

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

NICOLAU KUBISZEWSKI

ANÁLISE DE FLEXÃO EM PEÇAS IMPRESSAS EM 3D COM PETG

ERECHIM

2024

NICOLAU KUBISZEWSKI

ANÁLISE DE FLEXÃO EM PEÇAS IMPRESSAS EM 3D COM PETG

Trabalho Conclusão de Curso realizado no Campus Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jakerson Ricardo Gevinski

Erechim

2024

Resumo

Este estudo investigou a influência da orientação das camadas na resistência à flexão de peças impressas em 3D utilizando o material PETG. A manufatura aditiva, com ênfase na impressão 3D, permite a criação de peças com geometrias complexas, sendo o processo FDM (Fused Deposition Modeling) amplamente utilizado. O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito de diferentes alinhamentos das camadas externas na resistência à flexão de peças fabricadas por meio de impressão 3D FDM utilizando o material PETG. A pesquisa busca compreender como as variações no alinhamento das camadas superiores e inferiores influenciam no desempenho mecânico das peças. Foram impressas 20 peças não normalizadas com densidade de 70% e cinco camadas externas superiores e inferiores, cada uma com diferentes orientações sendo 0° e 90°, e submetidas a ensaios de flexão de três pontos em um aparato também não normalizado. Os resultados indicaram que a orientação das camadas é um fator determinante para as propriedades mecânicas das peças, com a configuração 90°/90° proporcionando a maior resistência à flexão, enquanto a orientação 0°/0° resultou em maior flexibilidade. Este estudo contribui para a otimização de processos de impressão 3D, oferecendo percepções práticas para a fabricação de peças mais resistentes e adequadas às exigências industriais.

Palavras chave: Manufatura aditiva; Impressão 3D; FDM (Fused Deposition Modeling); PETG

Abstract

This study investigated the influence of layer orientation on the flexural strength of 3D printed parts using PETG material. Additive production, with an emphasis on 3D printing, allows the creation of parts with complex geometries, with the FDM (Fused Deposition Modeling) process being widely used. The objective of this work was to analyze the effect of different alignments of the external layers on the flexural strength of parts manufactured through FDM 3D printing using PETG material. The research seeks to understand how variations in the alignment of the upper and lower layers influence the mechanical performance of parts. 20 non-standardized parts were printed with a density of 70% and five upper and lower external layers, each with different orientations, 0° and 90°, and subjected to three-point bending tests on a non-standardized apparatus. The results indicated that the orientation of the layers is a determining factor for the mechanical properties of the parts, with the 90°/90° configuration providing greater resistance to bending, while the 0°/0° orientation trained in greater flexibility. This study contributes to the optimization of 3D printing processes, offering practical insights for the manufacture of more resistant parts suited to industrial requirements.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; FDM (Fused Deposition Modeling); PETG

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Comparativo entre Manufatura Aditiva (a) e Subtrativa (b).....	13
Figura 2-Fluxograma do processo de Impressão 3D.....	14
Figura 3-Processo de impressão 3D por FDM.....	16
Figura 4-Representação dos eixos da impressora FDM.....	17
Figura 5-Esquema técnico de impressão FDM.....	18
Figura 6-Tipos de orientações angulares de deposição.....	21
Figura 7-Viga reta (não deformada).....	25
Figura 8-Viga sob momento fletor.....	25
Figura 9-Viga submetida a um momento fletor.....	26
Figura 10-Representação do ensaio de flexão de três pontos.....	31
Figura 11-Layout do software utilizado para modelamento e salvamento das peças.....	32
Figura 12-Interface do software OrcaSlicer.....	33
Figura 13-Impressora Creality Ender-3 S1 PRO.....	34
Figura 14-Filamento de PETG - 3DPRIME.....	34
Figura 15-Paquímetro Mitutoyo.....	35
Figura 16-Aparato para ensaio de Três Pontos.....	36
Figura 17-Viga em geometria de ampulheta.....	38
Figura 18-Vista frontal da peça em formato de ampulheta.....	39
Figura 19-Segmento da peça em formato de retângulo (A).....	39
Figura 20-Segmento da peça em formato de retângulo (B).....	40
Figura 21-Segmento da peça em formato de triângulo (C).....	41
Figura 22-Demonstração dos dados da equação 5.....	42
Figura 23-Peça a ser ensaiada.....	42
Figura 24-Orientação das camadas.....	43
Figura 25-Representação das Peças.....	44
Figura 26-Aparato para o ensaio de três pontos.....	46
Figura 27-Aparato para o ensaio de três pontos.....	48
Figura 28-Peça impressa.....	49
Figura 29-Orientações das camadas impressas.....	49
Figura 30-Gráfico 01-Tensão Máxima obtida nos ensaios 1, 2, 3 e 4.....	51
Figura 31-Gráfico 02-Deslocamento das peças nos experimentos 1, 2, 3 e 4.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D.....	22
Tabela 2-Propriedades do filamento.....	24
Tabela 3-Parâmetros de camadas externas dos corpos de prova, onde os valores são representados em graus de angulação.....	44
Tabela 4-Parâmetros fixos utilizados na impressão.....	45
Tabela 5-Identificação das peças.....	45
Tabela 6-Dados do ensaio.....	50
Tabela 7-Fratura dos corpos de prova.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO GERAL	11
2.1 Objetivos Específicos	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Manufatura Aditiva	12
3.2 Processo de Impressão FDM	15
3.2.1 Vantagens e Limitações da Impressão 3D pelo Processo FDM.....	18
3.2.2 Parâmetros de Impressão	19
3.3 Materiais Utilizados para Impressão 3D	21
3.3.1 Polietileno Tereftalato Glicol (PETG).....	23
3.4 Flexão	24
3.4.1 Ensaio de Flexão – Procedimentos e Normas.....	29
3.4.2 Ensaio de Flexão de Três Pontos	30
4 MATERIAIS E METODOS	32
4.1 Materiais	32
4.1.1 Software de Desenho CAD	32
4.1.2 Software de Fatiamento	33
4.1.3 Impressora 3D.....	33
4.1.4 Filamento.....	34
4.1.5 Paquímetro.....	35
4.1.6 Aparato para Ensaio de Três Pontos	35
4.2 Métodos	36
5 DESENVOLVIMENTO	37
5.1 Norma ISO 178 (2019)	37
5.2 Elaboração das Peças a Serem Ensaadas	37
5.3 Impressão das Peças	42
5.4 Ensaio de Flexão	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1 Aparato adaptado para o ensaio de flexão	48
6.2 Peças Impressas	49
6.3 Ensaio de Flexão de Três Pontos	50
6.4 Discussão acerca dos resultados dos ensaios	50
6.4.1 Comparação de Resistência à Flexão.....	52
6.4.2 Efeitos da Orientação das Camadas.....	52

6.4.3 Análise do Deslocamento.....	53
6.4.4 Análise das fraturas.....	53
7 CONCLUSÃO.....	54
8 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE A – Planilha de Coletas de Dados	64

1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias avançadas na indústria 4.0 tem impulsionado o surgimento de novos métodos de produção, promovendo a adoção da manufatura aditiva. Dentro da manufatura aditiva, a principal tecnologia utilizada é a impressão 3D. Essa tecnologia está em constante crescimento e permite a produção de objetos com geometrias complexas, oferecendo uma vasta gama de produtos no setor de engenharia, abrangendo a indústria automobilística, aeroespacial, civil, médica, entre outros. (VALEAN *et al.*, 2020).

Apesar do assunto ter se tornado popular há poucos anos, as tecnologias de impressão 3D não são novas. Muitas modalidades utilizadas atualmente foram desenvolvidas e utilizadas pela primeira vez no final da década de 1980 e na década de 1990. Essas tecnologias foram utilizadas com o intuito de tratar uma fenda palatina de um paciente em 1999, realizando a impressão 3D da palatina do paciente e posteriormente possibilitando a substituição (DAWOOD *et al.*, 2015).

A impressão 3D é uma técnica de fabricação de peças tridimensionais, utilizando a deposição de material em camadas até a formação do sólido desejado. Esse processo ocorre a partir da elaboração de sólidos em *softwares* de modelagem 3D. Esses sólidos passam pelo processo de fatiamento, no qual são divididos em camadas com pequenas espessuras e que, posteriormente, são impressas uma a uma. A forma com a qual as camadas são impressas varia de acordo com a geometria do sólido e acabamento desejado (GOHAR, 2021).

Os equipamentos de manufatura aditiva vendidos hoje têm como base o sistema “camada por camada” e o que os diferencia é o processo utilizado para a formação dessas camadas, bem como, qual o material pode ser processado por eles. (ALBERTI *et al.*, 2014).

Os processos mais conhecidos são a modelagem por fusão e deposição FDM (*Fusion and Deposition Modeling*), que como o nome sugere trabalha com a fusão e deposição de polímeros termoplásticos como: ABS, PLA, PETG, também a estereolitografia (SLA) que permite a criação de peças a partir da resina líquida com camadas formadas a partir da cura com fonte de luz UV e a Sinterização a Laser Seletiva (SLS) que permite a fabricação de peças usando metais e polímeros usando um laser para fundir partículas de material em pó. (MIRANDA; DEL VECHIO, 2020).

Conforme abordado, o processo de impressão 3D FDM é visto como um dos principais processos e utiliza como matéria prima alguns polímeros termoplásticos. Essa matéria-prima se apresenta no formato de “fios” que são chamados de filamentos. Para que aconteça a fusão e deposição, os filamentos são aquecidos no bico injetor de material presente na impressora e são distribuídos na placa de impressão, ou seja, a mesa sobre a qual as peças serão impressas, camada por camada, para produzir a estrutura 3D desejada. (GONZÁLEZ; GONZÁLEZ, 2019).

A orientação das camadas na impressão 3D desempenha um papel crucial, pois pode impactar diretamente várias propriedades do material. Entre essas propriedades estão a dureza, a resistência mecânica, a refração da luz e a aparência final do objeto impresso. A forma como as camadas são dispostas pode influenciar a integridade estrutural e a estética do produto, tornando a escolha da orientação um fator essencial no processo de fabricação aditiva (3DLAB, 2024).

Com base nesses pontos os quais requerem ajustes, a problemática desse trabalho está diretamente relacionada com a integridade das peças impressas, onde são avaliadas através da resistência à flexão. De acordo com Costa (2023) os problemas que ocorrem com maior frequência, ocasionam defeitos, e baixa resistência mecânica nas peças, são referentes à deposição de material, como o entupimento dos bicos ou empenamento do material.

Abordando a mesma problemática, encontra-se Bolleli e Lebrão (2019), os quais, realizaram um trabalho abordando as propriedades mecânicas, como flexão e tração de peças impressas com FDM para materiais como o Poliacido Láctico (PLA), o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG). Nesse trabalho obtiveram resultados de que o material mais resistente à flexão é o PLA, suportando cargas de até 68,46 MPa, enquanto o PETG apresentou resistência de 52,70 MPa e o ABS, em média 45 MPa. No ensaio de tração o PLA também se mostrou superior, suportando tensão de 68,78 MPa, o ABS com tensões de 41 MPa e o PETG, com apenas, 21 MPa.

Valente (2022), também abordou em seu trabalho a resistência à flexão de peças impressas com FDM, porém apenas no material PLA. Com esse trabalho o autor conclui que a resistência à flexão aumenta com o aumento da densidade de preenchimento, da espessura de parede e da altura entre camada.

Na literatura, não foram encontrados estudos que tratem especificamente da orientação das camadas externas e sua influência na resistência de peças impressas.

Assim, esta pesquisa busca preencher uma importante lacuna no conhecimento sobre as propriedades mecânicas dessas peças.

A resistência à flexão é crucial em inúmeras aplicações, desde peças mecânicas em indústrias e componentes automotivos até dispositivos médicos e biomédicos. Sendo assim, compreender como diferentes alinhamentos das camadas externas influenciam na resistência à flexão permitirá a concepção e produção de peças e equipamentos mais inteligente e adaptados às demandas reais (ALVES, 2022).

A importância desta pesquisa busca como o comportamento das variações de orientação de camadas afetam a resistência à flexão de peças produzidas por impressão 3D FDM, usando PETG. Explorando esta questão, o trabalho tem o potencial de oferecer uma contribuição para o campo da manufatura aditiva, possibilitando a criação de componentes mais resistentes e adaptados às exigências práticas de variados setores industriais. Esta análise agrega para o conhecimento acadêmico na área, pode melhorar a eficiência produtiva e a sustentabilidade, ao reduzir falhas e desperdícios, impactando positivamente a aplicabilidade e durabilidade de produtos impressos em 3D.

2 OBJETIVO GERAL

Analisar o efeito de diferentes orientações das camadas externas de peças produzidas por impressão 3D FDM, em PETG, através de ensaios de flexão. Esta análise visa entender a influência das variações na integridade e desempenho mecânico das peças.

2.1 Objetivos Específicos

a) realizar uma revisão teórica sobre manufatura aditiva com ênfase na impressão 3D utilizando PETG e também sobre flexão.

b) construir ou adaptar um aparato de ensaios de flexão capaz de testar peças impressas em 3D.

c) executar a impressão 3D de peças experimentais utilizando PETG, variando o alinhamento das camadas externas superior e inferior para criar um conjunto diversificado de amostras para testes.

d) realizar ensaios de flexão de três pontos em todas as peças impressas.

e) realizar a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de flexão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentado o referencial teórico no qual envolve a Manufatura Aditiva, com impressão 3D pelo método FDM. Neste contexto são apresentadas suas vantagens, limitações, bem como os principais parâmetros de impressão. Lista-se alguns materiais utilizados para esse tipo de processo com ênfase no PETG. Também são abordados conceitos sobre flexão, bem como o ensaio de flexão.

3.1 Manufatura Aditiva

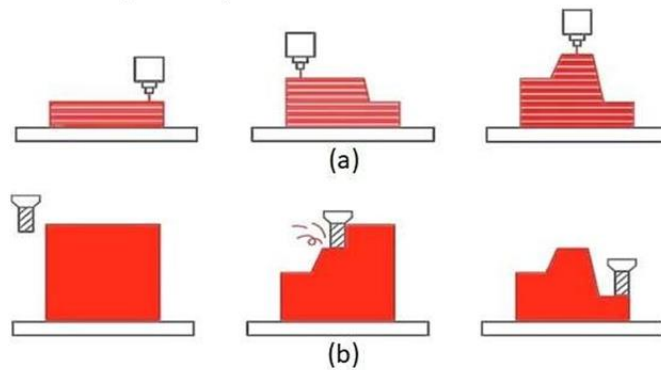
A Manufatura Aditiva é um método de produção que consiste na fabricação de objetos adicionando material. A impressão 3D foi associada a esse método de fabricação em 1980, o qual consiste na fabricação de objetos usando camadas, sendo desenvolvido para promover benefícios às indústrias e projetos científicos (CRUMP, 1992).

Antes da manufatura aditiva se tornar tão popular a manufatura subtrativa era a única a ser usada em larga escala na indústria. A Manufatura Subtrativa é toda aquela que atribui forma para as peças através da subtração ou divisão de material. Como exemplos, pode-se citar a retificação, furação, torneamento, fresagem, eletroerosão, dentre outros (VOLPATO, 2017).

Na Figura 1 é possível observar as diferenças encontradas nos dois tipos de manufatura, a aditiva e a subtrativa.

Na Manufatura Aditiva (Figura 1 – a) a peça é formada a partir da adição de material de acordo com o formato desejado. Já, na manufatura subtrativa (Figura 1 – b), parte-se de um bloco, no qual o material vai sendo removido de acordo com a geometria desejada. Entre as diferenças delas, destaca-se a sobra de materiais a serem descartados, que na manufatura aditiva é, consideravelmente, menor, uma vez que só é adicionado o material necessário para a geometria de cada peça (WILTGEN; LOPES, 2022).

Figura 1 - Comparativo entre Manufatura Aditiva (a) e Manufatura Subtrativa (b)



Fonte: Adaptado de Wiltgen (2019).

O processo de Manufatura Aditiva no formato de impressão 3D utiliza dados obtidos através de uma representação geométrica computacional tridimensional do objeto, originada de um software auxiliado por computador (CAD, do inglês *Computer Aided-Design*). Esse processo de fabricação viabiliza a criação de objetos físicos por meio de diversos materiais e apresentando diversas variações, tanto da geometria como da forma de fabricação. A construção de peças por essa tecnologia apresenta boa parte dos seus processos automatizados e ocorre de maneira rápida por apresentar poucas etapas de projeto comparado com o convencional (manufatura subtrativa) até a confecção do produto. (VOLPATO, 2017).

Em 1986, o primeiro processo de manufatura aditiva, a estereolitografia (do inglês *Service Level Agreement - SLA*), foi patentado. Os processos de manufatura aditiva emergiram primeiramente sob o nome de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*), devido à configuração que apresenta. Posteriormente, as aplicações das novas tecnologias iniciaram e, atualmente, se apresentam como uma reforma industrial que abrange inúmeros setores fabris e tem possibilidade de atingir um público ainda maior (GONZÁLEZ; GONZÁLEZ, 2019).

Todas as modalidades de fabricação por impressão 3D baseiam-se em uma representação geométrica tridimensional (3D) feita pelo usuário em um software de desenho. Ainda, as peças podem ser copiadas com um scanner 3D, que permite copiar as medidas e geometrias da peça desejada, usando a original como modelo (OLIVEIRA, 2020).

Os itens a serem produzidos podem se apresentar de diversos formatos digitais, sendo que o mais utilizado é conhecido como *Standard Tessellation Language* (STL), no qual é realizada a conversão do arquivo de uma peça criada em

um software de desenho para a extensão “. STL” e lido pelo programa que repassa as informações para a impressora, usualmente chamado de fatiador (VOLPATO, 2017).

As etapas do processo abordadas anteriormente, podem ser mais bem compreendidas, por meio do fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2– Fluxograma do processo de Impressão 3D.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2020).

A busca pela impressão 3D, como alternativa aos procedimentos convencionais de produção manual, surge pela capacidade de fabricar peças de elevada complexidade com boa qualidade, se equiparando aos outros processos de produção. Essa alternativa tem se firmado, principalmente, em materiais poliméricos, porém esse método de fabricação também pode ser aplicado em vários outros materiais (GOMES; WILTGEN, 2020).

A impressão 3D em polímeros é bem-vista, pois dentre outros pontos importantes são recicláveis, e com isso, são considerados sustentáveis. Para ser considerado sustentável, ao final da sua vida útil, o plástico deve retornar à cadeia produtiva, pois assim, poucos recursos naturais e energia são perdidos em aterros ou

lixões. Nesse quesito, o PETG atende aos requisitos de sustentabilidade e é considerado altamente ecológico (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

Ainda é conveniente citar, como aplicações eficazes da tecnologia da impressão 3D possui uma variedade de produtos, incluindo implantes médicos, peças ortopédicas e dentárias, aparelhos auditivos, ferramentas, componentes aeroespaciais, componentes militares e automotivos, eletrônica, arte, joias, iluminação comercial, avatares de videogame e alimentos modificados (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015).

A Manufatura Aditiva é importante para as mais variadas áreas e aplicações, a partir do estudo feito por Capucho *et al* (2021), que relata a produção de uma prótese biomecânica para pacientes com perda do osso intermediário e outro da ponta do dedo indicador. Essa relevância também é mostrada em outro estudo que traz a Manufatura Aditiva como uma solução para confirmar simulações, como em circuitos de refrigeração de moldes, com a possibilidade de fabricar circuitos mais complexos, na qual são vistas várias vantagens, como, menor tempo para atingir a temperatura de extração, resfriamento homogêneo entre outras, com isso 15,5% de aumento de produtividade do molde (WILTGEN; LOPES, 2022).

3.2 Processo de Impressão FDM

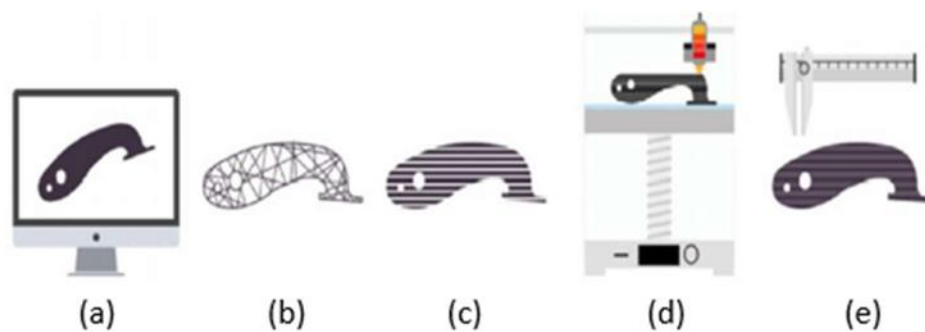
O processo de impressão 3D conhecido como FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou traduzindo de forma direta, Modelagem por Deposição Fundida foi consolidado no início dos anos de 1990, sendo assim, esse processo foi o segundo processo de impressão a ficar conhecido. Ele tem alto reconhecimento e aplicação hoje em dia devido à possibilidade de impressão em diversos materiais, geometrias complexas, baixo custo e pouca manutenção nos equipamentos (SILVA, 2020).

Para realizar o processo FDM é necessário obter filamentos termoplásticos que são adquiridos em bobinas classificadas por peso, cor e material, como, por exemplo, o polietileno tereftalato glicol (PETG). O material é conectado a extrusora onde é puxado, aquecido até seu ponto de fusão e extrudado através de um orifício com formato e tamanho desejado (JOE MICALLEF, 2015).

Na Figura 3, é possível observar as etapas da impressão 3D por meio do processo FDM. O primeiro passo para a impressão 3D usando FDM é a modelagem do objeto, ou também chamado de sólido, que será criado em software de desenho

CAD 3D (Figura 3 – a), na sequência, esse sólido oriundo do software de desenho é salvo com a extensão “STL” (Figura 3 – b) para que a mesma possa ser aberta em um software de fatiamento. O fatiamento é onde o sólido é dividido em finas camadas (Figura 3 – c) que posteriormente serão impressas de uma a uma, formando o objeto desejado (Figura 3 – d). Ao final do processo, com a peça impressa, basta conferir as medidas e verificar se as mesmas estão de acordo com o projeto elaborado inicialmente (Figura 3 – e).

Figura 3 – Processo de impressão 3D por FDM.



Fonte: Adaptado de Alves (2022).

Existem vários métodos para realizar a impressão 3D, o mais comum é um sistema que se movimenta por três eixos X, Y e Z onde dois deles são executados pela extrusora (Z e Y) e um pela plataforma de impressão (X), assim sendo possível a impressão de formas complexas depositando material em quantidade correta e em pontos específicos (MICALLEF, JOE, 2015).

Esses eixos podem ser visualizados na Figura 4, no qual apresenta o processo de impressão por FDM.

Figura 4 - Representação dos eixos da impressora FDM.



Fonte: O autor, 2024.

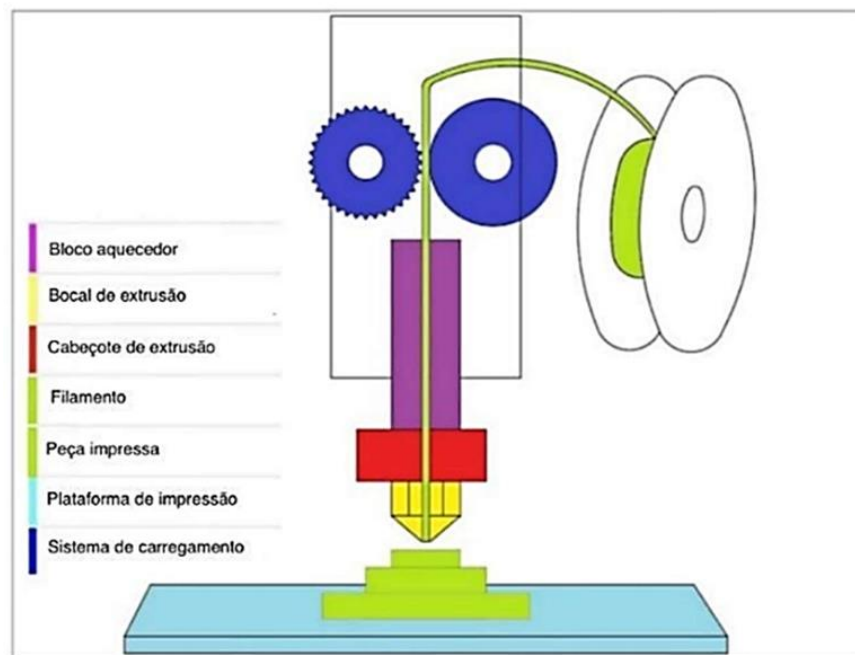
As partes mostradas na Figura 4, são: (a) bobina de filamento, (b) detector de filamento, (c) eixo ZY, (d) tela de comando, (e) eixo X, (f) entrada para cartão SD e cabo tipo C, (g) mesa de impressão e (h) extrusora direct-drive.

Geralmente a extrusora se movimenta pelo eixo Z e Y e conta com um sistema de arrefecimento do material, composto por uma ou mais ventoinhas. O sistema de arrefecimento tem como objetivo resfriar o material rapidamente para que ele fixe no lugar onde foi depositado. A plataforma de impressão se movimenta pelo eixo X, e conta com um sistema de aquecimento que tem como objetivo evitar deformações e má aderência (SILVA, 2020).

A Figura 5 apresenta de forma ilustrada o esquema técnico utilizado no processo de impressão FDM, no qual é possível observá-lo como um todo. Nesse

esquema é possível analisar desde o filamento no rolo, passando pelo sistema de carregamento dele, na qual é realizada uma tração do filamento por meio de engrenagens e polias, até o seu aquecimento no bloco aquecedor e extrusão pelo bocal (ou também chamado de bico extrusor). Ao final do esquema, tem-se a peça pronta disposta acima da plataforma de impressão.

Figura 5 – Esquema técnico de impressão FDM.



Fonte: Adaptado de Kuznetsov *et. al* (2018).

Para que a impressão seja realizada de forma correta, com boa qualidade de acabamento e boa resistência mecânica, vários parâmetros precisam ser ajustados na impressora. Esses parâmetros variam de acordo com o material a ser utilizado e são mais bem explicados na sequência.

3.2.1 Vantagens e Limitações da Impressão 3D pelo Processo FDM

Segundo Modeen (2005) a impressão 3D tem algumas vantagens como a capacidade de produzir formas complexas e detalhadas, baixos desperdícios de matéria prima, pois isenta qualquer processo de acabamento para retirada de material, como a usinagem e conta com fácil instalação não necessitando de ambientes controlados.

Além das vantagens já listadas, quando se trabalha com a impressão 3D pelo processo de FDM, há a demanda de apenas um processo, ou seja, em apenas um comando de impressão é realizado todos os detalhes das peças, como exemplo: esquadrejamento, rosca, furação, entre outros. Enquanto, na fabricação convencional cada máquina realiza cada um dos processos, sendo necessárias várias máquinas para uma mesma peça (OLIVEIRA, 2020).

Em contrapartida, uma das maiores limitações da impressão 3D FDM é o tempo de impressão dos modelos. O tempo é determinado pelas trajetórias geradas pelo programa de corte, estrutura da impressora e complexidade e resolução do modelo. Modelos com dimensões consideráveis grandes e complexos podem levar dias de impressão (MODEEN, 2005).

Além disso, outro fator que causa limitações na impressão é o erro dos parâmetros e umidade do ar no momento da impressão. Esses pontos podem causar bolhas nas peças, descolamento da peça da placa de impressão e pouca aderência entre as camadas, dependendo do material a ser utilizado. Sendo assim, o ambiente de impressão precisa ter controle desses fatores, bem como o armazenamento dos filamentos (CASTANHEIRA, 2016).

3.2.2 Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão são configurados no software de fatiamento, que também permite a visualização de todas as camadas de impressão, minimizando o risco de erros. Além disso, o software fornece informações precisas sobre o tempo de impressão e o consumo de material (ALL3DP, 2019).

É essencial atribuir parâmetros iniciais onde alguns desses parâmetros são fornecidos pelo fabricante na tabela 2, que será mostrada adiante. Esses ajustes conduzem as propriedades definitivas do modelo que está sendo fabricado, dado que eles têm a capacidade de influenciar tanto as na precisão dimensional quanto o desempenho das propriedades mecânicas do produto final (SILVA, 2022).

Alguns parâmetros abordados são: velocidade de impressão, espessura de camadas, geometria de preenchimento e a densidade de impressão. A velocidade de impressão pode ser definida pela velocidade na qual o bico extrusor faz sua movimentação sobre a plataforma durante o processo de impressão (SOOD *et al.*, 2012).

Segundo Silva *et al.*, (2020) a velocidade de impressão tem ligação direta ao acabamento gerado na impressão e o tempo de impressão. Essa relação permite afirmar que quanto maior a velocidade de impressão, conseqüentemente, menor será o tempo e em contrapartida, pior será o acabamento superficial da peça impressa.

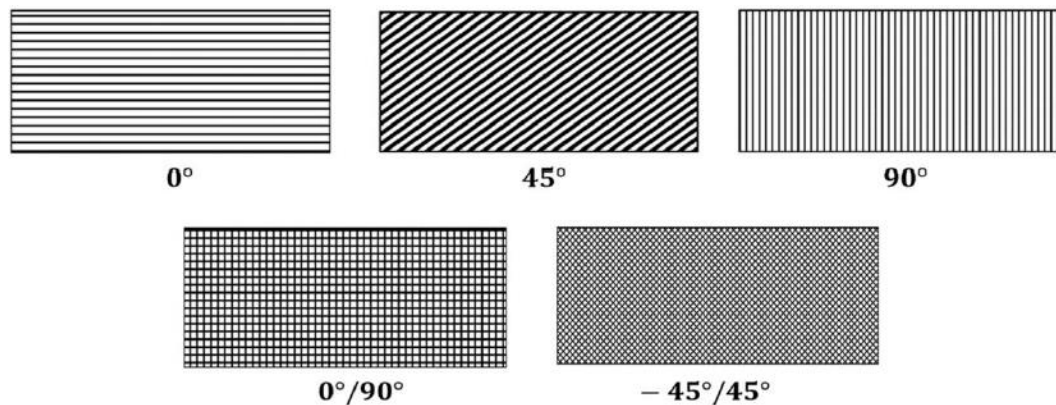
A espessura da camada nada mais é que a altura da camada de filamento depositada sobre a plataforma a cada “fatia” da impressão, que é mensurada pela direção Z do modelo. O bico conectado na extrusora define essa altura, a escolha desse bico é dada pela finalidade desejada. Este parâmetro afeta qualidade, tempo de impressão, assim como maior resistência (ALL3DP, 2019; ARAUJO, 2016).

Em outras palavras, se o bico extrusor acoplado na impressora for com dimensões de 0,4 mm de diâmetro a espessura da camada será igual a ele. Se o bico extrusor for com dimensão de 0,2 mm de diâmetro a camada terá essa mesma espessura. Considerando a altura de camada, que pode ser configurada no software de fatiamento, quanto menor for a altura melhor pode ser o acabamento e maior riqueza de detalhes. Porém, quanto maior for a altura da camada, mais rápida será a impressão, pois é depositado maior quantidade de material e menor a riqueza de detalhes (KHAN; SHAIKH 2014).

Em qualquer projeto de impressão 3D, é essencial escolher a orientação das camadas de acordo com a finalidade desejada. A orientação pode influenciar diretamente a resistência, a estética e a velocidade de construção do objeto, dependendo de sua geometria. A direção de impressão afeta significativamente o tempo necessário para imprimir e na resistência das peças. Isso ocorre porque propriedades como dureza, resistência mecânica e refração da luz variam dependendo da direção das camadas e velocidade de impressão. Geralmente, as peças são mais resistentes na direção XY (x e y) do que na Z, devido ao risco de separação entre as camadas nesse último eixo. Portanto, planejar a orientação de impressão para maximizar a resistência é muito benéfico (3DLAB, 2024).

A orientação angular das camadas refere-se ao ângulo em que o material é depositado em relação ao eixo X da plataforma de impressão. Exemplos de diferentes ângulos de orientação podem ser vistos na Figura 6.

Figura 6 - Tipos de orientações angulares de deposição.



Fonte: Dey, A.; Yodo, N. (2019).

Por fim, a densidade do modelo ou também chamada de percentual de preenchimento, é a quantidade de material que será impresso no interior do modelo. Essa densidade é designada em percentual, podendo variar de 0% a 100%, sendo um modelo sólido contendo 100% de preenchimento e um modelo apenas com camadas externas sendo de 0%. Quanto maior o percentual maior o tempo de impressão e vice-versa (CASAGRANDE; JOCHEM, 2019; ALL3DP, 2019).

3.3 Materiais Utilizados para Impressão 3D

Atualmente, os materiais mais usados para a impressão 3D FDM são os termoplásticos, como o Acrilonitrila-Butadieno Estireno (ABS), o Poli Ácido Lático (PLA), o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) e o Nylon. Além desses materiais, a impressão 3D FDM já está sendo utilizada, porém em menor escala, para a impressão de metais e materiais cimentícios, como na construção de casas (FIGUEIREDO; CESAR, 2022).

As propriedades mecânicas qualitativas de alguns materiais termoplásticos podem ser observadas na Tabela 1. Onde estão separadas em diferentes propriedades sendo classificadas em níveis como, baixo, médio e alto. Esses níveis são exclusivamente para mostrar qual é superior igual ou inferior em cada propriedade.

Tabela 1 - Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D.

Propriedades	PLA	ABS	PETG (PET, PTT)	NYLON
Ecológico	alto	baixo	alto	baixo
Brilho	médio	baixo	alto	médio
Transparência	médio	baixo	alto	baixo
Rigidez/Dureza	médio	alto	alto	alto
Resistência a impactos	baixo	médio	alto	alto
Flexibilidade	baixo	médio	médio	médio
Contração/WARP	baixo	alto	médio	baixo
Precisão/Detalhes	alto	baixo	médio	alto
Qualidade de superfície	alto	baixo	alto	alto
Resistência/Atritos	baixo	médio	alto	alto
Resistência Química	médio	baixo	alto	alto
Resistência Temp.	baixo	alto	médio	alto
Usinabilidade	baixo	alto	baixo	alto
Densidade	baixo	médio	baixo	baixo
Temp. de Impressão	médio	alto	alto	alto
Temp. de Mesa Aquecida	baixo	alto	médio	alto
Preço por m3/grama/hora	baixo	médio	médio	baixo

Fonte: Besko, Bilyk e Sieben (2017).

De acordo com a bibliografia as propriedades que têm maior interesse para o trabalho são aquelas que dizem respeito às propriedades mecânicas dos materiais, sendo assim, são consideradas principalmente: resistência ao impacto, flexibilidade e dureza, além de impacto ambiental, ou seja, o quão ecológico é o material (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

A partir da Tabela 1, observa-se que os materiais que se demonstraram mais ecologicamente corretos foram o PLA e o PETG, sendo ambos de recicláveis. Quando são abordadas as propriedades mecânicas de dureza e flexibilidade os materiais que apresentam as melhores características são o ABS, PETG e o Nylon, sendo que apresentaram nível alto de dureza e médio no quesito de flexibilidade. Por fim, quando

abordado a propriedade de resistência ao impacto os melhores são o PETG e o Nylon (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

A análise da Tabela 1 mostra que o PETG é o material com a maior diversidade de propriedades classificadas como altas, tornando-se assim o material mais interessante, portanto, o escolhido para este trabalho. Sabe-se que quanto maior o percentual de preenchimento de uma peça, maior é sua resistência mecânica, porém, em um estudo realizado por Atako (2022), é observado que a densidade de preenchimento acima de 70% não implica diferenças na resistência da peça.

3.3.1 Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)

O PETG é uma derivação termoplástica do PET (poli tereftalato de etila) e é empregado na impressão 3D FDM. O "G" se refere à "modificado com etilenoglicol", com essa modificação é obtido um material com maior transparência, menor fragilidade e facilidade de manipulação em comparação ao PET. Segundo Castanheira (2016), o PETG é um ótimo material para impressão pois pode ser usado na área de trabalho sem enfrentar grandes desafios de adesão a mesa de impressão, que costuma ser uma limitação no momento da impressão.

Uma particularidade que faz com que esse material reduza dificuldades de adesão à mesa de impressão e principalmente das camadas entre si é sua capacidade de absorver umidade do ambiente, sem causar danos para a impressão, e assim se torna pegajoso ao ser fundido e depositado na mesa de impressão. Com isso é reduzido drasticamente a possibilidade de deslizamento da peça evitando erros de impressão (ALL3DP, 2021).

Evitando os erros de impressão como o descolamento das peças da placa de impressão e, principalmente, das camadas entre si, reduz-se a possibilidade dessas peças apresentarem problemas na estrutura delas. Com as peças apresentando maior integridade, as propriedades mecânicas são valorizadas, com isso, as peças apresentam maior resistência mecânica, com maior flexibilidade e menor risco de danos nas peças, com pouca distorção (SILVA, 2020).

Esse material é um composto polimérico e sua transição vítrea é em torno de 80 graus celsius. Algumas propriedades do material em comparação com outros materiais utilizados para impressão 3D são, alta flexibilidade, temperatura de fusão

alta, tem menor retração, sendo assim os modelos tendem a manter suas dimensões com maior precisão (WANG *et al.*, 2013).

Dados fornecidos pelo fabricante PRINT3D do filamento PETG estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do filamento.

Parâmetro	Ajustes
Velocidade da ventoinha	100%
Resistência a flexão	72MPa
Temperatura de extrusão	235°C a 255°C
Temperatura da Mesa aquecida	85°C
Densidade	1,27 (g/cm ³)

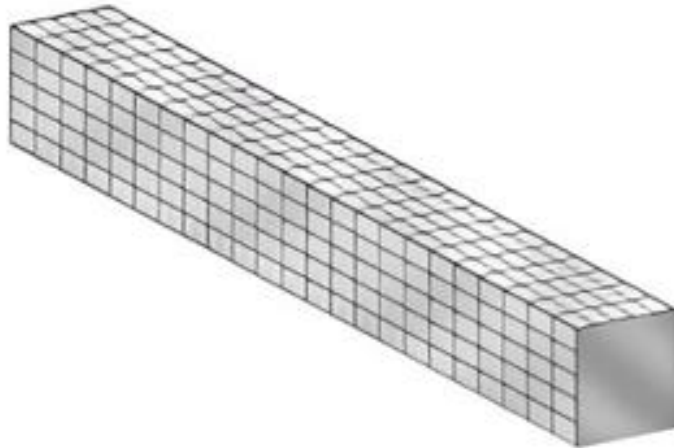
Fonte: PRINT3D, 2024.

3.4 Flexão

Na engenharia, a flexão é um termo que descreve a deformação de um elemento estrutural sob a ação de cargas transversais. O esforço que leva o elemento a curvar-se é conhecido como momento fletor. Isso é relevante no estudo de vigas e outros componentes estruturais sujeitos a cargas em sua direção perpendicular. Vigas são elementos cujo seu comprimento e largura são maiores que sua espessura e que suportam carregamentos aplicados perpendicularmente a seu eixo longitudinal (HIBBELER, 2010; SILVA *et al.*, 2018).

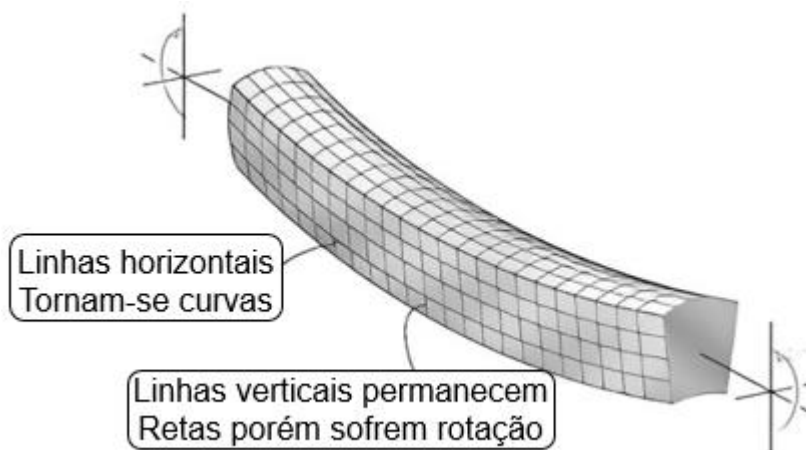
É possível ver na Figura 7 uma viga não deformada, a qual tem seção transversal quadrada, constante, simétrica e marcada por uma grade de linhas longitudinais e transversais. Na Figura 8 pode-se observar quando um momento fletor é aplicado na viga, onde é possível ver que as linhas longitudinais se tornam curvas e as linhas transversais verticais continuam retas, porém sofrem rotação (HIBBELER, 2010).

Figura 7 - Viga reta (não deformada)



Fonte: adaptado de Hibbeler, 2010.

Figura 8 - Viga sob momento fletor



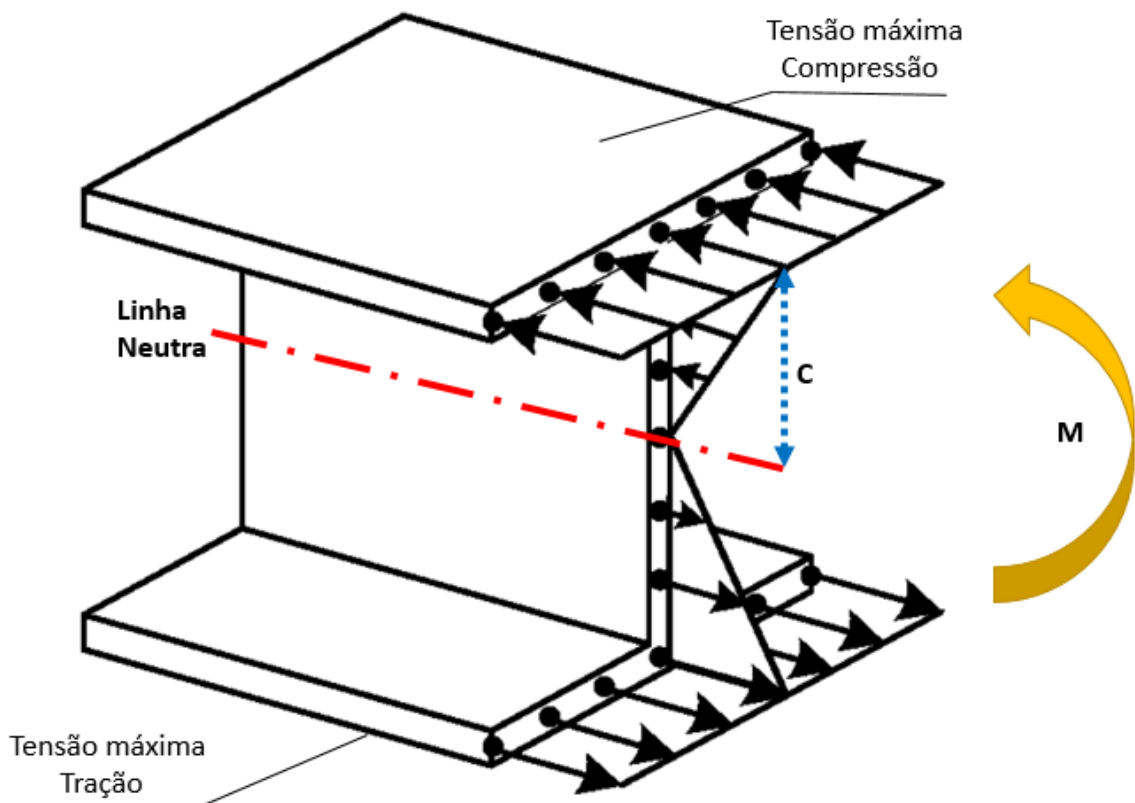
Fonte: adaptado de Hibbeler 2010.

O comportamento de qualquer viga deformável sujeita a um momento fletor provoca tensões como, tração do material na parte inferior e a compressão do material na parte superior onde a deformação máxima ocorre tanto na superfície inferior quanto na superior. Por consequência entre essas duas regiões deve existir uma linha, considerada linha neutra onde não irá ocorrer mudança no seu comprimento e consequentemente não haverá tensões (HIBBELER, 2010).

A Figura 9 ilustra o estado de tensão em uma viga submetida a um momento fletor. O estado de tensão se refere à distribuição de forças internas na viga, caracterizado pela presença de tensões ao longo do seu comprimento. Essas tensões são resultado da aplicação de cargas externas, como peso e forças concentradas.

Na Figura 9, também pode-se visualizar a linha neutra, representada por uma linha e ponto, destacada em vermelho, na qual divide a viga em duas zonas: a região superior, onde o material está sob compressão, e a região inferior, onde está sob tração. As setas indicam a magnitude das tensões, que aumentam à medida que se afastam da linha neutra, alcançando valores máximos nas superfícies superior e inferior da viga. A letra “c” representada por uma seta com linha tracejada e na cor azul, refere-se à distância da linha neutra até as superfícies superior e inferior, onde essas tensões máximas ocorrem. A seta em amarelo curvada, marcado com a letra M, representa o sentido do momento fletor aplicado, que induz as tensões representadas e é responsável pela flexão da viga (HIBBELER, 2010).

Figura 9 - Viga submetida a um momento fletor



Fonte: O autor, 2024.

A tração é a força que atua ao longo do eixo de um objeto, tendendo a alongá-lo. Este comportamento é comum em cabos de suspensão e diversos componentes de engenharia. A compressão, por outro lado, tende a achatá-lo ou encurtá-lo.

sendo característica essencial de elementos estruturais como colunas e pilares, que suportam o peso de edifícios e outras estruturas (HIBBELER, 2010).

Conforme Hibbeler (2010) para calcular a tensão máxima de um corpo submetido a flexão, utiliza-se a equação (1).

$$\sigma = \frac{M.C}{I} \quad (1)$$

Onde o C representa a distância entre a linha neutra e a superfície (milímetros), conforme demonstrado na Figura 9.

O M é o momento de força, que é calculado a partir da equação (2).

$$M = F.d \quad (2)$$

sendo o F a força aplicada (Newton) e d é a distância perpendicular da força até o apoio ou engaste (milímetros).

Para determinar o momento de inércia, é essencial empregar fórmulas específicas para formas geométricas comuns, tais como: retângulos (equação 3) e triângulos (equação 4), onde B é a base (milímetros), h é a altura (milímetros).

$$I = \left(\frac{B.h^3}{12} \right) \quad (3)$$

$$I = \left(\frac{B.h^3}{36} \right) \quad (4)$$

Para peças com perfil I, é necessário utilizar o teorema dos eixos paralelos também conhecido como Teorema de Steiner, onde permite calcular o momento de inércia em torno de um eixo paralelo a um eixo que passa pelo centroide da seção. Para realizar o cálculo, é necessário somar a área da seção transversal, representada por A , e a distância entre o eixo que passa pelo centroide e o eixo paralelo desejado, representada por E , conforme mostrado nas equações 5 e 6.

$$I = \left(\frac{B.h^3}{12} \right) + A.E^2 \quad (5)$$

$$I = \left(\frac{B \cdot h^3}{36}\right) + A \cdot E^2 \quad (6)$$

Analisando o cenário ligado à engenharia mecânica, a peça que se mostra com maior capacidade de resistir a um momento fletor é a viga I, no qual é um componente estrutural amplamente utilizado devido à sua capacidade de suportar grandes cargas e resistir a momentos de flexão. Sua geometria é caracterizada por uma seção transversal que se assemelha à letra "I", composta por uma alma central vertical e duas flanges horizontais, uma superior e outra inferior. Essa configuração proporciona uma alta resistência à flexão e ao cisalhamento, uma vez que os flanges resistem aos momentos de flexão enquanto a alma suporta as forças de cisalhamento (HIBBELER, 2010).

A viga I é maximizada pelo fato de a maior parte do material estar concentrada nas mesas, onde as tensões de tração e compressão são mais significativas. A alma, embora relativamente fina, oferece resistência suficiente para forças de cisalhamento. São utilizadas em quadros de máquinas, suportes industriais e estruturas de equipamentos pesados entre outras aplicações. Esta distribuição do material torna a viga I uma escolha econômica e eficiente em termos de uso de material e capacidade estrutural (GERE, 1999).

Com isso, são verificados alguns estudos relacionados a flexão em diferentes materiais para avaliar como eles se comportam a esse tipo de esforço. Considerando que o ensaio de tração é frequentemente utilizado devido à sua capacidade de produzir resultados semelhantes aos do ensaio de flexão para certos materiais, observa-se que outros materiais apresentam diferenças significativas de resistência entre os ensaios de flexão e tração.

No estudo conduzido por Bejo *et al.* (2021), foi feita uma análise comparativa sobre as propriedades mecânicas de aços com diversos tratamentos, nos testes realizados, a resistência de Flexão registrou 930,90 MPa e a resistência à Tração alcançou 924,55 MPa. Essa proximidade nos valores indica uma diferença mínima entre as resistências à tração e à flexão, sugerindo que o aço mantém uma resistência consistente sob ambos os ensaios.

Já em um estudo realizado por Bolelli e Lebrão (2019), foi feita uma análise das propriedades mecânicas de peças fabricadas por impressão 3D FDM, submetidos a

ensaios de tração e flexão. No material PETG, observou-se que, no ensaio de flexão, a resistência foi de 52,70 MPa, enquanto no ensaio de tração, a resistência foi significativamente menor, atingindo 21,01 MPa. Esses resultados indicam que o PETG exibe comportamentos distintos sob diferentes tipos de carga, evidenciando uma variação significativa em sua resposta mecânica dependendo do tipo de esforço aplicado.

3.4.1 Ensaios de Flexão – Procedimentos e Normas

Em termos de caracterização de corpos de prova, pode-se classificá-los em normalizados e não normalizados.

Um corpo de prova normalizado segundo a ISO 178 (2019) é uma amostra de material que foi fabricada e preparada seguindo padrões e especificações estabelecidos por normas técnicas. Essas especificações determinam dimensões, formas, processos de fabricação e condições de ensaio, garantindo uniformidade e comparabilidade dos resultados.

Um corpo de prova não normalizado segundo a ISO 178 (2019), não segue as especificações padronizadas de dimensões ou preparação, podendo variar em forma, tamanho e métodos de fabricação. Esses corpos de prova são geralmente usados em situações em que as condições específicas de uso ou o formato do material não permitem a preparação de amostras normalizadas.

Em relação a realização dos ensaios de flexão de três pontos precisam ser seguidos alguns parâmetros exigidos na norma ISO 178 (2019). De acordo com a norma, o corpo de prova precisa estar apoiado sobre dois roletes e estar submetido a uma carga de um cutelo, situado na metade da distância entre os apoios. O cutelo e os apoios precisam ter superfícies cilíndricas com raio de $5,0 \pm 0,1$ mm.

Com o procedimento descrito acima é possível determinar as propriedades mecânica dos materiais ensaiados, referentes à flexão de polímeros reforçados e não reforçados, como compósitos que apresentem alto módulo de elasticidade (DE ANDRADE, 2021).

Para realizar o ensaio, é necessário definir, conforme a norma, qual o material a ser ensaiado. A norma apresenta vários materiais, como o termoplástico, a exemplo do PETG. Além disso, a espessura do corpo de prova não pode ter dimensão maior que a largura. Para isso, a norma ISO 178 (2019) fornece as dimensões e tolerâncias

específicas. Para materiais termoplásticos, a seção transversal das amostras deve ser retangular, com lados opostos planos e paralelos (tolerância de $\pm 0,2$ mm) e lados adjacentes perpendiculares ao longo de todo o comprimento do material.

De acordo com a norma ISO 178 (2019), é aplicada uma força na amostra até que a ruptura ocorra na superfície inferior da amostra ou até que uma deformação máxima de 5% seja atingida, o que ocorrer primeiro.

A velocidade recomendada para o ensaio é de 1 milímetro por segundo para peças com espessura entre 1 e 3,5 milímetros. Para outras espessuras, podem ser utilizadas velocidades de 2, 5 e 10 milímetros por segundo, com uma variação de 20%. Adicionalmente, podem ser aplicadas velocidades de 20, 50, 100, 200 e 500 milímetros por segundo, com uma variação de 10%.

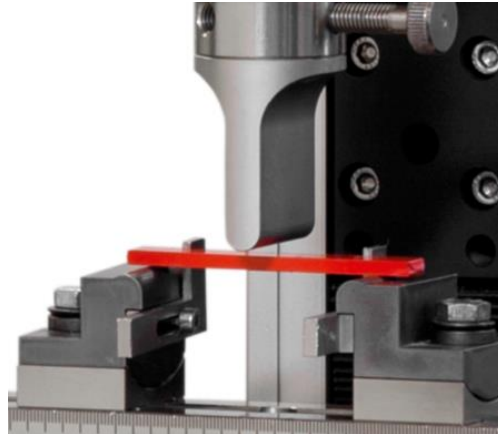
3.4.2 Ensaio de Flexão de Três Pontos

O ensaio de flexão de três pontos, tem como objetivo a aplicação de cargas em três pontos distintos da peça que está sendo ensaiado e melhor se qualifica para se chegar o mais próximo de um momento fletor puro, e conseqüentemente não gerar tensões cisalhantes, já que para aplicar um momento fletor puro, a solução utilizada no ensaio de flexão é aplicar um carregamento central na peça apoiada em suas extremidades. Para isso, a peça a ser ensaiada deve ser colocada sobre dois suportes, criando um vão entre eles. Na sequência a carga é aplicada, sendo que dois pontos são localizados nas regiões onde ficam aplicados os suportes, enquanto o terceiro ponto fica localizado no centro da peça (PRATES; VERDÉRIO JÚNIOR; CAMINAGA, 2023).

Quando a carga central é aplicada, ela faz com que o material se deforme. Essa deformação tende a aumentar à medida que a carga também vai sendo gradualmente aumentada, até que ocorra a fratura do material ou então a deformação excessiva. Esse método é amplamente utilizado para determinar a resistência à flexão (capacidade de uma estrutura ou material resistir a momentos de flexão) e a rigidez dos materiais ensaiados (BEJO *et al.*, 2021).

O ensaio de três pontos pode ser melhor compreendido observando a Figura 10, na qual uma viga está bi apoiada e ao centro está sofrendo uma carga no sentido contrário, que causa a deformação e flexão.

Figura 10– Representação do ensaio de flexão de três pontos.



Fonte: ZwickRoell (2020).

Para a realização do ensaio de flexão de três pontos em corpos de prova impressos em 3D, precisam ser levados em consideração alguns pontos primordiais, como temperatura parametrizada e espessuras de camadas. Esses pontos podem impactar diretamente os resultados obtidos; se forem mal dimensionados, podem resultar em delaminação (camadas com baixa aderência entre si) ou em uma maior fragilidade da peça (OLIVEIRA, 2020).

A resistência à flexão que uma determinada peça apresenta, tende a decrescer com o aumento da espessura das camadas, ou seja, quanto mais espessas forem as camadas durante a impressão, menos resistentes à flexão serão as peças. Por outro lado, um maior número de camadas (com espessuras menores) contribui para o acréscimo na resistência à flexão. Esse aumento na resistência ocorre devido a quantidade menor de porosidades (OLIVEIRA, 2020).

4 MATERIAIS E METODOS

Nesta seção, são detalhados os materiais e métodos utilizados para a realização dos experimentos e análise dos dados. O foco principal é descrever os materiais empregados, a impressão das peças e os testes realizados, de forma que o estudo possa ser replicado por outros pesquisadores.

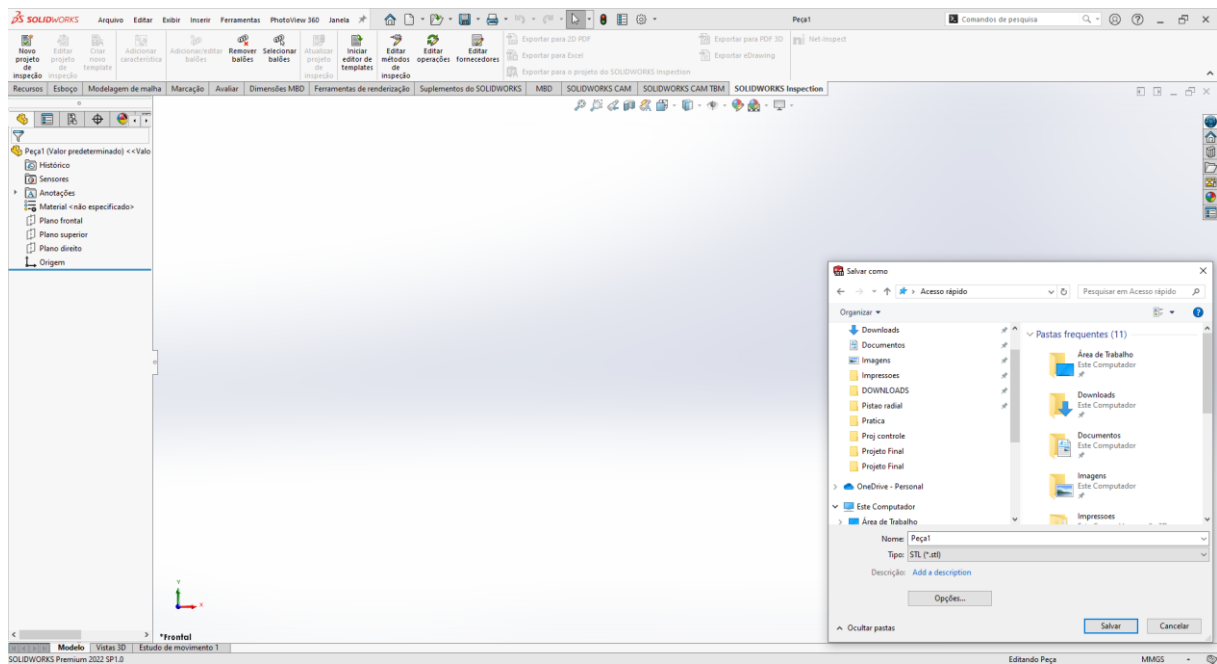
4.1 Materiais

Para a realização do presente trabalho é necessário a impressão de uma série de peças. Para a impressão das peças são necessários os materiais descritos na sequência.

4.1.1 Software de Desenho CAD

É mostrado na Figura 11 o Layout do software de desenho Solidworks 2022 versão estudantil.

Figura 11- Layout do Software de Desenho

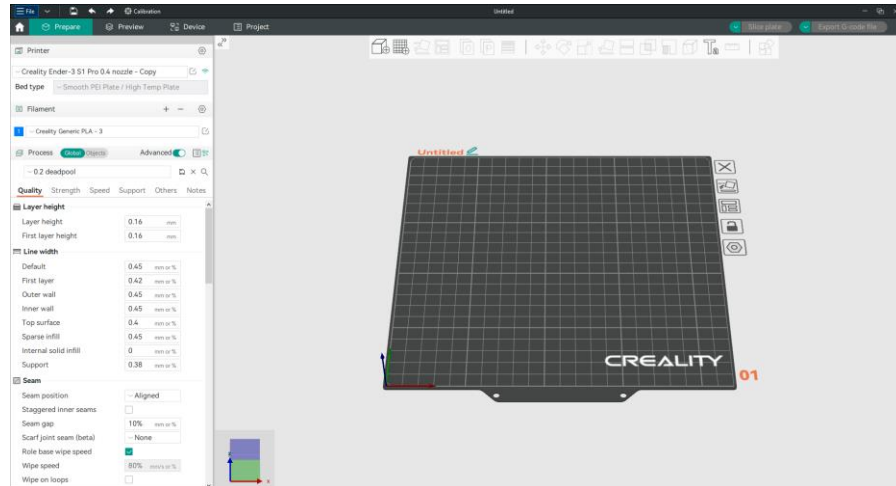


Fonte: O autor, 2024.

4.1.2 Software de Fatiamento

A interface do software OrcaSlicer pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Interface do software OrcaSlicer



Fonte: O autor, 2024.

4.1.3 Impressora 3D

A impressora é do modelo Ender-3 S1 PRO, marca Creality e sua tecnologia de modelagem é FDM. O modelo da impressora pode ser observado na Figura 13.

Figura 13– Impressora Creality Ender-3 S1 PRO



Fonte: O autor, 2024.

4.1.4 Filamento

O filamento é o PETG, da marca 3DPRIME, de 1 quilograma, na cor preta, conforme pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Filamento de PETG - 3DPRIME



Fonte: O autor, 2024.

4.1.5 Paquímetro

O Paquímetro é da marca Mitutoyo IPT54, com resolução 0,01mm como ilustrado na Figura 15.

Figura 15- Paquímetro Mitutoyo

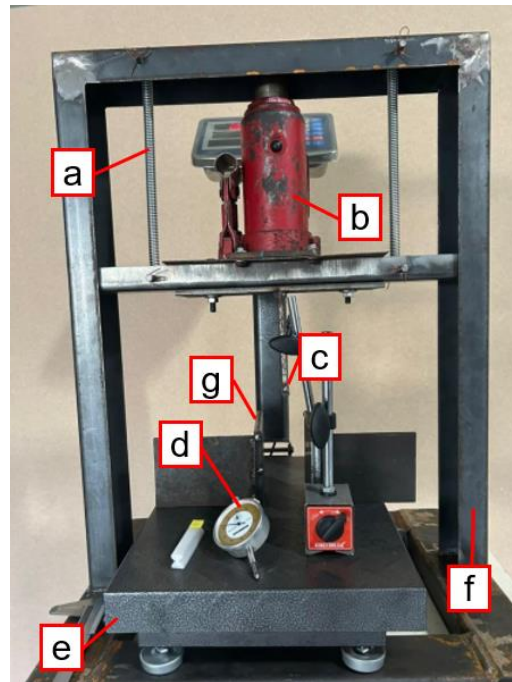


Fonte: O autor, 2024.

4.1.6 Aparato para Ensaio de Três Pontos

O aparato de ensaios, como pode ser observado na Figura 16, consiste em uma estrutura composta por sete perfis em U soldados (f), além de um perfil U móvel (c), um macaco hidráulico de 2T (b), duas molas de tração (a), dois apoios para a peça (g), uma balança modelo supercrown com variação de 0 a 150 Kg (e), e um relógio comparador digimes analógico com resolução de 0,01 mm (d).

Figura 16 – Aparato para ensaio de Três Pontos



Fonte: O autor, 2024.

4.2 Métodos

Em termos gerais, essa pesquisa se classifica, em seus objetivos, como uma pesquisa exploratória, visto que tem por objetivo o preenchimento de lacunas existentes na literatura na abordagem do tema proposto. Quanto à abordagem, classifica-se como qualitativa, onde a análise concentra-se em aspectos como padrões, variações e relações entre os conjuntos de dados. E quanto à natureza, classifica-se como aplicada, pois ela objetiva a aquisição de novos conhecimentos, com objetivos de aplicações práticas (GIL, 2010).

O processo inicia-se com a modelagem das peças no software Solidworks 2022, versão estudantil. Após a modelagem, o projeto é exportado no formato STL. Em seguida, o arquivo é importado no software de fatiamento Orcaslice, onde os parâmetros de impressão são configurados. Nesta etapa, define-se a velocidade de impressão em 40 mm/s, a altura da camada em 2 mm, preenchimento triangular com 70% de densidade e é definida as 5 camadas externas com as variações de 0° e 90°. Com a parametrização concluída, os dados são transferidos para a impressora 3D, previamente carregada com o material PETG, e inicia-se a impressão das 5 peças por variação.

Após a conclusão da impressão na impressora Ender 3 S1 PRO, realiza-se a conferência dimensional das peças utilizando um paquímetro Mitutoyo IPT54, a fim de garantir que as dimensões estão corretas. As peças são então etiquetadas em 4 grupos e individual de 1 a 5 para melhor organização e preparo para o ensaio. No próximo passo, cada peça é posicionada individualmente no aparato de ensaio. Antes de iniciar o teste, aplica-se uma carga inicial de 1 kg, e então a balança é zerada e o relógio comparador é ajustado corretamente (zerado e posicionado).

Para garantir maior precisão na coleta de dados durante o ensaio, utilizam-se dois smartphones para gravar as leituras da balança e do relógio comparador. Após a coleta dos dados, estes são organizados em uma planilha, com os dados do ensaio como carga aplicada em quilogramas e deslocamento em milímetros e são calculados a média, desvio padrão e tensão máxima.

5 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento do trabalho, onde inicialmente aborda-se novamente sobre a norma o que rege todos os ensaios realizados, na sequência aborda-se sobre a elaboração das peças a serem impressas utilizando equações citadas anteriormente, os métodos de impressão das peças, e por fim, os procedimentos necessários para a realização do ensaio de flexão de três pontos.

5.1 Norma ISO 178 (2019)

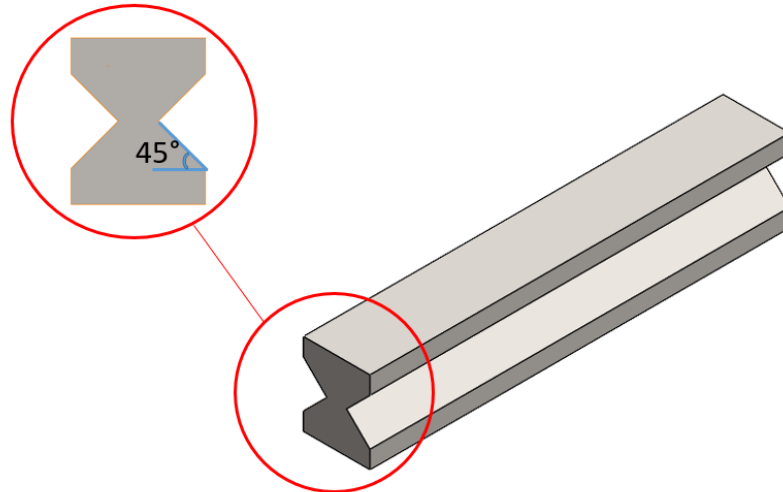
Alguns itens da norma foram utilizados, como: cutelo e os apoios com superfície de raio de 5 mm, distância de 64mm entre os batentes e quantidade de 5 peças para cada variação.

5.2 Elaboração das Peças a Serem Ensaadas

A intenção é encontrar uma geometria otimizada para resistir à flexão, levando à escolha da viga I, conhecida por sua alta capacidade de suportar esse tipo de esforço. No entanto, essa geometria não se mostrou eficiente para impressão, pois observou-se que necessitaria de suportes, resultando em desperdício de material e em pontos de fragilidade onde o suporte se encontra com a peça. Por isso,

desenvolveu-se uma nova geometria em forma de ampulheta, que mantém semelhanças com a viga I, mas com uma inclinação máxima de 45 graus que dispensa suportes, como é possível observar na Figura 17.

Figura 17– Viga em geometria de ampulheta

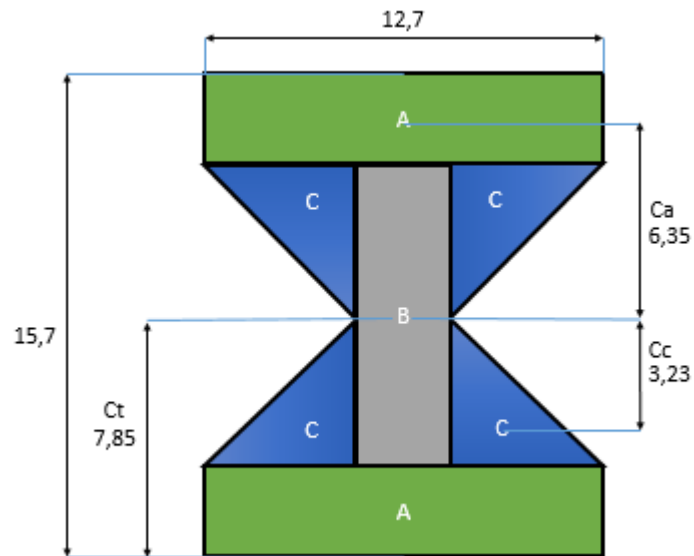


Fonte: O autor, 2024.

Para ensaiar a peça, é crucial determinar a resistência necessária para que ela se deforme ou se rompa, considerando que o aparato disponível suporta somente 1500N. Alcançou-se esse objetivo por meio do cálculo da tensão máxima, que utiliza a Equação 1 e do ajuste das dimensões da peça. Para calcular a tensão máxima é necessário calcular a inércia da peça (I), o momento (M) e a distância da base até o centro da peça (C).

É possível observar na Figura 18, as dimensões totais como: base de 12,7mm, altura de 15,7mm, C_t 7,85mm (distância da base da peça até o centro), C_c 3,23 (distância do centro do triângulo C até o centro da peça) e C_a 6,35mm (distância do centro do retângulo A até o centro da peça).

Figura 18 – Vista frontal da peça em formato de ampulheta

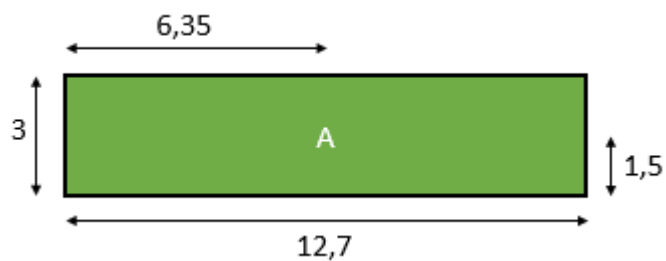


Fonte: O autor, 2024.

O formato de ampulheta é segmentado em várias formas geométricas simples, como retângulos e triângulos, para que seja possível utilizar as equações 5 e 6, conforme representado a seguir nas Figuras 19, 20 e 21:

Os retângulos representados por A, podem ser observados pela Figura 19, que mostra as dimensões em milímetros.

Figura 19 – Segmento da peça em formato de retângulo (A)



Fonte: O autor, 2024.

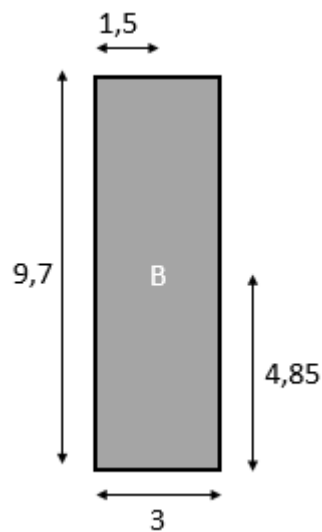
As dimensões representadas na Figura 19, são necessárias para aplicar na equação 5, para calcular a inércia do retângulo, com os dados mostrados a seguir:

$$B = 12,7\text{mm}; h = 3\text{mm}; A = 38,1\text{mm}; E=Ca= 6,35\text{mm}$$

A partir desse cálculo, pode-se observar que a Inercia do retângulo A é igual a $1564,86 \text{ mm}^4$ e multiplicando pelas quantidades de retângulos iguais, tem-se: $2 \times 1564,86 = 3129,72 \text{ mm}^4$

O retângulo representado por B, pode ser observado pela Figura 20, que mostra as dimensões em milímetros.

Figura 20 – Segmento da peça em formato de retângulo (B)



Fonte: O autor, 2024.

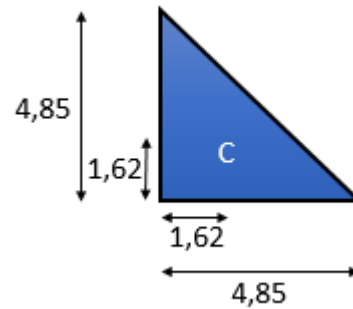
As dimensões representadas na Figura 20, são necessárias para aplicar na equação 5, para calcular a inércia do retângulo, com os dados mostrados a seguir:

$$B = 3\text{mm}; h = 9,7\text{mm}; A = 29,1\text{mm}; E=C= 0$$

A partir desse cálculo, pode-se observar que a Inercia do retângulo B é igual a $228,17 \text{ mm}^4$, não é necessária a multiplicação pois só possui um retângulo com essa geometria.

O triângulo representado pela letra C, pode ser observado pela Figura 21, que mostra as dimensões em milímetros.

Figura 21– Segmento da peça em formato de triângulo (C)



Fonte: O autor, 2024.

As dimensões representadas na Figura 21, são necessárias para aplicar na equação 6, para calcular a inércia do triângulo, com os dados mostrados a seguir:

$$B = 4,85\text{mm}; h = 4,85\text{mm}; A = 11,76 \text{ mm}; E=Cc = 3,23\text{mm}$$

A partir desse cálculo, pode-se observar que a Inércia do triângulo C é igual a $138,1 \text{ mm}^4$. Multiplicando pelas quantidades de triângulos iguais, tem-se: $4 \times 138,1 = 552,4 \text{ mm}^4$.

Com as inércias dos retângulos e dos triângulos calculadas é possível fazer o somatório das mesmas para encontrar a inércia total, que resultou em $3910,29 \text{ mm}^4$.

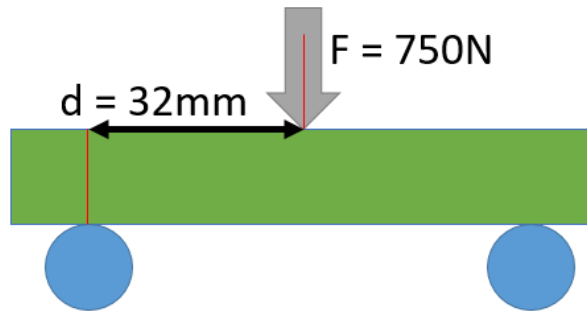
Em conformidade, no software Solidworks (versão estudantil) a inércia total é $3911,20$. Comparando a inércia feita com cálculos manuais e pelo software, pode-se ter certeza do valor calculado, devido à sua semelhança.

Para calcular o momento (M), é preciso utilizar a Equação 2, onde F é a força aplicada (será utilizada a força teórica da metade da capacidade que o aparato para ensaio pode registrar, sendo 750N), d é a distância da força aplicada até onde ela está apoiada, como é possível observar na Figura 22.

$$F = 750 \text{ N}, d = 32\text{mm}$$

Realizando o cálculo, encontrou-se o momento (M) de 24000 N.mm .

Figura 22– Demonstração dos dados da equação 2.



Fonte: O autor, 2024.

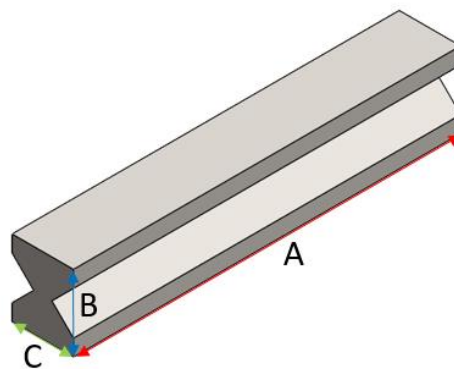
Após encontradas todas as incógnitas para calcular a tensão máxima é possível aplicar na equação 1, com os dados mostrados a seguir:

$$M = 24000 \text{ N.mm}; C_t = 7,85 \text{ mm}; I = 3910,29 \text{ mm}^4$$

Com isso, foi obtido o resultado de tensão máxima de 48,18 MPa.

A dimensão da peça a ser ensaiada ficou conforme a Figura 23, onde A é 80 mm, C é 12,7 mm e B é 15,7 mm.

Figura 23 – Peça a ser ensaiada



Fonte: O autor, 2024.

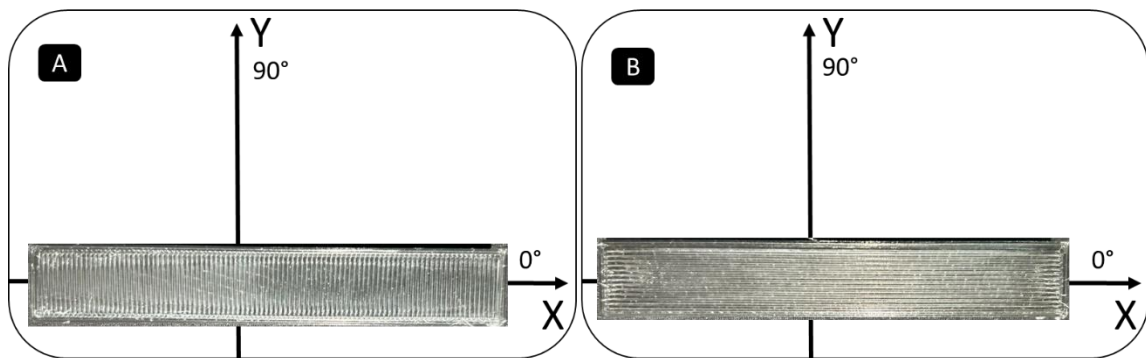
5.3 Impressão das Peças

São impressas 5 peças de cada variação, totalizando 20 peças a serem ensaiadas, com as dimensões definidas, realizou-se o modelamento no software SolidWorks, versão estudantil, e em seguida foi exportado no formato STL. Com o

arquivo no formato STL, foi possível iniciar o processo de fatiamento, onde utilizou-se o software Orcalise, para configurar os parâmetros de fatiamento.

Deu-se o nome para cada orientação de camadas considerando o plano cartesiano XY, quando as linhas de impressão superiores estão paralelas com o eixo X serão consideradas 0 graus e quando estiverem paralelas com o eixo Y serão consideradas 90 graus, como é possível visualizar na figura 24, A com 90 graus e B com 0 graus.

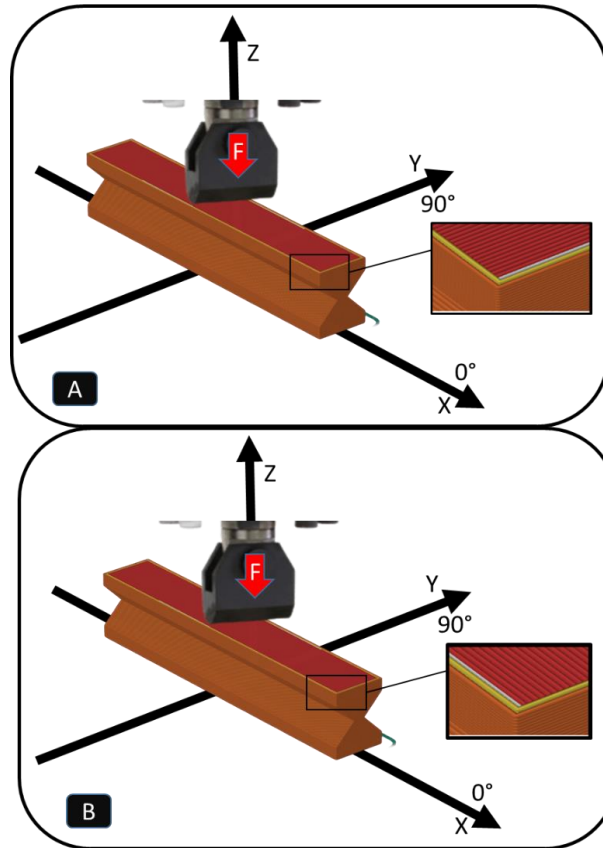
Figura 24 – Orientação das camadas



Fonte: O autor, 2024.

Para a impressão é definido 5 camadas de 0,2 milímetros cada, superior e inferior com orientações alternadas de 0 e 90 graus com percentual de preenchimento interno de 70% e geometria triangular. Essa configuração proporcionou diferentes variações das peças impressas. Os detalhes dessas variações, estão listados na Tabela 3 e visualmente disponível na Figura 25, onde pode-se observar que (A) representa a configuração de 90° e está paralelo ao cutelo e (B) que representa a configuração de 0° perpendicular ao punção.

Figura 25 – Representação das Peças



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 3 – Parâmetros de camadas externas das peças, onde os valores são representados em graus de angulação.

Superfície Superior	Superfície Inferior
0°	90°
0°	0°
90°	0°
90°	90°

Fonte: O autor, 2024.

Os parâmetros foram configurados segundo o “guia completo sobre impressão 3D com PETG”, e alguns desses parâmetros foram mantidos fixos, como é possível observar na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros fixos utilizados na impressão

Parâmetro	Ajustes
Número de perímetros	5
Velocidade de impressão	40 mm/s
Temperatura de extrusão	230 °C
Temperatura da mesa aquecida	85 °C
Altura de camada	0,2mm
Percentual de preenchimento	70%
Preenchimento	Triangular

Fonte: O autor, 2024.

5.4 Ensaio de Flexão

Após a impressão das peças, identificou-se as mesmas para o ensaio. Primeiramente colocam-se etiquetas com a identificação de 1 a 4, em conjuntos de 5, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Identificação das Peças.

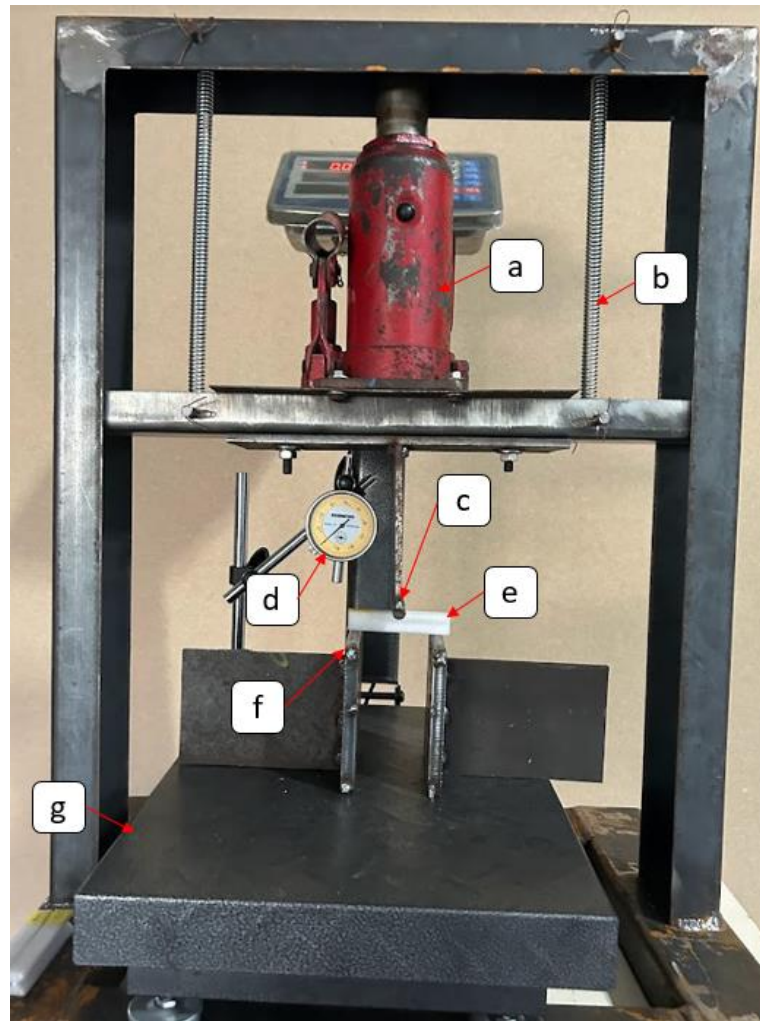
Identificação	Ângulo de impressão	Quantidade
1	0°/0°	5
2	0°/90°	5
3	90°/0°	5
4	90°/90°	5

Fonte: O autor, 2024.

Para a realização desse ensaio a peça é apoiada sobre dois batentes a uma distância de 64 mm. O cutelo é carregado de maneira crescente, que fica situado na metade da distância entre os apoios. O cutelo apresenta superfícies cilíndricas com raio no valor de $5,0 \pm 0,1$ mm segundo norma ISO 178 (2019).

A Figura 26 ilustra de maneira prática como ocorre o ensaio de flexão de três pontos. Sendo (a) macaco-hidráulico, (b) mola de tração, (c) punção, (d) relógio comparador, (e) peça a ser ensaiado, (f) batente, (g) balança.

Figura 26 – Aparato para o ensaio de três pontos.



Fonte: O autor, 2024.

Antes de iniciar o ensaio de flexão, é realizada uma conferência dimensional das peças com um paquímetro Mitutoyo IP54 para garantir que foram impressos nas dimensões desejadas.

O projeto do aparato foi desenvolvido pelo autor deste trabalho e foi fabricado no laboratório de fabricação do IFRS – Campus Erechim. Este aparato é caracterizado como não normalizado, sendo uma adaptação necessária devido à indisponibilidade da máquina de ensaios normalizada.

Inicialmente posicionou-se os batentes de forma precisa utilizando um paquímetro, garantindo um distanciamento simétrico em relação ao punção. Em seguida, posicionou-se dois smartphones para capturar os dados do ensaio. No primeiro smartphone é possível observar o visor da balança, permitindo a visualização do peso aplicado, enquanto o segundo smartphone registra o relógio comparador,

possibilitando a medição do deslocamento em milímetros da peça. A peça foi então posicionada conforme ilustrado na Figura 26, apresentada anteriormente.

Após o posicionamento adequado de todos os componentes, o ensaio é iniciado. O macaco hidráulico é acionado manualmente, aplicando primeiro uma pré-carga de 1 kg, seguida de um deslocamento lento e constante do punção em direção à peça. Durante o processo, a balança monitora a carga aplicada em quilograma, e o relógio comparador monitora o deslocamento em milímetros. O ensaio prossegue até o rompimento das peças.

Após os ensaios, os vídeos gravados pelos dois smartphones são revisados para realizar a coleta de dados. Com os dados obtidos, é elaborada uma planilha, onde pode ser observada no Apêndice A, que permitiu o registro dos dados de carga aplicada e deslocamento. A partir dos dados se tornou possível calcular a força em Newton e determinar a tensão máxima em MPa. Com todos os dados registrados no ensaio calculou-se o desvio padrão e a média.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem como propósito apresentar os resultados obtidos a partir das peças impressas por meio da impressão 3D feita a partir da tecnologia FDM com o material PETG. Tais peças foram fabricadas especialmente para o experimento de flexão de três pontos, que foi realizado em um aparato desenvolvido no IFRS, que funcionou de forma semelhante a um ensaio, mas não seguiu estritamente a norma. O experimento foi realizado parcialmente segundo a Norma ISO 178, contemplando os seguintes quesitos como, o diâmetro do cutelo, diâmetro dos batentes, posição da peça a ser ensaiada. Além disso, serão apresentados e discutidos os dados obtidos por meio do aparato utilizado nos ensaios de flexão de três pontos, apresentando uma análise detalhada dos resultados obtidos.

6.1 Aparato adaptado para o ensaio de flexão

Utilizou-se o aparato de maneira eficaz, permitindo a realização de todos os ensaios nas 20 peças e permitiu registrar a carga aplicada juntamente com o deslocamento.

Figura 27 – Aparato para o ensaio de três pontos.



Fonte: O autor, 2024.

6.2 Peças Impressas

Na figura 28 pode ser visualizada uma das peças impressas para o ensaio de três pontos.

Figura 28 – Peça impressa.



Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 29 é possível ver as diferentes orientações das camadas externas impressas, onde A é a orientação de 90° e B de 0°, sendo o preenchimento de 70% internamente.

Figura 29 – Orientações das camadas impressas



Fonte: O autor, 2024.

6.3 Ensaio de Flexão de Três Pontos

A Tabela 6 indica a média dos dados colhidos diretamente do painel da balança e do relógio comparador nos ensaios, onde com esses dados realizou-se o cálculo para encontrar a média de tensão máxima e desvio padrão.

Tabela 06 – Dados do ensaio.

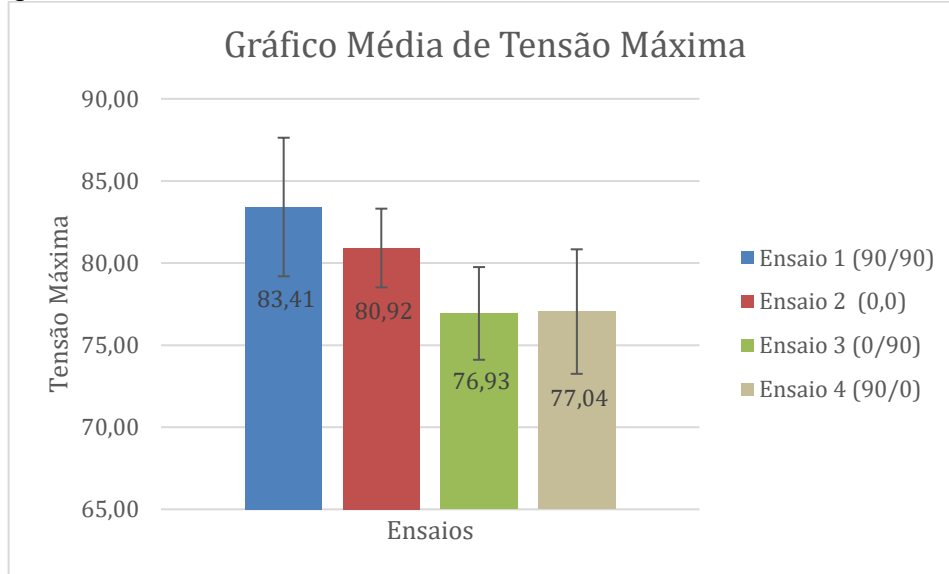
Ensaio	Média de carga aplicada (kg)	Média de Deslocamento (mm)
1 (90°/90°)	129,84	4,6
2 (0°/0°)	125,96	5,42
3 (0°/90°)	119,75	4,81
4 (90°/0°)	119,93	4,04

Fonte: O autor, 2024.

6.4 Discussão acerca dos resultados dos ensaios

A Figura 30 com o Gráfico 01 indica a média de tensão máxima obtida nos experimentos. É possível perceber que as orientações de camadas causaram influência. O experimento que obteve maior resistência a flexão foi com a peça com angulação das camadas externas de 90°/90°, obtendo 83,41 MPa com um desvio padrão médio de $\pm 4,22$. Os experimentos com a variação de 0°/90° e 90°/0° se comportaram de forma semelhante obtendo respectivamente 76,93 e 77,04 MPa média de tensão máxima e a média de desvio padrão de $\pm 2,82$ e $\pm 3,79$. Já o experimento com angulação de camadas de 0°/0° obteve 80,92 MPa de média de tensão máxima e com média de desvio padrão de $\pm 2,4$. Comparando o ensaio 3 que obteve a menor média de tensão máxima com o ensaio 1 que obteve a maior, observa-se um aumento de 8,42%.

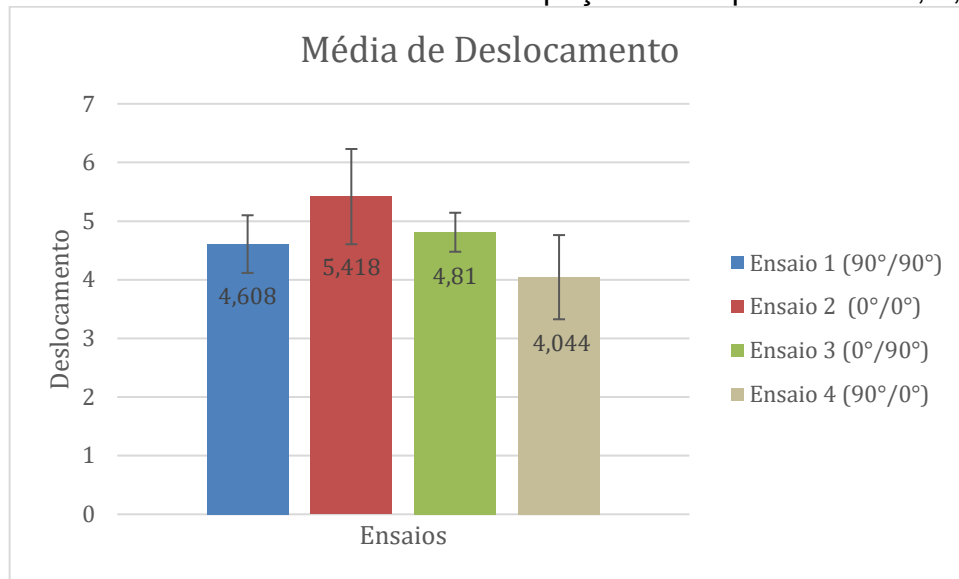
Figura 30 - Gráfico 01 - Tensão Máxima obtida nos ensaios 1, 2, 3 e 4.



Fonte: O autor, 2024.

A Figura 31 com o Gráfico 02 indica a média de deslocamento das peças, que se refere ao quanto as peças fletiram. Analisando o gráfico, observa-se que o ensaio 2 com as orientações de camada de 0°/0° foram as que indicaram maior deslocamento chegando a 5,4 mm com uma média de desvio padrão de $\pm 0,81$. Com o menor deslocamento com 4 mm e média de desvio padrão de $\pm 0,72$, tem-se o ensaio 4 com a orientação de camadas de 90°/0°. Os experimentos 1 e 3 apresentaram respectivamente, 4,6 e 4,8 mm de deslocamento, valores bem próximos, onde os dois tem a camada de 90 graus na sua parte inferior. Comparando o ensaio 4, que apresentou o menor deslocamento, com o ensaio 2, que apresentou o maior deslocamento, observou-se um aumento de 33,98%.

Figura 31 - Gráfico 02 - Deslocamento das peças nos experimentos 1, 2, 3 e 4.



Fonte: O autor, 2024.

6.4.1 Comparação de Resistência à Flexão

No presente estudo, a peça com orientação das camadas de 90°/90° obteve a maior tensão, alcançando 83,41 MPa. De fato, a orientação das camadas tem um impacto significativo na resistência mecânica, com camadas orientadas paralelas ao eixo de carga apresentando maior resistência devido à distribuição mais uniforme das tensões. Tal aspecto está em consonância os resultados dos ensaios, em que a orientação de 90°/90° obteve melhor desempenho comparado a outras orientações.

6.4.2 Efeitos da Orientação das Camadas

Peças com orientações de camadas de 0°/90° e 90°/0° apresentaram resultados semelhantes em termos de tensão, 76,93 MPa e 77,04 MPa, respectivamente. Isso pode ser explicado pela teoria de compostos laminados, em que a alternância das direções das fibras (ou camadas, no caso do FDM) contribui para um equilíbrio das propriedades mecânicas em diferentes direções. A orientação cruzada das camadas pode melhorar a tenacidade e reduzir a propagação de trincas, corroborando com os resultados do presente trabalho que mostram desempenhos similares para orientações de 0°/90° e 90°/0°.

6.4.3 Análise do Deslocamento

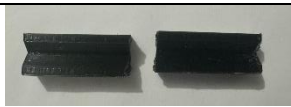


Em termos de deslocamento, a orientação $0^\circ/0^\circ$ apresentou o maior deslocamento, com uma média de 5,4 mm. Isso está de acordo com os estudos de Tymrak *et al.* (2014), que apontam que camadas alinhadas com a direção de carga podem resultar em maior flexibilidade, aumentando o deslocamento sob carga. Por outro lado, a orientação $90^\circ/0^\circ$ obteve o menor deslocamento, com 4 mm, o que pode ser atribuído à maior rigidez proporcionada pela orientação perpendicular das camadas externas (Tymrak *et al.*, 2014).

6.4.4 Análise das fraturas

As fraturas observadas nas peças impressas em 3D com PETG durante os ensaios de flexão de três pontos trazem informações valiosas sobre a integridade estrutural e os pontos de falha dos materiais.

Peças com orientação de $90^\circ/90^\circ$ e $0^\circ/0^\circ$ apresentaram fraturas com maior repetitividade, onde as de $90^\circ/90^\circ$ tiveram uma fratura central alinhada com o punção e as $0^\circ/0^\circ$ tiveram fraturas com uma delaminação na linha neutra. Já as peças com orientação $0^\circ/90^\circ$ e $90^\circ/0^\circ$ tiveram fraturas aleatórias, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Fratura dos corpos de prova.

			
$90^\circ/90^\circ$	4	1	0
$0^\circ/0^\circ$	1	4	0
$0^\circ/90^\circ$	1	1	3
$90^\circ/0^\circ$	1	2	2

Fonte: O autor, 2024.

É importante notar que existem limitações. A precisão na orientação das camadas e a homogeneidade do material podem variar ligeiramente entre diferentes máquinas e configurações de impressão. Portanto, replicar os resultados em diferentes ambientes de fabricação pode apresentar variações.

7 CONCLUSÃO

Com o presente estudo, foi possível aprofundar o conhecimento sobre o processo de manufatura aditiva, com foco na impressão 3D e no uso do material PETG. Exploramos de maneira detalhada os parâmetros de impressão, com ênfase especial na orientação das camadas, que se mostrou um fator determinante nas propriedades mecânicas das peças impressas. A adaptação de um aparato específico permitiu a realização de ensaios de flexão de maneira padronizada, garantindo que todas as peças fossem submetidas às mesmas condições de teste.

Apesar das limitações do aparato, foi necessário ajustar o dimensionamento das peças para assegurar que os ensaios fossem realizados dentro da faixa de leitura adequada, exigindo um estudo cuidadoso da geometria e da inércia das peças. Após a realização dos testes, confirmou-se que o dimensionamento estava correto, pois todas as peças permaneceram dentro da faixa de leitura do aparato. A impressão das peças foi realizada com sucesso, variando as orientações das camadas externas entre 90° e 0° . No total, foram ensaiadas quatro variações, com cinco peças em cada grupo, permitindo a obtenção de dados sobre a tensão máxima e o deslocamento. Esses resultados mostram a influência da orientação das camadas na resistência mecânica das peças impressas, em termos de flexão.

A orientação das camadas mostrou-se um fator importante para determinar a resistência a flexão das peças, com a orientação de $90^\circ/90^\circ$ proporcionando a maior resistência à flexão. Esses aspectos são particularmente relevantes para aplicações que exigem uma escolha mais sutil da orientação das camadas.

A análise do deslocamento das peças reforça a importância da orientação das camadas na performance mecânica. Peças com orientação $0^\circ/0^\circ$ apresentaram maior flexibilidade, resultando em maior deslocamento, o que pode ser desejável em aplicações onde a deformação controlada é necessária. Esses resultados estão alinhados diretamente a orientação das camadas e a flexibilidade das peças impressas, sugerindo que ajustes na orientação podem ser usados para customizar as propriedades mecânicas das peças para diferentes aplicações.

As descobertas sobre a orientação das camadas têm implicações práticas importantes. Por exemplo, peças que necessitam de resistência à flexão, como componentes estruturais, podem se beneficiar de orientações de $90^\circ/90^\circ$. Em

contraste, para aplicações onde a flexibilidade é desejada, uma orientação de $0^\circ/0^\circ$ pode ser mais adequada.

8 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os tópicos apresentados na sequencia expõem algumas sugestões para melhoria e desenvolvimento

- Desenvolver um sistema de deslocamento constante e automatizado, para melhorar a precisão da velocidade de ensaio.

- Realizar os mesmos ensaios com outros materiais como PLA ou ABS.

- Realizar o ensaio em uma máquina normalizada utilizando as peças criadas no trabalho.

- Realizar o mesmo ensaio com a variação de outros parâmetros como, tipo de preenchimento, densidade de preenchimento e número de camadas externas.

- Testar outras angulações para orientações de camadas.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, E. A; DA SILVA, L. J; D'OLIVEIRA, A. S. **Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade.** Soldagem & Inspeção, Revista Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 19, n. 2, p.190-198, 9 jul. 2014.

ALL3DP. **3D Slicer Settings for Beginners – 8 Things You Need to Know.** 2019. Disponível em: <<https://m.all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>>. Acesso em: 25 de mar 2024.

ALVES, P. H. T. F. **Influência do padrão e densidade de preenchimento na resistência mecânica de amostras fabricadas em PETG via deposição de material fundido.** 2022. 82 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ARAUJO, G. G. **A Impressão 3D e os Parâmetros que Influenciam o Produto Final.** 62 p. Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2016.

ATAKO G., KAM M., KOC, H. **A three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filament: A statistical investigation.** Journal of Material Research and Technology. v. 18, p. 1542-1554, mar. 2022

BELLINI, A.; GÜÇERI, S. **Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling.** Rapid Prototyping Journal, v. 9, n. 4, p. 252-264, 2003.

BEJO, F. G. *et al.* **Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços SAE 1045 e SAE 1020, em diferentes condições metalúrgicas, através dos ensaios de tração unidirecional e flexão em três pontos.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 26, n. 03, 2021

BESKO, M; BILYK, C; SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia: Gestão, Tecnologia e Inovação, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 9-18, Setembro/Dezembro 2017.

BOLLELI, R. M; LEBRÃO, G. W. **Avaliação das propriedades de material produzido por FDM em impressora 3d**, In: 19 CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 29 nov. 2019, São Paulo.

BOURELL, D.L.; LEU, M.C.; ROSEN, D.W. **Roadmap for Additive Manufacturing**, University of Texas at Austin, Austin TX, 2009.

CAPUCHO, W *et al.* **A aplicação da manufatura aditiva na medicina 4.0 para produção de próteses biomecânicas**. In: XVI Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, 2021.

CASAGRANDE, C.A.; JOCHEM, L.F. **LAB - Ciência, tecnologia e resistência dos materiais**. Indaial: UNIASSELVI, 2019. 198 p.

CASTANHEIRA, A. T. G, **Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico**. 2016, 60 p. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

CHACÓN, J. M.; CAMPO, M.; ELIPE, H. G. **Influence of the printing parameters on the mechanical properties of parts manufactured by fused deposition modeling (FDM): Experimental work and modeling**. Materials, v. 10, n. 12, p. 1334, 2017.

COSTA, J. C. G. **Estudo de compósitos de estrutura sanduíche utilizando sisal-epóxi e núcleo honeycomb a base de petg e pla feito em impressora 3D**. 2023. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.

CRUMP, S.S. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**. US Patent 5,121,329, 1992.

DAWOOD, A; MARTI MARTI, B; SAURET-JACKSON, V. **3D printing in dentistry**. British Dental Journal, n. 219, 11 dez. 2015, p. 521-529.

DE ANDRADE, Cláudio José Montenegro. **Efeitos da alteração dimensional em corpos de prova de compósitos PRFV submetidos ao ensaio de flexão conforme a norma ASTM D790**. 2021. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2021.

DEY, A., & YODO, N. (2019). **A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics**. Manufacturing and materials processing, Fargo-USA, 29 de julho de 2019, n. 3, p. 64.

DOMINGO-ESPIN, M.; JURADO, C.; VIDAL, D. **Influence of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing**. 3D Printing and Additive Manufacturing, v. 2, n. 2, p. 70-76, 2015.

FIGUEIREDO, B. B; CESAR, F. I. G. **Um estudo da utilização da Impressora 3D na Engenharia e na Medicina**. RECISATEC – REVISTA CIENTÍFICA SAÚDE E TECNOLOGIA, v. 2, n. 1, 2022.

GERE, J. M.; TIMOSHENKO, S. P. **Mechanics of Materials**. 5ª ed. Boston: PWS-Kent, 1999.

GOHAR, S; ALI, A; HUSSAIN, G; AHMAD, H. **Mechanical performance of honeycomb sandwich structures built by FDM printing technique**. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1 mar. 2021. p. 1-19.

GONZÁLEZ, R. A; GONZÁLEZ, R. I. **Study of bending test of specimens obtained through fdm processes of additive manufacturing**. Procedia Manufacturing, 15 out. 2019, v. 41, p. 859-866.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**, 3. ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, INC. 2007.

GUAN, R.; SMITH, D. **Influence of Infill Parameters on the Tensile Mechanical Properties of 3D Printed Parts**. Journal of Emerging Investigators, vol.,2, pp 1-5, 17 jul. 2020.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 7. Ed, 2010. 637p.

HU, Q.; LUO, M.; JIANG, S. **Influence of infill density and pattern on mechanical properties of 3D printed PLA**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 5, p. 8258-8268, 2020.

KUZNETSOV V, E *et al.* **Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process**. Jornal polymers, Basileia, Ed. 10, v. 3, 2018.

KHAN, I.; Shaikh, A. A. **A review of FDM Bases Parts to Act as Rapid Tooling**. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Gujarat, Ed. 11, V. 4, p. 59-65, 2014.

MA, Y.; ZHANG, J.; HUANG, Y. **Recycling of poly(ethylene terephthalate): A review focusing on mechanical recycling of PET into PET**. Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews, v. 57, n. 4, p. 411-433, 2017.

MICALLEF, J. **Iniciando o design para impressão 3D**. California: Apress Berkeley, CA, 1. Ed, 2015. 409p.

MIRANDA M. M.; DEL VECHIO, G. H. **IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências**. Revista Interface Tecnológica, v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020.

MODEEN, T. **The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture**. Automation in Construction, v. 14, p. 215-224, 2005.

PRATES, P. R.; VERDÉRIO JÚNIOR, S. A.; CAMINAGA, C. **Desenvolvimento de uma metodologia numérica para estudo do ensaio de flexão em três pontos: uma abordagem técnica e didática para o ensino aplicado de engenharia mecânica.** Revista de Ensino de Engenharia, [s. l.], v. 42, p. p436-453, 2023. DOI 10.37702/REE2236-0158. Disponível em: <http://revista.educacao.ws/revista/index.php/abenge/article/view/2156>. Acesso em: 04 abr. 2024.

OLIVEIRA, Clara Conceição. **Caracterização de peças fabricadas com impressão 3D e análise da resolução de duas impressoras.** 2020. 126 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Industrial e Engenharia Mecânica) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

PRINTIT3D. **Impressão 3D com PETG – Guia Completo.** Disponível em: <<https://www.printit3d.com.br/post/impress%C3%A3o-3d-com-petg-guia-completo>> Acesso em: 28 mar. 2024.

RODRÍGUEZ-PANES, A.; BAILESTRO, J.; FARRÉ-LADYCH, E. **Study of the mechanical properties of a 3D printed object.** Procedia Manufacturing, v. 13, p. 964-971, 2018.

SILVA, P. A. P. **Parametrização reológica do comportamento de blendas autorreparáveis durante o processo de impressão 3D.** Orientador: Rodrigo Lambert Oréfice. 2020. 175 p. Dissertação de Mestrado (Programa de PósGraduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SILVA, A. A. S. *et al.* **Ensaio de flexão de vigas metálicas.** Patos de Minas, v. 1. 2018.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. **Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement.** Journal of Advanced Research, Ranchi, Ed. 3, v. 1, 2012.

SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S. **Additive Manufacturing Innovations, Advances and Applications**. 1st Edition, Boca Raton, CRC Press, 2015. p.460

THOMAS, D. T. **The Development of Design Rules for Selective Laser Melting**. University of Wales, 2016.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. **A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling**. Rapid Prototyping Journal, v. 20, n. 3, p. 192-204, 2014.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. **Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions**. Materials & Design, v. 58, p. 242-246, 2014.

VALEAN, C *et al.* **Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens**. Procedia Structural Integrity, n. 26, 1 jun. 2020, p. 313-320.

VALENTE, Ricardo Lago. **Influência dos parâmetros de impressão 3d na resistência à flexão de corpos de prova impressos em ácido polilático (PLA) utilizando modelagem por fusão e deposição (FDM)**. 2022. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

WANG, Q.; WANG, C.; WANG, T. **Controllable low dielectric porous polyimide films templated by sílica microspheres: microstructure, formation mechanism, and properties**. Journal of colloid and interface Science, v. 389, n. 1, p. 99-105, 01 jan. 2013.

WILTGEN, F; LOPES, M. **Manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa**. Revista de Tecnologias, Ourinhos, v. 15, n. 1, p. 45-63, 11 out. 2022. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/425+Manufaturas+aditivas.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

WILTGEN, F., **Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico**. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF). São Carlos, 5 a 7 agosto, pp.1-5, 2019.

ZWICK & ROELLI, **ASTM D790 ensaio de flexão de 3 pontos em plásticos**. Disponível em: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/ensaio-de-flexao-de-3-pontos-astm-d790/#:~:text=A%20norma%20ASTM%20D790%20descreve,refor%C3%A7ada%20e%20materiais%20de%20isolamento> Acesso em: 27 mar. 2024.

3DLAB, **Saiba escolher o melhor sentido de impressão das peças 3D**, Disponível em: <https://3dlab.com.br/sentido-de-impressao-das-pecas-3d/>. Acesso: 31 mar. 2024.

3DLAB, **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**, Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso: 10 abr. 2024.

APÊNDICE A – Planilha de Coletas de Dados

Ensaio	Peso (KG)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Tensão Máxima (MPa)
Ensaio 1 (90°/90°)				
1	120,68	4,1	1206,8	77,53
2	138,88	4,68	1388,8	89,22
3	130,96	4,1	1309,6	84,13
4	130,98	5,1	1309,8	84,14
5	127,7	5,06	1277	82,04
Média	129,84	4,608	1298,4	83,41
Desvio Padrão	6,571925137	0,491853637	65,71925	4,220373435
Ensaio 2 (0°/0°)				
1	127,52	5,14	1275,2	81,92
2	123	5,7	1230	79,02
3	131,8	6,7	1318	84,67
4	123,28	4,7	1232,8	79,20
5	124,18	4,85	1241,8	79,77
Média	125,956	5,418	1259,56	80,92
Desvio Padrão	3,729997319	0,812169933	37,29997	2,396178612
Ensaio 3 (0°/90°)				
1	123,2	4,9	1232	79,14
2	125,58	4,85	1255,8	80,67
3	116	5,3	1160	74,52
4	118	4,5	1180	75,80
5	115,98	4,5	1159,8	74,51
Média	119,752	4,81	1197,52	76,93
Desvio Padrão	4,394009558	0,332415403	43,9401	2,822745119
Ensaio 4 (90°/0°)				
1	123,42	4	1234,2	79,29
2	118,32	2,86	1183,2	76,01
3	126,86	4,75	1268,6	81,50
4	119,86	4,41	1198,6	77,00
5	111,18	4,2	1111,8	71,42
Média	119,928	4,044	1199,28	77,04
Desvio Padrão	5,902636699	0,717725574	59,02637	3,791898654

Fonte: O autor, 2024.