



Alexandre Cancian

**RELAÇÃO DIÂMETRO DO BICO E SENTIDO DE IMPRESSÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA
ADITIVA COM FILAMENTO PLA**

Horizontina - RS

2023

Alexandre Cancian

**RELAÇÃO DIÂMETRO DO BICO E SENTIDO DE IMPRESSÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA
ADITIVA COM FILAMENTO PLA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Horizontina - RS

2023

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

“Relação diâmetro do bico e sentido de impressão sobre as propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva com filamento PLA”

Elaborada por:

Alexandre Cancian

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 15/12/2023

Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Fabrício Desbessel

FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Geovane Webler

FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este trabalho com saúde e forças para chegar até o final.

À minha namorada Caroline, que sempre esteve do meu lado, me dando todo apoio e cuidado, me motivando em todos os momentos difíceis, e me fazendo acreditar que seria possível, pela compreensão e paciência demonstrada durante o período.

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

Meu irmão Felipe, que sempre me apoiou e confiou em mim, por estar ao meu lado e por me fazer ter confiança nas minhas decisões, me mostrando admiração por tudo que consegui transmitir.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

(Ayrton Senna)

RESUMO

A impressão em 3D está entre as principais tecnologias emergentes no mundo, sendo sua utilização uma consequência de avanços tecnológicos, a agricultura e a tecnologia andam sempre em conjunto, a prototipagem 3D pode ser utilizada para produção equipamentos agrícolas e personalização de peças. Há, no mercado brasileiro uma demanda de peças para reposição de maquinários agrícolas, tendo em vista esse fato, o trabalho teve como objetivo identificar se a manufatura aditiva por extrusão, pode ser utilizada para a elaboração de peças agrícolas. Para iniciar a impressão das amostras, foram determinados alguns parâmetros que afetam as tolerâncias de dimensão e qualidade superficial das amostras. Os corpos de prova além de serem produzidos com diâmetro de furo do bico diferentes 0,4mm, 0,6 mm e 0,8 mm, foram fabricados com sentido de impressão diferentes. Foram realizados ensaios de tração, a coleta dos resultados foi realizada em uma máquina de ensaios modelo DL-30000 com auxílio do *software Tesc* versão 3.04 para a geração dos gráficos de forças. Análises dimensionais também foram realizadas. Este estudo possibilitou identificar que os corpos que apresentaram resistência máxima a tração, foram os corpos impressos com impressão 0,8 mm, sendo assim esse foi o filamento mais resistente para realizar a impressão das peças a serem substituídas na falta de peças agrícolas, principalmente os corpos de sentido de impressão longitudinal, que apresentam resistência de 82,7% maior que as impressas na transversal. Quando se trata de tensões de escoamento e tensões máximas que o material suporta, o sentido de impressão dos corpos de prova é favorável, tendo maior resistência o impresso na longitudinal. No entanto, o sentido do filamento também o tornou mais resistente, fazendo com que se rompa com maior carga quando exposto à tração.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Diâmetro de bico. Sentido de Impressão. Filamento PLA. Propriedades mecânicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da adoção de manufatura aditiva pela indústria em 2018	15
Figura 2 – Funcionamento da manufatura aditiva	16
Figura 3 – Funcionamento da tecnologia FDM.....	18
Figura 4 – Composição de esteroisômeros da mistura de PLA.....	21
Figura 5 – Peça original impressa com o material de suporte (à esquerda), e após a remoção (à direita)	25
Figura 6 – Representação esquemática do ensaio de tração	30
Figura 7 – Fluxo do trabalho.....	33
Figura 8 – Filamento Impressão 3d Voolt PLA Preto 1kg.....	34
Figura 9 – Desenho esquemático do sistema de impressão.....	35
Figura 10 – Desenho 2D projeto do corpo de prova, ESC 1:1	36
Figura 11 – Vista superior com corte no meio do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na longitudinal (a); Vista frontal do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na longitudinal (b).....	37
Figura 12 – Vista superior com corte no meio do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na transversal (c); Vista frontal do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na transversal (d)	37
Figura 13 – Máquina universal de ensaios, utilizada para coleta de dados	40
Figura 14 – Corpo de prova preso por garras do tipo pinça	41
Figura 15 – Medidas destacadas para comparação do controle dimensional.....	42
Figura 16 – Relação de Força x Deformação para filamento de impressão 0,4 mm.	43
Figura 17 – Relação de força x deformação para filamento de 0,6 mm	44
Figura 18 – Relação de força x deformação para filamento de 0,8 mm	45
Figura 19 – Comparação das medidas de análise dimensional realizado nos corpos de prova.	49
Figura 20 – Tensão de escoamento ES1 (kN), e tensão de escoamento ES2 (MPa)	50
Figura 21 – Gráfico de força máxima (kN) com representação dos CP e a média obtida através do sentido de impressão e diâmetro do bico de impressão.	51
Figura 22 – Força de ruptura FR (kN) e deformação da ruptura DR (mm).....	52
Figura 23 – Módulo de elasticidade (MPa).....	53
Figura 24 – Força máxima de tração (MPa).....	54

Figura 25 – Comparativo de resistência máxima a tração de acordo com sentido de impressão.....55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Passos de um processo de manufatura aditiva	17
Quadro 2 – Exemplos de materiais comerciais utilizados na manufatura aditiva	19
Quadro 3 – Características do material utilizado.....	34
Quadro 4 – Parâmetros de impressão	36
Quadro 5 – Identificação de numeração dos corpos de prova	38
Quadro 6 – Corpos de prova pós ensaio.....	46
Quadro 7 – Medidas dos corpos de prova com base no sentido de impressão e filamento.....	47
Quadro 8 – Resultados coletados nos ensaios de tração	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA	11
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.4	JUSTIFICATIVA	13
1.5	OBJETIVOS	14
1.5.1	Objetivo Geral	14
1.5.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	15
2.2	UTILIZAÇÃO DE PLA NA MANUFATURA ADITIVA.....	19
2.3	PARÂMETROS DE PROCESSOS RELACIONADOS A MANUFATURA ADITIVA	22
2.4	INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE IMPRESSÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	23
2.5	EFEITOS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO BICO DE IMPRESSÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	25
2.6	DEFEITOS DE IMPRESSÃO	27
2.7	ENSAIOS	28
2.8	ANÁLISE DIMENSIONAL.....	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	MATERIAL	33
3.2	PARÂMETROS DE PROCESSO	34
3.3	ENSAIOS	39
3.3.1	Propriedades mecânicas	39
3.3.2	Análise dimensional	41
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	43
4.2	ANÁLISE DIMENSIONAL.....	47
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D já existe há algum tempo, mas foi somente no final da década de 1980 e início da década de 1990 que ela ganhou popularidade e se tornou comercialmente viável de uma representação matemática de qualquer objeto tridimensional envolve principalmente a criação de formas, objetos, personagens e cenas usando *software* adaptado para cada situação (VOLPATO, 2017). Ao longo das três últimas décadas, a tecnologia de impressão 3D evoluiu consideravelmente e passou a fazer parte de diversos setores da indústria, da ciência e da vida de milhares de indivíduos. Há um enorme potencial para o uso desta tecnologia, cujos produtos ou objetos resultantes são cada vez mais complexos, baratos e rápidos de serem produzidos (MORANDINI; DEL VECHIO, 2020).

Segundo Azadi *et al.* (2021)

...A manufatura aditiva é o nome da produção industrial para Impressão 3D, um processo controlado por computador que cria objetos tridimensionais depositando materiais por camada. Fundindo a fabricação de filamentos, também conhecida como modelagem por deposição fundida, é a técnica de manufatura aditiva mais presente. As aplicações estruturais da modelagem da deposição fundida são um tanto limitadas pelos materiais poliméricos, que podem ser processados. A impressão de deposição fundida envolve um número extremamente grande de processos e parâmetros, todos os quais têm o potencial de impactar as propriedades mecânicas da peça acabada, como ácido polilático (PLA) (AZADI *et al.*, 2021, p. 1).

Considerando as vantagens da manufatura aditiva e o possível uso de materiais biodegradáveis, como o PLA, a fabricação de filamentos fundidos representa uma alternativa promissora à tecnologia de moldagem por injeção convencional, para a produção de componentes funcionais e sistemas, garantindo a confiabilidade dos componentes fabricados, e submetidos a cargas dinâmicas durante sua vida útil. Uma caracterização abrangente de suas propriedades mecânicas (CESNIK; SLAVIC; BOLTEZAR, 2023).

Uma das mais importantes características da manufatura aditiva é a sua facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. Durante a fabricação, utilizam-se as informações geométricas obtidas por meio de um sistema de planejamento da representação computacional 3D da peça. As informações geradas são enviadas na sequência planejada à máquina, que, então, executa o trabalho sem a assistência do operador (VOLPATO, 2017).

A impressão por Extrusão de Material é a mais comum encontrada comercialmente devido à sua acessibilidade e geralmente é utilizado polímeros como material de construção (SANTOS, 2018). Os polímeros têm ganhado espaço nos nichos em que prevaleciam anteriormente outras classes de materiais, como o caso dos metais, muito utilizados na construção de autopeças. Podem ser citadas como as principais razões pelas quais essas trocas estão ocorrendo a disponibilidade do material, a facilidade na transformação para a construção do produto, a liberdade de design, tornando os produtos mais atrativos para o consumidor final, a baixa densidade dos plásticos, promovendo uma diminuição do peso, bem como a ótima correlação entre o custo final do produto e as propriedades desejadas para o mesmo (ALMEIDA; SOUZA; 2015).

Em 2014, um estudo de Khajavi *et al.* (2014), analisou economicamente a cadeia logística com a manufatura aditiva para produção de peças de reposição, o estudo concluiu que com a distribuição dos locais de produção de maneira descentralizada têm-se um sistema mais econômico de manufatura com menores custos operacionais e mais flexibilidade.

Com a alta demanda e existência de uma variedade muito complexa de peças agrícolas, sendo colhedoras, tratores, plantadeiras, pulverizadores, plataformas de grãos, e as demais máquinas e implementos que sofrem desgaste, através de relatos de produtores que abordaram a dificuldade enfrentada pela falta de peças, muitas destas necessitam importação, ou os fabricantes não conseguem entregar, gerando grandes prejuízos por deixar o maquinário parado, podendo comprometer toda safra. Esta análise, possibilitou um estudo para a elaboração de peças agrícolas em manufatura aditiva, a fim de acelerar o processo de produção e evitar desperdícios.

1.1 TEMA

Relação do diâmetro do bico utilizado na impressora 3D e sentido de impressão sobre as propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva com filamento utilizando o material PLA

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na coleta de dados, através de manufatura aditiva com estudo avançado, utilizando impressora 3D modelo Ender 3, com o uso do material PLA (ácido poliláctico), realizado processo de fabricação em corpos de prova, com diâmetros de filamentos de impressão diferentes, sendo eles 0,4 mm, 0,6 mm e 0,8 mm e sentidos de impressão diferentes, longitudinal e transversal. Para a realização da coleta de dados, foi feita análise dimensional, com auxílio de um paquímetro. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios do modelo DL-3000, com foco em identificar a resistência máxima do material, e a possibilidade de utilizar o polímero PLA para substituição de peças.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Sob a ótica do desenvolvimento de produtos, a manufatura aditiva (MA) surge como uma grande possibilidade de estimular a inovação e a competitividade enquanto flexibiliza a cadeia logística, e os recentes investimentos na área comprovam isso. A MA permite que objetos possam ser fabricados em um menor número de etapas, sem passar por várias operações de manufatura para se obter o produto final, e de grandes cadeias logísticas para que aquele chegue ao consumidor (ARAÚJO, 2021).

A prototipagem 3D cria como alternativa a produção de peças conforme a necessidade individual de cada usuário ou ramo de produção, aprimorando a produção de objetos ou reposição de peças para processos produtivos e elaboração de protótipos, além de proporcionar a melhoria ou montagem de novas impressoras (ZUCCA, 2019).

De acordo com Zucca *et al.* (2018) existe no setor agrícola grande demanda por avanços tecnológicos e melhor infraestrutura para os próximos anos, surgindo espaço para utilização de matéria-prima sustentável e novas tecnologias visando uma maior produtividade. Sendo assim, cada vez mais os processos produtivos rurais utilizam novas tecnologias na busca por melhorias na produtividade e na utilização dos recursos disponíveis.

No país há uma grande demanda e diversidade de maquinários agrícolas, com o uso e desgaste algumas peças devem ser substituídas, porém, por inúmeros problemas, principalmente de logística, não há reposição de peças disponíveis,

vidando acelerar o processo, segue o questionamento: É possível a utilização de manufatura aditiva para elaboração e substituição de peças agrícolas, com objetivo de atender produtores e revendas de peças em geral?

1.4 JUSTIFICATIVA

A indústria de peças agrícolas no Brasil enfrenta desafios constantes, especialmente no que tange à reposição eficiente e durável de componentes. Uma tendência notável neste contexto é o uso da impressão 3D, em particular com materiais como o políácido láctico (PLA). Estudos como os de Jerez-Mesa *et al.* (2017) destacam a relevância crescente do PLA, atribuindo a ele resistência que o torna ideal para a fabricação de peças agrícolas duráveis.

A adoção da impressão 3D transforma a maneira como peças de reposição são produzidas no setor agrícola. A robustez do PLA, apontada por trabalhos como o de Ezeh e Susmel (2018), é um aspecto crucial para componentes agrícolas que operam frequentemente sob cargas cíclicas. A durabilidade é fundamental, considerando que a falha dos componentes pode acarretar paradas dispendiosas e prejudicar a produtividade.

Adicionalmente, a customização oferecida pela manufatura aditiva, como indicada na pesquisa de Afrose *et al.* (2016), abre novas possibilidades para a fabricação de componentes específicos para maquinários agrícolas. A influência da orientação da construção de peças em PLA sobre o seu comportamento quando submetido a estresse permite a otimização para aplicações específicas, elevou o desempenho das peças e potencialmente reduzindo custos no longo prazo.

No Brasil, a inserção de tecnologias de impressão 3D utilizando PLA, conforme discutido por Gomes e Wiltgen (2020), representa um progresso notável. Análises mecânicas sobre a eficácia de peças produzidas através da fabricação por filamento fundido, como evidenciado por Spoerk *et al.* (2018), mostram um grande potencial para a aplicação no campo agrícola. Essa abordagem não só é vantajosa do ponto de vista econômico, como também oferece resistência a variados tipos de falhas, sendo um aspecto alinhado às necessidades do setor agrícola brasileiro.

É evidente que a manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D de PLA, emerge como uma solução viável e promissora para a reposição de peças agrícolas no Brasil. Investigações como as de Letcher e Waytashek (2014) e Lee; Huang

(2013) corroboram a eficiência desse método, tanto em termos de resistência mecânica quanto de flexibilidade na produção.

As aplicações de impressão 3D para o meio rural são diversas, pode ser fabricados partes de bicos de pulverização, peças para aspersores, objetos para uso na produção animal, parafusos, porcas e engrenagens de inúmeros tamanhos, tudo a curto prazo e com a possibilidade de serem fabricados na própria propriedade rural (ZUCCA *et al.*, 2018).

Além dos benefícios diretos, a impressão 3D de materiais como PLA também contribui para práticas mais sustentáveis na agricultura. A capacidade de produzir peças sob demanda e com precisão reduz o desperdício de material e permite uma adaptação rápida às necessidades emergentes do setor, como sugerido por Senatov *et al.* (2016) e Safai *et al.* (2019). Assim, a impressão 3D não somente atende às demandas de durabilidade e eficiência, mas também se alinha com um cenário de produção agrícola cada vez mais voltado para a sustentabilidade e inovação tecnológica.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Geral

Identificar se a manufatura aditiva por extrusão, pode ser utilizada para a elaboração de peças agrícolas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Definir impressora 3D para manufatura das amostras;
- Fazer desenho do corpo de prova no *Solidworks* e transformar em STL;
- Identificar material da impressão;
- Manter velocidade de impressão padrão;
- Definir sentido do filamento;
- Definir diâmetro dos bicos da impressora;
- Analisar qual sentido de filamento é mais resistente a tração;
- Identificar qual diâmetro do bico de impressão apresenta maior resistência à tração.
- Identificar se o material pode ser utilizado para substituição de peças.

2 REVISÃO DA LITERATURA

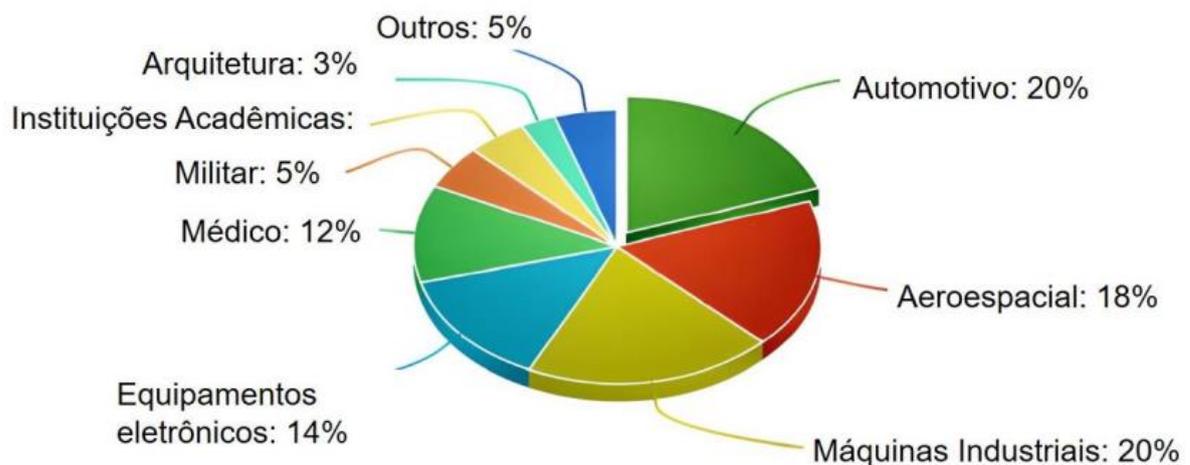
Neste capítulo, serão apresentadas bibliografias para auxiliar no processo de desenvolvimento do trabalho. Para isso, buscou-se bibliografias, com títulos sobre manufatura aditiva, uso de PLA, parâmetros de processos relacionados a manufatura aditiva, sentido de impressão, diâmetro do bico, defeitos da impressão, ensaios mecânicos, ensaios de tração e análise dimensional.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) é percebida atualmente como um tipo de tecnologia com a tendência de ser uma das principais metodologias de fabricação para o futuro, ainda com crescimento em potencial, mesmo já existindo há mais de 30 anos (SILVA *et al.*, 2020).

As impressoras 3D são máquinas desenvolvidas para dar origem a uma gama muito grande de peças. Dos nano componentes aos maquinários industriais, dos enfeites e utensílios aos carros e casas. Todo o processo é feito em algumas horas, ou até mesmo dias, dependendo da complexidade da peça e do processo utilizado (MATHIAS, 2019). A Figura 1 apresenta a distribuição da manufatura aditiva pelas principais indústrias segundo a receita de 2018 (VAFADAR *et al.*, 2021).

Figura 1 – Distribuição da adoção de manufatura aditiva pela indústria em 2018



Fonte: Adaptado de Vafadar *et al.*, 2021

É um processo que inicia com o modelo 3D da peça sendo “fatiado” eletronicamente, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definirão, em cada superfície da camada, onde será ou não adicionado material. A peça física é, então,

gerada por meio da adesão e empilhamento em sequência das camadas, iniciando na base até atingir o seu topo (VOLPATO, 2017).

Resumidamente, MA é um conjunto de tecnologias que funcionam adicionando material camada por camada, a partir de um modelo digital predefinido. Esse modelo é então “fatiado” em camadas com todas as informações para a máquina de manufatura aditiva iniciar a fabricação do objeto desejado, como exemplificado na Figura 2.

Figura 2 – Funcionamento da manufatura aditiva



Fonte: Quan *et al.*, 2015 *apud* Araújo, 2021, p. 23

Com o advento do CAD (*Computer-Aided Designs*), o qual impulsionou o projeto e a modelagem de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida. A possibilidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD, em 3D, permite a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de incorporar rápidas formas de modificar os desenhos de um projeto (GOMES; WILTGEN, 2020). Embora haja diferentes processos de manufatura aditiva, Gibson, Rosen e Stucker (2015) definiram oito passos de um processo genérico de MA. As etapas estão definidas no Quadro 1 (ARAÚJO, 2021).

Quadro 1 – Passos de um processo de manufatura aditiva

Passos	Conceitos
Modelagem CAD	A modelagem CAD (<i>Computer Aided Design</i>) é o primeiro passo nas técnicas de manufatura aditiva. É basicamente conceituar, projetar e assim visualizar o que será fabricado por manufatura aditiva a partir de um <i>software</i> . Todos os tipos de MA iniciam a partir de um modelo virtual, que pode ser obtido de diversas maneiras e que irá retratar toda a geometria externa da peça final;
Conversão para o formato STL	É o formato de arquivo mais comum nas máquinas de manufatura aditiva, nesse passo o modelo CAD é convertido em STL, que descreve a superfície fechada do modelo e servirá de base para os cálculos realizados. O arquivo STL, de <i>stereolithography</i> ou estereolitografia, descreve o modelo CAD em função apenas de sua geometria, sem cor, materiais, unidades entre outras informações; e funciona aproximando as superfícies do modelo a uma série de faces triangulares. Essas limitações do STL levaram ao desenvolvimento do AMF, que basicamente é uma extensão do formato anterior, acrescentando mais informações ao arquivo;
Transferência para a máquina de MA e manipulação do arquivo STL	O arquivo STL recebe as alterações necessárias dependendo das condições de cada operação, e depois é enviado para a máquina de manufatura aditiva;
Configuração da máquina de manufatura aditiva	Nesse passo a máquina é configurada de acordo com os parâmetros do processo, como por exemplo: material utilizado, fontes de energia, dimensões geométricas, espessura da camada, dentre outras variáveis;
Formação do objeto físico (impressão)	Acontece de fato a “impressão”, o material é adicionado camada por camada, formando o objeto desejado. Nesse passo não é necessária interação do operador, sendo recomendado apenas um monitoramento visual para garantir que erros básicos não aconteçam;
Remoção dos componentes	Após a máquina finalizar a operação, a peça deve ser retirada com os devidos cuidados para evitar acidentes e defeitos nos equipamentos;
Pós-processamento	Nesse momento o objeto formado é manipulado para que esteja pronto para uso. Ocorre a limpeza das peças, remoção de estruturas de suporte de maneira cuidadosa pois podem estar fragilizadas, dentre outras operações necessárias para melhorar propriedades mecânicas ou acabamento superficial
Aplicação	As peças obtidas a partir da manufatura aditiva estão prontas para uso. Dependendo dos requisitos de acabamento de sua aplicação, podem ser necessários procedimentos superficiais como pintura, ou montagem para se obter o produto final no aspecto desejado

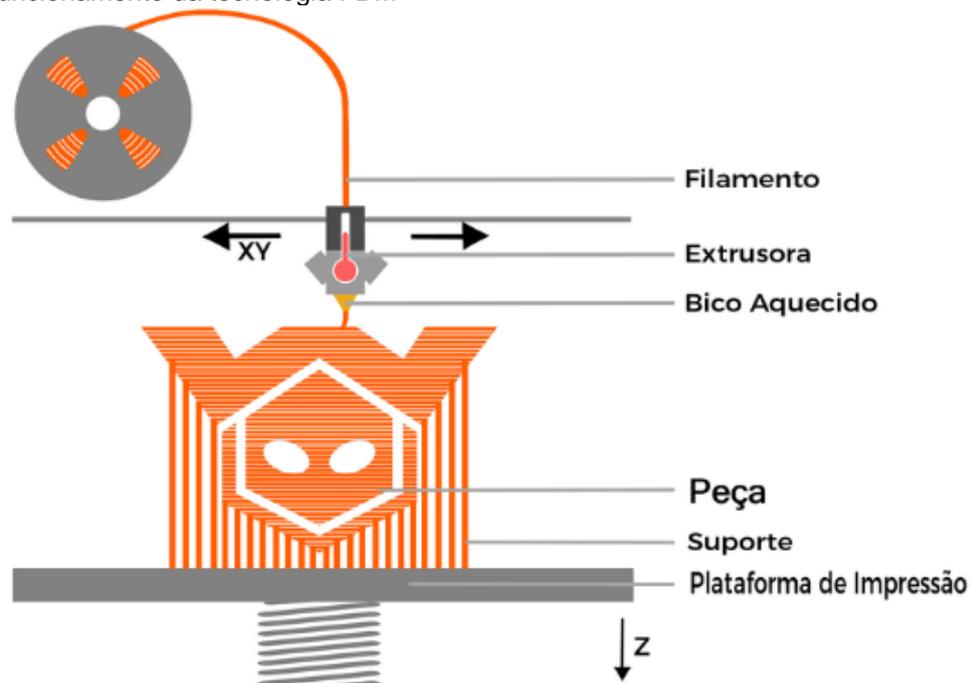
Fonte: Adaptado de Araújo, 2021

Na última década houve um claro aumento na precisão dos equipamentos, redução dos custos, maior variedade de materiais aplicáveis e possíveis aplicações, o mercado de equipamentos de MA se vê em crescimento constante (SILVA *et al.*, 2020). A integração da manufatura aditiva com a indústria de fabricação permite a

criação de peças complexas, que antes eram difíceis ou impossíveis de serem fabricadas pelos métodos tradicionais, com a explícita economia de matéria-prima obtida por meio da inserção apenas na quantidade necessária para confeccionar a peça (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019).

O processo com material fundido conhecido como modelagem por fusão deposição (do inglês *Fused Deposition Modeling* - FDM) (Figura 3) consiste na extrusão e deposição de material, para formação das camadas e geração de um objeto. A operação de impressão é realizada com temperaturas de extrusão por volta de 200°C (RAULINO, 2011). A ferramenta de extrusão tem movimento na direção X-Y, enquanto a mesa de extrusão se movimenta no eixo Z. O material fornecido no início do processo é um filamento, normalmente termoplástico, o qual é aquecido até adquirir uma forma pastosa, para então ser extrudado (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Figura 3 – Funcionamento da tecnologia FDM



Fonte: Wishbox, 2019

Outro aspecto importante da manufatura aditiva é a possibilidade de customização extrema dos materiais e das peças produzidas. Ezeh e Susmel (2018) exploraram a resistência do PLA impresso em 3D, fornecendo dados valiosos para engenheiros e designers que buscam customizar componentes para aplicações específicas. Com isso, tem-se a possibilidade de repor peças defeituosas com facilidade e otimizar os estoques de peças de reposição, diminuir peso e otimizações

diversas, fabricar produtos customizados, permitindo assim uma vasta aplicação na indústria de consumo (ATTARAN, 2017; FORD; DESPEISSE, 2016).

Assim sendo, quando nos referimos a impressão 3D, tratamos de uma tecnologia disruptiva que é considerada emergente no mercado mundial. A nível industrial espera-se que, gradativamente, as peças que são produzidas por caríssimos processos de usinagem sejam produzidas por manufatura aditiva. Essa evolução não só afetaria fornecedores de materiais, como também prestadores de serviço e cadeias produtivas ligadas a usinagem (MATHIAS, 2019).

A literatura atual sobre a manufatura aditiva, particularmente focada em materiais como o PLA e o ABS, fornece insights críticos sobre como as técnicas de impressão, orientações de *raster*, e condições de processamento afetam as propriedades mecânicas dos componentes. Compreender essas variáveis é crucial para otimizar o uso da manufatura aditiva em aplicações que exigem alta resistência, durabilidade e confiabilidade.

2.2 UTILIZAÇÃO DE PLA NA MANUFATURA ADITIVA

A variedade de materiais disponíveis para a tecnologia aumentou consideravelmente nos últimos anos, e que dispõe de uma boa quantidade nos dias de hoje. O Quadro 2 lista alguns materiais comerciais utilizados de maneira direta na manufatura aditiva, segundo Bourell *et al.* (2017):

Quadro 2 – Exemplos de materiais comerciais utilizados na manufatura aditiva

Polímeros	Metálicos	Outros
ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)	Ligas de alumínio	Chocolate
PC (Policarbonato)	Ligas de cobalto-cromo	Papel
PC/ABS Mistura	Ouro	
PLA (Ácido Polilático)	Ligas de níquel	
Polieterimida (PEI)	Prata	
Acrílico e acrilatos	Aço inoxidável	
Epóxi	Titânico puro	
Nylon 11 e 12	Liga Ti-6Al-4V	
Polímeros com enchimento de vidro/carbono/alumínio	Aços ferramenta	
Poliestireno		
Polipropileno		
Poliéster		
Poli(éter-éter-cetona)		
Termoplástico		
Elastômeros		

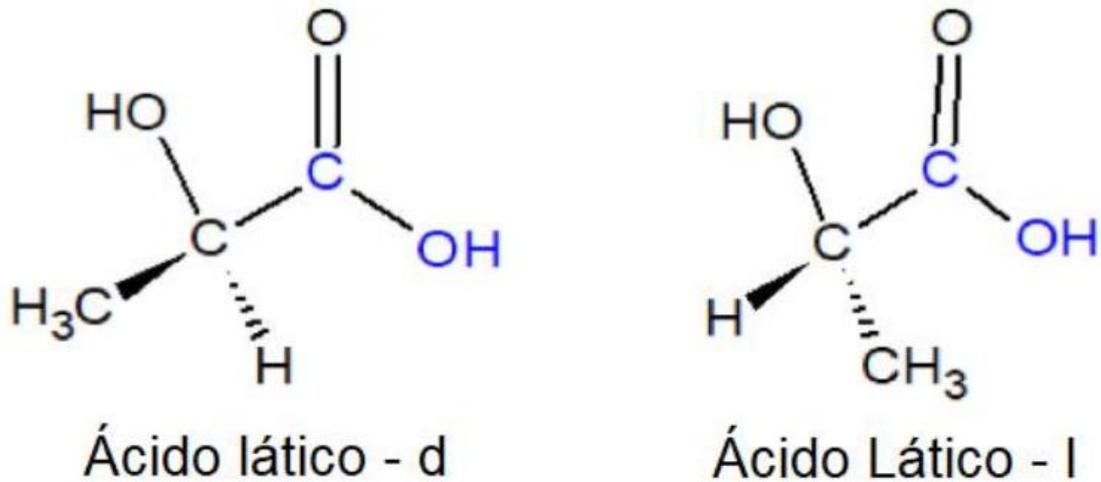
Fonte: Adaptado de Bourell *et al.*, 2017

Dentre os exemplares de polímeros o que mais interessa a este estudo é o PLA, sendo ele, o material que é mais utilizado nas impressoras que operam por extrusão. O material apresenta excepcional resistência e tenacidade, resistência à distorção térmica, solúvel em alguns solventes orgânicos, etc (MATHIAS, 2019). Os filamentos comerciais mais comumente utilizados na manufatura aditiva são de PLA ou de copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). Na maioria dos casos, esses filamentos comerciais não fornecem informações específicas sobre suas composições, sendo vendidos em diferentes cores (CALVO, 2023).

Com a crescente necessidade de desenvolvimento tecnológico na Indústria 4.0 e no uso de polímeros produzidos a partir de matérias-primas renováveis, visando sustentabilidade, o presente estudo teve como objetivo avaliar o aumento do limite de escoamento e do módulo de elasticidade, em função do aumento da fração cristalina, para o PLA produzido por manufatura aditiva (RODRIGUES, 2023).

A utilização de PLA na Manufatura Aditiva (MA), representa um avanço significativo no campo da fabricação digital. O PLA, um polímero biodegradável derivado de recursos renováveis como o milho, destaca-se não apenas por seu caráter ecológico, mas também por suas notáveis propriedades mecânicas e de fácil impressão, tornando-se um material preferencial para diversas aplicações na MA. Por ser produzido a partir de fontes renováveis como trigo, açúcar e arroz, grandes quantidades de carbono são consumidas durante o ciclo de vida do PLA (TÜMER; ERBIL, 2021), transformando-o em um polímero bastante estimado para fabricação. Ácido Lático (LA) é o monômero fundamental do PLA, que é sintetizado em uma mistura 50%*d* e 50%*l* (Figura 4).

Figura 4 – Composição de esteroisômeros da mistura de PLA



Fonte: Baran; Erbil, 2019

Geralmente, o LA é obtido por meio da fermentação bacteriana de fécula de milho, utilizando uma cepa de lactobacilo que gera, majoritariamente, composições de 99.5% do esteroisômero do tipo l, o que induz a alta resistência mecânica do polímero PLA após a polimerização (TÜMER; ERBIL, 2021). Para a caracterização mecânica dos polímeros, são usados alguns dos mesmos parâmetros que são úteis para os metais. Um ensaio de tração, por exemplo, pode determinar o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração (MATHIAS, 2019).

Conforme estudo de Letcher e Waytashek (2014), a utilização de PLA em impressoras 3D de entrada revelou um desempenho satisfatório em termos de propriedades mecânicas. Essa constatação é particularmente relevante quando consideramos o contexto da prototipagem rápida e da produção de peças de baixo custo, onde a eficiência do material e a precisão do processo de impressão são cruciais.

Avançado para a análise dos materiais, a pesquisa de Afrose *et al.* (2016) salientou os efeitos da orientação da construção no comportamento de fadiga do PLA processado por FDM. Este estudo revela que a orientação das camadas de impressão pode ter um impacto considerável na vida útil dos materiais, o que é crucial para aplicações em engenharia onde a durabilidade do material sob cargas cíclicas é fundamental.

A durabilidade e a confiabilidade a longo prazo de peças fabricadas com PLA também são de grande interesse. Trabalhos como o de Ezeh e Susmel (2018) e de Arbeiter *et al.* (2018) examinaram a resistência e a caracterização mecânica do PLA,

respectivamente, fornecendo insights valiosos sobre o potencial e as limitações do PLA em aplicações de engenharia mais exigentes.

2.3 PARÂMETROS DE PROCESSOS RELACIONADOS A MANUFATURA ADITIVA

Com o advento da MA, vários parâmetros de processo emergiram como críticos para assegurar a qualidade, funcionalidade e durabilidade das peças produzidas. No processo de impressão é possível definir as características finais da peça através de parâmetros de impressão. Sabe-se que ao variar os parâmetros de impressão, tem-se peças e protótipos com diferentes propriedades mecânicas, podendo estas variações serem benéficas ou não no aumento da resistência mecânica da peça (AMBRÓS, 2019).

Durante o processo de impressão 3D podem ser definidos parâmetros de operação da máquina, entre estes Cunico (2015) ressalta a espessura de camada, espessura de parede, densidade de preenchimento, velocidade de extrusão, velocidade de deslocamento, temperatura de extrusão, material de extrusão, entre outros. Os parâmetros devem ser bem definidos e ajustados para que o processo ocorra corretamente.

A orientação é um fator determinante no processo de impressão 3D, conforme Volpato (2017), essa etapa consiste em escolher como a peça fabricada será orientada em relação ao eixo principal de construção, além da orientação determinar o número de camadas e a quantidade de material suporte no processo. Estudos, como os de Afrose *et al.* (2016), revelam que a orientação em que uma peça é construída pode ter uma influência significativa no comportamento do material. Em particular, a orientação das *raster* – as linhas individuais de material depositadas durante a impressão – tem mostrado impactar propriedades como resistência à tração, flexão e fadiga (JAP *et al.*, 2019).

Em adição, a escolha do material é fundamental para determinar a funcionalidade e durabilidade da peça final. PLA, por exemplo, é amplamente utilizado devido à sua biodegradabilidade e facilidade de impressão (GOMEZ-GRAS *et al.*, 2018). Contudo, outros materiais, como o ABS, também têm sido estudados extensivamente para entender como suas propriedades variam após serem processados por MA (ZIEMIAN; OKWARA; ZIEMIAN, 2015).

O comportamento de materiais impressos em 3D, especialmente polímeros como PLA, é um tópico de considerável interesse (SAFAI *et al.*, 2019). Diversos

estudos têm examinado como os parâmetros de impressão, como a velocidade de impressão, a temperatura da extrusora e a espessura da camada, influenciam a resistência das peças (LEE; PEGUES, SHAMSAEI, 2020). Esses parâmetros, quando otimizados, podem melhorar significativamente a longevidade das peças em aplicações de engenharia e médicas.

Outro fator crítico na MA é a adesão entre camadas. A temperatura da cama de impressão, por exemplo, tem mostrado ter uma influência significativa na adesão intercamadas em peças FDM (SPOERK *et al.*, 2018). Temperaturas de cama inadequadas podem resultar em delaminação, onde as camadas se separam, reduzindo assim a resistência estrutural do objeto impresso.

A manufatura aditiva não se limita apenas a polímeros. Polipropileno e poliuretano de policarbonato são apenas alguns dos muitos materiais que têm sido explorados em aplicações de MA (MILLER *et al.*, 2017). Cada material traz consigo um conjunto único de desafios e parâmetros de processamento que precisam ser meticulosamente controlados para garantir peças de alta qualidade.

Os efeitos da orientação de *raster* e camada, por exemplo, têm sido um foco em estudos recentes, particularmente para materiais como o PLA. Estudos como os de Azadi *et al* (2020) e Dezianian e Azadi (2019) têm investigado especificamente como essas orientações influenciam as propriedades de fadiga e flexão do PLA, demonstrando a complexidade e a importância desses parâmetros na MA.

Por último, pós-processamento de peças impressas em 3D pode ter um impacto significativo em suas propriedades finais. Isso pode incluir tratamentos térmicos, acabamentos superficiais ou outras técnicas destinadas a melhorar a estética, a funcionalidade ou a durabilidade da peça (ARBEITER *et al.*, 2018).

2.4 INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE IMPRESSÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D, revolucionou a forma como os objetos são criados e projetados. Uma consideração fundamental na impressão 3D é o sentido ou orientação de impressão. Esta orientação tem influência direta nas propriedades mecânicas do objeto impresso, especificamente sua resistência, flexibilidade e durabilidade (AZADI *et al.*, 2021).

Os processos de manufatura aditiva, como o *Fused Deposition Modeling* (FDM), depositam material camada por camada. A orientação dessas camadas,

muitas vezes referida como orientação do *raster*, pode afetar significativamente as propriedades mecânicas do material impresso (JAP *et al.*, 2019). Estudos mostraram que objetos impressos na vertical tendem a ter maior resistência à tração, enquanto aqueles impressos horizontalmente podem oferecer melhor resistência à flexão (LETCHER; WAYTASHEK, 2014).

Afrose *et al.* (2016) demonstraram que a orientação do build pode influenciar a fadiga do ácido poliláctico (PLA) processado por FDM. Descobriu-se que amostras impressas verticalmente mostravam uma resistência significativamente melhor em comparação com as impressas horizontalmente. Isso pode ser atribuído à coesão intercamada e à natureza anisotrópica dos materiais impressos em 3D. Além disso, a porosidade dos objetos impressos pode ser afetada pela orientação. Por exemplo, os *scaffolds* de PLA impressos em 3D podem exibir comportamento de fadiga de baixo ciclo diferente, dependendo de sua orientação (SENATOV *et al.*, 2016). O estudo de Jerez-Mesa *et al.* (2017) sobre a longevidade de partes de PLA obtidas por manufatura aditiva reforça essa noção, destacando a necessidade de considerar a direção de impressão para otimizar a durabilidade do produto final.

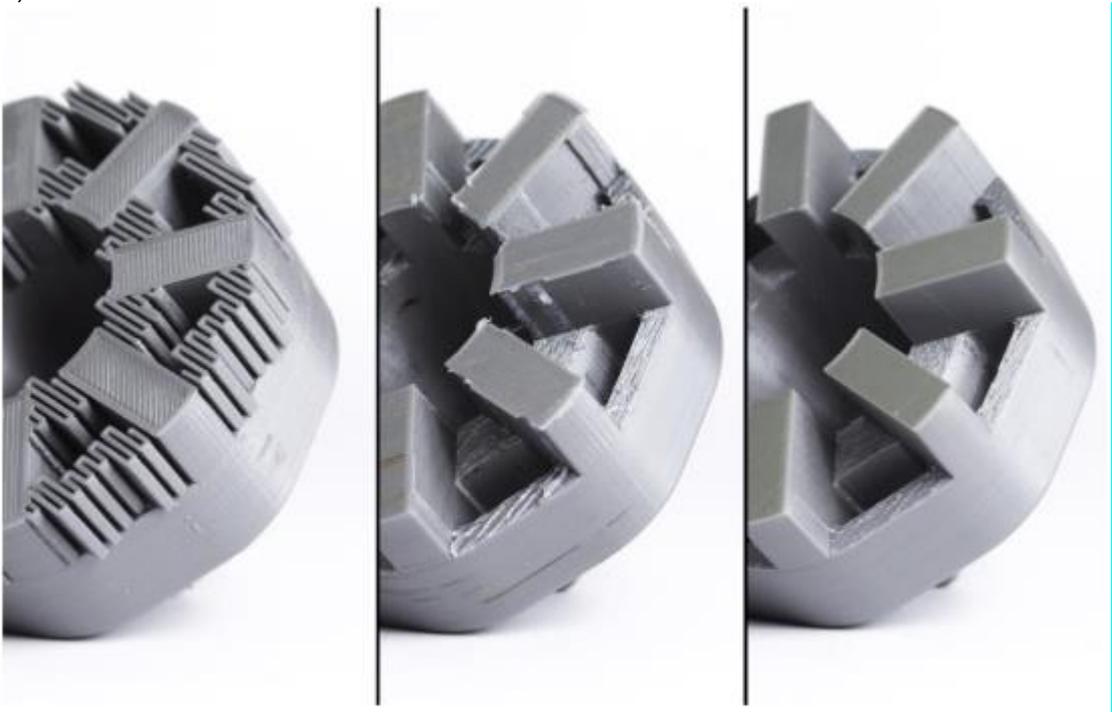
Ezeh e Susmel (2018) também abordaram a resistência do PLA impresso em 3D, concluindo que a resistência é altamente dependente da orientação da impressão. Compreender esta relação é essencial para projetar componentes que serão submetidos a cargas cíclicas em aplicações do mundo real. Em um contexto mais amplo, não é apenas o PLA que é afetado. Arbeiter *et al.* (2018) realizaram uma caracterização mecânica de componentes produzidos por FDM, observado que a estimativa da vida útil e as propriedades de fratura dependem da orientação da impressão.

A mesma conclusão foi tirada por Gomez-Gras *et al.* (2018), que estudaram o desempenho de espécimes de PLA fabricados por FDM, eles observaram que a resistência pode ser otimizada ajustando-se a orientação de impressão. Estudos também foram realizados em outros materiais além do PLA. Lee e Huang (2013) examinaram a análise de materiais FDM e Ziemian, Okwara e Ziemian (2015) exploraram o comportamento de tensão e fadiga do acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) impresso. Em ambos os casos, a orientação da impressão mostrou-se uma variável crucial nas propriedades mecânicas resultantes.

A qualidade da peça depende dentre outros fatores da orientação, espessura da camada e orientação da deposição do material, e essas limitações no

acabamento estão relacionadas com propriedades térmicas e mecânicas, uma vez que o material esfria rapidamente em várias técnicas de MA, levando à distorções e tensões (PÉREZ *et al.*, 2020). Em alguns processos de manufatura aditiva, o material de suporte da peça precisa ser fabricado simultaneamente para evitar deformações (ARAÚJO, 2021). A Figura 5 mostra um exemplo de pós-processamento de remoção desse material em uma peça.

Figura 5 – Peça original impressa com o material de suporte (à esquerda), e após a remoção (à direita)



Fonte: Armstrong, 2021

É inegável que a orientação de impressão desempenha um papel crucial nas propriedades mecânicas dos objetos impressos em 3D. À medida que a manufatura aditiva continua a crescer em popularidade e aplicação, entender essas nuances se tornará cada vez mais essencial para engenheiros, designers e fabricantes.

2.5 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO BICO DE IMPRESSÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A qualidade e as propriedades mecânicas desses componentes podem variar significativamente depende de várias variáveis do processo, incluindo a orientação do *raster*, a temperatura de impressão e, crucialmente, o diâmetro do bico de impressão (JAP *et al.*, 2019). O diâmetro do bico de impressão influencia diretamente na resolução da peça impressa, na largura da trilha depositada e na

velocidade de impressão. Como consequência, isso pode afetar a aderência entre as camadas, o que tem implicações significativas para as propriedades mecânicas, como resistência à tração, fadiga e rigidez (LETCHER, WAYTASHEK, 2014).

Afrose *et al.* (2016) investigaram os efeitos da orientação da construção da peça nas propriedades do PLA por FDM. Embora o foco de seu estudo não fosse o diâmetro do bico, é importante considerar que as variáveis do processo estão inter-relacionadas. A forma como o material é depositado, influenciada pelo diâmetro do bico, pode alterar a forma como as camadas se aderem entre si e, conseqüentemente, a resistência da peça.

As investigações sobre os efeitos da orientação do *raster* no comportamento revelaram que a orientação pode ter um impacto significativo nas propriedades mecânicas. Especificamente, a resistência à fadiga pode ser comprometida quando as camadas são alinhadas de certas maneiras, levando a pontos fracos dentro da peça (SENATOV *et al.*, 2016). Embora a relação entre a orientação do *raster* e o diâmetro do bico de impressão possa não ser imediatamente óbvia, a realidade é que um bico mais fino pode produzir trilhas mais estreitas, o que pode influenciar a orientação ótima do *raster* para a resistência mecânica.

Os estudos sobre a vida útil do PLA impresso em 3D também destacam a importância da integridade entre camadas. Peças com má adesão entre camadas mostram uma vida útil significativamente reduzida (JEREZ-MESA *et al.*, 2017). Em relação ao diâmetro do bico, um bico mais estreito pode oferecer maior precisão, mas pode também levar a uma aderência insuficiente se não for ajustado adequadamente, possivelmente comprometendo a vida útil da peça.

Os estudos de Arbeiter *et al.* (2018) e Gomez-Gras *et al.* (2018) também reiteram a importância da aderência entre camadas para as propriedades mecânicas. A fratura e a caracterização mecânica de componentes impressos mostraram que as imperfeições no processo de deposição, que podem ser influenciadas pelo diâmetro do bico, desempenham um papel crucial na determinação da resistência.

O papel do diâmetro do bico na deposição de materiais diferentes, como polipropileno, também foi investigado (CARNEIRO; SILVA; GOMES, 2015). É fundamental considerar que cada material tem suas próprias características e pode responder de maneira diferente às alterações no diâmetro do bico. Por exemplo, enquanto o PLA pode se beneficiar de um diâmetro de bico mais fino em termos de

resolução, outros materiais podem apresentar desafios em relação à aderência ou à formação de porosidade.

O diâmetro do bico de impressão desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades mecânicas das peças impressas em 3D. Ele influencia a resolução da peça, a aderência entre camadas e, por sua vez, a resistência à tração, rigidez e resistência à fadiga. Enquanto a literatura disponível oferece uma compreensão profunda sobre as propriedades mecânicas das peças impressas em 3D, mais pesquisas direcionadas ao diâmetro específico do bico e sua influência nas propriedades mecânicas são necessárias (SAFAI *et al.*, 2019).

2.6 DEFEITOS DE IMPRESSÃO

Na manufatura aditiva, especificamente na modelagem por deposição fundida (FDM), a qualidade das peças impressas é afetada por uma variedade de defeitos que podem comprometer tanto a estética quanto as propriedades mecânicas. Estes desafios na impressão 3D incluem porosidade, delaminação, deformação, inconsistências na superfície, e erros dimensionais, todos influenciados por fatores como materiais utilizados, configurações da impressora e ambiente de impressão.

Devido a seu princípio de funcionamento, com o aquecimento, extrusão e posterior resfriamento do material, tensões internas podem ser um problema levado a empenamentos ou encolhimentos da peça, sendo muitas vezes necessário adaptações para contornar esses fatores (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017). Segundo Kazmer e Colon (2020), outras desvantagens incluem a resistência limitada das peças; alta anisotropia; baixa resolução, acabamento superficial e eficiência energética; dentre outras limitações típicas de métodos de manufatura aditiva.

A porosidade, caracterizada pela presença de vazios internos na peça impressa, emerge como um dos principais defeitos, impactando a resistência mecânica e a integridade estrutural. Estudos ressaltaram a importância da densidade dos filamentos e das configurações de impressão na minimização deste problema. Em particular, a precisão no preenchimento e a sobreposição regular dos filamentos são cruciais para reduzir a porosidade (JEREZ-MESA *et al.*, 2017; SENATOV *et al.*, 2016).

Além da porosidade, a delaminação, onde as camadas de material se separam, é outro defeito comum. A delaminação ocorre frequentemente devido a

problemas de adesão entre as camadas, muitas vezes causada por temperaturas inconsistentes durante a impressão. Observaram que um controle rigoroso da temperatura de extrusão e da mesa é essencial para evitar a delaminação, especialmente em materiais como o PLA (AFROSE *et al.*, 2016; LETCHER; WAYTASHEK, 2014).

Defeitos na superfície como rugosidades ou linhas irregulares são influenciados pela precisão do equipamento de impressão e pelo controle do fluxo do material. Estudos destacam a importância de equipamentos precisos e ajustes refinados no fluxo do material para um acabamento de superfície de qualidade (MILLER *et al.*, 2017; ZIEMIAN; OKWARA; ZIEMIAN, 2015).

Por fim, os erros dimensionais, resultantes de calibração inadequada da impressora, expansão térmica dos materiais, ou erros de *software*, são um desafio crucial em termos de precisão e tolerâncias dimensionais. O trabalho de Azadi *et al.* (2020) e Ziemian; Ziemian e Haile (2016) sublinha a importância da precisão dimensional, principalmente quando se trata de componentes de engenharia, onde a exatidão é fundamental para o desempenho funcional.

Os defeitos de impressão na FDM são problemas multifacetados que requerem uma compreensão holística dos materiais, da tecnologia e das variáveis do processo. Como ressaltado por Lee; Huang (2013) e Safai *et al.* (2019), o conhecimento detalhado dos mecanismos de formação de defeitos e o desenvolvimento contínuo de soluções para mitigá-los são essenciais para aprimorar a confiabilidade e a eficiência desta tecnologia promissora. As pesquisas contínuas e a inovação são, portanto, fundamentais para superar esses desafios e expandir as aplicações práticas da manufatura aditiva.

2.7 ENSAIOS

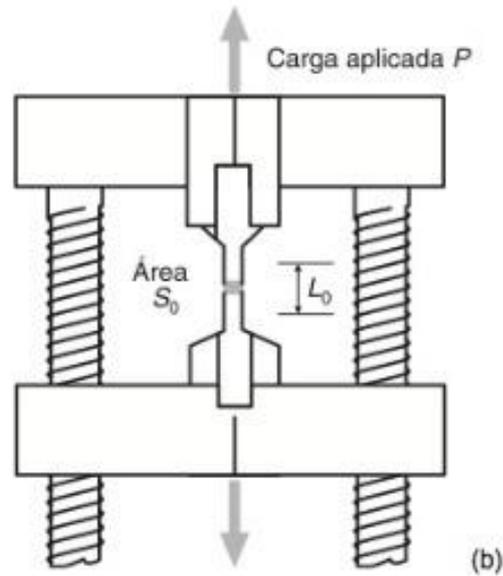
Nos ensaios de tração, a ênfase está em compreender até que ponto um material pode ser esticado antes de falhar, o que é crucial para aplicações estruturais. Estudos como os de Letcher; Waytashek (2014) avaliaram a resistência à tração de amostras de PLA impressas em 3D, ressaltando que a orientação das camadas de impressão pode significativamente afetar a resistência à tração. Da mesma forma, trabalhos como os de Senatov *et al.* (2016) abordaram a influência das configurações de impressão sobre as propriedades de tração de *scaffolds* porosos de PLA.

Os ensaios mecânicos fornecem informações fundamentais sobre as propriedades dos materiais utilizados na manufatura aditiva e sobre como as técnicas de impressão influenciam tais propriedades. Esses estudos são essenciais para engenheiros e designers que buscam utilizar a manufatura aditiva para criar peças e componentes com requisitos mecânicos específicos. A constante evolução dos materiais e técnicas de impressão 3D sugere uma necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nessa área, com o objetivo de melhor entender e otimizar o desempenho mecânico das peças impressas.

O ensaio de tração é fundamental na avaliação das propriedades mecânicas de materiais fabricados por impressão 3D, particularmente na tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Este teste proporciona uma análise detalhada das características de resistência do material quando submetido a forças de tração, sendo crucial para determinar parâmetros como resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento até a ruptura (LETCHER & WAYTASHEK, 2014). Estes dados são vitais para a seleção de materiais em projetos de engenharia e para compreender o comportamento dos materiais sob carga.

Os ensaios de tração em materiais impressos em 3D revelam particularidades únicas devido à natureza da manufatura aditiva. A impressão camada por camada pode causar anisotropia, ou seja, variações nas propriedades mecânicas dependendo da direção da carga em relação às camadas do material (AFROSE *et al.*, 2016). A orientação das camadas, um aspecto central na manufatura aditiva, influencia de maneira significativa as propriedades mecânicas do objeto impresso. A Figura 6 traz uma representação esquemática do ensaio de tração.

Figura 6 – Representação esquemática do ensaio de tração



Fonte: Garcia; Spin; Santos, 2012, p. 8

Estudo realizado por Ambrós (2019) intitulado “Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição”, pode-se concluir que a resistência à tração aumenta com o aumento do preenchimento, espessura de parede e altura entre camada, isso para peças e protótipos impressos em PLA.

Além da orientação da *raster*, outros parâmetros de impressão desempenham um papel crucial nas propriedades de tração dos materiais impressos. A temperatura do bico extrusor, a velocidade de impressão, e o padrão de preenchimento são fatores que afetam a adesão entre as camadas, influenciando diretamente as propriedades mecânicas do produto final. (SPOERK *et al.*, 2018) enfatizaram a importância da temperatura da base de impressão no que tange à adesão das partes e suas características mecânicas, sublinhando a necessidade de otimizar os parâmetros de impressão para alcançar as melhores propriedades mecânicas possíveis.

O uso do ensaio de tração em peças impressas em 3D vai além da mera caracterização de materiais, estendendo-se à aplicação e avaliação de peças para uso em situações reais. Com o avanço contínuo das tecnologias de impressão 3D e o desenvolvimento de novos materiais, os ensaios de tração permanecem como uma ferramenta essencial no asseguramento de que os componentes impressos cumpram com os requisitos de desempenho nas mais variadas aplicações, desde a engenharia tradicional até inovações no campo biomédico. Essa constante evolução

exige um entendimento aprofundado sobre como os diferentes parâmetros de impressão e as propriedades dos materiais influenciam o comportamento mecânico dos objetos impressos, garantindo sua funcionalidade, segurança e eficácia.

2.8 ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional é um aspecto crítico na impressão 3D, pois garante que as dimensões dos objetos impressos correspondam precisamente às especificações do *design* original. Essa precisão é essencial para a funcionalidade e a intercambiabilidade das peças, especialmente em aplicações onde os componentes precisam se encaixar com precisão em conjuntos complexos, como na engenharia aeroespacial, automobilística e na indústria de dispositivos médicos. O processo de impressão 3D, especialmente na tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), está sujeito a várias variáveis que podem afetar as dimensões finais do produto, como a contração do material, a precisão da máquina e os parâmetros de impressão (WITTBRODT; PEARCE, 2015).

Dentre os fatores que influenciam a precisão dimensional na impressão 3D, a escolha do material é primordial. Diferentes materiais têm diferentes taxas de contração quando resfriados do estado fundido para o sólido. Por exemplo, ABS e PLA apresentam comportamentos de contração distintos, o que demanda ajustes no processo de impressão para manter a precisão dimensional (AFROSE *et al.*, 2016). O controle da temperatura de impressão, tanto da extrusora quanto da base, é crucial para mitigar as tensões internas e evitar deformações, como evidenciado em estudos que investigam a adesão das camadas e a qualidade superficial das peças (SPOERK *et al.*, 2018).

A precisão da própria impressora 3D também é um fator determinante. A estabilidade mecânica da máquina, a resolução do eixo de movimentação e a precisão do mecanismo de extrusão influenciam diretamente a exatidão das dimensões da peça impressa (LETCHER; WAYTASHEK, 2014). Além disso, os parâmetros de impressão como a altura da camada, a velocidade de impressão e o padrão de preenchimento precisam ser cuidadosamente ajustados para garantir que as camadas sejam depositadas com precisão, evita discrepâncias dimensionais (WITTBRODT; PEARCE, 2015).

Na prática, uma abordagem comum para lidar com questões dimensionais é a utilização de tolerâncias de design e a realização de pós-processamento, como

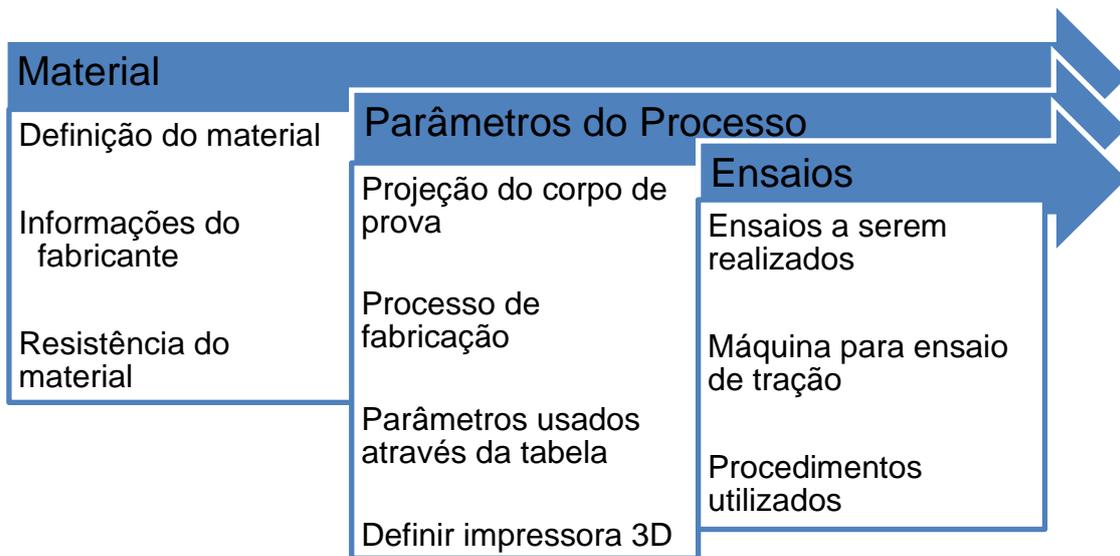
usinagem ou lixamento, para obter as dimensões desejadas. No entanto, a melhor estratégia é a otimização dos parâmetros de impressão e a escolha adequada do material e da tecnologia de impressão, adequando-se à aplicação específica e ao tipo de precisão requerido.

A análise dimensional, portanto, não é apenas uma questão de medir as dimensões finais de uma peça impressa em 3D. Ela abrange a compreensão e o controle de todo o processo de fabricação, desde o projeto e seleção de materiais até os ajustes finos dos parâmetros de impressão. Assegurar a precisão dimensional é vital para a confiabilidade e a funcionalidade dos objetos impressos em 3D, e continua a ser um foco importante para pesquisa e desenvolvimento dentro do campo da manufatura aditiva (LEE; HUANG, 2013).

3 METODOLOGIA

Neste trabalho utilizou-se os métodos e técnicas, desenvolvidos por Azadi (2021), publicado na revista "*Forces in Mechanics*". Dando origem ao estudo, como uma pesquisa experimental. Na Figura 7 está demonstrado o fluxo do trabalho.

Figura 7 – Fluxo do trabalho



Fonte: Autor, 2023

3.1 MATERIAL

O material utilizado para o estudo e desenvolvimento do trabalho foi o PLA Biopolímero ácido poliláctico, sendo que este é fabricado a partir da dextrose (açúcar), extraído de materiais recicláveis, é o biopolímero mais utilizado e o único hoje produzido em fábrica em escala global. Os produtos de PLA podem ser compostados em instalações industriais onde o calor é de 70°C ou mais, e a umidade mínima 70 % de umidade relativa do ar. O material é higroscópico e necessita na maioria dos casos de secagem antes do processamento. Todos os graus possuem certificado de biocompostabilidade EN12342, o Quadro 3 apresenta as especificações técnicas do PLA.

Quadro 3 – Características do material utilizado

Matéria prima	Poliácido láctico ou ácido poliláctico (PLA)
Precisão	±0.02 mm
Densidade	1.24g/cm ³
Temperatura de impressão	190°C a 215 °C
Temperatura da Mesa	60°C
Tg (temperatura de cristalização)	60°C
Tm (temperatura de fusão)	180°C

Fonte: Mercado Livre, 2023

Neste estudo, foram selecionados os filamentos PLA da marca Voolt 3D, com diâmetro de 1,75 mm e precisão de ± 0,05 mm. O filamento PLA foi escolhido devido a suas excelentes propriedades mecânicas, com resistência a tração de 48,24 Mpa. O material possui coloração preta, assim mostrado na Figura 8:

Figura 8 – Filamento Impressão 3d Voolt PLA Preto 1kg

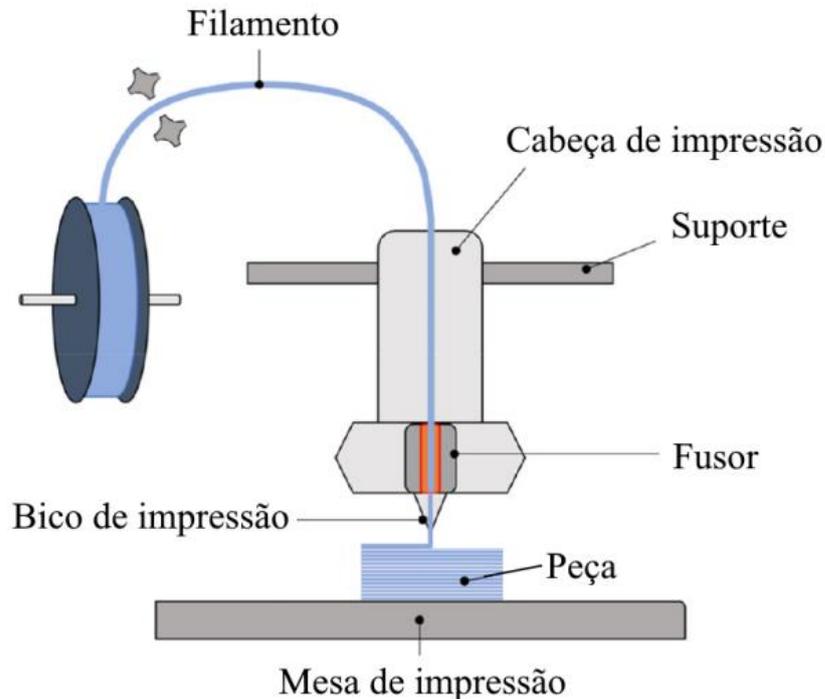


Fonte: Mercado Livre, 2023

3.2 PARÂMETROS DE PROCESSO

A impressora 3D utilizada para a realização do estudo, foi uma *Ender 3 32 Bits*, a qual se diferencia por ter alta qualidade de impressão, 50 microns (0,05 mm), área de impressão de 220 mm x 220 mm x 250 mm, 35 watts de potência, mesa aquecida em até 110° C e extrusor pode chegar até 255° C. A Figura 9 mostra o desenho esquemático do sistema de impressão dos corpos de prova.

Figura 9 – Desenho esquemático do sistema de impressão



Fonte: Adaptado de SOLA *et al.*, 2023 e RIGON *et al.*

Para iniciar a impressão das amostras, foram determinados alguns parâmetros que podem afetar as tolerâncias de dimensão e qualidade superficial das amostras. O diâmetro do furo do bico extrusor de maior dimensão, permite um tempo de produção mais curto, assim facilita a fabricação de várias amostras. Durante a extrusão do filamento, é formado o filete de extrusão e assim é gerado a altura desse componente, esse é um valor importante para o processo de fabricação de todos os corpos de prova, essa altura influencia as condições iniciais e de formação do objeto (RIGON, *et al.*, 2023).

O núcleo de qualquer componente fabricado, pode possibilitar várias formas e densidades desse enchimento. Podem ser gerados várias formas que completam o interior da peça. O formato gerado no interior do cubo, foi o de linhas, assim permitindo uma facilidade e rapidez na produção das amostras. A velocidade de impressão depende muito do fabricante e do filamento utilizado, os parâmetros escolhidos são padronizados, as impressoras podem concluir com rapidez e melhor acabamento. Os filamentos possuem características de impressão próprias que são definidas pelos fabricantes, uma vez que as superfícies de impressão das duas máquinas possuem elementos de aquecimento (RIGON, *et al.*, 2023). O Quadro 4 representa os parâmetros de impressão utilizados para manufatura aditiva dos corpos de prova:

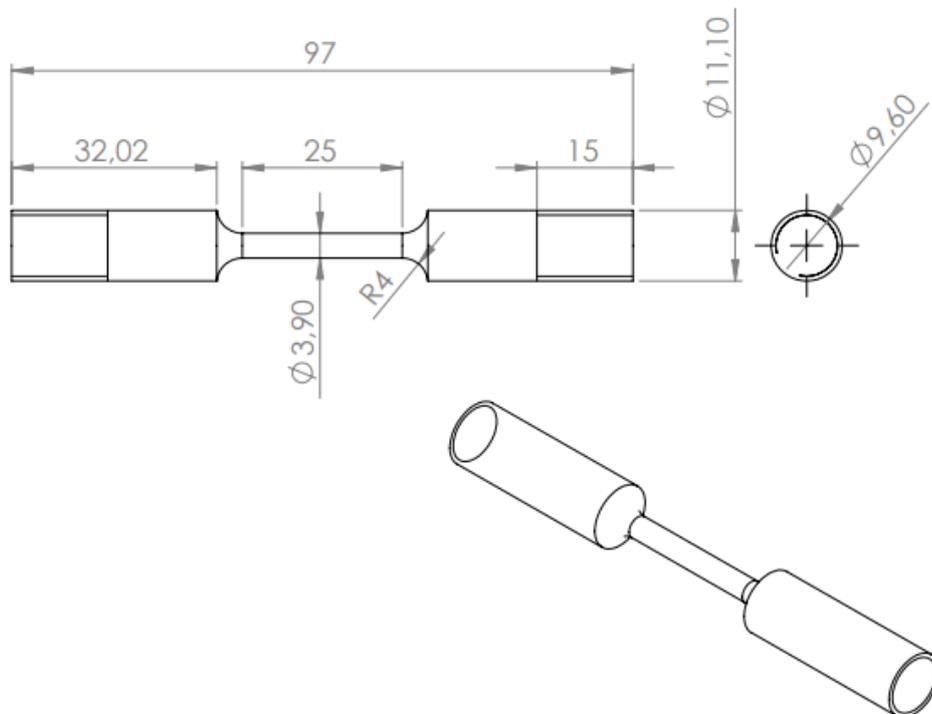
Quadro 4 – Parâmetros de impressão

Variáveis investigadas	Unidade	Parâmetros de impressão		
Diâmetro do furo do bico	mm	0,4	0,6	0,8
Temperatura de impressão	°C	200	200	200
Espessura da parede, teto e piso	mm	25	25	25
Densidade de preenchimento	%	100	100	100
Velocidade de impressão	mm/s	50	50	50
Velocidade de preenchimento	mm/s	50	50	50
Temperatura da mesa de impressão	°C	70	70	70

Fonte: Autor, 2023

O corpo de prova a ser impresso é um corpo para ensaio de tração, lembrando o formato de um cotonete, foi projetado por *software* de computador *Solidworks*, e transformado para o formato STL (sendo o único formato que a impressora realiza a leitura) com característica cilíndrica, segue algumas normas de projeto, para ser válido, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Desenho 2D projeto do corpo de prova, ESC 1:1

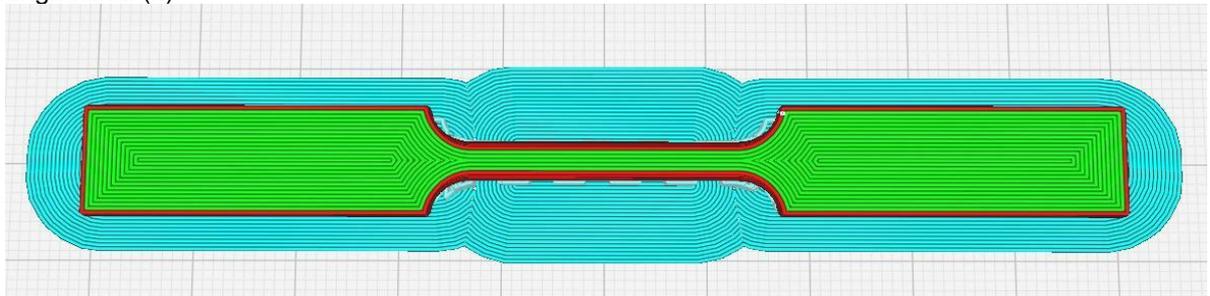


Fonte: Autor, 2023

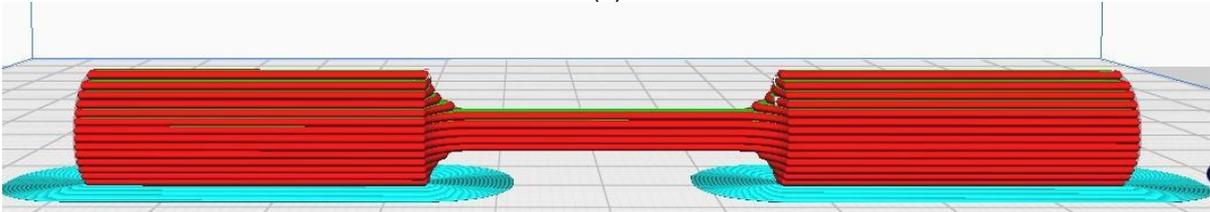
Os corpos de prova além de serem produzidos com diâmetro de furo do bico diferentes de 0,4 mm, 0,6 mm e 0,8 mm, foram fabricados com sentido de filamentos diferentes, conforme mostrado nas Figuras 11 (a - b) e 12 (c-d). É representado pelo programa *Cura UltiMaker*, que em formato STL, transmite uma perspectiva de

impressão para a impressora 3D, sendo então transversal (a e b) e longitudinal (c e d).

Figura 11 – Vista superior com corte no meio do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na longitudinal (a); Vista frontal do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na longitudinal (b)



(a)

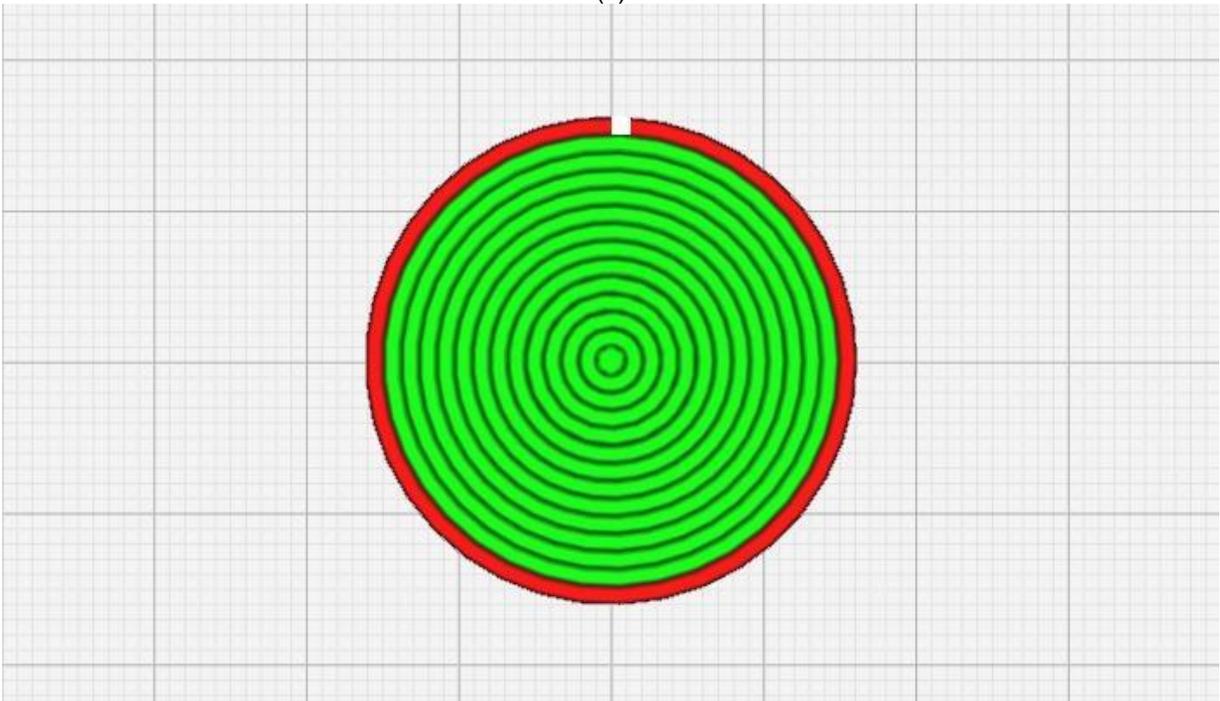


(b)

Fonte: Autor, 2023

Figura 12 – Vista superior com corte no meio do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na transversal (c); Vista frontal do sentido de impressão dos corpos de prova impressos na transversal (d)

(c)



(d)



Fonte: Autor, 2023

Após a impressão dos corpos de prova (CP), os mesmos passaram por uma inspeção visual para identificar a presença de algum defeito, as amostras apresentadas nos resultados, são as que foram julgadas válidas para as análises comparativas, identificou-se os CP por numeração e foram demarcados, no Quadro 5, foram nomeados os CP, no seguinte formato:

Quadro 5 – Identificação de numeração dos corpos de prova

Identificação do CP	Sentido de impressão	Diâmetro do bico (mm)
CP 01	Transversal	0,4
CP 02	Transversal	0,4
CP 03	Transversal	0,4
CP 04	Longitudinal	0,4
CP 05	Longitudinal	0,4
CP 06	Longitudinal	0,4
CP 07	Longitudinal	0,6
CP 08	Longitudinal	0,6
CP 09	Longitudinal	0,6
CP 10	Transversal	0,6
CP 11	Transversal	0,6
CP 12	Transversal	0,6
CP 13	Transversal	0,8

CP 14	Transversal	0,8
CP 15	Transversal	0,8
CP 16	Longitudinal	0,8
CP 17	Longitudinal	0,8
CP 18	Longitudinal	0,8

Fonte: Autor, 2023

3.3 ENSAIOS

Nesta etapa é mostrado os ensaios realizados para coletar os dados do estudo. Sendo ensaio de tração, identificado esforços que foram analisados para coletar dados para validação dos resultados. Apresenta parâmetros utilizados para análise dimensional, medidas válidas e identificação dos corpos de prova considerados válidos.

3.3.1 Propriedades mecânicas

Para coleta dos resultados utilizou-se uma máquina de ensaios modelo DL-30000 conforme mostrado na imagem (A), com auxílio do *software Tesc* versão 3.04 para a geração dos gráficos de forças. Todos ensaios foram realizados na URI - Universidade Regional Integrada de Santo Ângelo RS, conforme apresentado na Figura 13, com capacidade máxima de 300 kN e sentido de ensaio no campo inferior. Levou-se em consideração a análise do comprimento da base, força de escoamento, força máxima, força de ruptura, tensão de escoamento, módulo de elasticidade, deformação e tensão.

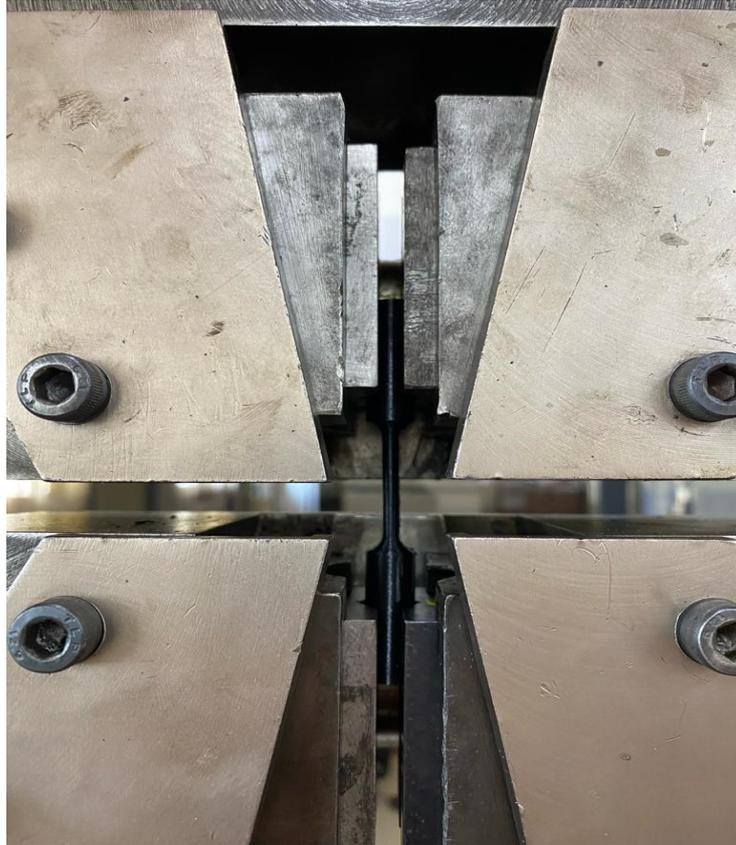
Figura 13 – Máquina universal de ensaios, utilizada para coleta de dados



Fonte: Autor, 2023

Os corpos de prova através de demarcação e identificação, foram presos nas garras do tipo pinça, individualmente, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova preso por garras do tipo pinça



Fonte: Autor, 2023

Através da realização dos ensaios, a máquina universal, com auxílio de um *software*, no programa *Tesc* versão 3.04, desenvolve gráficos de escoamento de material, e momento de ruptura, para realizar análise detalhada da resistência de cada corpo de prova.

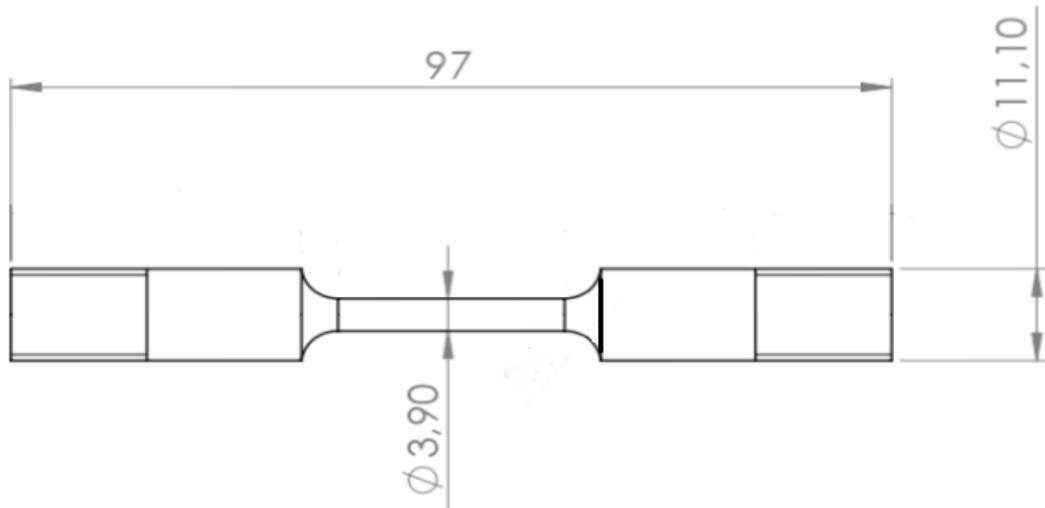
3.3.2 Análise dimensional

O uso de dispositivos de metrologia para capturar dados dimensionais vai além das verificações básicas de qualidade e oferece a possibilidade de melhorar os projetos de forma ativa e corrigir de forma independente os processos de fabricação. A qualidade total da análise de dados fornece informações úteis para a tomada de decisões. Para preencher as lacunas entre o real e o virtual e oferecer processos verdadeiramente digitalizados, a fabricação inteligente requer análise dimensional.

Pensado nisso, tendo todas as medidas do projeto do corpo de prova, numerou-se as amostras já impressas, com base no sentido de impressão. Realizou-se as medições do comprimento total das amostras, diâmetro do cilindro maior e diâmetro do cilindro menor, conforme representado na Figura 15. As medidas foram

feitas com o auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo, e resolução de 300 mm, referência do modelo 500-173-30. Tendo essas informações foi possível o desenvolvimento de planilhas e comparar com as medidas do projeto.

Figura 15 – Medidas destacadas para comparação do controle dimensional



Fonte: Autor, 2023

Para a coleta de dados do controle dimensional, as medidas foram comparadas, apresentado na Figura 14 usado a unidade de medida em milímetros (mm). Avaliou-se o comprimento total da amostra (L), diâmetro do corpo maior (\varnothing maior), e diâmetro menor (\varnothing menor). O comprimento da base de ensaios foi de 25 mm para todos os corpos de prova. As medidas esperadas foram baseadas nas do projeto.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

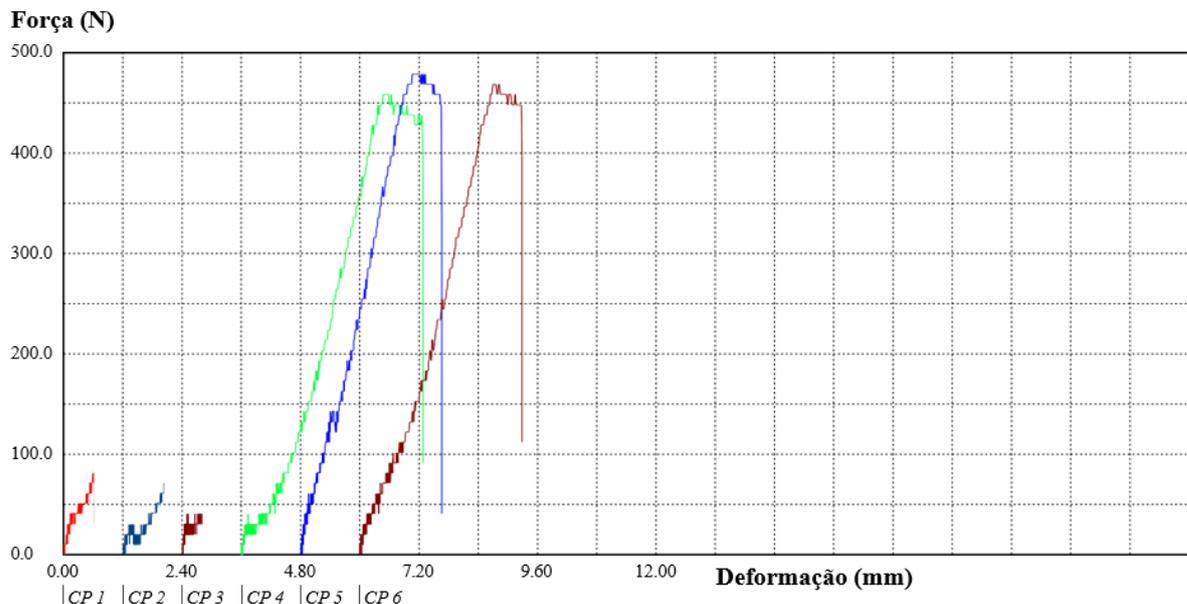
Nesta etapa do trabalho, foram apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia do projeto, descrita anteriormente, seguindo todas as etapas do projeto, realizando ensaios de tração para coletar informações sobre a resistência do material PLA, este, utilizado como base de estudos. E informações do controle dimensional obtendo informações das medidas das amostras. Apresentado os resultados por fim realizado uma discussão geral dos resultados e feito um fechamento do trabalho.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Após coletados os resultados dos ensaios de tração na máquina universal de ensaios, o sistema gerou resultados tornando possível a análise mais detalhada de cada uma das amostras. Levado em consideração o comprimento da base de ensaios de 25 mm para todos os corpos.

Na Figura 16 observa-se os resultados dos ensaios de tração, comparou-se a relação de força com relação a deformação realizados nos corpos impressos com filamentos 0,4 mm de diâmetro, onde os três primeiros corpos, impressos no sentido transversal (CP 01, CP 02 e CP 03) tendo força máxima 80 N. Estes, apresentaram resistência menor quando comparados aos (CP 04, CP 05 e CP 06) impressos com sentido de impressão longitudinal, chegou à força máxima de 450 N.

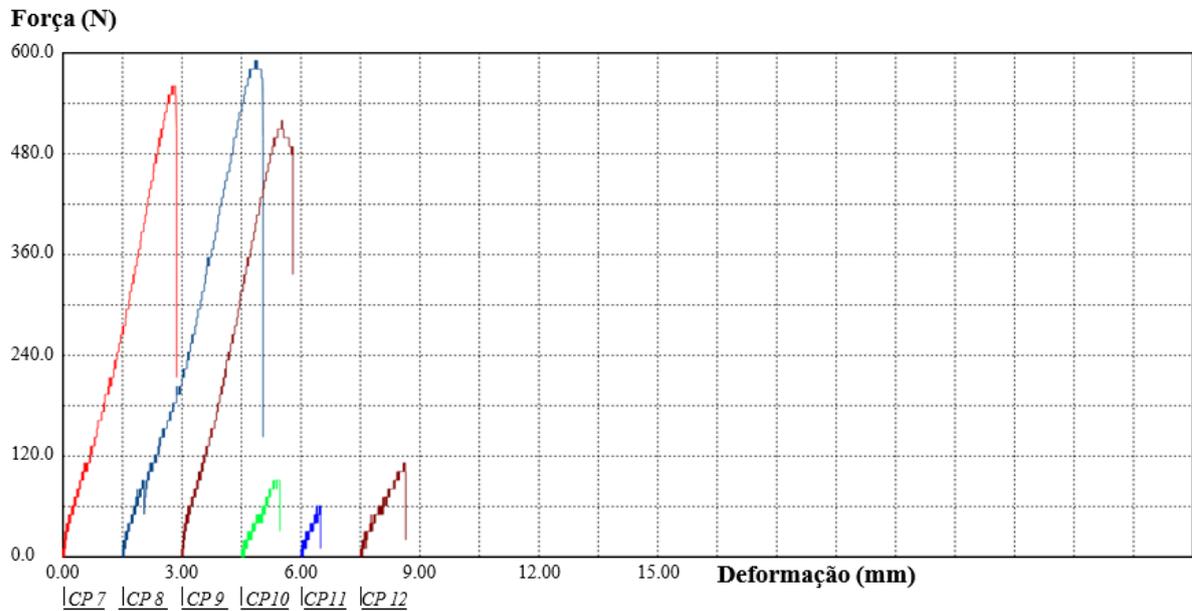
Figura 16 – Relação de Força x Deformação para filamento de impressão 0,4 mm



Fonte: Autor, 2023

A Figura 17 apresenta os ensaios de tração realizados nos corpos de prova impressos com filamentos de 0,8 mm de diâmetro, onde os três primeiros corpos de prova, impressos no sentido longitudinal (CP 07, CP 08 e CP 09) tendo resistência máxima 570 N. Estes, apresentaram maior resistência quando comparados aos (CP 10, CP 11 e CP 12) impressos com sentido de filamento transversal, que apresentaram a tensão máxima de 90 N.

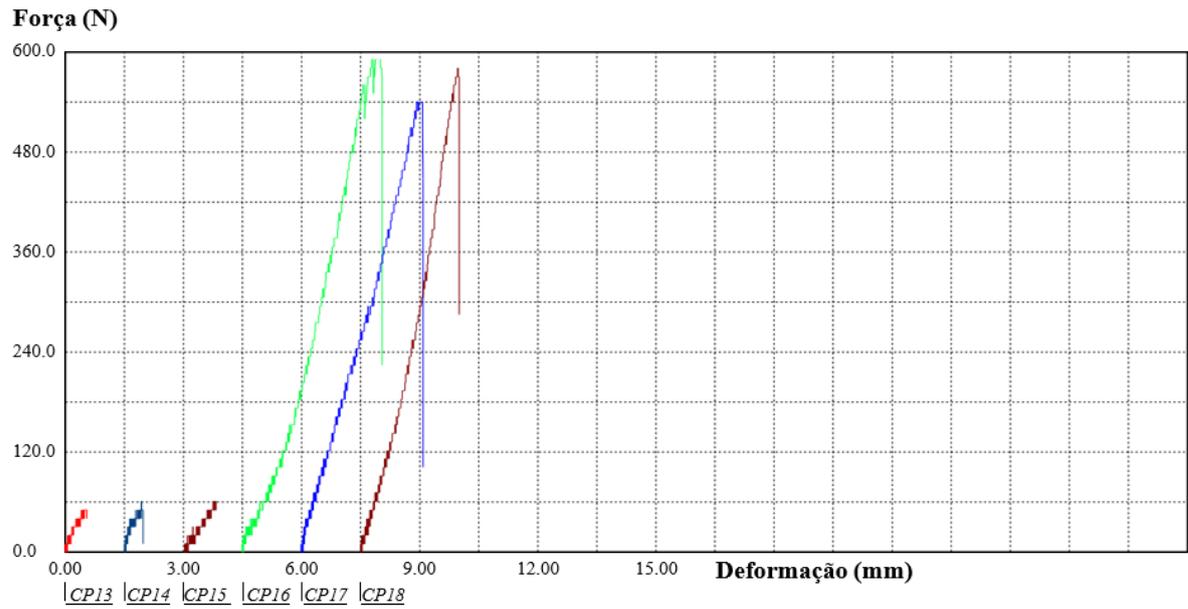
Figura 17 – Relação de força x deformação para filamento de 0,6 mm



Fonte: Autor, 2023

A Figura 18 apresenta os ensaios de tração realizados nos corpos de prova impressos com filamentos 0,8 mm de diâmetro, onde os três primeiros corpos de prova, impressos no sentido transversal (CP 13, CP 14 e CP 15) tendo resistência máxima 110 N. Estes, apresentaram resistência menor quando comparados aos (CP 16, CP 17 e CP 18) impressos com sentido longitudinal, chegou à força máxima de 600 N.

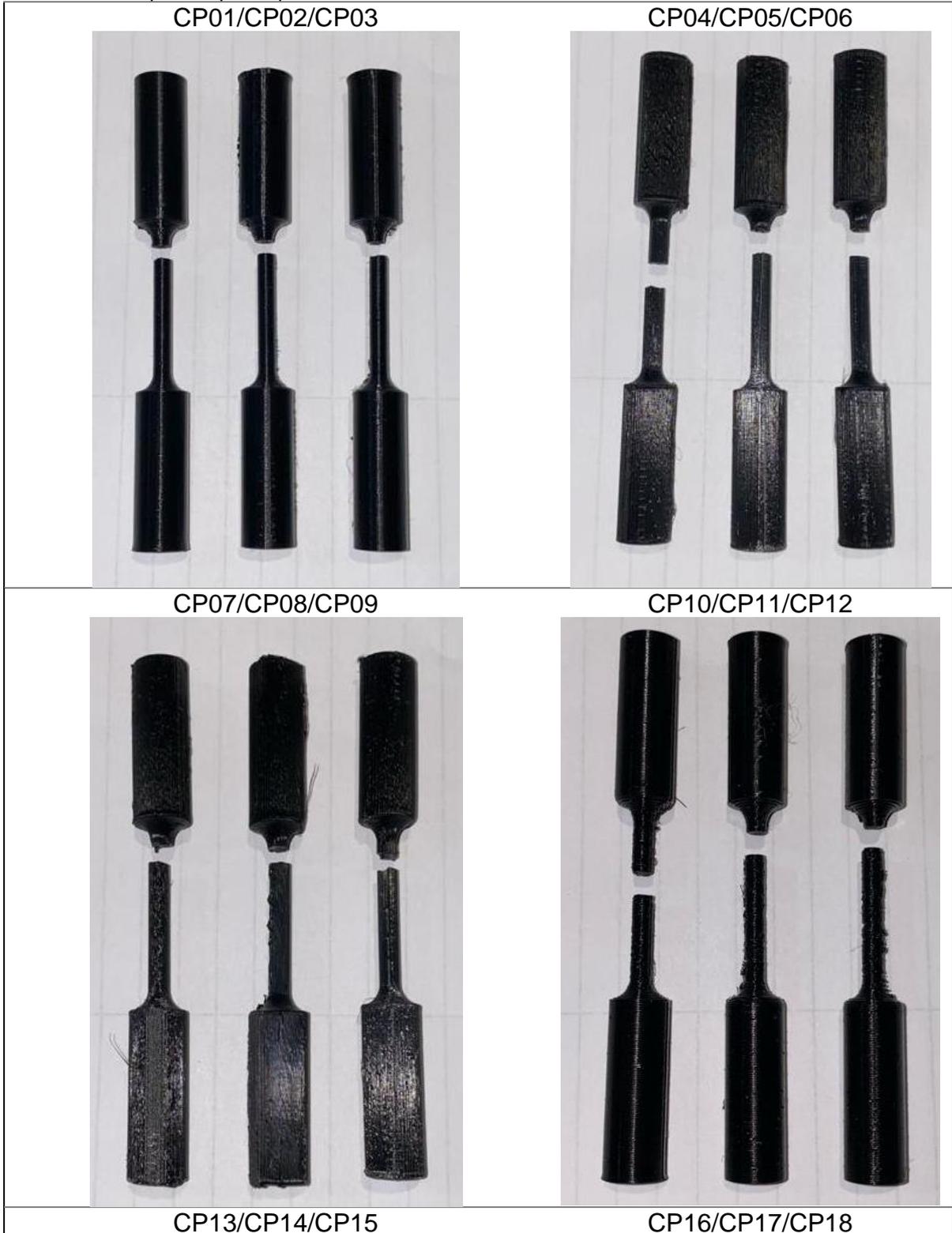
Figura 18 – Relação de força x deformação para filamento de 0,8 mm

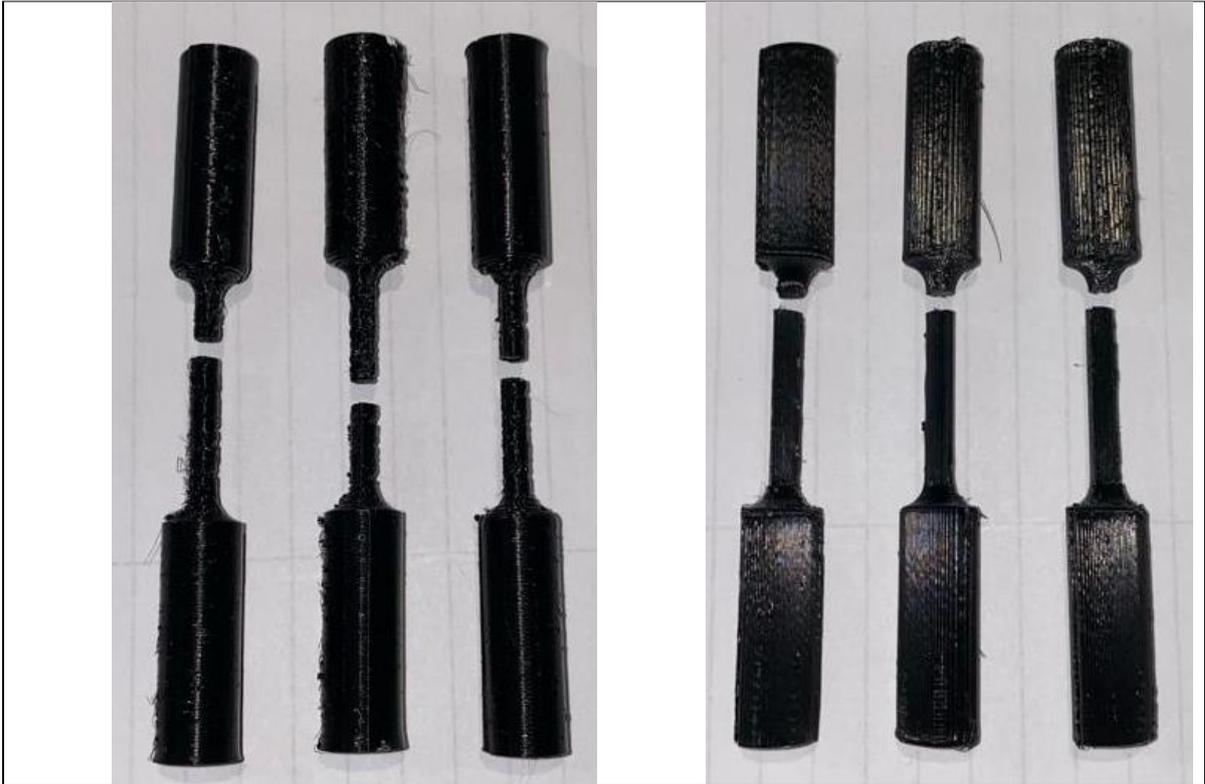


Fonte: Autor, 2023

De acordo com os ensaios, foi possível notar a força exigida para atingir a ruptura dos corpos de prova, o que é o objetivo maior da pesquisa. Possibilitou estabelecer uma correlação entre a densidade e a resistência à tração do material. Os corpos de prova rompem quando sofrem força de tração, como é possível observar no Quadro 6.

Quadro 6 – Corpos de prova pós ensaio.





Fonte: Autor, 2023

4.2 ANÁLISE DIMENSIONAL

Conforme apresentado na metodologia, os corpos de prova foram impressos e considerados válidos para os ensaios. Foram realizadas algumas conferências de medição dos mesmos, sendo avaliados o diâmetro maior (\varnothing maior), diâmetro menor (\varnothing menor), e comprimento total (L) dos corpos de prova (CP), conforme apresentados no Quadro 7, o qual possibilita a comparação da variação das medidas, baseados no sentido de impressão, representados pela média dos corpos com mesmos processos de fabricação, e cálculo de desvio padrão.

Quadro 7 – Medidas dos corpos de prova com base no sentido de impressão e filamento

CP (número do corpo de prova)	L(mm)	\varnothing Maior(mm)	\varnothing Menor (mm)
01/02/03	97,65 \pm 1,37	10,95 \pm 0,02	3,79 \pm 0,01
04/05/06	96,77 \pm 0,29	10,98 \pm 0,05	3,88 \pm 0,03
07/08/09	96,72 \pm 0,29	10,93 \pm 0,04	3,83 \pm 0,01
10/11/12	97,01 \pm 0,02	10,95 \pm 0,12	3,85 \pm 0,02
13/14/15	97,03 \pm 0,09	10,98 \pm 0,11	3,85 \pm 0,03
16/17/18	96,77 \pm 0,33	11,02 \pm 0,07	3,86 \pm 0,04

Fonte: Autor, 2023

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como estudo no trabalho, as medições das amostras apresentaram variações entre elas. No comparativo entre sentidos do filamento longitudinal e transversal com o PLA, e impressas na máquina *Ender 3*, por conta de esta máquina não possuir isolamento fechado no estrutural, os corpos apresentaram variações.

Os corpos de prova CP01, CP02 e CP03 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 2,02$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,08$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,12$ mm.

Os corpos de prova CP04, CP05 e CP06 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,49$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,06$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,05$ mm.

Os corpos de prova CP07, CP08 e CP09 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,57$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,12$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,07$ mm.

Os corpos de prova CP10, CP11 e CP12 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,03$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,13$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,05$ mm.

Os corpos de prova CP13, CP14 e CP15 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,06$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,1$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,07$ mm.

Os corpos de prova CP16, CP17 e CP18 no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,56$ mm, diâmetro maior (\emptyset Maior) $\pm 0,06$ mm, e diâmetro menor (\emptyset Menor) $\pm 0,06$ mm.

Todos os corpos de prova apresentaram uma média de variação consideravelmente baixa como resultado final, no comprimento total das amostras (L) apresentou uma variação de $\pm 0,01$ mm, diâmetro maior (\emptyset maior) $\pm 0,05$ mm, e diâmetro menor (\emptyset menor) $\pm 0,06$ mm, sendo esse o cálculo da média das medições feitas, está enumerado os CP de 01 a 18 e variação das medidas conforme mostra Figura 19.

Figura 19 – Comparação das medidas de análise dimensional realizado nos corpos de prova.

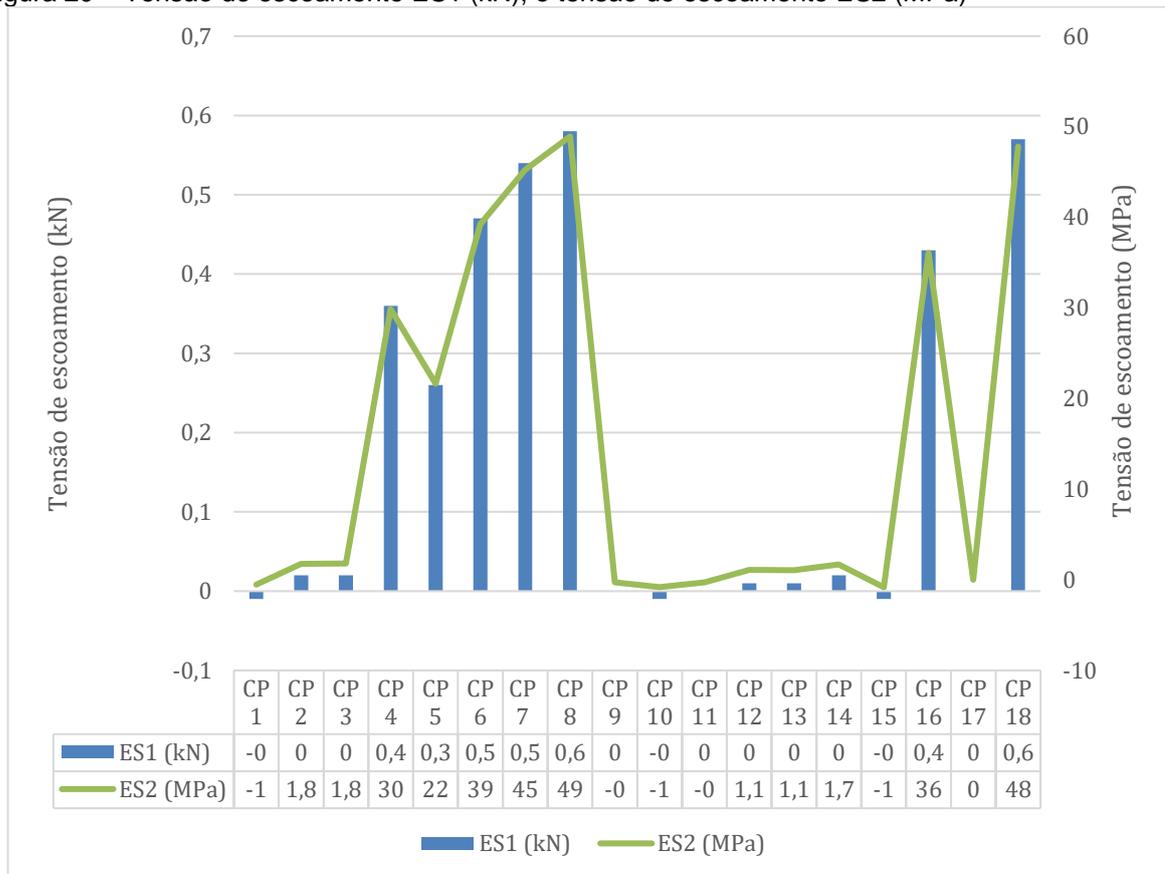


Fonte: Autor, 2023

Com o estudo do controle dimensional, pode-se concluir que o comprimento total das amostras se tem uma precisão maior quando impressos no sentido longitudinal. E ao imprimir peças circulares, se tem maior precisão no sentido transversal, e o diâmetro do filamento que apresentou precisão mais próxima da medida desejada foi o de 0,8 mm com baixa variação. Os principais resultados obtidos oriundos dos ensaios de tração.

Após coletadas as informações dos dados da tensão de escoamento (ES1) medido em kilo Newton (kN) e da tensão do escoamento (ES2) medidos em Mega Pascal (MPa), alguns corpos de prova não mostraram resistência quando ensaiados, devido baixo valor, não sendo demonstrado pela máquina no ensaio de tração, conforme representado na Figura 20.

Figura 20 – Tensão de escoamento ES1 (kN), e tensão de escoamento ES2 (MPa)

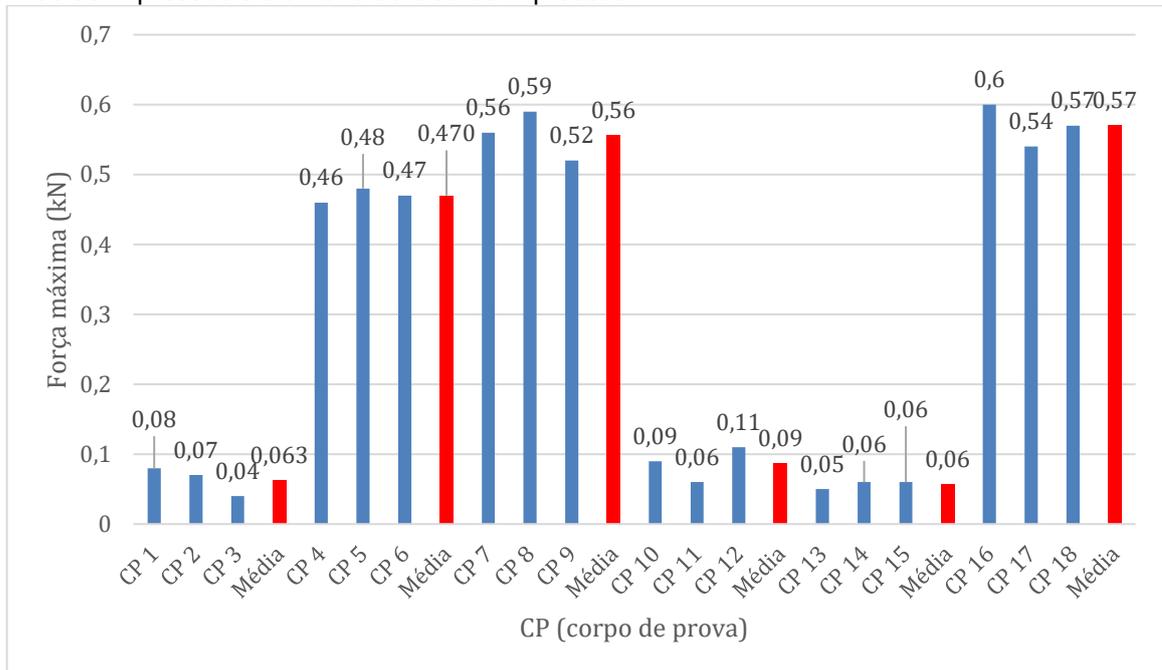


Fonte: Autor, 2023

Quando comparadas as forças e tensões de escoamento das amostras, identificou-se que os corpos com impressão longitudinal apresentam insignificamente maior resistência a tração, comparados aos corpos transversais que apresentam um valor muito baixo. As amostras impressas com bico de 0,6 mm foram as que apresentaram maior resistência.

Conforme apresentado na Figura 21, com os dados da força máxima medido em kilo Newton (kN). Permitiu a comparação entre as 18 amostras, identificou-se que os corpos com impressão longitudinal apresentam forças muito maiores, se comparados aos corpos transversais que apresentam um valor mais baixo. As amostras impressas com bico de 0,8 mm foram as que apresentaram média de força máxima maior.

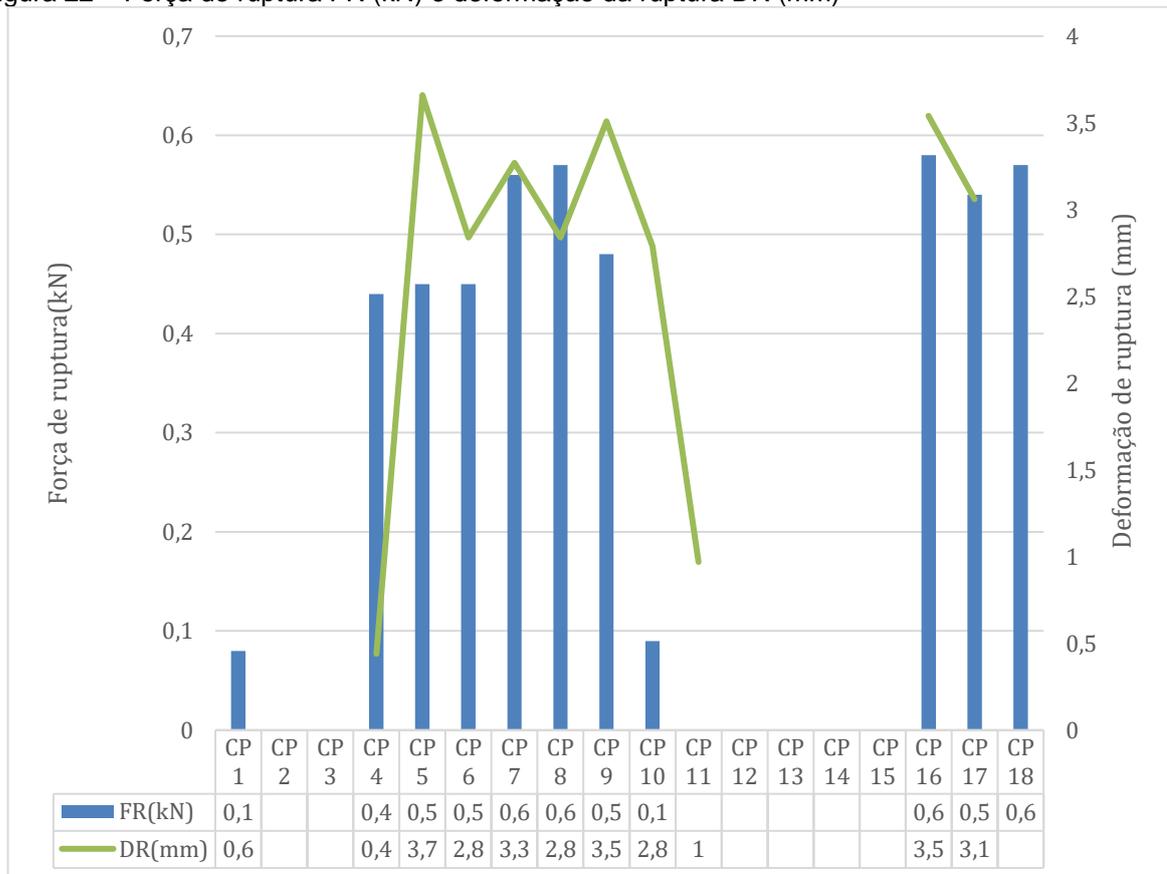
Figura 21 – Gráfico de força máxima (kN) com representação dos CP e a média obtida através do sentido de impressão e diâmetro do bico de impressão.



Fonte: Autor, 2023

Coletados os dados da força de ruptura (FR) medido em kilo Newton (kN) e da deformação de ruptura (DR) medidos em Mega Pascal (MPa), alguns dos corpos de prova ensaiados, devido ao seu baixo valor, não foram coletados resultados pela máquina no ensaio de tração, fica assim com valor igual a zero. conforme Figura 22. As amostras impressas com bico de 0,8 mm, no sentido longitudinal, foram as que apresentam maior e de menor variação na força e deformação de ruptura.

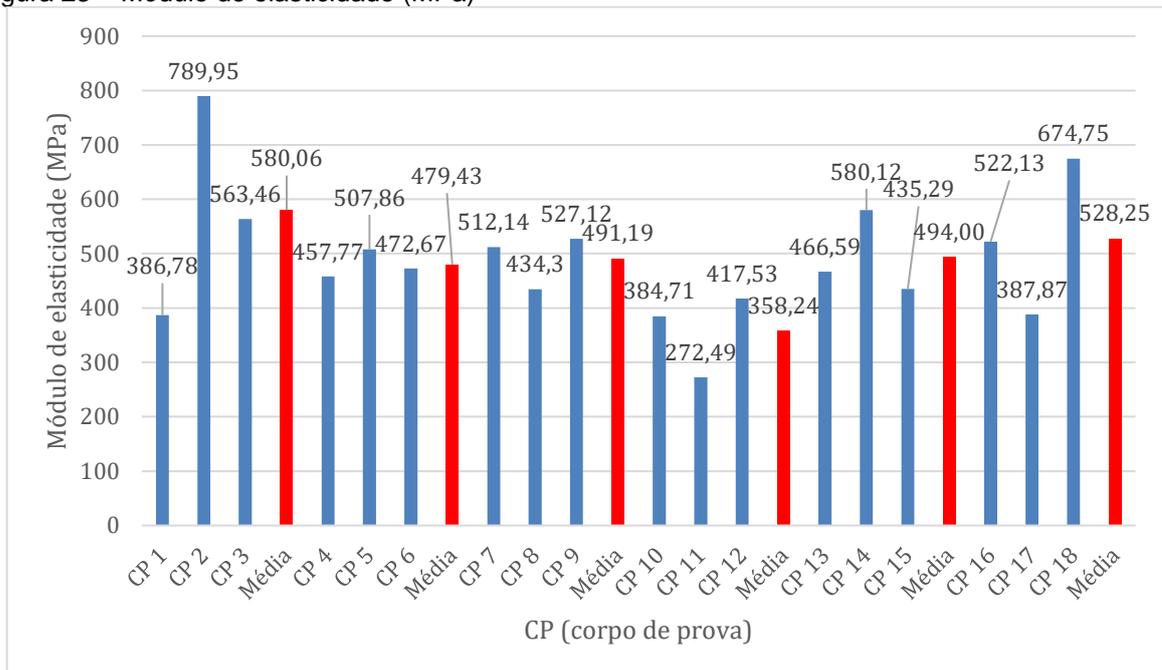
Figura 22 – Força de ruptura FR (kN) e deformação da ruptura DR (mm)



Fonte: Autor, 2023

Nesta etapa coletou-se o módulo de elasticidade dos corpos, que foram medidos em Mega Pascal (MPa), conforme mostra a Figura 23, não se obteve variações de medidas tão distantes, tais como os demais comparados, mesmo desta força os corpos que entregaram maiores resistências ao módulo de elasticidade, foram os impressos no sentido de impressão longitudinal de acordo com as médias apresentadas na figura. Os corpos de prova com média maior, foram os corpos com bico de impressão de 0,4 mm, no sentido longitudinal, com média de 580,06 MPa.

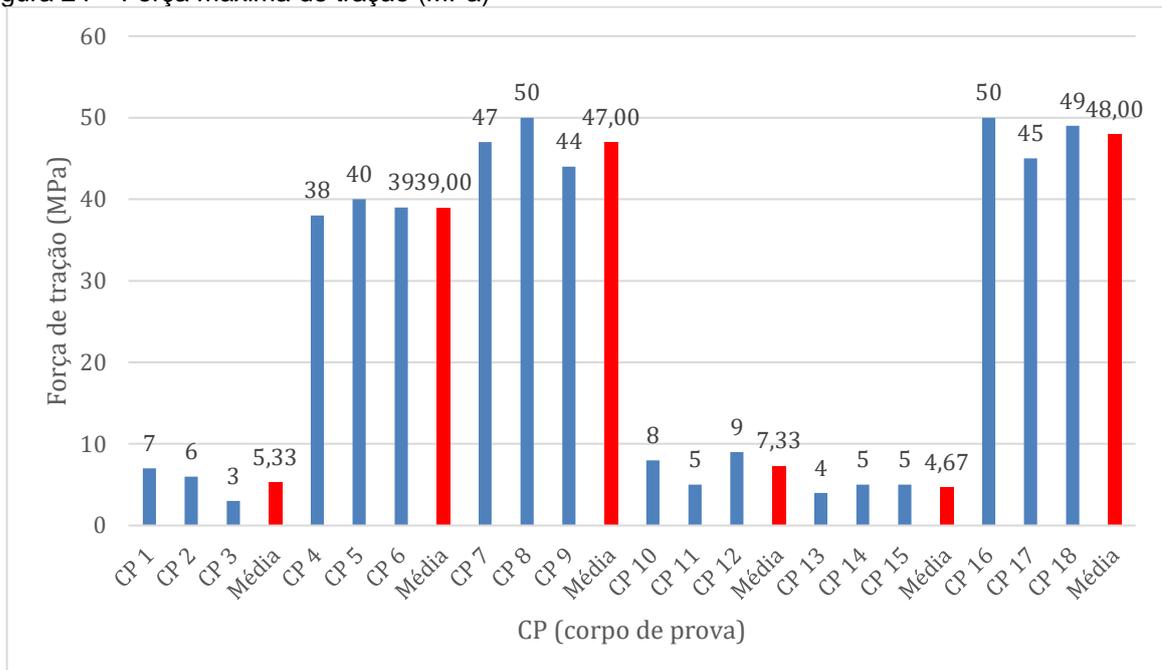
Figura 23 – Módulo de elasticidade (MPa)



Fonte: Autor, 2023

Na Figura 24 coletou-se a tensão máxima de tração, que foram medidos em Mega Pascal (MPa), obteve-se variações de medidas de valores bem distintos, desta força os corpos que entregam maiores tensões de força máxima de tração, analisado com base na média, foram os impressos no sentido de impressão longitudinal. Os corpos que apresentaram média maior de 48 MPa foram os corpos com bico de impressão de 0,8 mm, no sentido longitudinal, ficou muito próximo dos impressos com bico de 0,6 mm longitudinal, com média de 47 MPa, tendo diferença de apenas 1 MPa.

Figura 24 – Força máxima de tração (MPa)



Fonte: Autor, 2023

Coletadas informações conforme detalhadas no Quadro 8 descritos abaixo pelas siglas:

CP: Corpo de prova.

ES1: Força de escoamento (kN)

FM: Força máxima (kN)

FR: Força de ruptura (kN)

ES2: Tensão de escoamento (MPa)

ME: Módulo de elasticidade (MPa)

DR: Deformação ruptura (mm)

T: Tensão (força máxima) (MPa)

Quadro 8 – Resultados coletados nos ensaios de tração

CP	ES1 (kN)	FM (kN)	FR (kN)	ES2 (MPa)	ME (MPa)	DR (mm)	T (MPa)
CP 01	-0,01	0,08	0,08	-0,51	386,78	0,61	7
CP 02	0,02	0,07	-	1,77	789,95	-	6
CP 03	0,02	0,04	-	1,79	563,46	-	3
CP 04	0,36	0,46	0,44	29,88	457,77	3,66	38
CP 05	0,26	0,48	0,45	21,65	507,86	2,84	40
CP 06	0,47	0,47	0,45	39,26	472,67	3,27	39

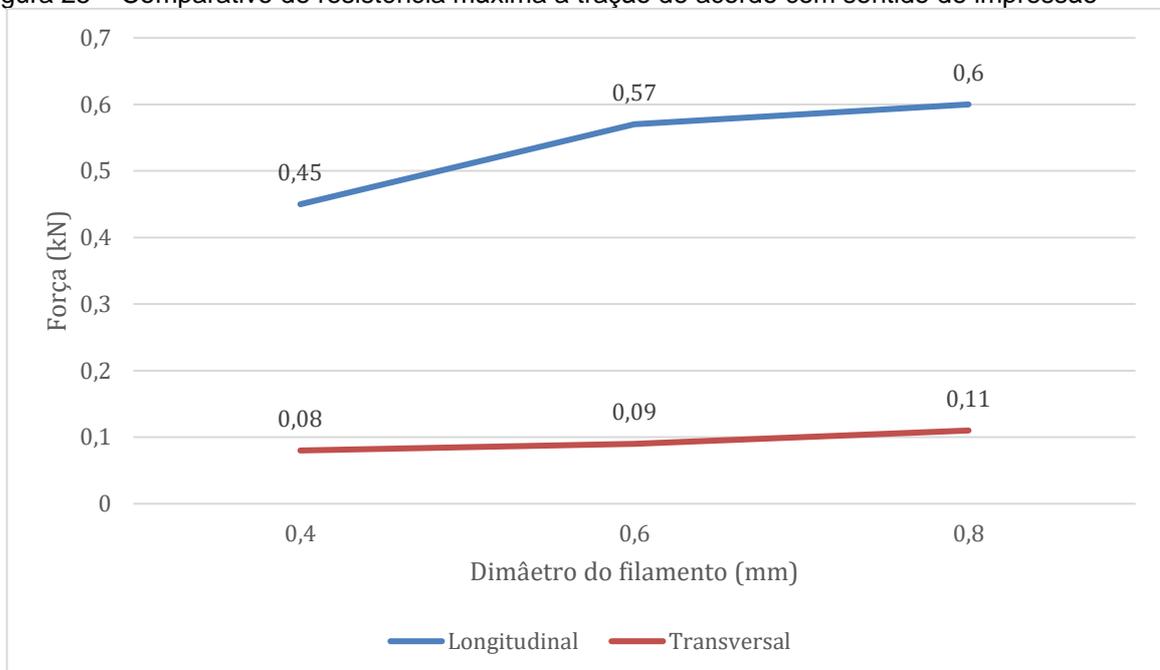
continua

continuação							
CP 07	0,54	0,56	0,56	45,25	512,14	2,84	47
CP 08	0,58	0,59	0,57	48,93	434,30	3,51	50
CP 09	-0,00	0,52	0,48	-0,28	527,12	2,79	44
CP 10	-0,01	0,09	0,09	-0,81	384,71	0,97	8
CP 11	-0,00	0,06	-	0,29	272,49	-	5
CP 12	0,01	0,11	-	1,08	417,53	-	9
CP 13	0,01	0,05	-	1,06	466,59	-	4
CP 14	0,02	0,06	-	1,71	580,12	-	5
CP 15	-0,01	0,06	-	-0,82	435,29	-	5
CP 16	0,43	0,60	0,58	36,05	522,13	3,54	50
CP 17	-	0,54	0,54	-	387,87	3,06	45
CP 18	0,57	0,58	0,57	47,80	674,75	2,49	49

Fonte: Autor, 2023

A análise dos resultados, possibilita identificar que quando o corpo de prova é impresso no sentido longitudinal, ele apresenta uma resistência a tração maior do que quando comparado ao sentido de impressão transversal, apresenta resistência 5x maior, conforme mostrado na Figura 25. Quanto maior o diâmetro do bico de impressão do CP, maior será sua resistência a tração.

Figura 25 – Comparativo de resistência máxima a tração de acordo com sentido de impressão



Fonte: Autor, 2023

Com base nos dados coletados no estudo, identificou-se qual sentido de impressão, e diâmetro do filamento apresenta uma resistência máxima a tração.

Quando se compara os corpos impressos na longitudinal, pode-se observar que os de diâmetro 0,8 mm com 0,6 kN, foram os que apresentaram maior resistência, onde os corpos com diâmetro 0,4 mm apresentaram 75% de eficiência ao comparar com o 0,8mm. Os corpos de filamento 0,6 mm apresentaram uma eficiência de 20% maior que os de 0,4 mm, porém ao comparar com os de diâmetro 0,8 mm ele apresenta 95% da eficiência entregue pelos de diâmetro 0,8 mm.

Quando foram analisados os corpos impressos na transversal, os que apresentaram maior resistência máxima a tração, foram os corpos de 0,8 mm com 0,11 kN, onde os corpos com diâmetro 0,4 mm apresentaram 73% de eficiência ao comparar com o 0,8mm. Os corpos de diâmetro 0,6 mm apresentaram uma eficiência de 9% maior que os de 0,4 mm, porém ao comparar com os de 0,8 mm ele teve 82% da eficiência entregue pelos corpos de prova com diâmetro de 0,8 mm.

Este estudo possibilitou identificar que os corpos que apresentaram resistência máxima a tração, foram os corpos impressos com diâmetro 0,8 mm, sendo assim esse poderá ser o filamento mais resistente para realizar a impressão das peças a serem substituídas na falta de peças, principalmente os corpos de sentido de impressão longitudinal, que apresentam resistência de 82,7% maior que as impressas na transversal.

CONCLUSÃO

A partir dos dados coletados neste estudo, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

Os parâmetros da impressão 3D na variação do bico de impressão do filamento, e sentido de impressão transversal e longitudinal foram examinados neste estudo para avaliar a resistência à tração dos materiais usados na manufatura aditiva, e variação das medidas após a impressão. Como resultado, foi usado uma impressora comercial *Ender 3*, *software* de modelagem, máquina de ensaio e material PLA.

Com a validação do controle dimensional, pode-se concluir que o comprimento total das amostras teve uma precisão maior quando impressos no sentido longitudinal, e ao imprimir peças circulares, se teve maior precisão no sentido transversal, e o diâmetro do filamento que apresentou precisão mais próxima da medida desejada foi o de diâmetro 0,8 mm com baixa alteração nas medidas.

Este estudo possibilitou identificar que os corpos que apresentam maior resistência máxima a tração, são os corpos impressos com filamento 0,8 mm, sendo assim esse possivelmente será o filamento mais resistente para realizar a impressão das peças a serem substituídas na falta de peças agrícolas, principalmente os corpos de sentido de impressão longitudinal, que apresentam resistência de 82,7% maior que as impressas na transversal.

Assim, pode-se concluir que, quando se trata de tensões de escoamento e tensões máximas que o material suporta, o sentido de impressão dos corpos de prova é favorável. No entanto, o sentido do filamento também o torna mais resistente, fazendo com que se rompa com maior carga quando exposto à tração. Em resumo, o estudo obteve os resultados desejados e forneceu informações importantes para estudos futuros sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- AFROSE, M. F.; MASOOD, S. H.; IOVENITTI, P.; NIKZAD, M.; SBARSKI, I. *Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material*, **Prog. Addit. Manuf.** v. 1, n. 1, p. 21–28, 2016.
- ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro, **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.
- ALMEIDA, G. S. G. de; SOUZA, W. B. de. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. São Paulo: Érica, 2015.
- AMBRÓS, G. S. **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- ARAÚJO, V. C. **Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.
- ARBEITER, F.; SPOERK, M.; WIENER, J.; GOSCH, A.; PINTER, G. *Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication*, **Polym. Test.** v. 66, p. 105-113, 2018.
- ARMSTRONG, C. **Post processing for FDM printed parts**. **3D Hubs**, 2021. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- ATTARAN, M. *The rise of 3-D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. **Business Horizons**, v. 60, n. 5, p. 677-688, 2017.
- AZADI, M.; DADASHI, A.; DEZIANIAN, S.; KIANIFAR, M.; TORKAMAN, S.; CHIYANI, M. *High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing*. **Forces in mechanics**, v. 3, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266635972100007X>. Acesso em 1 ago. 2023.
- AZADI, M.; KIANIFAR, M.; DEZIANIAN, S.; DADASHI, A.; TORKAMAN, S.; CHIYANI, M. *Investigation of the raster orientation on fatigue properties of additively manufactured PLA polymer by FDM method*. In: **PROCEEDINGS OF THE 28th ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF IRANIAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING**, Tehran, Iran, 2020.
- BARAN, E. H.; ERBIL, H. Y. *Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review*. **Colloids and Interfaces**, v. 3, n. 2, p. 43, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/COLLOIDS3020043>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BOURELL, D., KRUTH, J.P., LEU, M., LEVY, G., ROSEN, D., BEESE, A.M., CLARE, A., *Materials for additive manufacturing. Manufacturing Technology*, v. 66, p. 659-681, 2017.

CALVO, R. S. **Caracterização de filamentos comerciais de PLA e ABS para manufatura aditiva.** Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2023.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. *Fused deposition modeling with polypropylene, Mater. Des.* v. 83, p. 768-776, 2015.

CESNIK, M.; SLAVIC, J.; BOLTEZAR, M. *Accelerated vibration-fatigue characterization for 3D-printed structures: Application to fused-filament-fabricated PLA samples. International Journal of Fatigue*, v. 171, p. 107574, 2023.

CUNICO, M. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo.** Curitiba: Concep3D Pesquisas Científicas Ltda, 2015.

DEZIANIAN, S.; AZADI, M. *Investigation of the effect of layer orientation on flexural fatigue life and fracture surfaces in polylactic acid made by additive manufacturing with 3D printer, In: PROCEEDINGS OF THE 4TH NATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL AND AEROSPACE ENGINEERING, Tehran, Iran, 2019.*

EZEH, O. H.; SUSMEL, L. *On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA), Proc. Struct. Integr.* v. 9, p. 29–36, 2018.

FORD, S.; DESPEISSE, M. *Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

GARCIA, A.; SPIN, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies.** 2 ed. New York: Springer, 2015.

GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F. *Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. Revista Tecnologia*, [S. l.], v. 41, n. 1, 2020. DOI: 10.5020/23180730.2020.9917. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/9917>. Acesso em: 14 nov. 2023.

GOMEZ-GRAS, G.; JEREZ-MESA, R.; TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; LLUMÀ-FUENTES, J. *Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens, Mater. Des.* v. 140, p. 278-285, 2018.

JAP, N. S. F.; PEARCE, G. M.; HELLIER, A. K.; RUSSELL, N.; PARR, W. C.; WALSH, W. R. *The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer. Int. J. Fatigue* v. 124, p. 328-337, 2019.

JEREZ-MESA, R.; TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; LLUMÀ-FUENTES, J.; GOMEZ-GRAS, G.; PUIG, D. *Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing, Proc. Manuf.*, v. 13, p. 872–879, 2017.

KAZMER, D. O.; COLON, A. *Injection printing: additive molding via shell material extrusion and filling*. **Additive Manufacturing**, v. 36, 2020.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. *Additive manufacturing in the spare parts supply chain*. **Computers in Industry**, v. 65, n. 1, p. 50-63, 2014.

LEE, J.; HUANG, A. *Fatigue analysis of FDM materials*, **Rapid Prototyp. J.** v. 19, n. 4, p. 291-299, 2013.

LEE, S.; PEGUES, J. W.; SHAMSAEI, N. *Fatigue behavior and modeling for additive manufactured 304L stainless steel: the effect of surface roughness*. **Int. J. Fatigue**, v. 141, 2020.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. *Material property testing of 3D-printed specimen in pla on an entry-level 3D printer*, In: **PROCEEDINGS OF THE ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, PROCEEDINGS (IMECE), 2A**, 2014.

MATHIAS, R. F. **Análise experimental de amostras produzidas por manufatura aditiva em PLA através de ensaio de tração**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MERCADO LIVRE. **Filamento Impressão 3d Voolt Pla Preto 1kg**. 2023. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2689383262-filamento-impreso-3d-voolt-pla-preto-1kg_JM. Acesso em: 2 nov. 2023.

MILLER, A. T.; SAFRANSKI, D. L.; SMITH, K. E.; SYCKS, D. G.; GULDBERG, R. E.; GALL, K. *Fatigue of injection molded and 3D printed polycarbonate urethane in solution*. **Polymer**, v. 108, p. 121-134, 2017.

MORANDINI, M.; DEL VECHIO, G. H. *Impressão 3D, tipos e possibilidades: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências*. **Revista Interface Tecnológica**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020. DOI: 10.31510/infa.v17i2.866. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/866>. Acesso em: 14 nov. 2023.

PÉREZ, M.; CAROU, D.; RUBIO, E. M.; TETI, R. *Current advances in additive manufacturing*. **Procedia Cirp**, v. 88, p. 439-444, 2020.

RAULINO, B. **Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição)**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

REDWOOD, B.; SCHFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook: technologies, design and applications**. [s.l.]: 3D Hubs, 2017.

RIGON, L.; WEBLER, G.; GOMES, F. C.; DESBESSEL, F.; DALCIN, R. L. **Relação temperatura e controle dimensional de peças produzidas por manufatura aditiva com filamentos ABS e PLA**. In: SEMANA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA E ECONOMIA FAHOR, SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE

COOPERAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO E A INTEGRAÇÃO REGIONAL, 11, 2023, Horizontina. **Anais...** Horizontina,, 2023.

RODRIGUES, M. K. **Estratégias para o aumento de resistência e rigidez do PLA em manufatura aditiva.** Monografia – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2023.

SAFAI, L.; CUELLAR, J. S.; SMIT, G.; ZADPOOR, A. A. *A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers*, **Addit. Manuf.** v. 28, p. 87–97, 2019.

SANTOS, F. P. **Futuras tecnologias aplicadas à arquitetura: do digital para o material.** Tese (Mestrado em Arquitetura) – Departamento de Arquitetura, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.

SENATOV, F. S.; NIAZA, K. V.; STEPASHKIN, A. A.; KALOSHKIN, S. D. *Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed PLA-based porous scaffolds*, **Compos. Part B Eng.** v. 97, p. 193–200, 2016.

SILVA, P. C.; *et al.* Manufatura aditiva: revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 84502-84515, 2020.

SOLA, A.; CHONG, W. J.; SIMUNEC, D. P.; LI, Y.; TRINCHI, A.; KYRATZIS, I.; WEN, C. *Open challenges in testing of additively manufactured polymers: a literature survey and a case study in fused filament fabrication*. **Polymer Testing**, v. 117, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107859>. Acesso em: 25 out. 2023.

SOUZA, A. F; ULBRICH, C.B.L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2013.

SPOERK, M.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; SAPKOTA, J.; SCHUSCHNIGG, S.; HOLZER, C. *Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication*, **Plast. Rubber Compos.** v. 47, n. 1, p. 17-24, 2018.

TÜMER, E. H.; ERBIL, H. Y. *Extrusion Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review*. **Coatings**, v. 11, n. 4, p. 390, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/COATINGS11040390>. Acesso em: 22 nov. 2023.

VAFADAR, A.; *et al.* *Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges*. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgard Blucher, 2017.

WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. Anais [...]. São Carlos: UFSCar, 2019.

WISHBOX. **Tudo sobre impressão 3D: o que é, como funciona e tipos**. 25 nov. 2019. Disponível em <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>. Acesso em: 01 dez 2023.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. *The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components*, **Addit. Manuf.**, v. 8, p. 110–116, 2015.

ZIEMIAN, C. W.; ZIEMIAN, R. D.; HAILE, K. V. *Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts*. **Mater. Des.** v. 109, p. 209-218, 2016.

ZIEMIAN, S.; OKWARA, M.; ZIEMIAN, C. W. *Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene*. **Rapid Prototyp. J.**, v. 21, n. 3, p. 270–278, 2015.

ZUCCA, R. **Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. Disponível no Repositório Institucional da UFGD em: <https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio> 1. Agricultura 4.0. 2. Impressão 3D. 3. Tecnologias Agrícolas. I. Título.

ZUCCA, R.; SANTOS, R. C.; LOVATTO, J; LOVATTO, F; CARMATO, A. S. Estudo da viabilidade do uso de prototipagem rápida 3D em processos produtivos no meio rural. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n.28, p. 517-532, 2018.