão	55 mm/s	70 mm/s
Temperatura da mesa	70 °C	60 °C
Espessura de camada	0,1 mm	0,1 mm
Densidade de preenchimento	100%	100%
Arrefecimento	50%	100%

Fonte: SEPAHI *et al.*, 2021.

Os resultados resumidos dos ensaios do estudo de Sepahi *et al.* (2021) podem ser verificados na Tabela 6. Observa-se que para os corpos de prova em PETG, a orientação que apresentou a maior resistência à tração foi a de 0° (49,37 MPa), enquanto que para o PLA, a orientação com a maior resistência à tração foi a de ±45°, a qual ficou apenas 1,4% acima da resistência à tração da orientação de 0°, valores os quais foram de, respectivamente, 60,81 MPa e 59,98 MPa. Vale observar também que a orientação de 45° nos corpos de prova em PLA, por sua vez, também resultou em um valor menor do que as duas outras orientações citadas, o qual foi de 59,02 MPa.

Além dos valores de resistência à tração, também foram obtidos os módulos de elasticidade. Para o PETG, a orientação 0° apresentou o maior valor, com 1468,26 MPa, enquanto que para o PLA, quando observadas apenas as orientações de 0°, 90° e ±45°, a orientação que obteve o maior módulo de elasticidade foi a de ±45°, com um valor de 2514,88 MPa (SEPAHI *et al.*, 2021).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração em corpos de prova em PLA e PETG.

Amostra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
PETG 0°	49,37	1468,26
PETG 90 °	35,86	1387,23
PETG 45°	37,37	1381,90
PETG 0°/90°	46,47	1452,67
PETG ±45°	40,95	1354,82
PLA 0°	59,98	2462,27
PLA 90°	51,57	2510,50
PLA 45°	59,02	2487,24
PLA 0°/90°	57,22	2567,41
PLA ±45°	60,81	2514,88

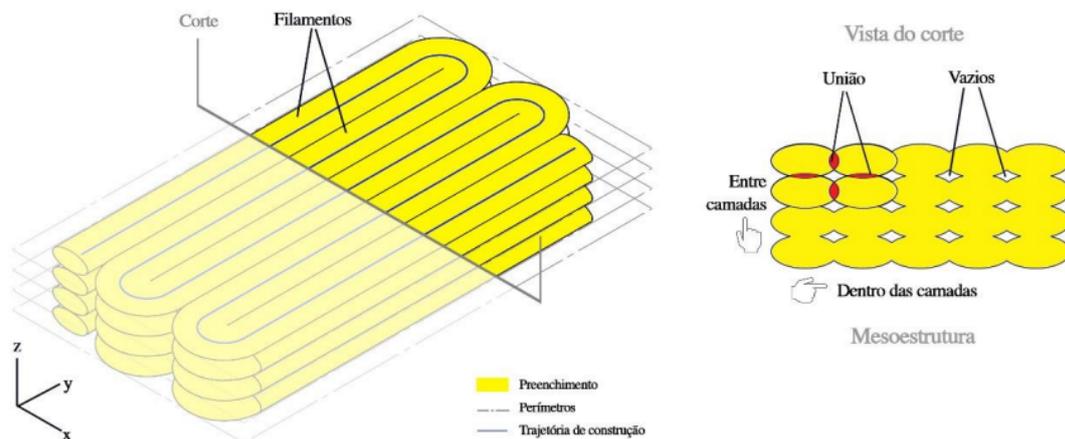
Fonte: SEPAHI *et al.*, 2021.

2.4 ANÁLISE DE ESTRUTURAS IMPRESSAS

Qualquer fabricação produzida através de impressão 3D está sujeita a construção onde haverá espaços vazios entre os filamentos depositados, tanto de uma camada para a outra, quanto de um filamento para o outro na mesma camada. Essa mesoestrutura será estabelecida pela trajetória de deposição dos filamentos, assim como de alguns parâmetros do processo. Como pode ser visto na Figura 7, esses vazios, assim como o seu formato e extensão da união entre os filamentos, influenciarão a anisotropia e propriedades mecânicas da peça impressa (SANTANA *et al.*, 2018) (MORADI *et al.*, 2021).

Diante disso torna-se necessário a avaliação das propriedades das criações produzidas através da tecnologia de impressão 3D, uma vez que, pelo apresentado, a estrutura encontrada nesse tipo de manufatura possui particularidades que outras tecnologias não possuem. Ademais, as propriedades a serem avaliadas que merecem mais atenção são justamente as propriedades mecânicas, dado que a mesoestrutura gerada pela impressão 3D não só acarreta em uma redução da área transversal das peças como também implica em um questionamento quanto a interação e devida fusão entre filamentos depositados subsequentemente (SANTANA *et al.*, 2018).

Figura 7 – Ilustração da estrutura gerada por impressão 3D utilizando FFF.



Fonte: SANTANA *et al.*, 2018.

2.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Em um ensaio de tração, o qual é um ensaio uniaxial, submete-se um corpo de prova, geralmente de geometria estabelecida por norma, a uma força de tração crescente até a sua ruptura. Do processamento de dados desse ensaio é possível obter uma série de dados, como a máxima tensão suportada, tensão de escoamento do material, módulo de elasticidade, dados de deformação, coeficiente de Poisson, entre outros (DJOKIKJ *et al.*, 2021).

A máquina universal de ensaio faz a aquisição dos dados de força e deslocamento, dados esses que são usados na obtenção da curva tensão-

deformação do material sendo estudado. Através da análise da curva tensão-deformação é possível obter o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, entre outros. Dessa forma, faz-se necessário a definição dos parâmetros dessa curva (POPOV, 1978). Sendo assim, a equação

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

é utilizada para obter a tensão no corpo de prova. “F” é a força aplicada enquanto “A” é a sua área inicial da seção transversal (DJOKIKJ *et al.*, 2021).

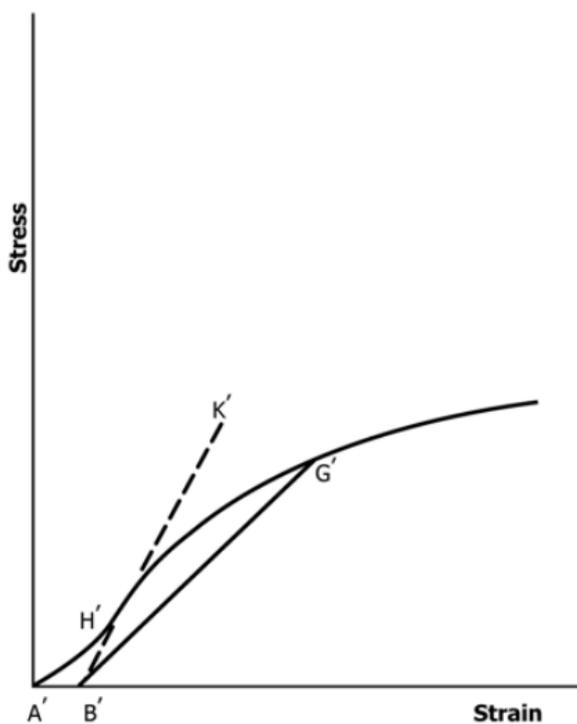
Os valores de deslocamento fornecidos pela máquina são na unidade Milímetros. Para converter estes dados em deformação normal, utiliza-se a equação

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde a deformação normal ε é igual ao deslocamento entregue pelo equipamento Δl dividido pela distância inicial as entre garras l_0 (DJOKIKJ *et al.*, 2021).

A partir dos dados aquiridos durante o ensaio, a norma ASTM D638 – 14 indica como deve-se proceder para se obter o módulo de elasticidade e tensão de escoamento das curvas tensão-deformação dos ensaios. Na norma, é instruído que, quando o material não apresenta uma região claramente linear, deve-se utilizar o método da secante para o cálculo desses parâmetros. O método da secante, como pode ser conferido na Figura 8 e no item A1.3 da norma ASTM D638 – 14, diz que o módulo de elasticidade do material sem região linear é obtido, em síntese, traçando uma reta desde o ponto de zero deformação até qualquer ponto G' na curva tensão-deformação do material. A inclinação dessa reta é o módulo de elasticidade e o ponto onde ela cruza a curva tensão-deformação é a tensão de escoamento do material a partir do ensaio (ASTM D638 – 14, 2019).

Figura 8 – Representação gráfica do método da secante para o cálculo do módulo de elasticidade de materiais.



Fonte: ASTM D638 – 14, 2019.

Para os corpos de prova que possuem a sua impressão orientada em 45° ou $\pm 45^\circ$, diferente de 90° e 0° , neste trabalho optou-se por utilizar a norma ASTM D3518M – 18, uma vez que nessa orientação o modo de falha é através do cisalhamento, tornando a análise da tensão de cisalhamento mais adequada do que a tensão principal. A curva tensão-deformação padrão se torna uma curva de tensão de cisalhamento em função de deformação de cisalhamento (ASTM D3518M – 18, 2023).

Uma vez que em um ensaio de tração é um ensaio uniaxial, temos que a tensão de cisalhamento que existirá no corpo de prova é igual a metade de sua tensão normal, definindo a tensão de cisalhamento por

$$\tau = \frac{F}{2 * A} \quad (3)$$

pode-se calcular a tensão de cisalhamento de cada ponto. Para calcular a deformação de cisalhamento no plano xy, utiliza-se

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (4)$$

onde ε_x é a deformação na direção da aplicação da força e ε_y é a deformação da direção transversal à aplicação da força. (ASTM D3518M – 18, 2023).

Em um material que apresente uma região linear no início de sua curva tensão-deformação ou da curva tensão-deformação de cisalhamento, a qual é representante da região de comportamento elástico desse material, reconhece-se que o módulo de elasticidade é justamente a inclinação desse segmento da curva (POPOV, 1978).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

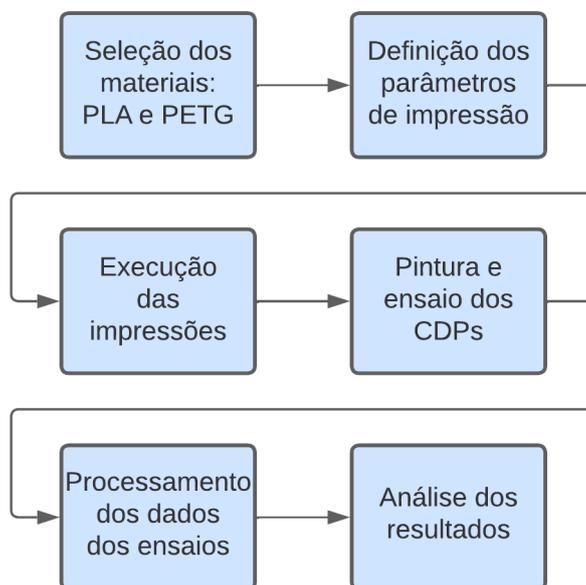
3.1 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Para a realização deste trabalho, a metodologia representada pelo fluxograma da Figura 9 foi utilizada. Iniciou-se pela definição dos objetivos e abordagens do estudo a ser realizado, seguido da seleção e compra dos dois materiais: PLA e PETG.

A seguir, a escolha dos parâmetros de impressão foi realizada, a qual foi influenciada pela literatura. Com os parâmetros definidos, todas as impressões dos corpos de prova foram realizadas para ambos os materiais.

Concluídas as impressões, os corpos de prova foram pintados com o fim de serem identificados pelo DIC e dessa forma foram ensaiados. Na sequência, os dados dos ensaios puderam ser aquisitados e processados.

Figura 9 – Fluxograma.



Fonte: O autor.

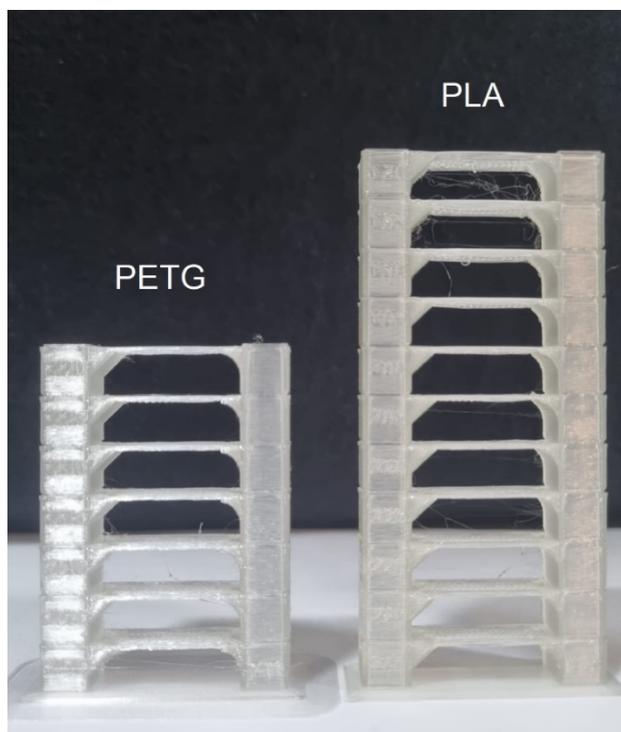
3.2 MATERIAIS

Para realizar a análise desse trabalho, optou-se pela matéria prima sem a adição de pigmento, para que este não tenha qualquer influência nos

resultados. Os materiais selecionados para esta análise foram o PLA e PETG fornecidos pela empresa Slim 3D, da cidade de Joinville, em Santa Catarina.

Antes de realizar a impressão dos corpos de prova, foram impressas 2 torres de temperatura, uma para cada material. Para o PETG a temperatura inicial é de 250 °C e cada andar reduz a temperatura em 5 °C até 220 °C. Para o PLA a redução de temperatura também foi de 5 °C em cada, mas partiu de uma temperatura de 230 °C indo até 180 °C, torres e faixas de temperatura essas que foram fornecidas automaticamente pelo software Ultimaker Cura, versão 5.2.1. A Figura 10 apresenta as duas torres impressas em PLA e PETG.

Figura 10 – Torres de temperatura de PLA e PETG.

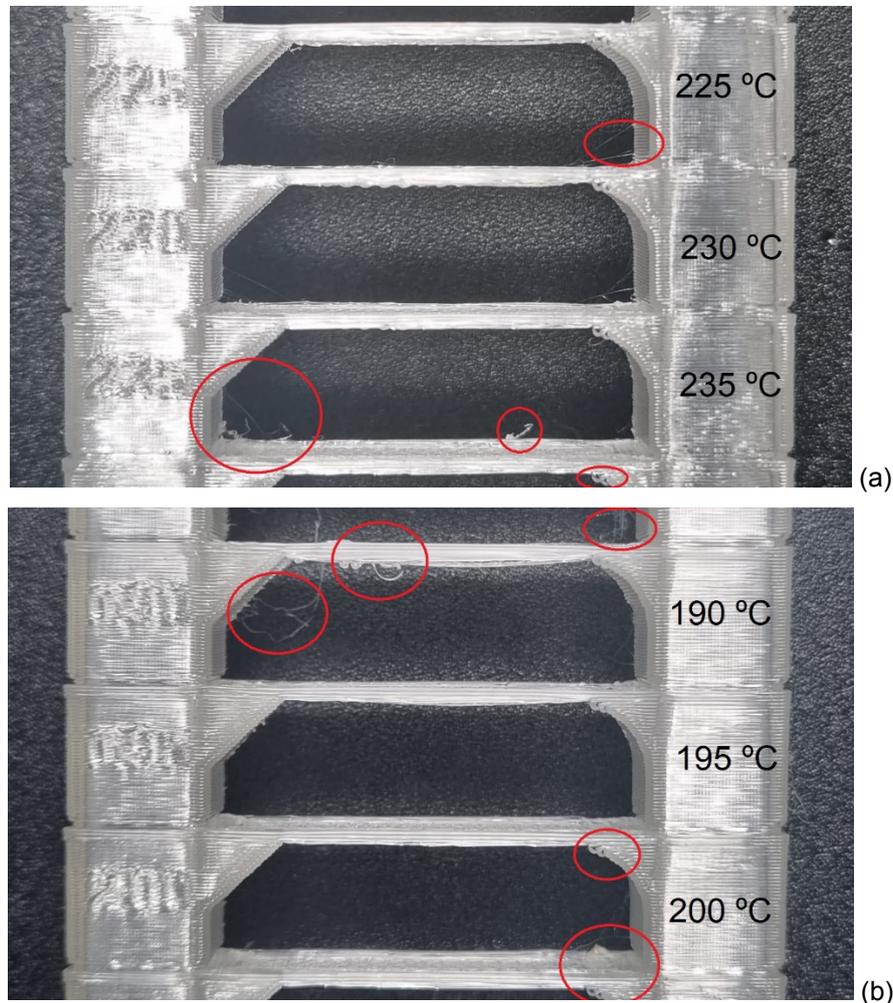


Fonte: O autor.

Torres de temperatura são estruturas criadas para avaliar visualmente e qualitativamente a temperatura ideal de impressão do material a ser utilizado, onde cada “andar” da torre é impresso em uma temperatura diferente. O valor desse parâmetro pode ser diferente até para fabricantes diferentes do mesmo material e para cada um deles haverá um valor de viscosidade ideal para a sua impressão, e a torre de temperatura possibilita uma análise popularmente acessível para se analisar essa propriedade. A Figura 11 mostra uma ampliação

afim de evidenciar a escolha da temperatura de impressão de 195 °C para o PLA e 230 °C para o PETG. Nela, estão destacados alguns defeitos estéticos.

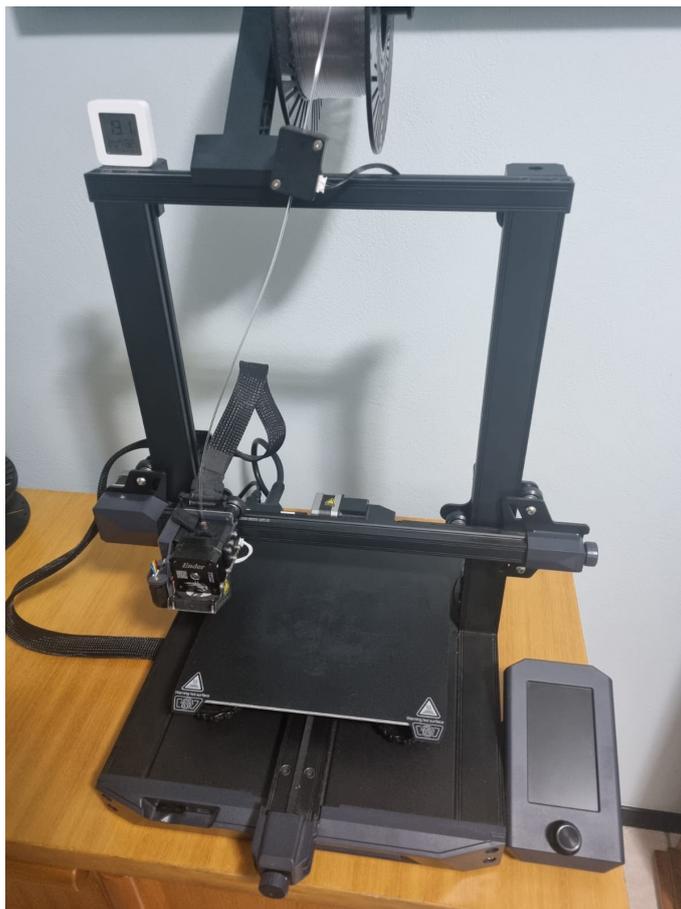
Figura 11 – Visualização aproximada dos andares visualmente melhor impressos das torres de temperatura de PLA (b) e PETG (a).



Fonte: O autor.

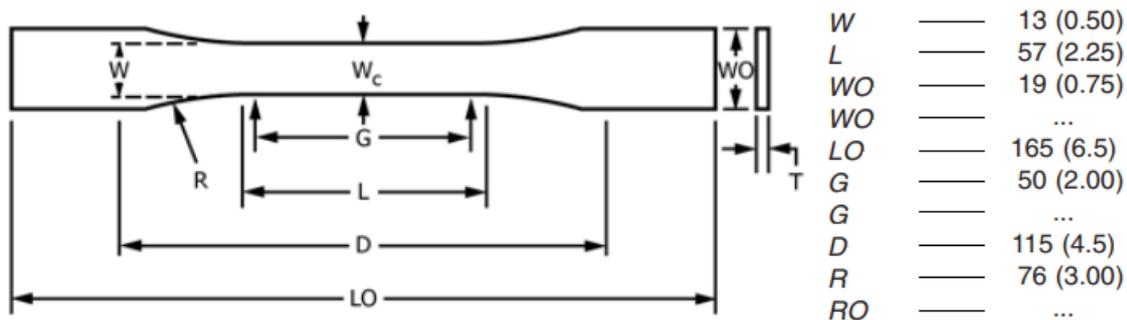
Para realizar a impressão dos corpos de prova, foi utilizada uma impressora 3D da marca Creality, modelo Ender-3 S1, impressora do tipo cartesiana, como mostrado na Figura 12. Os corpos de prova foram construídos utilizando o programa de CAD Inventor da AutoDesk seguindo o padrão do corpo de prova “tipo I” da norma ASTM D638 – 14, conforme apresentado pela Figura 13. A norma indica que esse tipo de corpo de prova deve ter 7 mm de espessura, ou menos. A espessura escolhida foi de 3,4 mm.

Figura 12 – Impressora utilizada para a impressão dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Dimensões (mm (in.)) do corpo de prova escolhido para a realização dos ensaios.



Fonte: ASTM D638 – 14.

3.3 MÉTODOS

Para a impressão dos corpos de prova nas três orientações escolhidas, os seguintes parâmetros foram definidos: temperatura de impressão,

temperatura da mesa, velocidade de impressão, porcentagem de preenchimento, tipo de preenchimento, espessura de camada e quantidade de arrefecimento permitido. (Tabela 7). O software escolhido para realizar o fatiamento foi o Ultimaker Cura, versão 5.2.1. Por padrão, os projetos possuem paredes que percorrem o perímetro do sólido antes de atingir o preenchimento, o que não é conveniente nesse trabalho, uma vez que serão ensaiadas diferentes orientações do material e a orientação do perímetro se torna um parâmetro de influência. Por esse motivo as paredes foram eliminadas, restando apenas o preenchimento. No software, foi possível escolher uma orientação específica para o preenchimento. A Figura 14 apresenta imagens dos corpos de prova fatiados nas 3 orientações escolhidas, respectivamente 0°, 90° e ±45°. Em cinza estão as camadas anteriores e em laranja está a camada sendo impressa no momento da captura da imagem.

Tabela 7 – Parâmetros definidos para a impressão de todas as amostras.

Parâmetro	PLA e PETG
Temperatura de impressão	PLA: 195 °C / PETG: 230 °C
Temperatura da mesa	PLA: 60 °C / PETG: 80 °C
Velocidade de impressão	60 mm/s
Porcentagem de preenchimento	100%
Tipo de preenchimento	Linhas
Espessura de camada	0,2 mm
Arrefecimento	100%

Fonte: O autor.

A temperatura da mesa deve existir para evitar que o polímero solidifique muito rápido e assim garantir uma melhor aderência. Experimentalmente é possível concluir que 80 °C e 60 °C são temperaturas suficientes para a impressão de PETG e PLA, respectivamente. A velocidade de impressão deve ser definida com cuidado pois com velocidades altas propiciam mais defeitos durante a impressão, sendo que 60 mm/s é considerada experimentalmente uma velocidade segura para se utilizar.

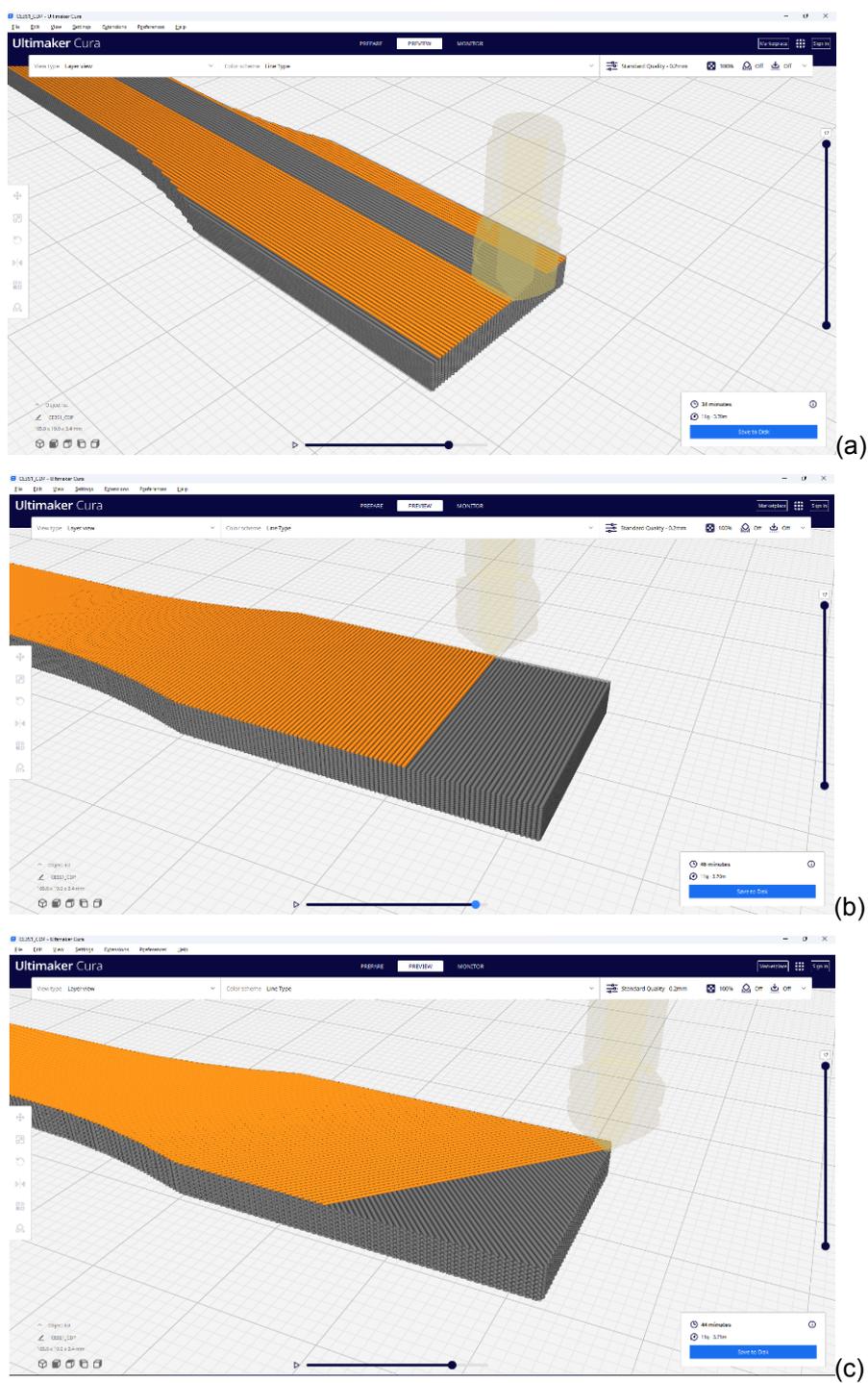
Além da porcentagem de preenchimento e tipo de preenchimento, que foram selecionados de acordo com a proposta de estudo realizada nesse

trabalho, os parâmetros de espessura de camada e arrefecimento também foram selecionados com base em experimentação. A espessura de 0,2 mm é muito utilizada por permitir impressões mais rápidas sem abrir mão da qualidade superficial da peça impressa, enquanto a porcentagem de arrefecimento de 100% é crucial para o PLA, e apenas uma opção para o PETG, podendo ser valores menores para esse último.

Foram impressas 5 amostras para cada condição. Como são dois materiais diferentes e três orientações diferentes, foram impressas 30 amostras ao todo. Como a impressão de vários corpos de prova simultaneamente implicaria em interrupções no momento do acréscimo de camadas, optou-se por imprimir um corpo de prova de cada vez.

Para obter a área transversal dos corpos de prova, foi utilizado um paquímetro analógico, sendo realizadas três medidas de largura e três medidas de espessura. As Tabelas 8 e 9 apresentam as medidas realizadas em todos os corpos de prova, em milímetros. A letra “E” é referente à espessura medida e “L” é referente à largura. A Figura 15 apresenta uma foto de todos os corpos de prova.

Figura 14 – Representação das três orientações para os corpos de prova no software Ultimaker Cura: (a) 0°, (b) $\pm 45^\circ$ e (c) 90°.



Fonte: O autor.

Tabela 8 – Medidas dos CDPs de PLA.

Orientação	Nº	E1	E2	E3	L1	L2	L3
0°	1	3,45	3,50	3,50	13,00	13,00	13,00
0°	2	3,50	3,50	3,50	13,00	12,90	12,90
0°	3	3,50	3,50	3,50	12,90	12,95	12,95
0°	4	3,50	3,50	3,50	12,95	12,90	12,90
0°	5	3,55	3,55	3,50	12,95	12,95	13,00
± 45°	1	3,60	3,55	3,55	14,00	13,95	13,95
± 45°	2	3,60	3,60	3,60	13,90	13,95	14,00
± 45°	3	3,60	3,60	3,55	14,00	13,95	13,95
± 45°	4	3,60	3,60	3,60	14,00	13,95	14,00
± 45°	5	3,55	3,55	3,55	13,95	13,95	13,95
90°	1	3,70	3,65	3,65	13,80	13,80	13,85
90°	2	3,60	3,55	3,55	13,75	13,80	13,80
90°	3	3,60	3,60	3,55	13,75	13,75	13,80
90°	4	3,60	3,60	3,60	13,80	13,75	13,75
90°	5	3,60	3,55	3,55	13,75	13,75	13,80

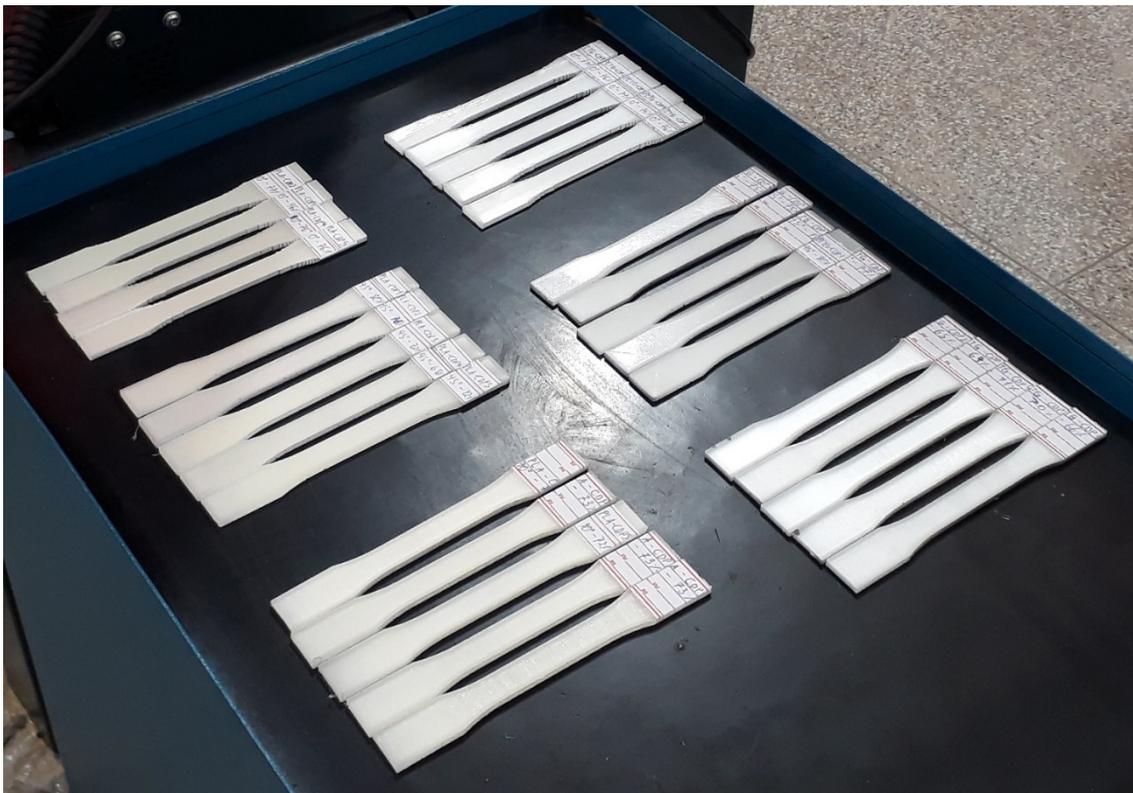
Fonte: O autor.

Tabela 9 – Medidas dos CDPs de PETG.

Orientação	Nº	E1	E2	E3	L1	L2	L3
0°	1	3,50	3,55	3,55	13,00	13,00	13,00
0°	2	3,50	3,55	3,50	13,00	13,00	13,10
0°	3	3,50	3,55	3,50	13,00	13,00	13,00
0°	4	3,50	3,50	3,50	13,05	13,00	13,00
0°	5	3,45	3,50	3,50	13,10	13,05	13,00
± 45°	1	3,45	3,45	3,50	14,10	14,00	14,10
± 45°	2	3,55	3,55	3,55	14,00	14,00	14,05
± 45°	3	3,55	3,55	3,50	14,00	14,00	14,00
± 45°	4	3,55	3,55	3,50	14,00	14,00	14,00
± 45°	5	3,50	3,50	3,45	14,10	14,05	14,05
90°	1	3,65	3,60	3,55	13,80	13,80	13,80
90°	2	3,60	3,60	3,55	13,80	13,80	13,80
90°	3	3,60	3,55	3,55	13,80	13,80	13,80
90°	4	3,60	3,60	3,50	13,80	13,80	13,85
90°	5	3,55	3,60	3,60	13,85	13,80	13,80

Fonte: O autor.

Figura 15 – Corpos de prova agrupados e prontos para os ensaios.



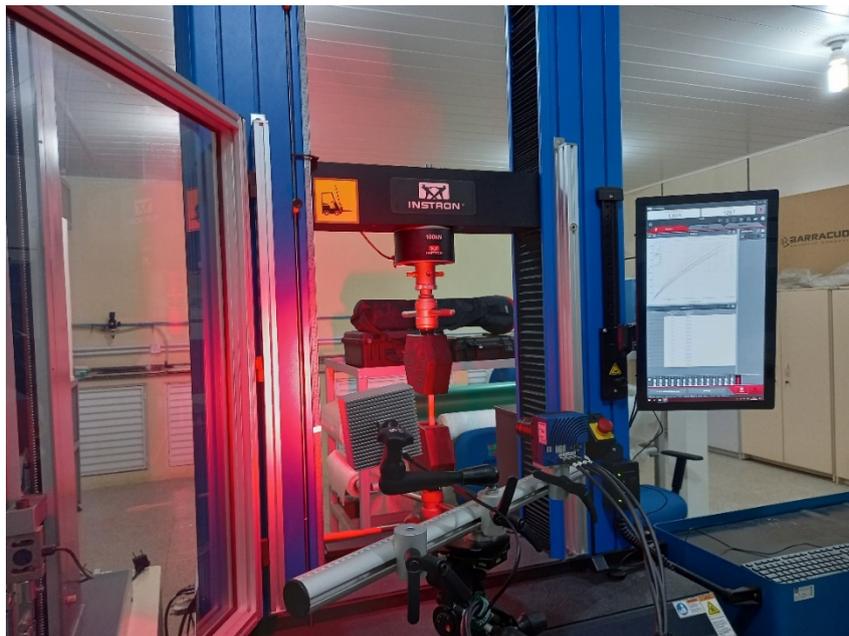
Fonte: O autor.

Após finalizada a impressão de todos os corpos de prova, estes foram pintados de branco e preto, sendo a tinta preta aspergida na forma de névoa, apenas para formar uma nuvem de pontos sobre o fundo branco, para uma adequada identificação de padrão e captura de imagens do sistema de DIC utilizado para a obtenção das deformações durante os ensaios. Foi utilizado o sistema DIC Dantec Q400 da empresa Dantec para a obtenção das imagens durante os ensaios. O sistema faz a correlação digital das imagens por meio de fotografia tiradas com uma frequência pré-definida e que mapeia o posicionamento dos diferentes pontos pretos sobre a amostra em cada tempo. Posteriormente, os dados são tratados via software, permitindo a obtenção do campo de deformações completo sobre regiões escolhidas sobre a amostra (QUANJIN *et al.*, 2020). O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de tração foi a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos INSTRON EMIC 23-100, apresentada na Figura 16. Todos os ensaios foram realizados a uma

velocidade de 2 mm/min, a qual está dentro da faixa de velocidades indicada pela norma ASTM D638 - 14.

Após realizar os ensaios de tração, a próxima etapa consistiu em analisar a fratura utilizando um estereoscópio, a fim de observar e caracterizar melhor a falha de cada grupo de amostras. O equipamento utilizado foi da marca Leica, modelo MZ95. A Figura 17 apresenta o referido equipamento.

Figura 16 – Equipamento de ensaio de tração e compressão INSTRON EMIC 23-100.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Estereoscópio utilizado para a captura de imagens das falhas nos CDPs.

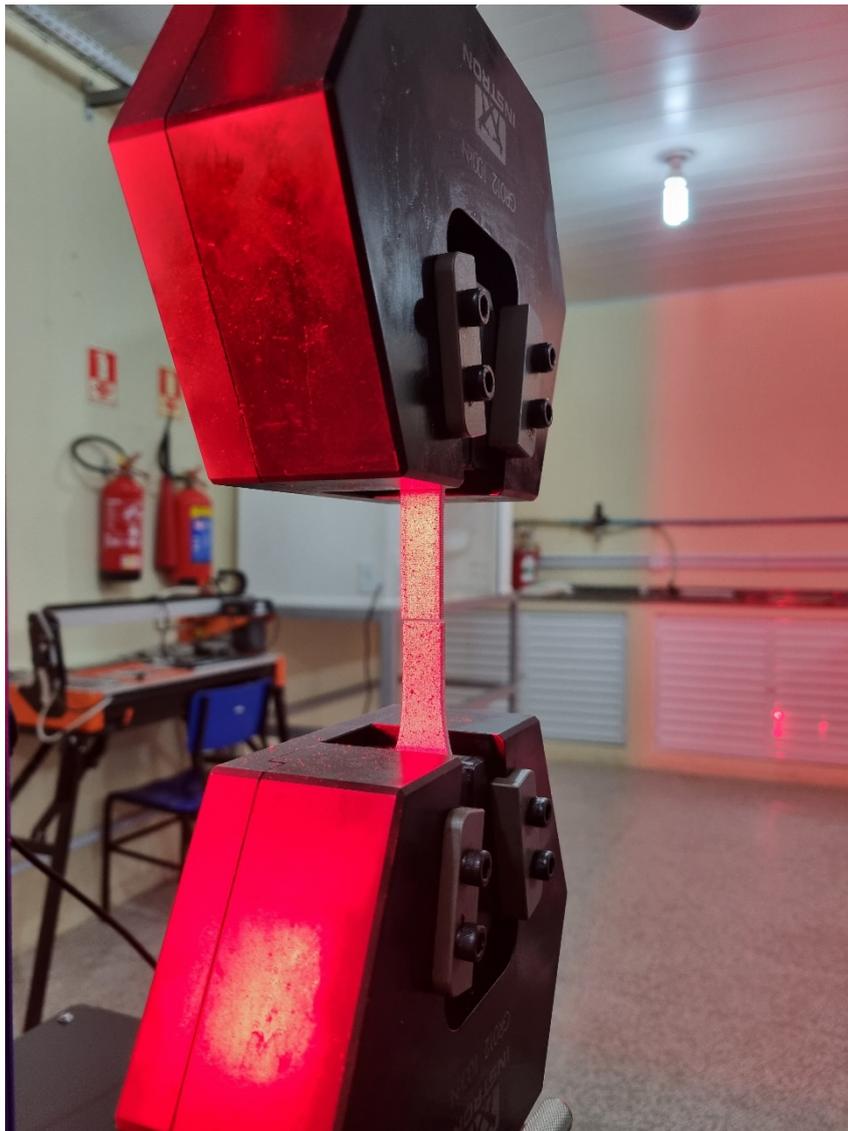


Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as amostras foram ensaiadas e a Figura 18 apresenta um corpo de prova com a orientação de 90°. A luz vermelha é utilizada pelo sistema DIC para aumentar o contraste dos pontos sobre o fundo pintado na amostra.

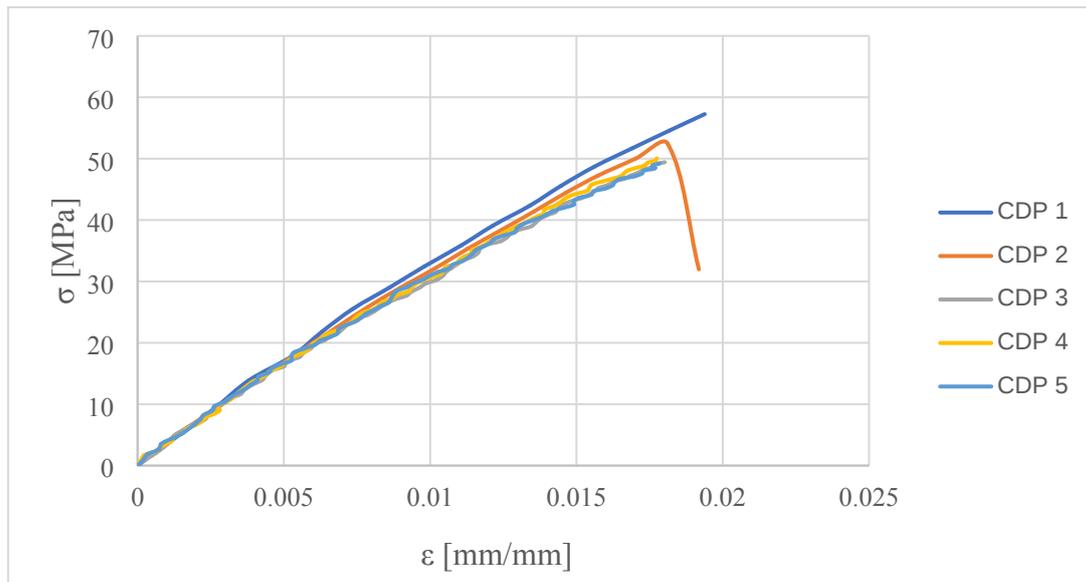
Figura 18 – Amostra ensaiada.



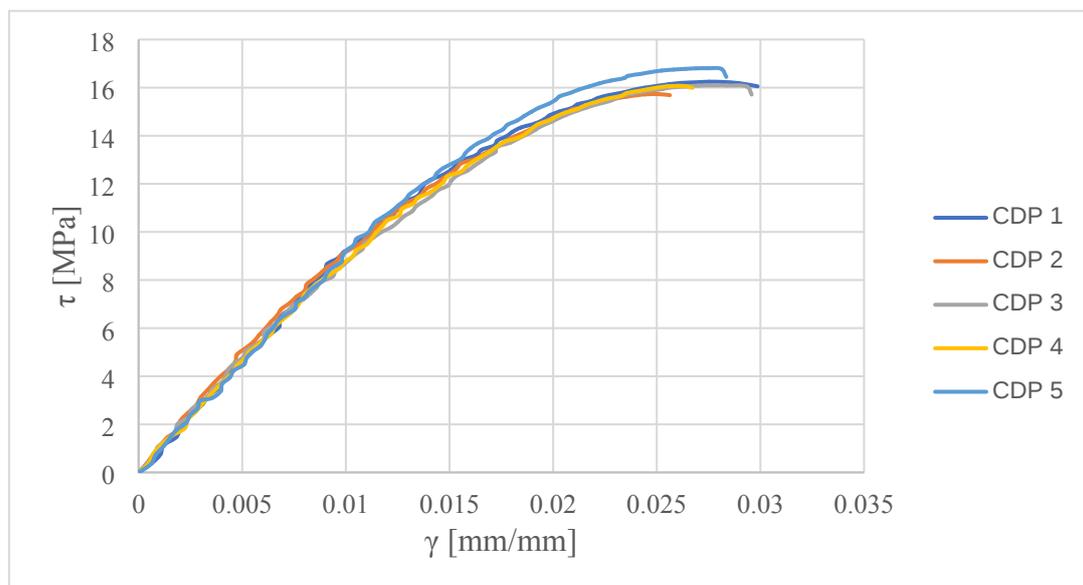
Fonte: O autor.

A obtenção dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal, bem como da tensão de ruptura foi feita por meio da análise das curvas tensão-deformação das amostras. As Figuras 19 a 24 apresentam as curvas tensão versus deformação para as seis condições ensaiadas.

Figura 19 – Curvas tensão-deformação da condição PLA 0°.

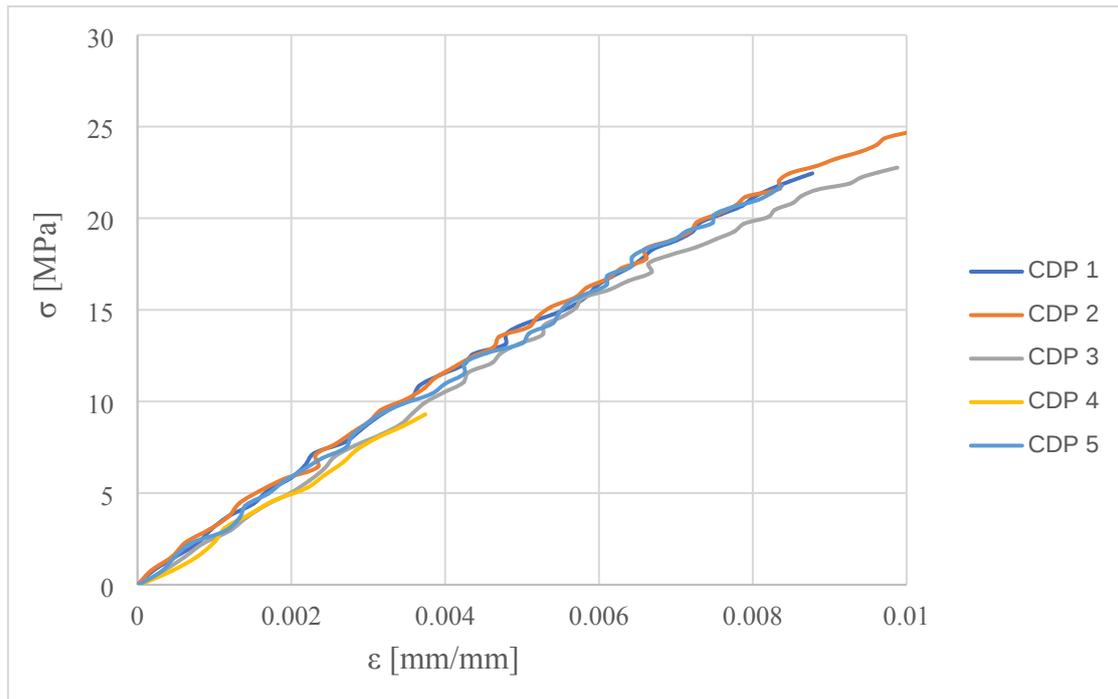


Fonte: O autor.

Figura 20 – Curvas tensão-deformação de cisalhamento da condição PLA $\pm 45^\circ$.

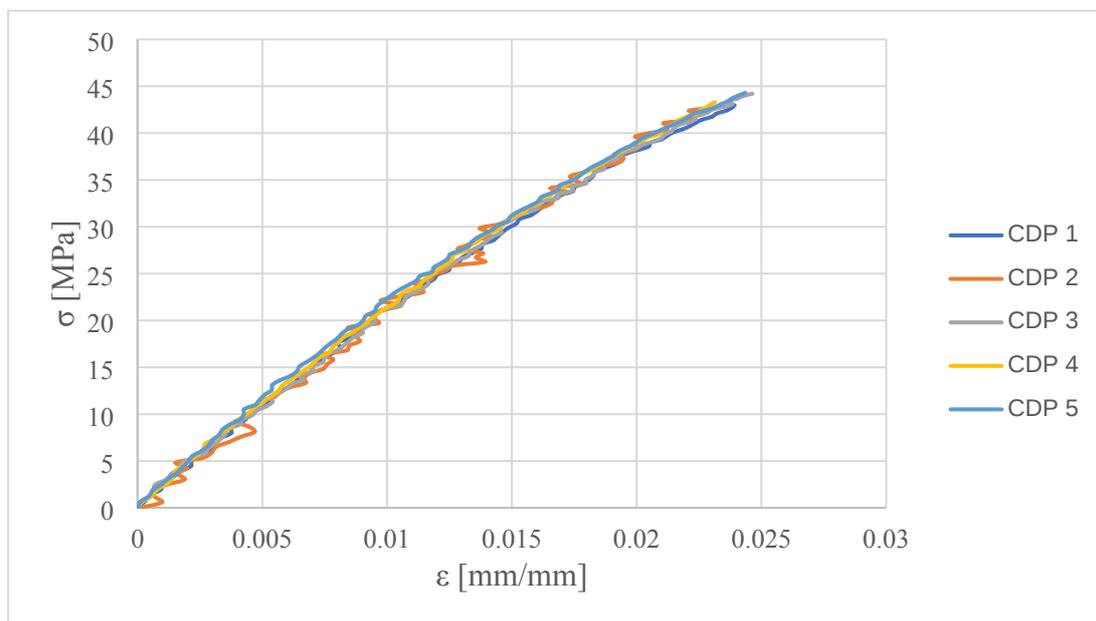
Fonte: O autor.

Figura 21 – Curvas tensão-deformação da condição PLA 90°.



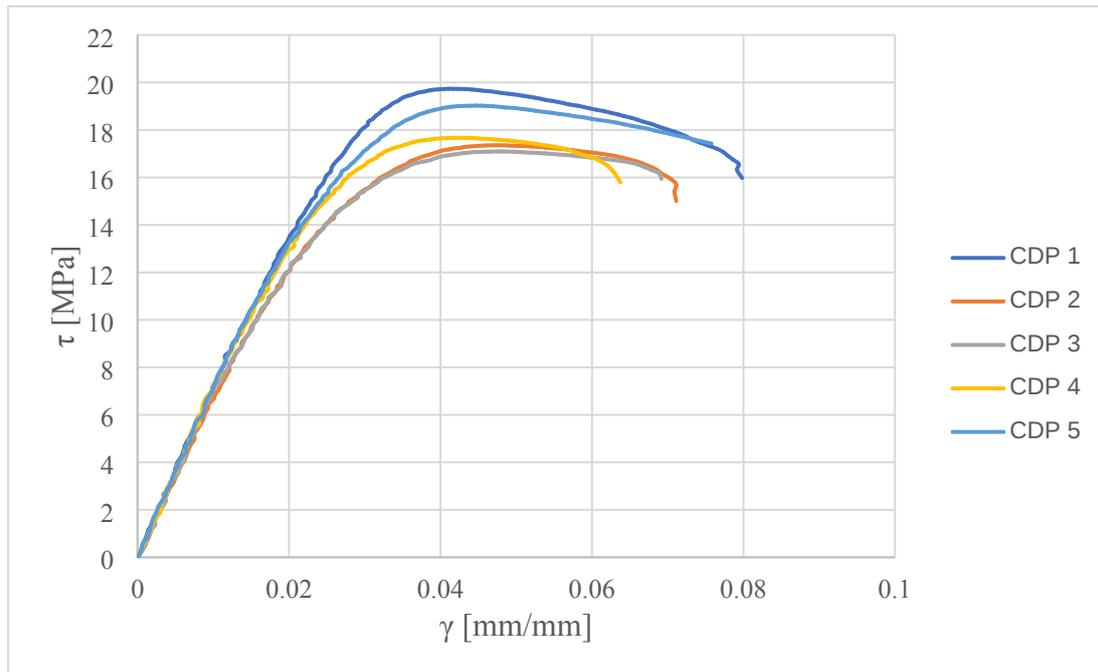
Fonte: O autor.

Figura 22 – Curvas tensão-deformação da condição PETG 0°.



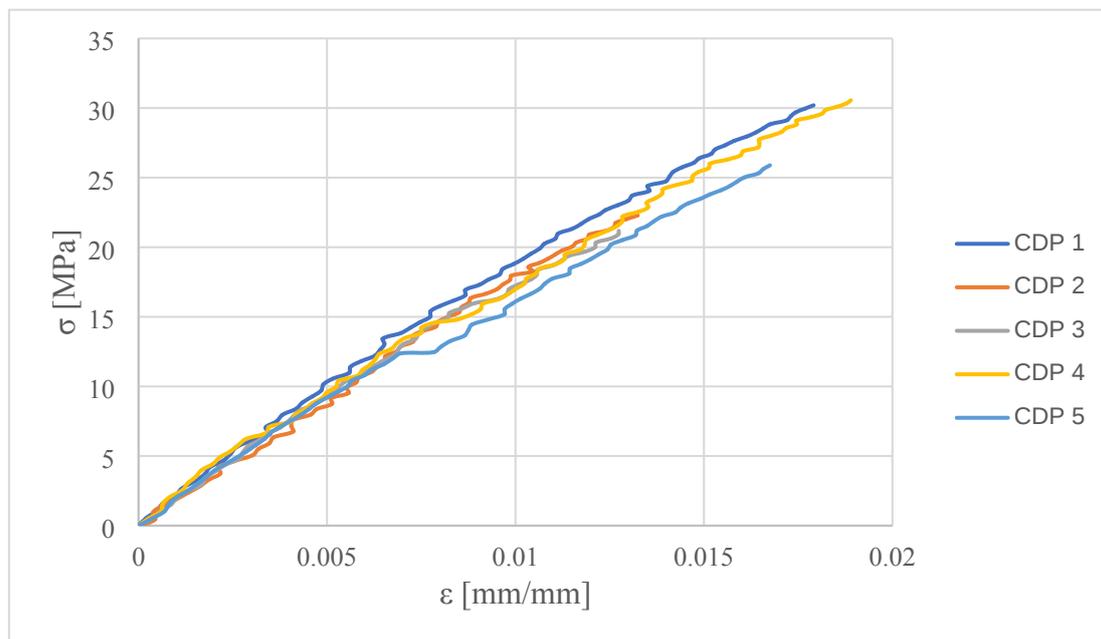
Fonte: O autor.

Figura 23 – Curvas tensão-deformação de cisalhamento da condição PETG $\pm 45^\circ$.



Fonte: O autor.

Figura 24 – Curvas tensão-deformação da condição PETG 90° .



Fonte: O autor.

Nota-se que nas curvas referentes às orientações de 90° e 0° , para ambos os materiais, há uma leve curvatura no comportamento até a falha, se aproximando de uma reta, com uma ruptura brusca característica de material frágil, ao passo que na orientação de $\pm 45^\circ$, a região anterior à falha já denota

maior curvatura e evidencia um escoamento do materiais, apresentando também um comportamento de material dúctil. Acredita-se que tanto para o caso de descolamento das lâminas (orientação de 90°) quanto para o caso de ruptura transversal dos filamentos (orientação de 0°), a ruptura que ocorre se dá de forma a inviabilizar o escoamento do material, caracterizando o comportamento frágil. Já na orientação de $\pm 45^\circ$, essa construção contribui com a ação da tensão de cisalhamento, permitindo que o corpo de prova escoe e falhe nessa orientação.

A Tabela 10 apresenta os dados compilados para a tensão máxima e deformação máxima de cada uma das seis condições de amostragem, juntamente com os respectivos desvios padrões. Mesmo não sendo o foco desse trabalho, estão apresentados também a tensão máxima principal e deformação na direção x da condição de $\pm 45^\circ$.

Tabela 10 – Tensão e deformação máxima de cada condição ensaiada.

Condição	Média [MPa]		Desvio padrão [MPa]	Média [mm/mm]		Desvio padrão [mm/mm]
PLA 0°	σ_{\max}	52,74	4,45	ϵ_{\max}	0,0185	0,0007
PLA $\pm 45^\circ$	σ_{\max}	32,38	0,78	ϵ_{\max}	0,0201	0,001354
	τ_{\max}	16,19	0,39	γ_{\max}	0,0280	0,001825
PLA 90°	σ_{\max}	23,11	1,16	ϵ_{\max}	0,0082	0,002634
PETG 0°	σ_{\max}	43,56	0,74	ϵ_{\max}	0,0238	0,000759
PETG $\pm 45^\circ$	σ_{\max}	36,36	2,29	ϵ_{\max}	0,0466	0,00403
	τ_{\max}	18,18	1,15	γ_{\max}	0,0719	0,006173
PETG 90°	σ_{\max}	26,27	4,34	ϵ_{\max}	0,0159	0,002774

Fonte: O autor.

Observa-se que a orientação de 0° apresentou os maiores valores para a resistência à tração em ambos os materiais, o que confirma a hipótese de que o material apresentará maior resistência se a carga for aplicada no sentido de tracionar as suas “fibras”. O explicado é diferente da orientação de $\pm 45^\circ$ que escoar e falhar por cisalhamento, e diferente da orientação de 90°, na qual as fibras não rompem e apenas se descolam lateralmente. Nota-se também que, avaliando apenas as tensões máximas principais, a orientação de 90° foi a que menos resistiu, fortalecendo o argumento de que essa orientação proporciona

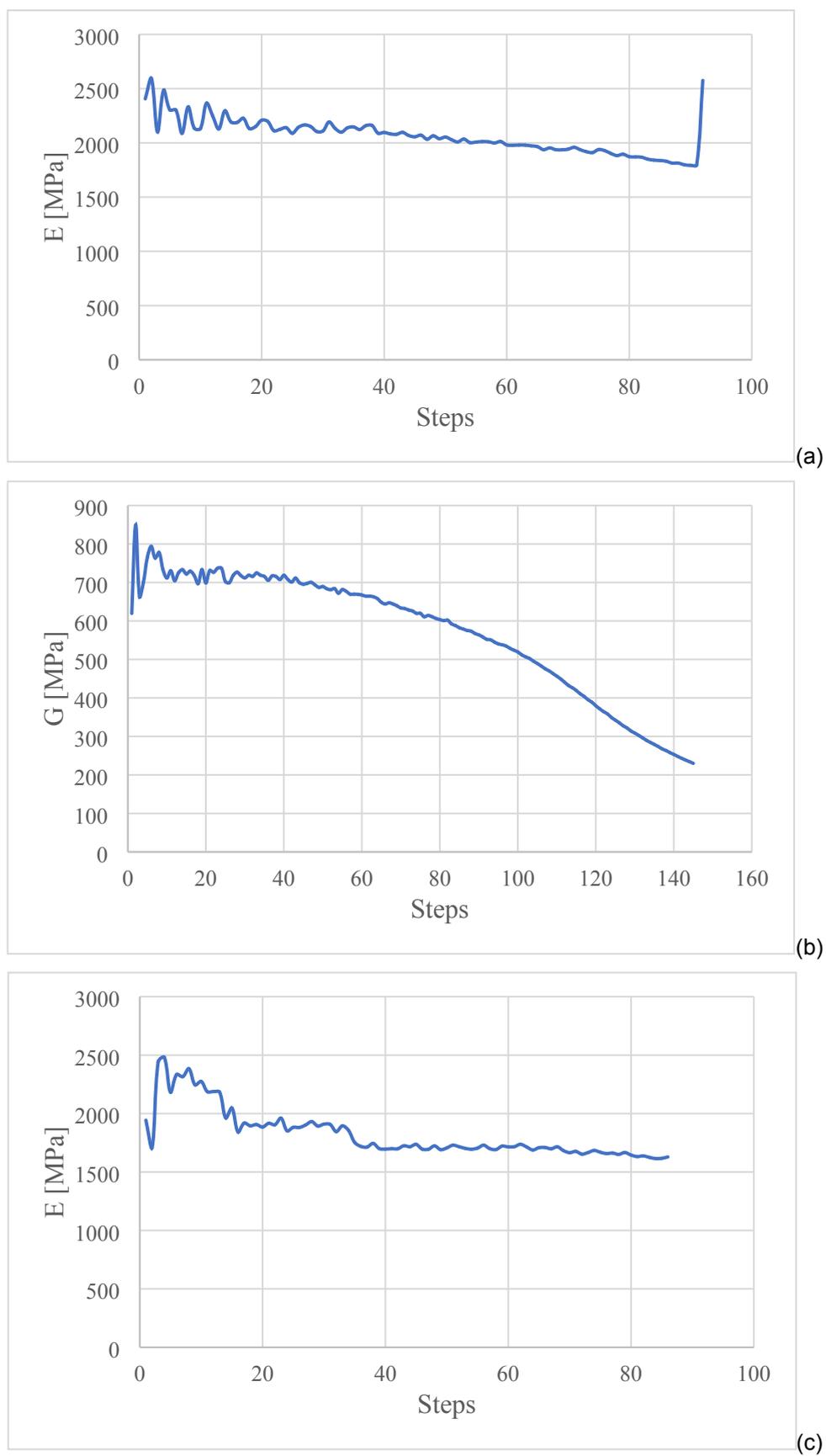
uma falha por descolamento, a qual é menos resistente por não necessitar de ruptura dos filamentos.

Quanto às deformações, vê-se que os menores valores foram respectivos à orientação de 90° , novamente explicado pela falha por descolamento, onde o material não resiste tanta extensão quanto as outras orientações pois a interação que há entre as lâminas é menor do que há ao longo da própria continuidade do filamento.

Uma vez que nenhuma das curvas de tensão deformação obtidas apresentou um comportamento plenamente linear, o método da secante para extração dos módulos de elasticidade foi empregado. Devido as incertezas da região inicial das curvas e ao fato de que à medida que os pontos na curva se aproximam da falha ou da tensão de escoamento é observado uma redução no módulo de elasticidade, concluiu-se que o mais adequado é realizar a coleta do módulo de elasticidade prioritariamente evitando as regiões citadas, permanecendo distante da falha e/ou tensão de escoamento do material.

A Figura 25 apresenta três gráficos do material PETG, respectivamente referentes as orientações de 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° . Os gráficos são dos módulos de elasticidade retirados ao longo da curva tensão-deformação através do método da secante. Neles, é possível identificar um ruído inicial, assim como a tendência de decaimento à medida que o ensaio avança no tempo.

Figura 25 – Gráficos dos módulos de elasticidade do PETG: (a) PETG - CDP 1 (0°), (b) PETG - CDP 5 ($\pm 45^\circ$) e (c) PETG - CDP 4 (90°).



Fonte: O autor.

A Tabela 11 apresenta os resultados da média do módulo de Elasticidade juntamente com seu desvio padrão, para cada uma das seis condições analisadas.

Tabela 11 – Módulo de elasticidade de cada condição ensaiada.

Condição	Média [GPa]		Desvio padrão [GPa]
PLA 0°	E_{11}	3,35	0,063
PLA ±45°	G_{12}	0,94	0,032
	E_{12}	2,45	0,187
PLA 90°	E_{22}	2,77	0,18
PETG 0°	E_{11}	2,20	0,094
PETG ±45°	G_{12}	0,70	0,024
	E_{12}	1,92	0,074
PETG 90°	E_{22}	1,89	0,081

Fonte: O autor.

Quanto aos resultados para a tensão última obtida para cada condição, foi possível observar uma coerência com outros estudos, sendo a orientação de 0° a resultar nos maiores valores. Da mesma forma, observa-se que a orientação de 90° foi a que apresentou os menores valores para essa propriedade, o que também corrobora com algumas referências da literatura, exatamente como foi o caso de Ranganathan *et al.* (2020). Igualmente ao que foi apresentado para a análise da tensão máxima, vê-se que a orientação de 0°, por sofrer a solitação mecânica de forma a tracionar os filamentos do material, alcança valores maiores para o módulo de elasticidade. Estando sujeita ao descolamento de camadas, vê-se também que a orientação de 90° ficou abaixo da orientação de 0° para os dois materiais.

As Tabelas 12 e 13 apresentam os dados obtidos de tensão máxima neste trabalho juntamente com a comparação com dados das referências, para o PLA e o PETG, respectivamente.

Tabela 12 – Tensão máxima para PLA.

Orientação	Presente trabalho [MPa]	Zhang et al. [16] [MPa]	Santana et al. [4] [MPa]	Sepahi et al. [19] [MPa]
0°	52,74	49,41	49,34	59,98
±45°	16,19 (τ_{\max})	-	43,5	60,81
90°	23,11	30,67	-	51,57

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Tensão máxima para PETG.

Orientação	Presente trabalho [MPa]	DOLZYK e JUNG [18] – CDP “A” [MPa]	SANTANA et al. [4] [MPa]	SEPAHI et al. [19] [MPa]
0°	43,56	45,71	41,1	49,37
±45°	18,18 (τ_{\max})	41,7	32,15	40,95
90°	26,27	44,12	-	35,86

Fonte: O autor.

As Tabelas 12 e 13 mostram que para o PLA, a resistência à tração obtida nesse trabalho na orientação de 0° está respectivamente 6,7% e 6,9% acima dos resultados obtidos por Zhang *et al.* (2023) e Santana *et al.* (2018), enquanto que para a orientação de ±45°, o resultado desse presente trabalho culminou em um valor 62,8% abaixo do trabalho de Santana *et al.* (2018) e 73,4% abaixo da referência de Sepahi *et al.* (2021). Para o PETG, a orientação de ±45° também se manteve abaixo da literatura revisada, ficando 43,4% abaixo do resultado de Santana *et al.* (2018) e 56,4% abaixo da resistência à tração obtida no trabalho de Dolzyk e Jung (2019). Na orientação de 90° ficou 40,5% abaixo do obtido por Dolzyk e Jung (2019) e 26,7% abaixo do obtido por Sepahi *et al.* (2021).

Tabela 14 – Módulo de elasticidade para PLA.

Orientação	Presente trabalho [GPa]	LETCHER e WAYTASHEK [17] [GPa]	SANTANA et al. [4] [GPa]	SEPAHI et al. [19] [GPa]
0°	3,35	3,33	3,59	2,46
±45°	0,94 (G_{12})	-	3,3	2,51
90°	2,77	3,49	-	2,51

Fonte: O autor.

Tabela 15 – Módulo de elasticidade para PETG.

Orientação	Presente trabalho [GPa]	DOLZYK e JUNG [18] – CDP “A” [GPa]	SANTANA et al. [4] [GPa]	SEPAHI et al. [19] [GPa]
0°	2,20	1,62	1,92	1,47
±45°	0,70 (G_{12})	1,48	1,55	1,35
90°	1,89	1,56	-	1,39

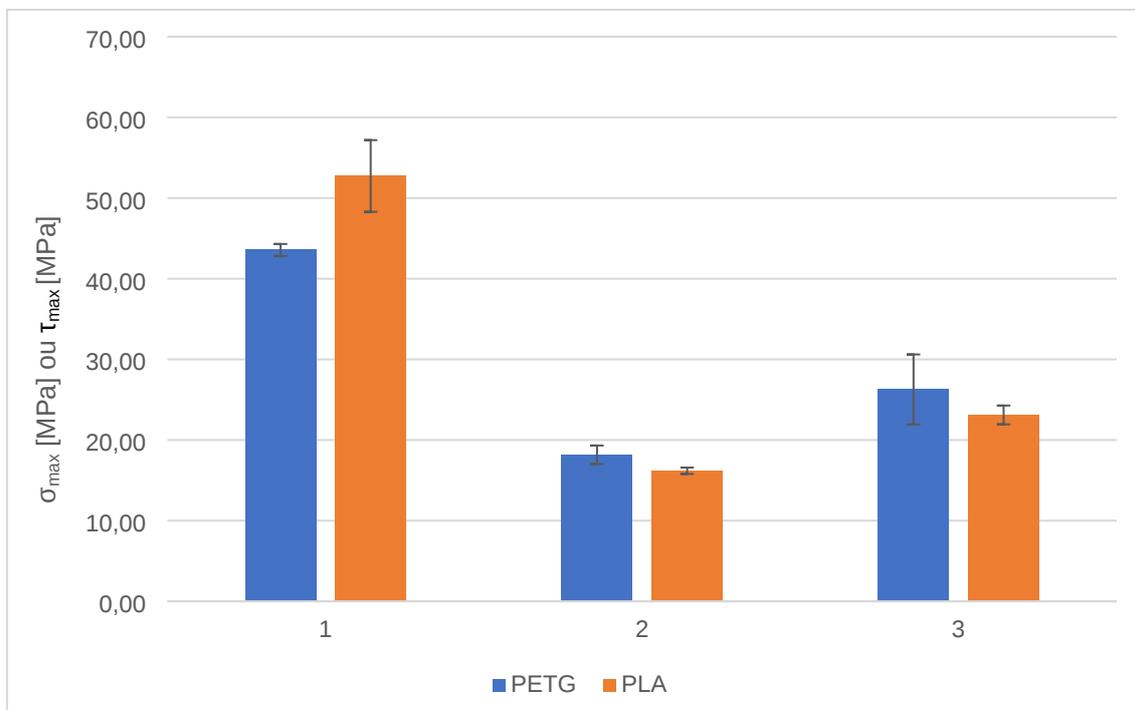
Fonte: O autor.

Pelas Tabelas 14 e 15 apresentadas, é possível observar que os valores de módulo de elasticidade nas orientações 0° e 90°, para ambos os materiais, resultaram em valores com diferença relativa abaixo de 33,2%, quando comparados com a literatura, valor esse respectivo à orientação de 0° no PETG, enquanto que a menor diferença encontrada nesse grupo de condições foi para a orientação de 90° no PLA, com uma diferença máxima de 26,0%. Porém, é possível notar que para a orientação de ±45° o resultado desse trabalho ficou em média 67,0% abaixo para o PLA e 51,9% abaixo para o PETG, denotando uma inconsistência. Contudo, vale ressaltar que a análise do módulo de elasticidade para os corpos de prova com a orientação de ±45° realizada nesse trabalho foi seguindo a norma ASTM D3518M – 18, a qual implica inerentemente em resultados diferentes caso os dados fossem abordados utilizando somente a norma ASTM D638 – 14, norma utilizada para os corpos de prova nas orientações de 0° e 90°. Como exemplo da causa da divergência, pode-se citar o uso da equação (3) para o cálculo da tensão de cisalhamento. Nela, vê-se que a tensão de cisalhamento é, por definição, a tensão de tração aquirada do ensaio de tração dividida por dois. Logo, é esperado que os resultados processados para as orientações de ±45° permeiem um patamar inferior de tensão quando comparados com os dados de tensão de tração. Dada essa diferença, pode-se observar também que a abordagem utilizada pelas referências da comparação não realizou a análise da tensão de cisalhamento dos corpos de prova orientados a ±45°.

Frente aos resultados expostos, as Figuras 26 e 27 apresentam graficamente as variações da Tensão Máxima e do Módulo de Elasticidade para

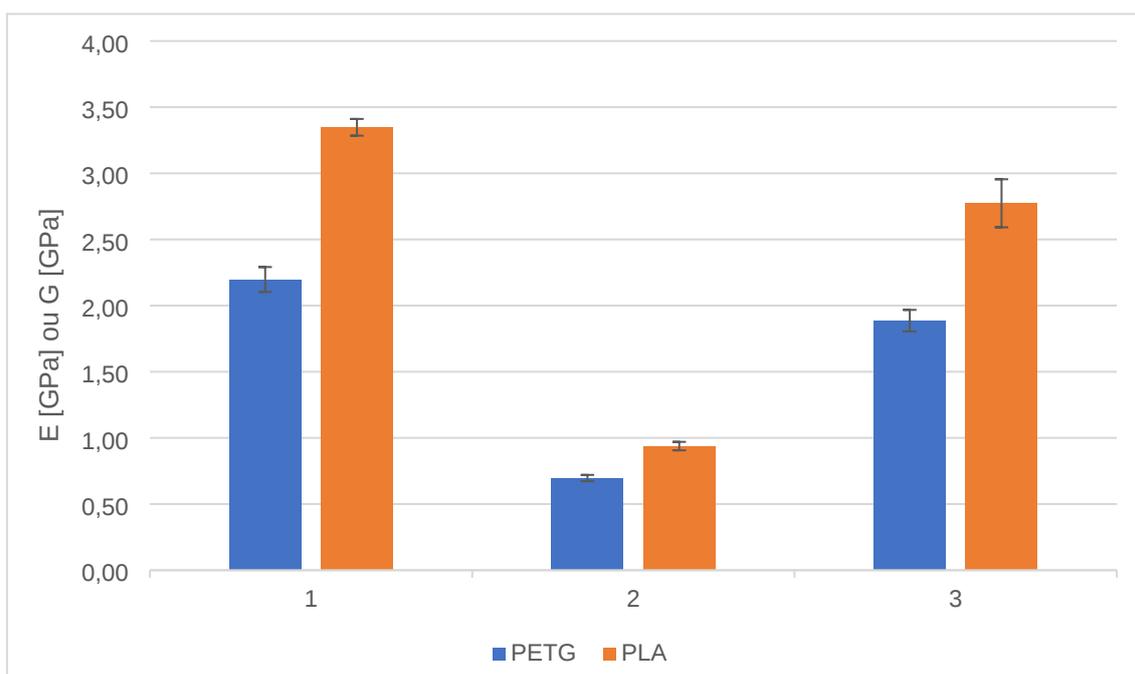
as diferentes orientações de fabricação, respectivamente. Em ambos os gráficos, os grupos de colunas 1, 2 e 3 são referentes às orientações de 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° , respectivamente.

Figura 26 – Gráfico dos resultados de tensão máxima para o PLA e PETG.



Fonte: O autor.

Figura 27 – Gráfico dos resultados de módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento para o PLA e PETG.



Fonte: O autor.

Quanto aos modos de falhas observadas nos ensaios, a Figura 28 apresenta uma captura das falhas mais características de cada condição. Nela, é possível reparar na semelhança com as falhas expostas no trabalho de Dolzyk e Jung (2019), para as mesmas condições.

Na Figura 28 é identificável a falha transversalmente plana nos corpos de prova de orientação de 90° , denotando a falha por descolamento de camadas. Na orientação de 0° também é encontrada uma tendência de falha transversal e plana, porém, sabendo da orientação do CDP, onde os filamentos estão rompendo transversalmente à orientação deles, é possível concluir que se trata de uma fratura frágil. Na orientação de $\pm 45^\circ$ é possível notar os planos onde houve a falha do CDP, que são justamente os planos formados pela orientação de $\pm 45^\circ$, dando solidez para o argumento de falha por cisalhamento.

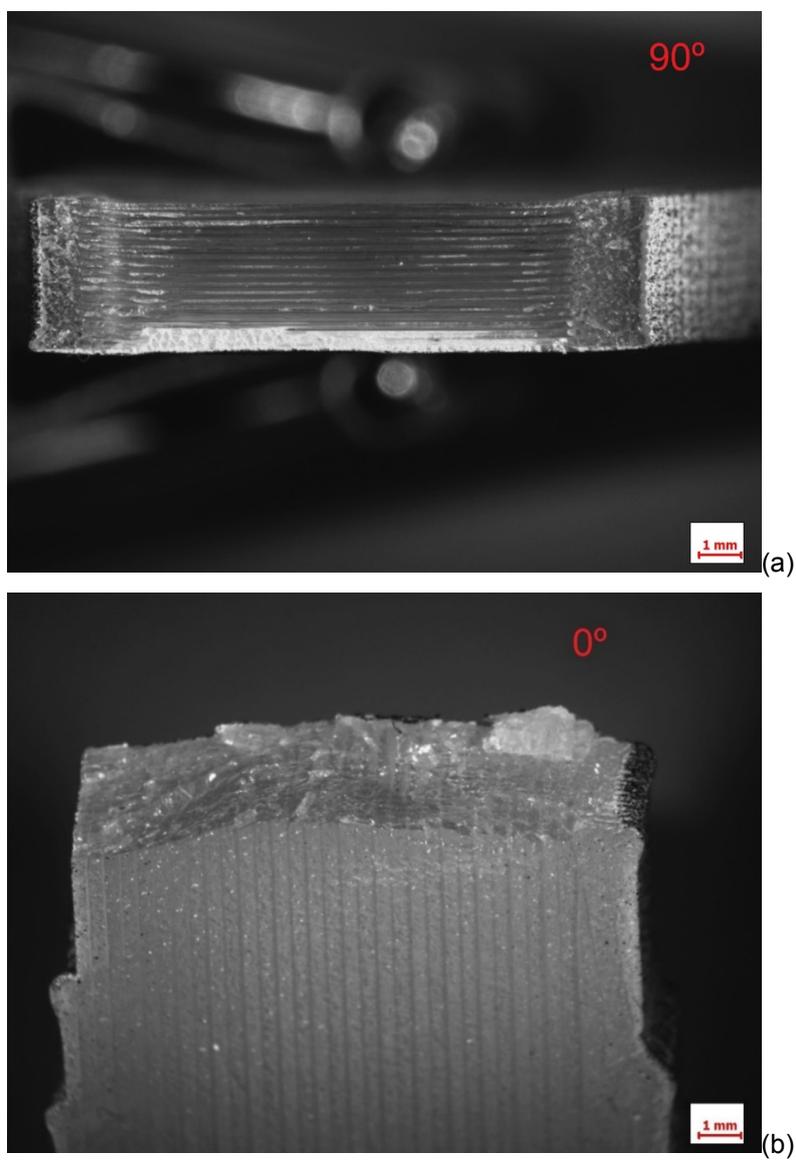
Figura 28 – Falhas características de cada condição para o PLA e PETG.

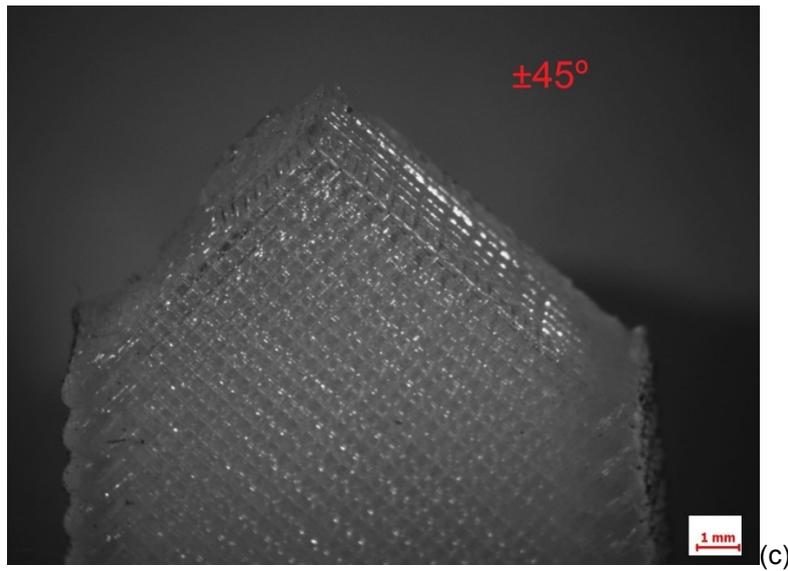


Fonte: O autor.

Para analisar as falhas com mais critérios, a Figura 29 apresenta capturas com aumento da região da falha dos corpos de prova em PETG nas três orientações ensaiadas.

Figura 29 – Falhas com aumento óptico de amostras em PETG: (a) 90° , (b) 0° e (c) $\pm 45^\circ$.

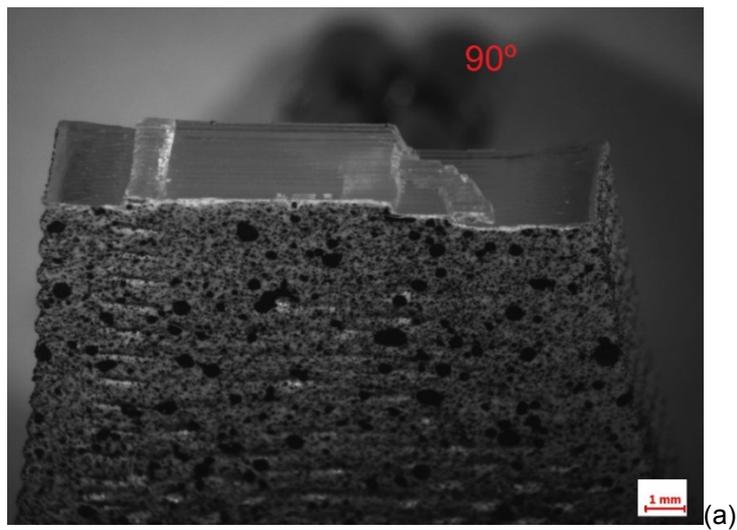


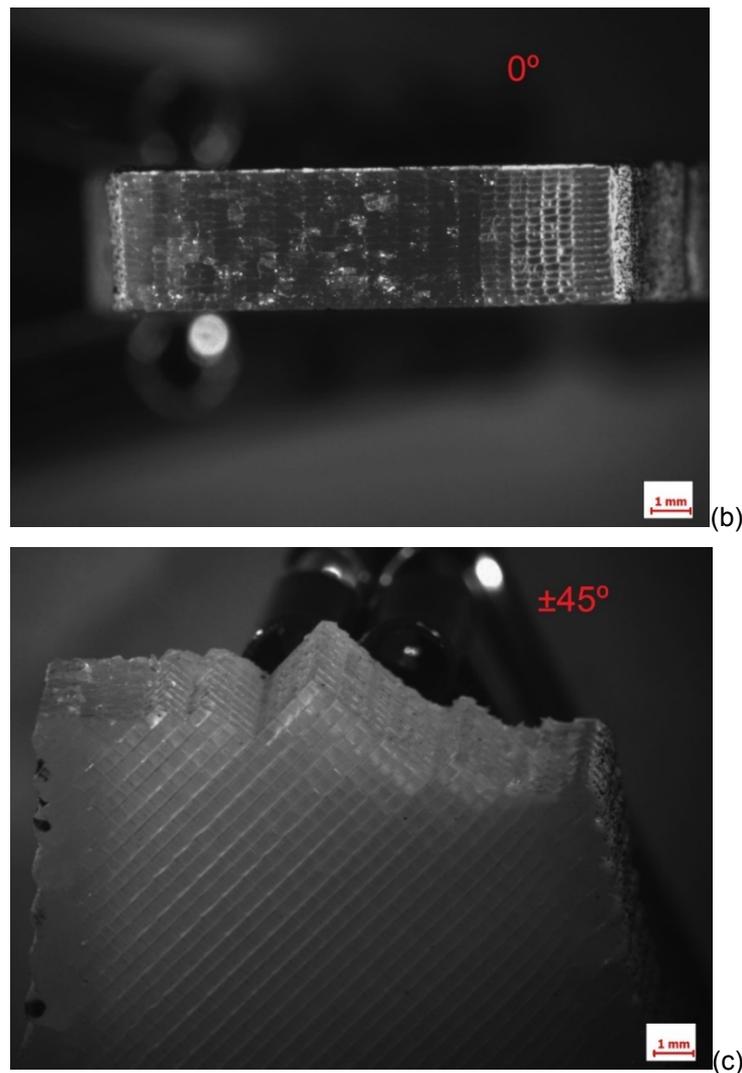


Fonte: O autor.

A Figura 30 apresenta as falhas dos corpos de prova em PLA.

Figura 30 – Falhas com aumento óptico de amostras em PLA: (a) 90° , (b) 0° e (c) $\pm 45^\circ$.





Fonte: O autor.

É possível observar, tanto nas amostras de PLA quanto de PETG, a falha característica da orientação de $\pm 45^\circ$, onde os planos formados estão nessa orientação, caracterizando uma falha por cisalhamento. Com o auxílio dessas capturas é possível compreender o comportamento de material dúctil nas curvas do ensaio de tração dessa orientação, a qual mostrou um escoamento e também foi a orientação com os maiores valores de deformação.

Quanto às amostras nas orientações de 0° e 90° , é possível notar que as falhas aparentam aspectos de falhas frágeis em ambos os materiais. Contudo, é fácil verificar que na orientação de 0° há a falha pela ruptura das “fibras” da impressão, enquanto que na orientação de 90° a falha se dá principalmente pelo descolamento dessas “fibras”. Isso é observável nas capturas de 0° , onde vê-se os filamentos rompidos transversalmente, e nas capturas de 90° , especialmente

no PLA, em que é exibido regiões em diferentes patamares de nítido descolamento lateral entre filamentos. Contudo, essas duas orientações se assemelham quando analisadas as suas curvas obtidas através dos ensaios de tração, onde ambas apresentam menos curvatura na região antecedente à fratura do que a orientação de $\pm 45^\circ$ e também falham de forma súbita, sem apresentar escoamento.

Entretanto, é importante salientar que, como explicado, o comportamento frágil apresentado nas orientações de 0° e 90° são de origem diferentes, visto que o modo de falha dessas orientações é integralmente diferente, como pode ser conferido nas Figuras 29 e 30.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho foi realizado com o intuito de analisar o efeito da orientação de construção em amostras impressas utilizando a tecnologia de impressão 3D, comparativamente entre dois materiais: PLA e PETG. Nele, foram definidos parâmetros e métodos específicos para serem realizadas as impressões dos corpos de prova, os quais foram ensaiados segundo norma técnica e proporcionaram resultados validos e úteis que puderam ser comparados com a literatura.

A orientação nos materiais PLA e PETG que apresentou a maior resistência à tração foi a de 0° , sendo respectivamente 52,74 MPa e 43,56 MPa. A orientação de 0° também apresentou os maiores módulos de elasticidade, sendo eles, para o PLA e PETG respectivamente, 3,35 GPa e 2,20 GPa. A orientação de 0° possuir maior resistência à tração e módulo de elasticidade tem embasamento no modo de falha dessa orientação, a qual implica no rompimento transversal do filamento, exigindo do material na sua orientação com maior homogeneidade e continuidade estrutural, assim naturalmente mais resistente. Com exceção da orientação de $\pm 45^\circ$, a qual teve sua tensão e deformação de cisalhamento analisadas, diferente da literatura que analisou a tensão normal, pode-se assumir que os resultados obtidos são coerentes e representam corretamente os materiais e as condições aplicadas para a sua impressão e ensaio mecânico.

Com os resultados apresentados, é possível assumir que tanto o PLA quanto o PETG são materiais promissores que possuem bastante potencial em diversas aplicações citadas e, com o presente estudo aliado à literatura, vê-se que a orientação pode ser utilizada para otimizar o desempenho mecânico de projetos de impressão 3D, a qual deve ser definida em função das demandas do projeto, principalmente de sua solicitação mecânica.

Por fim, sugere-se como proposta para futuros trabalhos o estudo do efeito da orientação no comportamento de corpos de prova produzidos por impressão 3D tendo-se como um novo parâmetro a porcentagem de preenchimento, onde deve-se escolher um tipo de preenchimento que possua direcionalidade. Outro estudo pertinente é a análise da isotropia do

preenchimento do tipo “giróide”, este que é uma geometria teoricamente isotrópica.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials International. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics** (ASTM D638 – 14). Mar, 2019.
- American Society for Testing and Materials International. **Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 645° Laminate** (ASTM D3518/D3518M – 18). Mai, 2023.
- AMZA, C. G. et al. **Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts**. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 562, 13 fev. 2021.
- DJOKIKJ, J. et al. **Experimental investigation on mechanical properties of FFF parts using different materials**. *Procedia Structural Integrity*, v. 41, p. 670–679, 1 jan. 2022.
- DOLZYK, G.; JUNG, S. **Tensile and Fatigue Analysis of 3D-Printed Polyethylene Terephthalate Glycol**. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 19, n. 2, p. 511–518, 26 mar. 2019.
- DOSHI, M. et al. **Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects**. *Materials Today: Proceedings*, out. 2021.
- FERNANDES, A. et al. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO EM PEÇAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE FDM EM POSIÇÕES DIFERENTES**. Mai, 2022. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/34234>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- FOCKE, W. W. et al. **Mechanical Properties of Ternary Blends of ABS + HIPS + PETG**. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, v. 48, n. 8, p. 814–820, 21 jul. 2009.
- HANON, M. M.; DOBOS, J.; ZSIDAI, L. **The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness**. *Procedia Manufacturing*, v. 54, p. 244–249, 2021.
- HARTMANN, Jonathan et al. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO PLA OBTIDO PELA TECNOLOGIA FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)**. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Teresina, ago. 2022.
- KHOSRAVANI, M. R. et al. **Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds**. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, 19 jan. 2022.
- KL, L. et al. **Amorphous copolyester/polyoxymethylene blends: Thermal, mechanical and morphological properties**. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, v. 57, n. 11, p. 570–570, 2004.

KLING, M. et al. **Avaliação das propriedades mecânicas em diferentes combinações de parâmetros de manufatura aditiva**. Dez, 2021. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021_210946_615265ba232f2.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2023.

KUMAR, R. et al. **A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed Product with PLA, ABS & PETG Materials**. Procedia CIRP, v. 107, p. 15–20, 1 jan. 2022.

LETCHER, Todd; WAYTASHEK, Megan. **Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer**. 13 mar, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39379>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

LIU, H. et al. **Three-dimensional printing of poly(lactic acid) bio-based composites with sugarcane bagasse fiber: Effect of printing orientation on tensile performance**. Polymers for Advanced Technologies, v. 30, n. 4, p. 910–922, 13 jan. 2019.

MORADI, M. et al. **Experimental investigation on mechanical characterization of 3D printed PLA produced by fused deposition modeling (FDM)**. Materials Research Express, v. 8, n. 3, p. 035304, 1 mar. 2021.

PETROV, P. et al. **Research into the effect of the 3D-printing mode on changing the properties of PETG transparent plastic**. 2021. Disponível em: <<https://popups.uliege.be/esaform21/index.php?id=3763>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

POPOV, E. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Blucher, 1978.

QUANJIN, M. et al. **Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method**. Materials Today: Proceedings, v. 27, p. 757–763, 2020.

RANGANATHAN, S. et al. **The Effect of Print Orientation and Infill Density for 3D Printing on Mechanical and Tribological Properties**. Set, 2020. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-28-0411/>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

RAZGRIZ, G. **O XYZ da Impressão 3D**. Editora NCB, 2020.

SANTANA, L. et al. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, 6 dez. 2018.

SEPAHI, M. T. et al. **Mechanical Properties of 3D-Printed Parts Made of Polyethylene Terephthalate Glycol**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 30, n. 9, p. 6851–6861, 19 jul. 2021.

ZHANG, G. et al. **A systematic investigation on the minimum tensile strengths and size effects of 3D printing polymers.** *Polymer Testing*, v. 117, p. 107845, 1 jan. 2023.