



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO UFG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA MECÂNICA



Thiago Menezes do Prado

**Avaliação de resistência mecânica e análise de forma
geométrica de elementos de fixação por rosca
fabricados através de manufatura aditiva**

Goiânia
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Thiago Menezes do Prado

3. Título do trabalho

AValiação de Resistência Mecânica e Análise de Forma Geométrica de Elementos de Fixação por Rosca Fabricados através de Manufatura Aditiva

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 05/10/2023, às 08:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Menezes Do Prado, Discente**, em 05/10/2023, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4100447** e o código CRC **36F7883F**.

Thiago Menezes do Prado

**Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica
de elementos de fixação por rosca
fabricados através de manufatura aditiva**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha
Coorientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Prado, Thiago Menezes do

Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica de elementos de fixação por rosca fabricados através de manufatura aditiva [manuscrito] / Thiago Menezes do Prado. - 2023.
83 f.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha; co-orientador Dr. Rhander Viana.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

1. Impressão 3D. 2. Manufatura Aditiva. 3. Polímeros de Engenharia. I. Cunha, Daniel Fernandes da , orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 04 da sessão de Defesa de Dissertação de **Thiago Menezes do Prado**, que confere o título de Mestre em, **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos **trinta e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três**, a partir das **17h00min**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E ANÁLISE DE FORMA GEOMÉTRICA DE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO POR ROSCA FABRICADOS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Daniel Fernandes da Cunha - (PPGMEC-UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Rhander Viana - (UnB Gama)** Coorientador, Professor Doutor **Maksym Ziberov - (UnB)** membro titular externo e Professor Doutor **Everton Coelho de Medeiros - (SENAI SP)** membro titular externo: **cuja participação ocorreu através de videoconferência pelo link: meet.google.com/iaj-ajzi-dtm**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Daniel Fernandes da Cunha, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos trinta e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2023, às 19:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maksym Ziberov, Usuário Externo**, em 31/08/2023, às 20:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Everton Coelho de Medeiros, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 20:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4011422** e o código CRC **9824433F**.

Referência: Processo nº 23070.037143/2023-43

SEI nº 4011422

Dedico este trabalho à minha filha, mãe, tias e a meu orientador, responsáveis por me fazer querer construir sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por sempre estar à frente de tudo e de todos os meus passos, me direcionando em todos os momentos difíceis desta caminhada, agradecendo-lhe esta oportunidade, na qual o Senhor sempre me concedeu a perseverança e o discernimento necessário para concretizar e vencer mais esta etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha, pela orientação, incentivo, compreensão, estímulo e principalmente paciência em transmitir a mim seus valiosos conhecimentos e por estar sempre à disposição no auxílio e direcionamento para realização deste trabalho, objetivando sempre o meu sucesso.

Aos Professores Dr. Maksyn Ziberov e Dr. Everton Coelho de Medeiros que ao longo desta caminhada me auxiliaram com seus conhecimentos e por estarem sempre prontos a transmitir o auxílio necessário para a realização deste trabalho.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, pelo apoio e contribuição para desenvolvimento deste trabalho, e aos amigos Alcione dos Reis e Samuel Alves de Freitas pelo auxílio durante essa caminhada.

Aos meus familiares pelo incentivo e apoio incondicional, que sempre me apoiou nos momentos difíceis ao longo desta jornada, estando sempre presente em todos os momentos da minha vida e por sempre acreditarem em mim: em especial a minha filha Isadora Vilarinho Menezes Prado pelo amor incondicional e por ser sempre minha motivação para todos os desafios de minha vida.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

O trabalho aborda a resistência mecânica à tração dos filetes internos em corpos de prova fabricados em PLA e ABS a partir de manufatura aditiva por *Fused Deposition Modelling* (FDM). Foram fabricados corpos de prova com dimensões 30 x 30 x 20 mm em PLA e ABS com uma impressora 3D modelo Ender 3 V2. O furo passante dos corpos de prova possui medidas M12 x 1,75. Os parâmetros variados na pesquisa foram: preenchimentos (p), quantidade de paredes (w) e altura das camadas (h), para possibilitar o entendimento de como é afetado a resistência mecânica do material. Assim, o presente estudo objetivou comparar a resistência mecânica dos polímeros PLA e ABS através de ensaios de tração, definindo qual material possui maior resistência e com baixo custo de produção oriundo da impressão 3D. Os ensaios de tração foram realizados por uma máquina de tração com capacidade máxima de 600 kN a qual aplica uma tensão gradual nos corpos de prova até a fratura ou rompimento do material. Para a análise dos resultados, foram verificados a relação de resistência dos corpos de prova de forma gráfica (força x tempo) e estatística (ANOVA), julgando a influência da relação das variáveis em teor individual e coletivo nos resultados alcançados. Peças impressas em PLA apresentaram maior qualidade de resistência mecânica quando comparadas com as impressas em ABS, de acordo com os resultados gráficos obtidos. Como resultado estatístico, a análise ANOVA permitiu identificar que o fator de maior influência nos testes foi o de preenchimento (P%), sendo preponderante tanto de forma individual quanto coletiva, ao ser analisado sua influência com as outras duas variáveis.

Palavras-chave: Impressão 3D. Manufatura Aditiva. Polímeros de Engenharia.

ABSTRACT

The work addresses the mechanical tensile strength of internal fillets in specimens manufactured in PLA and ABS from additive manufacturing by Fused Deposition Modelling (FDM). Test specimens measuring 30 x 30 x 20 mm were manufactured in PLA and ABS with a 3D printer model Ender 3 V2. The through hole of the specimens has measurements M12 x 1.75. Varied parameters used were: infill (p), number of walls (w) and height of the layers (h), to enable the understanding of how the mechanical resistance of the material is affected. Thus, the present study aimed to compare the mechanical resistance of PLA and ABS polymers through tensile tests, defining which material has greater resistance and with low production cost from 3D printing. The tensile tests were carried out using a tensile machine with a maximum capacity of 600 kN, which gradually applied tension to the specimens until the material fractured or ruptured. For the result analysis, relation of resistance from the specimens was verified graphically (force x time) and statistically (ANOVA), judging the influence of variables in individual and collective content in the achieved results. Pieces printed in PLA showed a higher quality of mechanical resistance compared to those made from ABS material when graphic results obtained were verified. As a statistical result, the ANOVA analysis identified the factor with greatest influence on tests were infill (P%), being preponderant both individually and collectively, when analyzing its influence with other two variables.

Keywords: 3D printing. Additive Manufacturing. Engineering polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Suavização da malha.....	14
Figura 2: Etapas dos processos MA.	15
Figura 3: Estratégias de preenchimento internos das camadas.....	16
Figura 4: Regra dos 45° para a geração de suporte (Adaptado do manual de instruções da Cliever CL2 Pro).	17
Figura 5: Orientações de impressão.	17
Figura 6: Resistência à tração versus deformação na resistência à tração para amostras impressas em ABS.....	18
Figura 7: Resistência à tração versus deformação na resistência à tração para amostras impressas em PLA.	18
Figura 8: Limite elástico.....	21
Figura 9: Correlação entre dureza e limite de resistência à tração.	22
Figura 10: Exemplo de curva de tensão-deformação.	25
Figura 11: Padrões de preenchimento.	26
Figura 12: Resultados de deslocamento máximo (global) e deformação máxima equivalente.	27
Figura 13: Diferentes tipos de orientação angular de preenchimento.	28
Figura 14: Vista esquemática dos ângulos de filamentos para (a) posicionamento horizontal, (b) vertical e (c) perpendicular da peça.	28
Figura 15: Massa dos corpos de prova, em gramas (g).	29
Figura 16: Avaliação dimensional das amostras, em milímetros (mm).	30
Figura 17: Sentidos de Deposição escolhidos para os 4 corpos de prova.	31
Figura 18: Teste de tensão de cisalhamento elaborado no <i>software</i> ANSYS.	32
Figura 19: ABS (à direita) e PLA (à esquerda) com filamento horizontal, área de ruptura.	34
Figura 20: Blocos com filetes de rosca (ABS).	36
Figura 21: Impressora Creality Ender 3V2.....	38
Figura 22: Ficha técnica da impressora Creality Ender 3V2.....	39
Figura 23: Microscópio.	39
Figura 24: Máquina de tração modelo UHF 600kNX Shimadzu.	40
Figura 25: Bloco PetG.	41

Figura 26: Parafuso soldado ao extensor para teste de tração.	41
Figura 27: Parafuso soldado ao extensor para teste de tração.	42
Figura 28: Filetes de rosca corpo de prova PLA bipartido.	43
Figura 29: Parafuso (12mm) e rosca (passo, 1,75mm) padrão.	43
Figura 30: ABNT – “NBR 5876 – Roscas – Terminologia”.....	44
Figura 31: Peças para pré-testes (ABS).	45
Figura 32: Peças para Testes (PLA e ABS).	45
Figura 33: Gráfico 3 - Pré-teste Peça ABS 1.	46
Figura 34: Gráfico 4 - Pré-teste Peça ABS 2.	47
Figura 35: Gráfico 5 - Pré-teste Peça ABS 3.	47
Figura 36: Peça 2 de ABS após o pré-teste, onde a seta azul aponta para local de rompimento dos filetes de rosca.	49
Figura 37: Peças 1 e 3 de ABS após o pré-teste, onde os círculos amarelos apontam os danos na estrutura externa.	49
Figura 38: Gráfico 6 - Comparativo de testes Peça 1 (h10w2p15).	51
Figura 39: Gráfico 7 - Comparativo de testes Peça 2 (h10w2p55).	51
Figura 40: Gráfico 8 - Comparativo de testes Peça 3 (h10w6p15).	52
Figura 41: Gráfico 9 - Comparativo de testes Peça 4 (h10w6p55).	52
Figura 42: Gráfico 10 - Comparativo de testes Peça 5 (h20w2p15).	53
Figura 43: Gráfico 11 - Comparativo de testes Peça 6 (h20w2p55).	53
Figura 44: Gráfico 12 - Comparativo de testes Peça 7 (h20w6p15).	54
Figura 45: Gráfico 13 - Comparativo de testes Peça 8 (h20w6p55).	54
Figura 46: Gráfico 14 - Representação gráfica DOE – PLA.	57
Figura 47: Gráfico 15 - Representação gráfica DOE – ABS.	58
Figura 48: Resultados de significância dos fatores investigados.	60
Figura 49: Gráficos de dupla interação para tração máxima.	61
Figura 50: Resultados de influência dos fatores investigados.	61
Figura 51: Enredo de efeitos principais para tração máxima de cada parâmetro.	62
Figura 52: Imagem microscópica da angulação interna dos filetes de rosca (peça h10w6p15) – Esquerda ABS, direita PLA.	65
Figura 53: Gráfico 16 - Box Plot – Angulação de fabricação dos filetes de rosca em PLA. ...	65
Figura 54: Gráfico 17 - BoxPlot – Angulação de fabricação dos filetes de rosca em ABS.	66
Figura 55: Propriedades material PLA e ABS.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais tecnologias de digitalização 3D.....	13
Tabela 2: Resultados para os ensaios de flexão. Onde, CP= corpo de prova, P= Carga, I= momento de inércia, M= Momento fletor máximo, W= módulo de resistência, σ = tensão de flexão de ruptura, Q= carga variável, V=esforço cortante, τ = tensão tangencial ou de cisalhamento.	19
Tabela 3: Resultados do ensaio de resistência à tração.	30
Tabela 4: Tabela de resultados obtidos nos ensaios de tração.....	32
Tabela 5: Tabela de análise dos resultados.....	33
Tabela 6: Resultados dos testes de tensão.	33
Tabela 7: Dados do experimento (DOE) – PLA.....	57
Tabela 8: Dados do experimento (DOE) – ABS.	58
Tabela 9: Dados de angulação dos filetes de rosca fabricados – PLA.	65
Tabela 10: Dados de angulação dos filetes de rosca fabricados – ABS.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

h	Altura
W	Quantidade de paredes
P	Preenchimento

Siglas

kN	Quilo Newton
s	Segundos
\bar{x}	média
s	desvio padrão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS	9
2.1 Conceitos de Manufatura Aditiva (MA)	9
2.2 Princípios do Processo da Manufatura Aditiva (MA).....	11
2.3 Etapas da Manufatura Aditiva (MA).....	14
2.4 Métodos de construção das peças	16
2.4.1 Estratégia de preenchimento	16
2.4.2 Orientação da impressão	16
2.4.3 Espessura das camadas.....	18
2.5 Propriedades dos materiais.....	20
2.5.1 Deformações elásticas e plástica dos materiais	20
2.5.2 Dureza.....	21
2.6 Polímeros	22
2.6.1 Resistência mecânica dos polímeros.....	23
2.7 Ensaio de resistência à tração.....	24
2.8 A influência de diferentes tipos de preenchimento na manufatura aditiva.....	26
2.9 Ensaio de tração em amostra fabricadas por manufatura aditiva.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Materiais e corpos de prova	36
3.2 Equipamentos.....	38
3.3 Ensaio de tração	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Resultados dos pré-testes	46
4.2 Resultados dos testes.....	50
4.3 Análise estatística.....	56
4.3.1 Tabulação dos dados para análise estatística.....	56
4.3.2 Análise estatística dos ensaios	59
4.4 Avaliação das dimensões da rosca fabricadas.....	64
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

O estudo baseia-se em analisar as condições de resistência dos filetes de rosca entre dois materiais poliméricos e depois definir quais condições de deposição obteve-se melhor resultado.

A pesquisa na qual demos ênfase é uma tecnologia denominada modelagem por deposição de material fundido (*Fused Deposition Modelling* - FDM), especificamente nesse trabalho foi utilizado o poliácido láctico, comercialmente denominado PLA, também conhecido como PDLA ou PLAA. Este é um polímero sintético termoplástico que vem substituindo os plásticos convencionais em diversas aplicações. É feito com ácido láctico (composto orgânico de função mista – ácido carboxílico e álcool) a partir de fontes renováveis como milho, mandioca, beterraba e, por isso, é biodegradável, compostável, reciclável e não possui nenhum tipo de resíduo tóxico. Amplamente utilizado em manufatura 3D por ser fácil de imprimir e pode ser usado em qualquer impressora, aberta ou fechada, com ou sem mesa aquecida. Possui também uma boa aderência na mesa de impressão, baixíssima contração, elevada dureza superficial e alta qualidade visual na impressão.

O outro material utilizado é o Acrilonitrila Butadieno Estireno, comercialmente conhecido como ABS. Um polímero amorfo produzido através de polimerização por emulsão ou massa do acrilonitrilo e estireno na presença de polibutadieno. As propriedades mais importantes do ABS são a resistência ao impacto e a rigidez. Para sua impressão é necessária mesa aquecida e, preferencialmente, impressora fechada.

Os dispositivos de Prototipagem Rápida mais comuns e difundidos pelo mundo são os que utilizam a tecnologia de FDM. O processo tipicamente se inicia pela extrusão de filamentos de material, a partir de um cabeçote extrusor, sobre uma plataforma de construção, formando a primeira camada do componente em fabricação. Após esse processo a plataforma é rebaixada, ou a extrusora é elevada na medida da espessura de camada da peça definida via *software*, então é depositada uma nova camada de material que se une com a anterior recém-depositada. O procedimento se repete até o fim da construção do produto (ALMEIDA, 2007; ZIEMIAN *et al.*, 2015).

Devido a ampla difusão deste processo em indústrias de diferentes segmentos, estudos são feitos para análise de resistência mecânica em diferentes aspectos de fabricação. Não foi

observado, no entanto, trabalhos experimentais que contemplem a resistência mecânica de peças fabricadas por FDM que possuam em sua estrutura elementos roscados, portanto, o objetivo geral deste trabalho é comparar esses dois materiais, PLA e ABS, e analisar qual possui maior resistência mecânica suportada em seus filetes de roscas submetidos a ensaios de tração. Também serão avaliados como os diferentes parâmetros de deposição influenciam na forma geométrica da fabricação destes filetes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS

O processo denominado Manufatura Aditiva (MA), ou *Additive Manufacturing* (AM) se originou na década de 80, e atualmente é amplamente empregada em diversos segmentos industriais e diferentes atuações de comércios.

Na indústria, os departamentos de manutenção têm utilizado a técnica pelo baixo custo e personalização de peças para substituírem peças danificadas com outras fabricadas com melhorias geométricas ou com maiores resistências mecânicas. A inovação nesta utilização é que dispensa deixar uma máquina parada pela espera de reposição de peças, além de dispensar a compra e estoque de várias peças de reposição.

Visando a utilização da manufatura aditiva na indústria mecânica, o presente trabalho sugere a análise de diferentes parâmetros e suas influências na resistência mecânica e nas tolerâncias geométricas de roscas fabricadas pela técnica de MA.

2.1 Conceitos de Manufatura Aditiva (MA)

Segundo Volpato (2017), a Manufatura Aditiva (MA) pode ser definida como “um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de camadas, uma após a outra, até a obtenção do produto final, com informações obtidas por meio de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD”. Trata-se de uma tecnologia que vem melhorando, aprimorando e/ou modernizando o processo de fabricação, sendo comumente chamada de impressão tridimensional (3DP) e prototipagem rápida.

Para complementar a definição de MA já apresentada, Gebhardt e Hotter (2016), afirmam que, seu princípio se baseia no fato que todo objeto tridimensional pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com as mesmas, sem alteração no produto final, independentemente de sua complexidade.

Araújo (2017) define impressão 3D como uma técnica em que, modelos CAD (*Computer-Aided Design*) projetados digitalmente são fabricados protótipos/objetos tridimensionais por meio da adição de camadas finais. Uma das tecnologias de crescimento mais comum e rápido em MA é *Fused Deposition Modeling* (FDM), pois, tem a capacidade de construir protótipos funcionais de geometria complexa.

Bandyopadhyay e Bose (2016) apontam que a MA é vista como uma estratégia para unir materiais para fazer segmentos após a exibição do projeto adicionado por computador (CAD) de uma seção, camada por camadas. Tal definição pode ser complementada por Bontempo *et al.* (2021) quando exprimem que, as tecnologias de MA são uma das áreas mais promissoras na fabricação de componentes. Além disso, apontam que, a MA é expressão que envolve diversos modelos ou métodos, entre eles: a estereolitografia (STL), além da modelagem de deposição fundida (FDM), às muitas denominações acerca dessa tecnologia, a que mais resistiu, e até hoje é usada, é a prototipagem rápida (*Rapid Prototype - RP*) (JÚNIOR *et al.*, 2015).

A técnica RP permite a construção rápida e precisa de objetos complexos, possibilitando a produção de protótipos físicos a partir de arquivos digitais em um curto espaço de tempo. Para isso, o uso de sistemas CAD (*Computer-Aided Design*) fundamental, uma vez que esses *softwares* permitem a criação de modelos 3D precisos que servirão de base para a fabricação dos protótipos. A relação entre RP e CAD tem se mostrado uma ferramenta importante para a redução de custos e tempo de desenvolvimento de produtos, pois permite a detecção antecipada de problemas no projeto, a realização de modificações antes da fabricação, além da possibilidade de avaliação do design e funcionalidade do produto (PRADO; SANTOS, 2017).

É preciso acrescentar que, em FDM, a fabricação de objetos ou protótipos é realizada por meio da fusão e extensão do filamento de polímero termoplástico de 1,75 / 2,85 mm de diâmetro através de um extrusora de fusão a quente. Dentre os diversos materiais que o processo de manufatura aditiva utiliza, são comuns os Polietileno tereftalato (PET) e o seu derivado PETG, o nylon, Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA), Poliuretano Termoplástico (TPU), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Poliacido Láctico (PLA), entre outros, sendo os dois últimos os mais difundidos e utilizados pelo processo de MA. O PLA é o mais popular entre os entusiastas da metodologia de impressão 3D pela facilidade em ser trabalhado pelo processo de impressão 3D (MOHAN *et al.*, 2021).

Aliado a novas técnicas que surgem constantemente, a MA hoje, não se atém apenas a modelos reduzidos, mas, constrói produtos finais, complexos e empregados em diferentes setores da indústria (JÚNIOR *et al.*, 2015). De acordo com Lovo e Fortulan (2016), o FDM é o mais difundido processo de MA, atualmente aplicada na fabricação direta de produtos, porém, apresenta forte característica anisotrópica. É usado na construção/fabricação direta de produtos comerciais, e que ocorre por causa dos progressos e popularidades do uso de programas de computador via CAD, e também pelas impressoras 3D, nesta última década.

Os mecanismos de RP mais usados e divulgados são aqueles empregados pela FDM, cujo processo começa pela extrusão de filamentos do material, com base num cabeçote extrusor,

depositado sobre uma mesa (plataforma) de construção, compreendendo a primeira camada do produto em fabricação. Rebaixa-se o plano de apoio e deposita-se a próxima camada, e assim, sucessivamente, as camadas vão sendo acrescentadas até chegar ao produto final (MOHAN *et al.*, 2021).

Vishwas e Basavaraj (2016) definem a RP como uma tecnologia para criação de componentes usando CAD. No lugar de usar métodos ou técnicas convencionais, o RP depende da somatória de modelos de materiais para se criar uma peça ou produto. Em razão de algumas situações positivas, o RP comprovou que seria possível reduzir o tempo gasto nas suas montagens ou fabricações de produtos, apresentando vantagens sobre os demais métodos conhecidos (VISHWAS; BASAVARAJ, 2016). Visto que, os princípios das tecnologias atuais em MA podem ser traçados por meio de duas grandes áreas técnicas: a topografia e a fotoescultura.

2.2 Princípios do Processo da Manufatura Aditiva (MA)

Conforme o já exposto acerca da MA, confirma-se que seus processos compreendem a construção de objetos tridimensionais, colocando camadas sobre camadas, sendo que tais sobreposições são realizadas de maneira automática, reduzindo a participação de maneira humana no decorrer da operação (ALVES, 2018).

A modelagem de materiais para a MA é uma etapa crítica do processo de produção, pois é responsável por garantir a precisão e qualidade da peça impressa em 3D. Existem diferentes métodos de modelagem utilizados na manufatura aditiva, incluindo a modelagem por extrusão, por laser, por deposição de material fundido, por estereolitografia e por sinterização seletiva a laser (MELLO, 2020). Cada método de modelagem apresenta suas próprias vantagens e desvantagens, sendo que a escolha do método depende das características do material utilizado e das especificações do produto final desejado. Para garantir a precisão da modelagem, é necessário utilizar *softwares* de CAD que permitam a criação de modelos tridimensionais complexos e a geração de arquivos no formato adequado para a impressão em 3D (ZANINI *et al.*, 2019).

De acordo com Gibson, Rosen e Stucker (2010), “[...] a maioria dos sistemas CAD 3D geram modelos tridimensionais a partir de operações com sólidos e ou superfícies [...]”, acrescentando que, como forma de obter arquivos 3D para a MA, recomenda-se que se utilize

de uma modelagem sólida, levando em conta que eles, trazem problemas em número reduzido, no momento de fazer a conversão do modelo para algum dos formatos e empregados na MA (ALVES, 2018).

Santana (2021) ressalta que, para que a impressão seja bem-sucedida, é necessário que o arquivo STL (*Standard Tessellation Language*) esteja adequado aos requisitos do processo de impressão. Segundo Santana *et al.* (2021), alguns critérios devem ser observados para garantir o bom funcionamento dos arquivos STL, tais como a topologia da peça, a resolução da malha, a espessura das paredes, a orientação da peça na plataforma de impressão, a presença de suportes e a integridade do arquivo.

Existem diferentes tipos de softwares CAD 3D disponíveis no mercado, com diversas características e funcionalidades. Segundo Gomes *et al.* (2021), os principais tipos de *softwares* CAD 3D são: paramétricos, diretos, baseados em malha e de modelagem livre. Os *softwares* paramétricos permitem a criação de modelos 3D a partir de parâmetros e fórmulas matemáticas, possibilitando a rápida modificação do modelo a partir de suas variáveis. Já os *softwares* diretos permitem a manipulação direta do modelo, sem a necessidade de criar parâmetros, facilitando a criação de formas complexas. Os *softwares* baseados em malha permitem a modelagem de superfícies complexas e a manipulação de malhas 3D. Por fim, os *softwares* de modelagem livre permitem a criação de formas orgânicas e escultóricas, a partir da manipulação direta do modelo. A escolha do tipo de software CAD 3D mais adequado dependerá das necessidades e objetivos do projeto em questão (GOMES *et al.*, 2021).

Quanto à digitalização 3D, pode-se dizer que, é ainda chamada de escaneamento, possibilita chegar-se às superfícies externas dos objetos, através de scanners com capacidade de captar a geometria de um dado objeto físico, que, depois de passar por uma remodelagem para sanar inesperados defeitos do processo, sendo convertida em modelos para serem usados nos sistemas de engenharia (DA SILVA *et al.*, 2010).

Ferreira (2003, p. 25) expõe que “os processos de digitalização podem ser divididos em sistemas de contato e sistemas sem contato [...]”, sendo que, “dentre as várias tecnologias [...] uma das mais utilizadas é o laser ou luz estruturada por captura das geometrias”, valendo ainda apontar que, tal processo apresenta maior automação ao adquirir os dados, sendo mais rápido e tem maior precisão (FERREIRA, 2003), desde que se leva em conta a opacidade e a cor da superfície que vai ser escaneada.

E, para reforçar esta afirmação, Sokovic e Kopac (2006), diz que, a digitalização tridimensional a laser é o processo mais rápido e preciso no eixo Z, podendo digitalizar vários tipos de materiais e texturas, pois não há o contato sendo possível até mesmo a digitalização de

líquidos (ALVES, 2018). Então, para ilustrar e enriquecer o que foi exposto, tem-se a Tabela 1, com as principais tecnologias de digitalização 3D.

Tabela 1: Principais tecnologias de digitalização 3D.

Escaneamento 3D	
Com Contato	Sem Contato
	Charge – coupled device (CCD)
	Fotogrametria digital
Apalpamento	Radar laser
Braço Mecânico	Triangulação por cores
Triangulação eletromagnética	Triangulação por laser
Triangulação ultrassônica	Tunelamento
	Luz branca ou estruturada

Fonte: Alves (2018).

No que se refere ao formato STL, deve-se considerar o que aponta Chua *et al.* (2010), STL foi proposto por *Albert Consulting Group*, em 1988, sob a responsabilidade da empresa 3D Systems Inc., dos Estados Unidos. É importante deixar registrado que, o STL é tido como sistema mais empregado na MA, por causa de sua capacidade representativa geométrica enquanto modelo de arquivo nos *softwares* de CAD, sendo o sistema padronizado da área industrial como uma das ferramentas de MA mais usada na atualidade (ALVES, 2018). Além disso, o arquivo STL pode ser apresentado no formato binário, tornando-o mais compacto, inadequado para interpretações humanas, diminuindo também a portabilidade entre diferentes plataformas virtuais.

As principais características do arquivo STL são a sua facilidade de uso e compatibilidade com uma grande variedade de *softwares* e equipamentos de MA. Entretanto, a malha formada por triângulos apresenta limitações em relação à resistência mecânica do objeto produzido e à fidelidade da sua representação em relação ao modelo original (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Em relação à sua linguagem textual, o arquivo STL é composto basicamente por coordenadas de vértices e índices de triângulos, que definem a sua geometria e topologia. De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), esse formato de arquivo é simples e compacto, tornando-se adequado para a transmissão de modelos tridimensionais pela internet e para o armazenamento de grandes conjuntos de dados em discos rígidos. Entretanto, a simplicidade da linguagem textual do arquivo STL não permite a inclusão de informações adicionais sobre o modelo, como

cores, texturas ou informações de materiais, limitando a sua capacidade de representação visual do objeto.

O arquivo STL apresenta algumas deficiências em relação à impressão. Mello (2020) aponta que, a malha tridimensional formada por triângulos pode gerar superfícies rugosas e irregulares, especialmente em modelos com curvas suaves ou detalhes finos. Além disso, a representação discreta do objeto pode gerar falhas na impressão, como buracos, sobreposições ou áreas vazias. Essas deficiências podem comprometer a qualidade e a precisão da impressão, exigindo o uso de *softwares* especializados para a correção e otimização dos modelos antes da impressão.

Nesta perspectiva, há que se levar em consideração a afirmação feita por Chua *et al.* (2010, p. 28) que, “[...] a qualidade da malha é diretamente dependente da qualidade dos algoritmos geradores de malha implementados nos módulos de exportação dos sistemas CAD”. Então, em caso de a geometria da peça apresentar falhas ou erros, e ainda, fazer ocorrer erros próximos, daí, ser preciso usar ferramentas específicas para reparar a malha defeituosa (CHUA *et al.*, 2010, *apud* ALVES, 2018), suavizando-as como o demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Suavização da malha.



Fonte: Alves (2018).

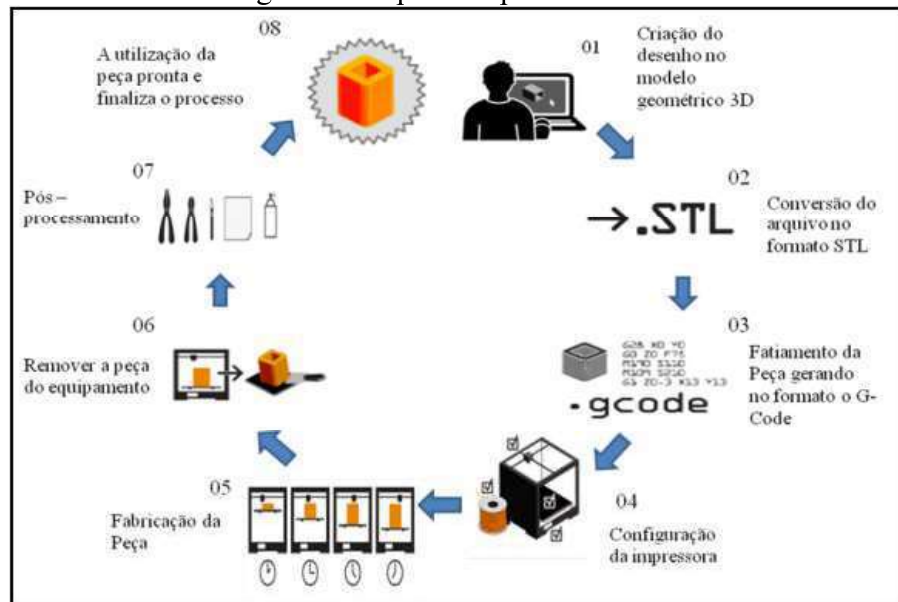
Em vista da Figura apresentada, de acordo com Alves (2018), a conversão de um modelo sólido em um modelo de representação de malhas de polígonos, como é o caso do STL, na maioria dos casos leva a erros de aproximação de superfícies contínuas e regulares por facetas. Valendo dizer que, mesmo sendo bem pequenas, não são capazes de representar de maneira suavizadas tais superfícies (ALVES, 2018).

2.3 Etapas da Manufatura Aditiva (MA)

Raulino (2011) relata que a MA se torna uma tecnologia diferencial entre as demais por seus aspectos físicos em relação ao modelo e os recursos empregados. No entanto, seu lado

computacional é semelhante aos demais processos subjacentes a MA. Para a fabricação das peças por MA, as etapas seguem oito fases, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Etapas dos processos MA.



Fonte: Santos *et al.* (2018).

Ao analisar a Figura 2, tem-se o seguinte sobre cada etapa apresentada: Primeiramente, cria-se o desenho da peça desejada usando o modelo geométrico 3D (*software* CAD); na segunda etapa, converte-se o desenho em 3D para o formato de arquivo de *stereo lithography* (STL); segue-se a etapa três onde transfere-se o arquivo STL do modelo para outro *software* para que a peça seja dividida em camadas, processo popularmente conhecido como fatiamento do modelo (RIBEIRO *et al.*, 2018). Nessa etapa define-se a espessura de cada camada, a velocidade em que será executada e que insumos serão usados com o arquivo G-Code; na quarta etapa, a impressora é preparada, caso seja necessária fazer algum ajuste da distância entre o bico da extrusora e a mesa, ou o nivelamento da mesa onde será depositada a primeira camada.; a quinta etapa é onde ocorre a fabricação da peça, de modo automático; na sexta etapa – após o resfriamento da mesa onde foi depositada a primeira camada, remove-se o objeto da impressora; na sétima etapa – os suportes são retirados (pós-processamento), caso haja a necessidade de utilizar suportes para fabricação da peça e a oitava ou última etapa – mostra a peça pronta (MELLO, 2020).

2.4 Métodos de construção das peças

São muitas as maneiras de se fabricar as peças, e, as variações existentes entre impressoras e entre projetos, dão conta do preenchimento da camada e o direcionamento dado pela impressão. Assim, os parâmetros mais convenientes ao projeto, devendo ser selecionados de modo direto da impressora, como por exemplos:

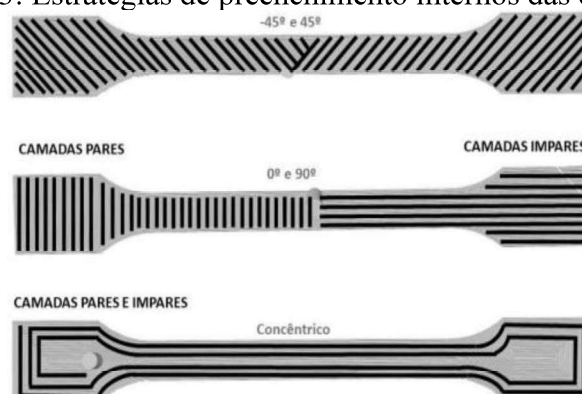
2.4.1 Estratégia de preenchimento

Nesse caso, pode-se escolher vários caminhos a ser percorrido no cabeçote. Há algumas “estratégias de preenchimento bem comuns”, são chamadas de retilínea e concêntrica (SANTANA *et al.*, 2021). Assim, tem-se que,

[...] a) Retilínea: Caracteriza-se pela trajetória em zig-zag, cujos filamentos são notavelmente paralelos, podendo, estes, serem alterados ou não em diferentes ângulos; b) Concêntrica: O preenchimento interno é feito conforme o perímetro da camada em ciclos equidistantes. Os ângulos descritos pela trajetória do cabeçote são conhecidos como ângulo de varredura (raster angles) (MATHIAS, 2019, p. 33).

A descrição apresentada é ilustrada pela Figura 3 que se segue onde é possível observar a estratégia de divisão das camadas de acordo com a angulação da orientação de preenchimento, revelando camadas pares e ímpares.

Figura 3: Estratégias de preenchimento internos das camadas.



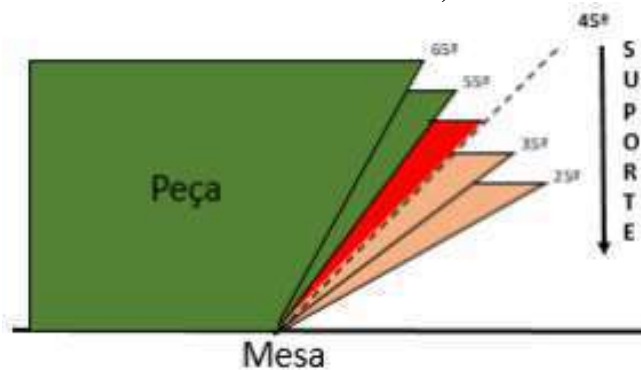
Fonte: Mathias (2019).

2.4.2 Orientação da impressão

Registre-se que as peças podem ser construídas em diferentes posições, em pé, deitadas,

na diagonal e etc. (MATHIAS, 2019). Estes modos diversificados podem refletir nos sistemas de produção, logo, alguns manuais sugerem que se use um suporte, isto é, um material para servir de apoio para as partes suspensa do objeto, a fim de facilitar ou garantir as angulações definidas nas impressões, tal como demonstrada na Figura 4.

Figura 4: Regra dos 45° para a geração de suporte (Adaptado do manual de instruções da Cliever CL2 Pro).

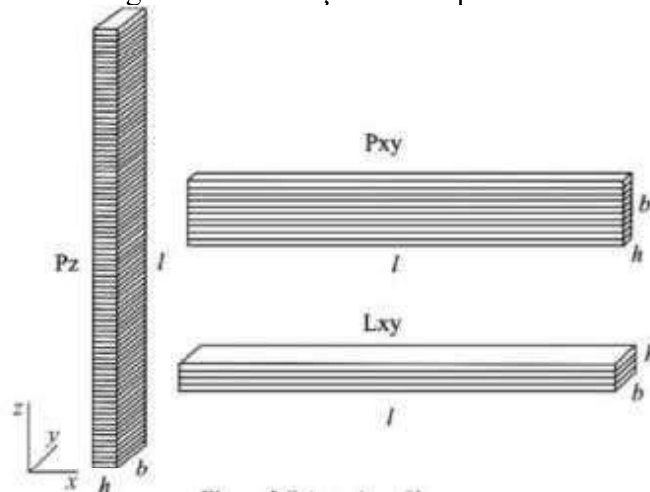


Fonte: Mathias (2019).

O conteúdo mostrado na Figura 4, ilustra perfeitamente o exemplo da empresa Cliever®, que “recomenda em seu manual que, para peças que apresentam ângulos menores do que 45° com a superfície da mesa de deposição, devem ativar a geração de suporte” (MATHIAS, 2019, p. 34).

Levando em consideração a possibilidade de a impressão ser realizada em várias posições, conforme mostra a Figura 5, deve-se ter em mente que as mais importantes delas, são a vertical (90°) e a horizontal (0°), cujas explicações seguem após a Figura 5.

Figura 5: Orientações de impressão.



Fonte: Dizon *et al.* (2018).

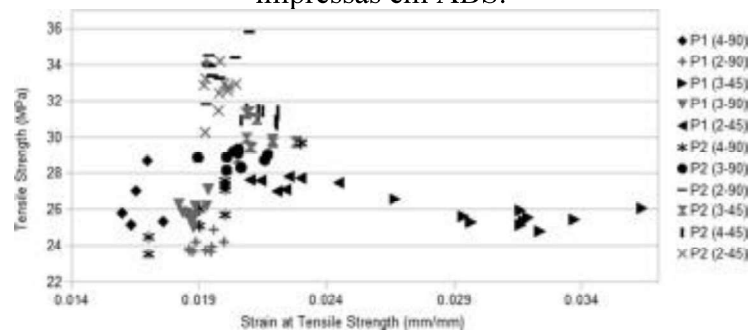
Analisando a Figura 5, o que se verifica é que, a orientação registrada por Pz representa a vertical (90°). Nela, é possível observar o fatiamento da peça em camadas, existindo um grande número delas. Enquanto a peça definida de Pxy, fatiada na horizontal, apresenta número menor de fatias, e a peça Lxy, também, fatiada horizontalmente, com um número ainda menor de fatias.

2.4.3 Espessura das camadas

A espessura da camada refere-se à altura de uma camada e permite a construção de camadas mais finas ou mais espessas (TANVEER *et al.*, 2022). A espessura das camadas influencia diretamente no desempenho estrutural da peça.

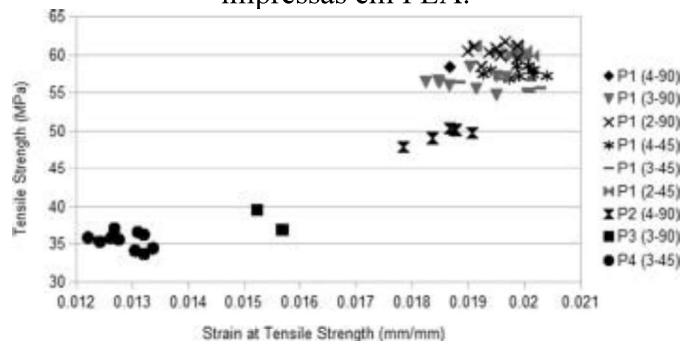
A influência da espessura da camada nas propriedades mecânicas do ABS foi investigada por Tymrak *et al.* (2014), onde descobriram que uma espessura de camada de 0,2 mm com orientação de $45^\circ/-45^\circ$ produziu os melhores valores de resistência à tração (Figura 6). Por outro lado, uma espessura de camada de 0,4 mm com orientação $0/90^\circ$ resultou no maior módulo de elasticidade (Figura 7).

Figura 6: Resistência à tração versus deformação na resistência à tração para amostras impressas em ABS.



Fonte: Tymrak *et al.* (2014).

Figura 7: Resistência à tração versus deformação na resistência à tração para amostras impressas em PLA.



Fonte: Tymrak *et al.* (2014).

Da mesma forma, Samykano *et al.* (2019) estudaram o impacto dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do ABS e identificou os parâmetros ideais para impressão 3D, incluindo porcentagem de preenchimento de 80%, espessura de camada de 0,5 mm e ângulo de varredura de 65°. No entanto, é importante notar que existe uma gama de valores de resistência à tração para amostras impressas em ABS (TYMRAK *et al.*, 2014; TORRADO PEREZ *et al.*, 2015). O desvio nestes valores pode ser atribuído à natureza anisotrópica das peças impressas, conforme explicado por Ahn *et al.* (2002).

Martinez *et al.* (2019), por sua vez, realizaram um estudo buscando avaliar o comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3d visando simulação de desempenho estrutural por meio de ensaios destrutivos de compressão e flexão. Em seu estudo os resultados para flexão demonstraram que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido (Tabela 2).

Tabela 2: Resultados para os ensaios de flexão. Onde, CP= corpo de prova, P= Carga, I= momento de inércia, M= Momento fletor máximo, W= módulo de resistência, σ = tensão de flexão de ruptura, Q= carga variável, V=esforço cortante, τ = tensão tangencial ou de cisalhamento.

CP	P (kN)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)	M _{f_{máx}} (kNxcm)	W(cm ³)	σ (Mpa)	Q(cm ³)	V(kN)	τ (Mpa)
P25	2.08	6.36	5.05	4.62	3.27	13.85	4.91	1.04	4.80
P50	1.73	6.19	4.74	3.89	3.13	12.22	4.69	0.87	4.12
A25	0.76	6.28	4.92	1.69	3.21	5.18	4.82	0.38	1.78
A50	0.69	6.62	5.39	1.54	3.45	4.38	5.17	0.35	1.54

Fonte: Martinez *et al.* (2017).

Os testes de Martinez *et al.* (2017) evidenciou que o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS, no que se refere ao momento fletor máximo, tensão de flexão de ruptura, esforço cortante e tensão de cisalhamento. Por outro lado, o ABS possui desempenho superior no módulo de elasticidade, e índices semelhantes para o momento de inércia e módulo de resistência.

2.5 Propriedades dos materiais

A propriedade dos materiais utilizados na impressão 3D é um fator crítico para garantir a qualidade e durabilidade das peças produzidas. Esses materiais incluem polímeros, metais, cerâmicas e compostos, cada um com características únicas de resistência, flexibilidade, condutividade térmica e elétrica, entre outras.

É importante entender as propriedades dos materiais utilizados na impressão 3D para garantir a qualidade e a segurança das peças produzidas, além de ampliar as possibilidades de aplicações da tecnologia (JESUS, 2018).

2.5.1 Deformações elásticas e plástica dos materiais

Assim que o teste de tração foi desenvolvido, alguns pesquisadores e estudiosos como Croucillo *et al.* (2018), possibilitaram a identificação dos padrões nos gráficos, sendo eles: “Os pontos de limite de escoamento e o limite de resistência à tração”, onde, o primeiro, indica o local em que o material sofre a deformação plástica, e, para os metais, é cerca de 0,002 ou 0,005, conforme seja o material deformante.

Quanto ao segundo, demarca o limite de resistência à tração, isto é, o máximo de tensão que o material pode suportar antes de acontecer a estricção e a próxima ruptura do material ou peça alterando seu aspecto mecânico (TOKUMOTO, 2003).

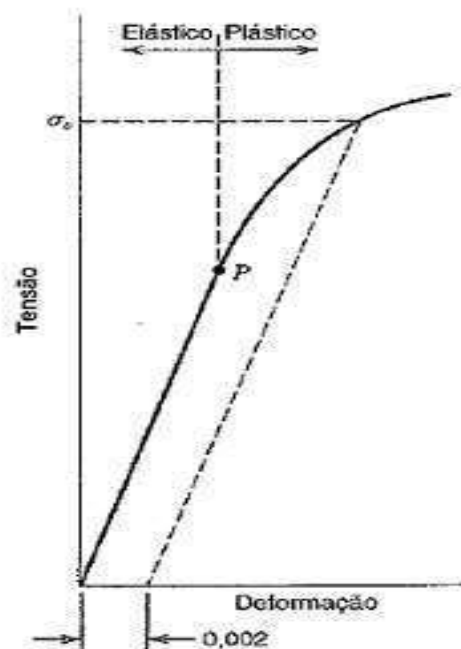
O módulo de elasticidade é uma propriedade importante para caracterizar o comportamento mecânico dos materiais em relação às deformações elásticas e plásticas. O estudo destaca que o módulo de elasticidade é diretamente proporcional à rigidez do material, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, maior será a resistência do material à deformação elástica. Já em relação à deformação plástica, o estudo indica que ela ocorre quando o material é submetido a tensões maiores do que sua resistência elástica, fazendo com que ele sofra deformações permanentes (REIS *et al.*, 2017).

O limite elástico é a tensão máxima que um material pode suportar sem sofrer deformação plástica permanente. Explica-se que a deformação elástica é aquela em que o material se deforma temporariamente, mas retorna à sua forma original quando a tensão é removida, sendo um importante parâmetro para determinar a capacidade de um material

suportar carga sem sofrer deformação permanente, e está diretamente relacionado à deformação elástica (CALLISTER, 2002).

No momento final da elasticidade, se centra no ponto em que uma reta paralela (Figura 8), intercepta na parte elástica do diagrama, partindo de uma pré-deformação específica, que normalmente é de 0,005 do material, isto é menos que 0,5%, então, tem-se que, “a magnitude do valor da tensão de escoamento é, portanto, a resistência à deformação plástica do material” (TOKUMOTO, 2003).

Figura 8: Limite elástico.



Fonte: Adaptado de Callister (2002).

2.5.2 Dureza

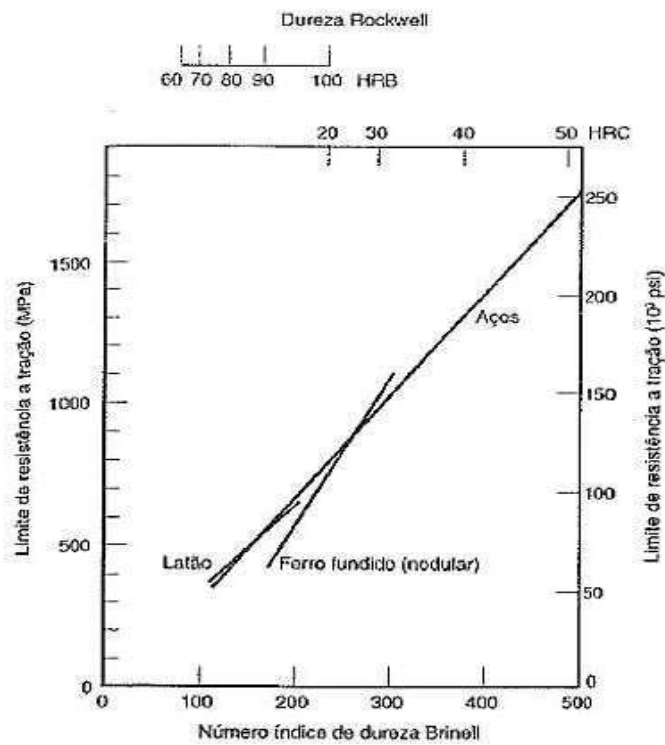
A dureza é um dos parâmetros necessários para caracterizar a mecânica do material a ser usado. Segundo Reis *et al.* (2017), a característica de dureza tende a mensurar a resistência ao desgaste de certo material, podendo ser modificada através da variação de temperatura que altera a microestrutura do material. Tem-se que, geralmente, materiais como o aço, a resistência é proporcional à dureza, e, se a última aumenta, amplia também a resistência quanto ao desgaste. Para completar, Shigley (2004), define que “a dureza de um material é a resistência à deformação plástica provocada (usualmente) por penetração”.

Destacando-se entre alguns tipos de ensaios usados, pode-se apontar quatro deles: Shore, Brinell, Vickers e Rocwell, acrescentando que, estes três últimos citados são empregados largamente na indústria em geral, em razão de sua facilidade de aplicação e reprodutividade dos seus testes (MATHIAS, 2019). Conferindo que a dureza pode afetar os testes de tração, deve-se considerar o que diz Callister (2002) em sua obra, definindo que,

[...] o módulo de elasticidade E (normalmente dado em GPa para os metais), ou módulo de Young, é a constante de proporcionalidade entre tensão e deformação. Com isso, quanto maior tivermos o módulo de elasticidade, mais rígido, ou seja, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma força (Callister, 2002, p. 42).

Assim, faz-se necessário lembrar que, mesmo que seja usado um outro material igual, não se altera o módulo da elasticidade, pois, é uma propriedade específica e própria do material, conforme a Figura 9 abaixo.

Figura 9: Correlação entre dureza e limite de resistência à tração.



Fonte: Mathias (2019).

2.6 Polímeros

Considerando-se caracterização dos polímeros, os parâmetros são quase os mesmos que se usam para caracterizar os metais. Podem variar sua classificação de acordo com sua forma

molecular, arranjo atômico, estrutura química e encadeamento das unidades, as quais definem características do material resultante (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001).

Os polímeros que apresentam linearidade molecular são classificados como termoplásticos, ou seja, permitem sucessivos reprocessamentos mediante aplicação de calor suficiente à fusão do mesmo. Em contrapartida, polímeros classificados como termorrígidos possuem estrutura molecular reticulada e não possibilita o reprocessamento uma vez atingida sua temperatura de fusão (BATHISTA; SILVA, 2003).

Dentre os polímeros lineares e termorrígidos, em sua maioria são os termoplásticos que despertam o interesse à MA, por exemplo, pois permitem ser modelados como filamento ou granulado e estocados para utilização posterior. Pode-se dizer que são plásticos que podem ser modelados com aumento de temperatura e marginal da pressão (CANEVAROLO JR, 2002).

Denota-se por polímeros de engenharia aqueles que possuem características capazes de substituir materiais clássicos de engenharia, principalmente o aço, podendo atuar como engrenagens ou peças estruturais. Em sua grande maioria, caracteriza-se por termoplásticos sintéticos, podendo ser reversivelmente aquecidos para modelagem e posteriormente resfriados, possibilitando o processamento do material solidificado por meio de extrusão, laminação e injeção (MANO, 2019).

2.6.1 Resistência mecânica dos polímeros

A resistência mecânica dos polímeros é uma propriedade fundamental que influencia seu comportamento e desempenho em uma ampla gama de aplicações. Polímeros são materiais macromoleculares que apresentam uma variedade de comportamentos mecânicos, como rigidez, ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto. A compreensão da resistência mecânica dos polímeros é essencial para o projeto e desenvolvimento de produtos com alta durabilidade e desempenho, desde componentes automotivos e aeroespaciais até embalagens, dispositivos médicos, brinquedos e muitos outros produtos do cotidiano (CANEVAROLLO JR, 2010).

O estudo e a otimização da resistência mecânica dos polímeros são áreas de pesquisa e engenharia em constante evolução, buscando aprimorar as propriedades mecânicas dos polímeros para atender às demandas de aplicações cada vez mais exigentes e sustentáveis (CEVALLOS *et al.*, 2022).

Os polímeros oferecem uma ampla variedade de características de aplicação em termos de resistência mecânica. Por exemplo, polímeros de alta rigidez, como o polietileno de alta densidade (PEAD), são frequentemente utilizados em aplicações que exigem alta resistência ao impacto e rigidez estrutural, como tubulações, recipientes de armazenamento e componentes automotivos. Por outro lado, polímeros de alta tenacidade, como o polipropileno modificado (PP), são ideais para aplicações que requerem uma combinação de resistência mecânica e ductilidade, como embalagens flexíveis e partes de veículos sujeitas a impactos repetidos (CAMPOS *et al.*, 2020).

Para Carpinski e Rodrigues (2022), a resistência ao desgaste é uma propriedade importante em aplicações de atrito e desgaste, como revestimentos de polímeros utilizados em peças de máquinas e engrenagens. Além disso, polímeros podem ser projetados para apresentar alta resistência à fadiga, tornando-os ideais para aplicações sujeitas a ciclos repetidos de estresse mecânico, como cabos de elevadores e peças de aeronaves. A compreensão das características específicas de aplicação dos polímeros em relação à sua resistência mecânica é crucial para o desenvolvimento de materiais poliméricos adequados para as demandas de cada aplicação.

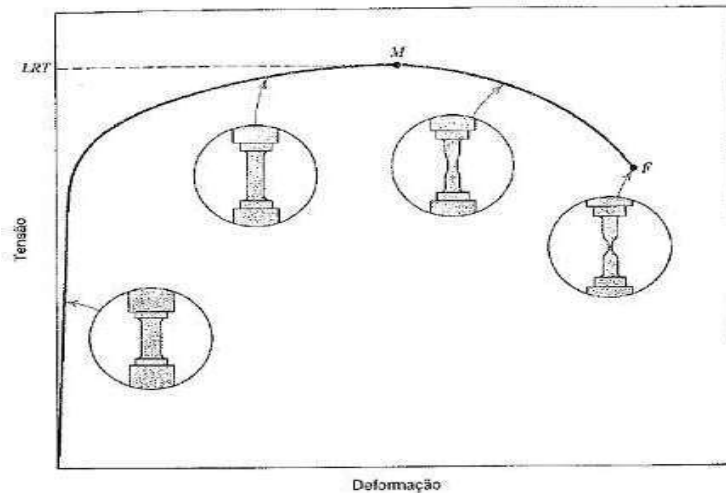
2.7 Ensaio de resistência à tração

A curva de tensão-deformação é obtida a partir de ensaios mecânicos, nos quais o material é submetido a uma carga crescente e sua resposta em termos de tensão e deformação é registrada. Essa curva pode fornecer informações valiosas sobre as propriedades mecânicas do material, como sua resistência, ductilidade, rigidez e tenacidade, e é fundamental para projetar estruturas seguras e confiáveis.

Para Lages *et al.* (2019), além de suas vantagens, a curva de tensão-deformação também possui algumas limitações. Uma delas é que a curva de tensão-deformação é obtida em condições de laboratório, o que nem sempre representa com precisão o comportamento real do material em aplicações reais. Os materiais podem ser sensíveis a fatores como temperatura, velocidade de carregamento e histórico de deformação, que podem afetar sua resposta mecânica. Além disso, a curva de tensão-deformação é limitada pela capacidade dos equipamentos de ensaio em aplicar cargas e medir deformações, o que pode resultar em dados experimentais com uma faixa de valores limitada (LAGES *et al.*, 2019).

Por tanto, é importante elaborar a curva de tensão-deformação, conforme demonstra a Figura 10 a seguir.

Figura 10: Exemplo de curva de tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de Callister (2002).

O diagrama apresentado na Figura 10, é o resultado das medidas realizadas por instrumentos do sistema usado. A variação de espessura da curva indica que para um mesmo material, a relação de forma da seção transversal exerce significativa influência sobre o comportamento da tensão de engenharia (NEMOTO, 2004). Pode ser calculada assim: P sobre A_0 , onde, P representa a força que foi aplicada ao material, e A_0 é a área inicial da seção transversal do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

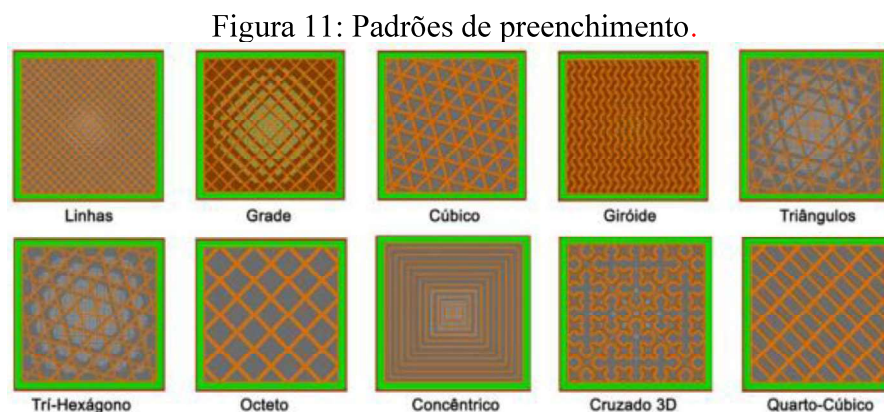
Nesse caso, é na leitura do extensômetro que se encontra a deformação do sistema, porém, existem outros tipos de sistemas, podendo usar dois pontos para referenciar uma distância qualquer, mas, que deverão ser medidas de novo, depois de aplicar a tensão, ou depois da peça se romper. Tal deformação E representa-se por: extensão medida depois de sujeitar o material à tensão subtraída pela extensão do corpo de prova, notando que l_0 é a extensão do corpo de prova e l é a mesma extensão medida depois de sujeitar o material à tensão, e, por utilizadas aqui duas medidas (unidades) de comprimento, esta deformação é denominada adimensional (NORTON, 2011).

2.8 A influência de diferentes tipos de preenchimento na manufatura aditiva

Para Pirog, Pionhievicz e Ferreira (2021), a MA engloba um conjunto de processos de produção que envolvem a construção de um produto através da deposição camada por camada de material o que torna possível observar a diferenciação de preenchimento deste produto. O autor defende que essa abordagem permite o controle preciso da geometria interna das peças fabricadas, por meio do uso de técnicas de otimização estrutural. Tais técnicas visam ainda, melhorar a resistência e rigidez das peças, reduzir a quantidade de material utilizado, diminuir o tempo de fabricação e aplicar preenchimentos internos estratégicos.

O padrão de preenchimento é o padrão de preenchimento interno selecionado para o objeto impresso, influenciando as propriedades mecânicas dos componentes (TANVEER *et al.*, 2022). Portanto, os padrões de preenchimento referem-se às estruturas que são incorporadas no interior de um componente durante o processo de fabricação aditiva. Galina (2017), Prada, Bossio e Bruno (2023) comentam que, a utilização de padrões pode trazer benefícios, como a redução do tempo de impressão da peça, o aprimoramento da resistência mecânica em geral ou em áreas específicas, além da redução da quantidade de material necessário e do tempo de impressão.

Uma ampla variedade de geometrias pode ser empregada como preenchimento, incluindo formas bidimensionais comuns, como retângulos, triângulos, hexágonos, linhas retas, curvas de Hilbert e concêntricas (VELOSO, 2020). A Figura 11 ilustra alguns padrões de preenchimento frequentemente utilizados na impressão 3D.

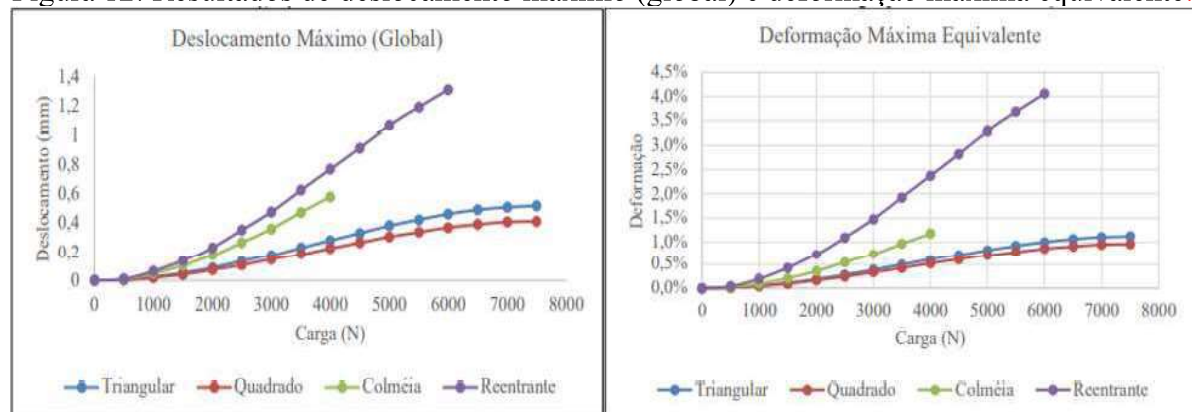


Fonte: Campos (2022).

Ao realizar a impressão 3D, é necessário definir a proporção de ocupação do espaço interno da peça pelo preenchimento. Quanto maior o percentual de preenchimento, maior será a quantidade de material necessário e o tempo de impressão. Diferenças na rigidez e resistência mecânica das peças impressas podem ser observadas de acordo com o percentual de preenchimento, a orientação e a geometria do padrão utilizado (VOLPATO, 2017).

O emprego de quatro diferentes tipos de preenchimentos, apresentaram suas respectivas máximas de tensão e deformação. A Figura 12 abaixo aponta os resultados obtidos no estudo de Veloso (2020), dos tipos de preenchimento retangular, quadrangular, colmeia e reentrante, revelando onde foi possível obter seu deslocamento máximo global e deformação máxima equivalente.

Figura 12: Resultados de deslocamento máximo (global) e deformação máxima equivalente.

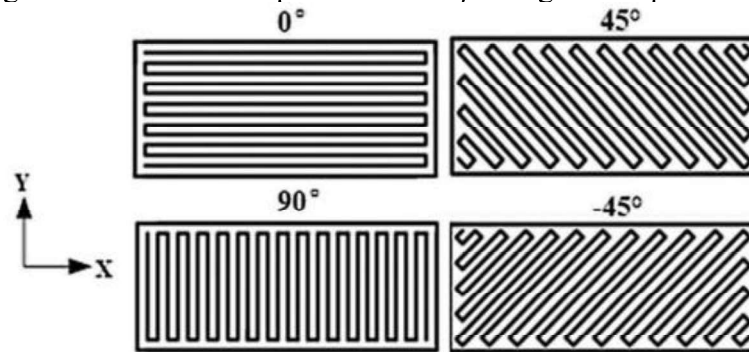


Fonte: Adaptado de Veloso (2020).

O autor conclui que, ao considerar uma carga de 4000N, que não ultrapassou a tensão máxima permitida pelo material em todos os corpos de prova, o preenchimento quadrado demonstrou ser o mais resistente, seguido pelos preenchimentos triangular, colmeia e reentrante. Em relação aos dados de deslocamento comparados à carga aplicada nos corpos de prova, é importante destacar a vantagem significativa dos preenchimentos triangular e quadrado em termos de rigidez. Isso deve ser levado em consideração em projetos onde essa característica seja relevante para a orientação dos preenchimentos (VELOSO, 2020).

A direção do preenchimento é responsável por determinar a orientação das linhas de preenchimento no objeto. Esse é um parâmetro de extrema importância, pois possui um impacto direto nas propriedades mecânicas do objeto (SOUSA, 2022). A Figura 13 representa o preenchimento orientado em 0° , 90° , 45° e -45° :

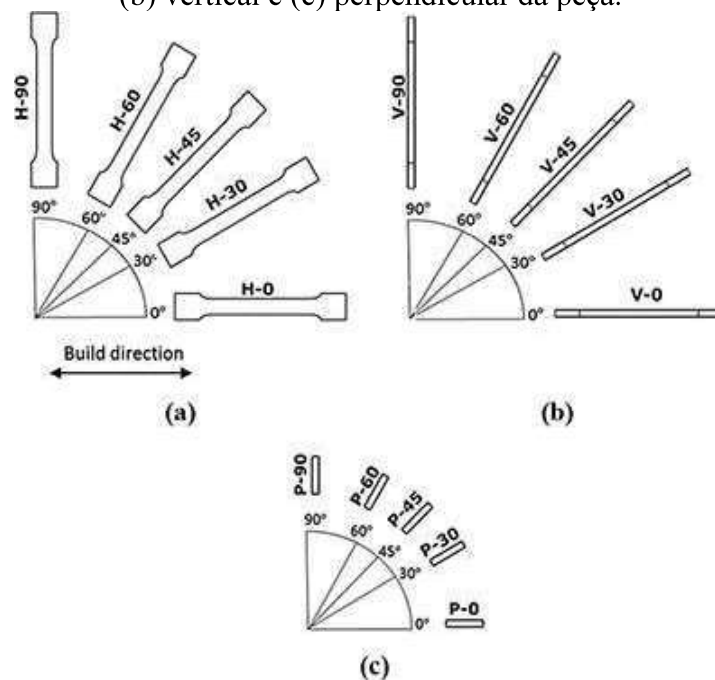
Figura 13: Diferentes tipos de orientação angular de preenchimento.



Fonte: Liu, Lei e Xing (2019).

Quanto ao ângulo de filamentos, Durgun e Ertan (2014) estudaram cinco ângulos de filamentos diferentes (0° , 30° , 45° , 60° e 90°) para três orientações (horizontal, vertical e perpendicular) e testaram a rugosidade da superfície, resistência à tração e resistência à flexão (Figura 14).

Figura 14: Vista esquemática dos ângulos de filamentos para (a) posicionamento horizontal, (b) vertical e (c) perpendicular da peça.



Fonte: Durgun e Ertan (2014).

Estes resultados sugerem que a orientação tem uma influência mais significativa do que o ângulo na rugosidade da superfície e no comportamento mecânico da peça de deposição fundida resultante. Além disso, diferentes estudos possibilitaram a verificação de resistências

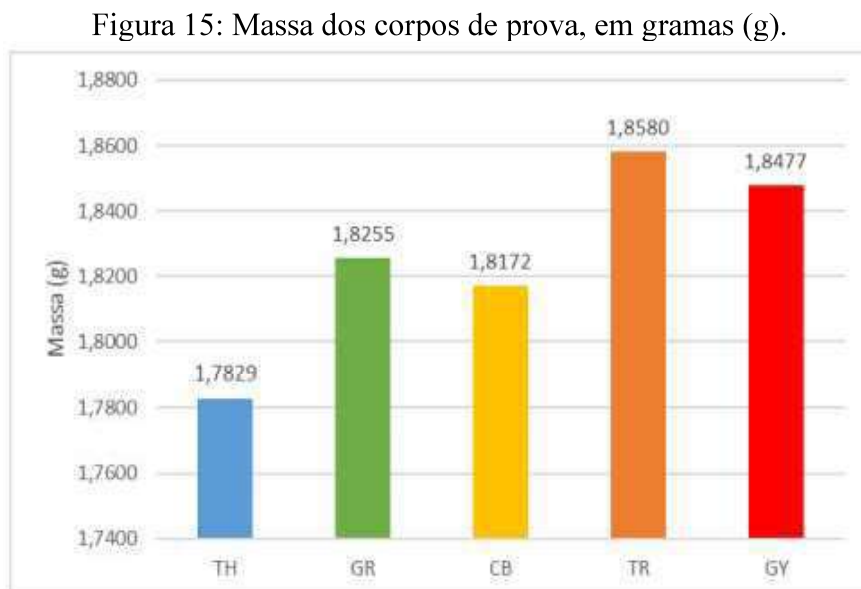
maiores com as orientações de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$ quando comparadas com orientações de $-45^\circ/45^\circ$ de preenchimento (FERNANDES, 2016; LOVO; FURLAN, 2016).

2.9 Ensaios de tração em amostra fabricadas por manufatura aditiva

Os ensaios de tração em amostras fabricadas por MA são fundamentais para entender o comportamento mecânico desses materiais e validar sua aplicabilidade em diferentes setores industriais. Para Lima *et al.* (2021), os ensaios de tração fornecem dados cruciais para a avaliação e otimização dos materiais utilizados na MA, bem como para a validação de sua conformidade com as especificações de projeto e normas técnicas. Esses ensaios desempenham um papel fundamental na garantia da segurança e confiabilidade de componentes fabricados por MA em diversas aplicações.

Jardim (2020) expõe em sua pesquisa de campo a análise de como o padrão de preenchimento afeta as características mecânicas do objeto produzido por MA com impressão 3D utilizando filamento do termoplástico acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). Para isso, o autor utilizou-se como fator crítico de análise, a resistência à tração de corpos de provas de diferentes geometrias que foram impressos por FDM, a fim de verificar a qualidade das impressões 3D e identificar possíveis defeitos no processo.

A Figura 15 apresenta os valores da massa dos corpos de prova.

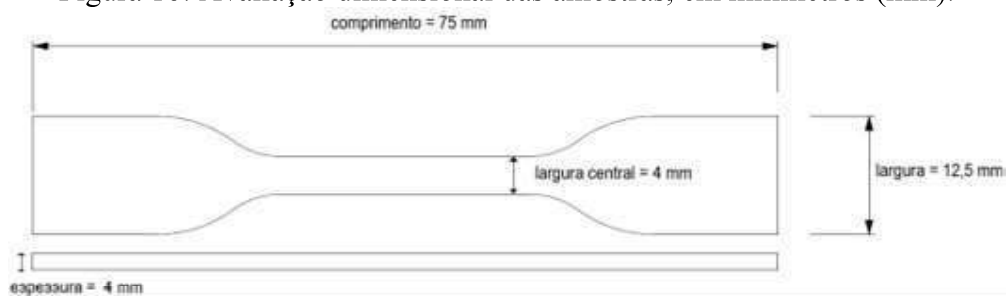


Fonte: Jardim (2020).

A amostra TR apresentou a maior massa dentre as avaliadas (1,8580g), enquanto a amostra TH apresentou o menor valor dentre as avaliadas (1,7829g). Calculando-se a média com o valor de todas as amostras, encontrou-se 1,8263g, na qual a amostra TR possui massa 5,8% maior que a média, enquanto a amostra TH possui 4,3% menor que a média (Figura 16).

A análise perante as dimensões das amostras utilizadas como corpos de prova nos ensaios, exposta na Figura 16, foi preponderante para determinação de fatores que interferem na propriedade de resistência mecânica do material.

Figura 16: Avaliação dimensional das amostras, em milímetros (mm).



	TH	GR	CB	TR	GY
Comprimento, C (mm)	74,76	74,70	74,72	74,71	74,69
Largura, L (mm)	12,58	12,59	12,58	12,62	12,60
Largura Central, LC (mm)	4,18	4,14	4,17	4,20	4,20
Espessura, E (mm)	3,60	3,64	3,66	3,69	3,85

Fonte: Adaptado de Jardim (2020).

Como resultados do teste de tração, obteve-se os valores mencionados na Tabela 3 abaixo, onde considerou-se as tensões máximas, de ruptura, escoamento, com valores em megapascal (MPa). Considerou-se também o alongamento da ruptura (%) e o módulo de elasticidade (MPa).

Tabela 3: Resultados do ensaio de resistência à tração.

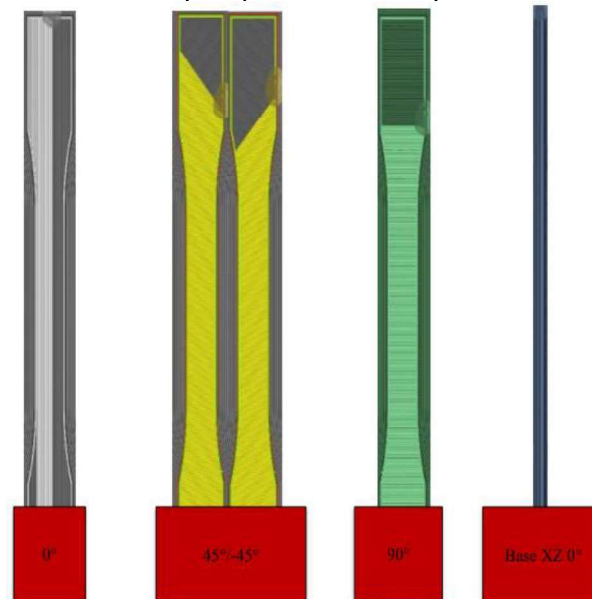
	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TH	20,46	20,46	15,07	0,89	731
GR	20,09	20,10	16,83	1,79	648
CB	19,16	19,18	15,83	1,63	731
TR	19,35	19,35	17,30	2,05	704
GY	20,46	20,59	16,74	1,69	629

Fonte: Jardim (2020).

Os resultados obtidos na avaliação das amostras mostraram que o padrão de preenchimento Gyroid (GY) apresentou a maior força máxima, assim como maiores valores de tensão de escoamento e tensão máxima, como era esperado pelo autor. De forma semelhante, a amostra com padrão de preenchimento Tri Hexagon (TH) também apresentou resultados idênticos àquelas com padrão Gyroid em relação à tensão de escoamento e tensão máxima. Por fim, o autor chegou à conclusão de que as diversas possibilidades de escolha nos parâmetros de impressão influenciam indiretamente na qualidade do material impresso.

Alguns parâmetros de impressão de polímeros são relevantes para quesito resistência, é o que ressalta Ortega (2023), onde em seu estudo, realizou ensaios mecânicos nos corpos de prova de PLA que foram impressos em 4 diferentes sentidos de deposição (orientação de 0° , angulação de deposição de 45° intercalada com camadas de -45° , orientação de 90° , orientação de deposição a 0°), conforme explicito na Figura 17.

Figura 17: Sentidos de Deposição escolhidos para os 4 corpos de prova.



Fonte: Ortega (2023).

Para os casos um a três (esquerda para direita), a base da impressão foi ao longo do plano XY (face), enquanto no quarto caso foi utilizado como base de impressão o plano XZ. Após os ensaios de tração, notou-se que a fratura nos corpos de prova ocorreu nos locais previstos e seu comportamento é frágil.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração se encontram na Tabela 4, após serem levantadas as curvas médias de força x deslocamento de cada um dos casos estudados.

Tabela 4: Tabela de resultados obtidos nos ensaios de tração.

Propriedades	Condição 1 (Figura 27)	Condição 2 (Figura 28)	Condição 3 (Figura 29)	Condição 4 (Figura 30)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	53,36 ± 1,219	46,17 ± 0,33	41,19 ± 2,17	57,2 ± 1,95
$\epsilon_{\text{máx}}$ (mm/mm)	0,0458 ± 0,001	0,0417 ± 0,0001	0,0332 ± 0,0025	0,0451 ± 0,0006
E (GPa)	1,16 ± 0,028	1,11 ± 0,007	1,24 ± 0,033	1,27 ± 0,034

Fonte: Ortega (2023).

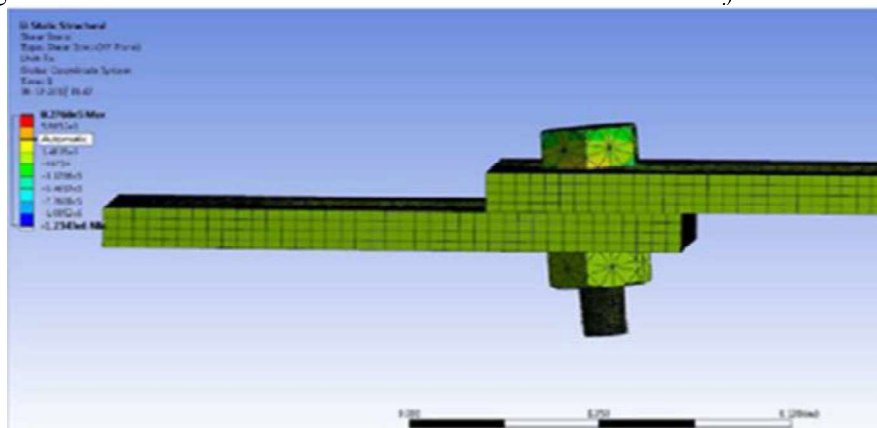
O estudo demonstrou também características peculiares a respeito do material PLA utilizado, onde o mesmo se assemelha a materiais isotrópicos (mesmo módulo de elasticidade em todos os sentidos de aplicação de carga), o que possui comportamento frágil e também resistente quando comparado a outros polímeros utilizados na MA.

Logo, foi possível estabelecer que para esforços axiais a deposição paralela a carga aplicada, representados pelas Figura 17 (corpos de prova 1 e 4, da esquerda para direita), é mais vantajosa e apresenta melhor desempenho, enquanto a deposição perpendicular ao sentido da carga, (corpo de prova 3, da esquerda para direita), apresenta características menos desejadas devido ao efeito da adesão entre camadas que facilita a ruptura para este tipo de aplicação de carga.

A comparação entre diferentes polímeros impressos pelo método FDM e expostos a ensaios de tração, é eficaz para a percepção do material mais resistente e que possa sofrer uma alta tensão.

Harshitha e Srinivasa (2019), apontam em seu projeto a comparação e relevância entre materiais ABS e PLA na elaboração de peças para suportarem altos índices de tensão e estresse equivalente, como é ilustrado na Figura 18, o qual as peças de ambos os materiais são submetidas a uma tensão de cisalhamento.

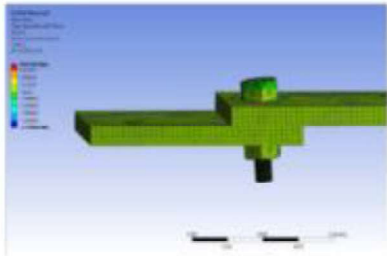
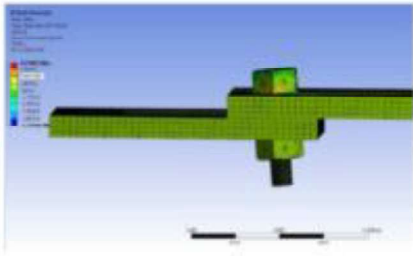
Figura 18: Teste de tensão de cisalhamento elaborado no *software* ANSYS.



Fonte: Harshitha e Srinivasa (2019).

Os resultados apresentados na Tabela 5 obtidos dos ensaios realizados são visualizados e analisados através do *software* ANSYS, o qual define valores de deformação mecânica total, tensão de cisalhamento e estresse equivalente comprovando que a análise do projeto que o material ABS é mais fraco que o material PLA. A tensão equivalente para ABS é de 3,6 MPa, enquanto para PLA é de 3,87 MPa, respectivamente (HARSHITHA; SRINIVASA, 2019).

Tabela 5: Tabela de análise dos resultados.

Parâmetros	ABS	PLA
Deformação total	270 N	300 N
Tensão de cisalhamento	3.69 MPa	4.1 MPa
Stress equivalente	3.6 MPa	3.87 MPa
Resultado ANSYS		

Fonte: Adaptado de Harshitha e Srinivasa (2019).

Os autores Dinesh *et al.* (2020), realizam em seu estudo de comparação, entre PLA e ABS, testes de tensão e flexão, relacionando nos ensaios o tempo do experimento com quantidade de carga aplicada em cada ensaio. Os resultados comparam a força aplicada até a ruptura dos cinco tipos de materiais com características distintas: ABS, PLA, 20% ABS e 80% PLA, 50%/50% (sanduíche), e 20% PLA e 80% ABS. A Tabela 6 abaixo dispõem os resultados dos testes realizados:

Tabela 6: Resultados dos testes de tensão.

ETIQUETA DA AMOSTRA	CARGA MÁXIMA	CARGA DE RUPTURA	CARGA DE TENSÃO
ABS	0.68	0.42	0.42
PLA	1.03	0.96	0.73
20% ABS, 80% PLA	1.18	1.07	0.83
50%50% SANDUICHE	0.71	0.53	0.57
80% ABS, 20% PLA	0.65	0.44	0.43

Fonte: Adaptado de Dinesh *et al.* (2019).

Os resultados do teste de tensão na Figura 19 representa explicitamente a dominância do material PLA no quesito resistência à tensão máxima (*maximum load*), carga de ruptura (*breaking load*), e carga na tensão (*load at strain*). O polímero PLA se mostrou efetivo tanto em sua composição única como no *mix* de composições das peças utilizadas nos ensaios. Portanto o material de maior resistência utilizado para o ensaio de tensão foi o de 20% ABS e 80% PLA, sobressaindo dos demais em todos os quesitos avaliados (DENISH *et al.*, 2020).

Pelegriño *et al.* (2019), realizaram em seu estudo a comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA produzidos pelo método FDM. Os autores dispuseram da impressão de corpos de prova em ambos os materiais (PLA e ABS) nas direções vertical e horizontal para a realização dos ensaios de tração. Após os testes houve uma análise microscópica verificando a ruptura dos materiais para, então, tomar-se conhecimento das vantagens e desvantagens de cada método e cada material e definir melhor direção de impressão e material.

Os testes de tração conduzidos em amostras impressas em ABS e PLA, tanto na direção vertical quanto horizontal, revelaram que o PLA e o ABS apresentam resultados semelhantes quando impressos horizontalmente. No entanto, quando comparados na direção vertical, foi observada uma diferença significativa nos resultados entre o PLA e o ABS.

A média das tensões obtidas para o PLA impresso horizontalmente foi de 28 MPa, enquanto para o ABS impresso horizontalmente foi de 29 MPa. A análise estatística de variância revelou que não houve diferenças significativas entre os dois materiais. No entanto, na análise microscópica, observou-se que o ABS apresentou maior resistência à ruptura em comparação ao PLA, com regiões esbranquiçadas e diferenças nas fibras após o teste de tração, conforme Figura 19.

Figura 19: ABS (à direita) e PLA (à esquerda) com filamento horizontal, área de ruptura.



Fonte: Pelegriño *et al.* (2019).

Ao comparar as direções de impressão no ABS, a média de tensão para a impressão horizontal foi de 29 MPa, enquanto para a vertical foi de apenas 11 MPa. Essa diferença foi estatisticamente significativa na análise de variância. Sob observação microscópica, os corpos

de prova impressos verticalmente apresentaram pouca resistência antes de romper, enquanto os impressos horizontalmente apresentaram maior resistência evidente.

Logo os autores concluíram que, no método de impressão FDM, a direção de impressão horizontal mostrou-se mais favorável para obter peças com maior resistência à ruptura. Além disso, o ABS também apresentou melhor acabamento superficial e menor tempo de execução em comparação ao PLA. Portanto, o ABS foi neste caso mais vantajoso em termos de resultados de teste de tração.

Os artigos selecionados sobre ensaios realizados com polímeros PLA e ABS resultou na conclusão de que o PLA é geralmente mais frágil em comparação com o ABS, o que pode limitar sua resistência a impacto e flexão em aplicações exigentes. Por outro lado, o ABS é um plástico mais resistente e durável, com maior tenacidade e flexibilidade, o que o torna mais adequado para aplicações que requerem peças com maior resistência mecânica.

Logo, a escolha entre PLA e ABS na impressão 3D por FDM depende das características mecânicas desejadas para a aplicação específica, bem como de outros fatores, como custo, facilidade de impressão, sustentabilidade e requisitos de pós-processamento. É importante considerar cuidadosamente as propriedades mecânicas do PLA e do ABS produzidos por FDM ao selecionar o material mais adequado para um projeto específico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de caso tem como objetivo comparar a resistência mecânica dos filetes de rosca dos materiais PLA e ABS para utilização em elementos de fixação e descobrir qual material é mais viável para produção de peças que necessite de uma boa resistência à tração, em termos de resistência, custo e tempo de fabricação.

O estudo visa comparar dois polímeros que possam ser utilizados em aplicações onde elementos roscados são submetidos a esforços de tração. Já existem estudos que evidenciam a resistência mecânica dos dois tipos de materiais rosqueados a um parafuso (HARSHITHA; SRINIVASA, 2019), onde foi feito a análise computacional da tensão de cisalhamento.

3.1 Materiais e corpos de prova

Foram realizados testes de tração com corpos de prova que possuem filetes de rosca, fabricados pelos dois materiais citados anteriormente (PLA e ABS), como mostra a Figura 20. A mesma expõe a similaridade de dimensão das peças de ambos os materiais assim como suas respectivas características de manufatura, tais como a altura da camada (h) de deposição do polímero, quantidade de paredes (w) do polímero na peça e também a porcentagem de preenchimento (p) de cada peça. Tais distintas características serviram para medir a resistência da peça, ocasionando ambos os polímeros usados em força de tração máxima resultante.

Figura 20: Blocos com filetes de rosca (ABS).



Fonte: O autor (2022).

A figura acima demonstra os corpos de prova feitos em ABS com diferentes modelos de fabricação, onde h refere-se à altura da camada de deposição, w equivale à quantidade de camadas, e P (%) como percentual de preenchimento de cada peça, todos com folga de 0,2 mm na fabricação relacionada ao ajuste de rosqueamento, todas feitas com velocidade de deslocamento do bico injetor de 50mm/s e com deposição na vertical. Para o PLA foram confeccionados corpos de prova nas mesmas quantidades das apresentadas anteriormente. Todas as amostras foram fabricadas, uma por vez, mantendo-se as mesmas condições de fabricação para todas.

Para a padronização dos corpos de prova foi selecionado um formato de rosca com diâmetro de 12 mm e passo de rosca 1,75. Essa dimensão foi escolhida pois é uma dimensão comum de parafusos encontrados comercialmente. Outra justificativa para o tamanho do furo e passo da rosca é que abaixo dessas dimensões, a impressora utilizada não garantia uma boa qualidade da forma dos filetes, e acima dessa medida, aumentava-se muito o tempo de fabricação e gasto com material, inviabilizando esta pesquisa no prazo determinado.

Os corpos de prova em PLA e ABS possuem dimensões de 30 x 30 x 20 mm. Estas dimensões foram escolhidas pois 20 mm de altura nos corpos de prova continham filetes suficientes para serem ensaiados e suportarem as cargas de tração. As larguras foram definidas pelo entendimento de que era necessário algum espaço entre as paredes do filete e as paredes externas para poder ser avaliado a influência do preenchimento nos ensaios de tração. Além do que já foi citado como justificativa para seleção do tamanho dos corpos de prova, estas foram dimensões que o tempo de fabricação eram intermediários e possível a confecção em tempo de realizar este trabalho.

Um desafio na fabricação dos corpos de prova foi a definição da folga a ser inserida no modelo CAD para que o parafuso pudesse roscar no corpo de prova com a mesma facilidade de um elemento roscado fabricado por usinagem convencional. Após alguns pré-testes, foi possível determinar que a folga de 0,2 mm no modelo CAD era suficiente para o parafuso ultrapassar todo o corpo de prova sem exceder o atrito comum de elementos de fixação que estes apresentam.

Valores de folga projetados acima deste valor foram identificados possuindo uma movimentação lateral do parafuso dentro do corpo de prova. Valores de folga abaixo deste, foram identificados que o parafuso não chegava ao final da rosca pelo movimento manual de giro do mesmo. O atrito entre os filetes de rosca do parafuso e o corpo de prova era demasiado

grande que não permitia o correto posicionamento do parafuso de forma manual no corpo de prova.

Como características de impressão, foram designadas pela impressora, temperaturas padrão que atende a fabricação de polímeros sólidos, não havendo alteração ou danificação no *layout* da peça fabricada. Portanto, as temperaturas descritas na Figura 23, definem precisamente a temperatura pontual de fabricação assim como a variação de temperatura. Foram utilizados também como parâmetros padrões o fluxo de aplicação do preenchimento dos blocos de ambos materiais.

Os parâmetros que variaram de acordo com o material de fabricação foram a temperatura do extrusor, e a temperatura de mesa. Para o PLA foi utilizada uma temperatura de impressão de 220°C e para o ABS 240°C. A temperatura da mesa para o PLA foi de 60°C e para o ABS 110°C. Na impressão de ABS não é acionado o ventilador para convecção forçada acima da peça, já para o PLA o uso do ventilador é altamente recomendável. Ambas recomendações são feitas pelos fabricantes dos filamentos.

3.2 Equipamentos

Para a fabricação dos corpos de prova foram utilizados uma impressora 3D do fabricante Creality, modelo Ender 3 V2 com extrusora hotend MK8 Rosca M6 (6mm). A mesma possui especificações técnicas e dimensões que atendem a impressão dos corpos de provas performados nos ensaios. O layout da impressora ilustrado na Figura 21, juntamente à sua ficha técnica (Figura 22), estão despostas a seguir.

Figura 21: Impressora Creality Ender 3V2.



Fonte: O autor (2022).

Figura 22: Ficha técnica da impressora Creality Ender 3V2.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS:	DIMENSÕES E PESO:
Volume de impressão: 220 x 220 x 250mm	Dimensões do equipamento: 475 x 470 x 620mm
Movimentação: Cartesiana	Dimensões da embalagem: 570 x 380 x 270mm
Diâmetro do filamento: 1,75mm	Peso da impressora: 9,2Kg
Materiais compatíveis: PLA, PETG, TPU, PLA Flex, PLA Silk, Wood e outros.	Peso da caixa: 11,5Kg
Precisão de impressão: +0,1mm	
Sistema de alimentação: bowden	
Diâmetro do bico: 0,4mm (compatível com outros diâmetros de bicos)	
Altura de camada: 0,1 – 0,4mm	
Velocidade máxima de travel: 180mm/s	
Velocidade máxima de impressão: 100mm/s	
Temperatura máxima do hotend: 255°C	
Temperatura máxima da mesa: 110°C	
Superfície da mesa: vidro	
Nivelamento de mesa: manual	
Conectividade: Cabo USB e cartão SD	
Softwares compatíveis: Ultimaker Cura, Simplify 3D e outros	
Formatos de arquivos: STL, OBJ, AMF e G-Code	
Sistemas operacionais: Windows, Mac e Linux	
Tensão: Bivolt (chaveada) AC 100 – 240V 50-60Hz	
Fonte de alimentação: DC 24V 21A 270W (Meanwell)	
Placa controladora: Placa Silenciosa	
Extrusora (hotend): MK8 Rosca M6 (6mm)	

Fonte: Ficha original da impressora (2022).

Foi analisada também a tolerância dimensional desses mesmos filetes, onde os corpos de prova bipartidos confeccionados por impressão 3D foram levados ao microscópio e definida a folga relacionadas com a tarraxa e parafusos convencionais de aço.

Os filetes localizados no interior central de cada bloco, possuem distintas tolerâncias dimensionais perante a força de tração aplicada no bloco. A medição inicial e final da dimensão do filete foram obtidas através da utilização de um instrumento de medida. O microscópio ótico utilizado para medição da folga entre o elemento roscado e um parafuso padrão de aço é um stereo microscópio, do fabricante Carl Zeiss, modelo Discovery V.8, conforme Figura 23 abaixo:

Figura 23: Microscópio.



Fonte: fishersci.pt/shop/products/discovery-c8-stereo-microscope/.

O ensaio de tração foi realizado através de uma máquina universal de ensaios, modelo UHF 600kNX do fabricante Shimadzu que tem a capacidade de tração máxima de 600 kN, ilustrado na Figura 24 abaixo.

Figura 24: Máquina de tração modelo UHF 600kNX Shimadzu.



Fonte: O autor (2022).

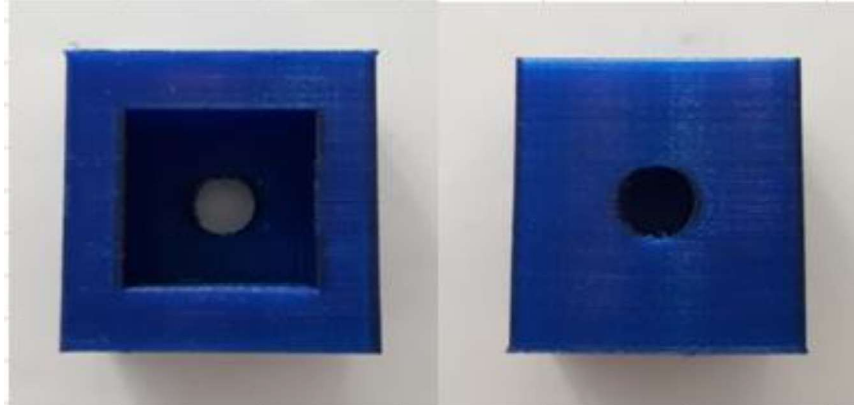
3.3 Ensaio de tração

Para ensaiar os filetes dos corpos de prova foi necessário projetar e fabricar dois suportes que conseguissem posicionar o corpo de prova e um parafuso roscado a esse, alinhados com o dispositivo móvel da máquina de ensaios para que o esforço de tração realizado pela máquina fosse integralmente transferido para os filetes de rosca.

Um suporte em PetG foi fabricado conforme indicado pela Figura 25 abaixo, para que o corpo de prova fosse encaixado dentro dele com a função de que as garras da máquina de

ensaios, ao se fecharem para realizarmos o ensaio, não fizesse pressão no corpo de prova, para não influenciar a parte interna do mesmo.

Figura 25: Bloco PetG.



Fonte: O autor (2022).

Este material ilustrado acima foi selecionado para o suporte devido sua resistência mecânica declarada comercialmente, sendo superior aos dois materiais avaliados neste trabalho, visando suportar a compressão das garras da máquina do ensaio de tração resistindo a deformação e assim não influenciando nos resultados dos ensaios.

Para o suporte do parafuso, foi fabricado um extensor soldado à extremidade de um parafuso comercial conforme Figura 26, para que a fixação na máquina não influenciasse durante o ensaio.

Figura 26: Parafuso soldado ao extensor para teste de tração.



Fonte: O autor (2022).

A montagem final para a realização do ensaio pode ser vista na Figura 27 abaixo. O bloco de PetG é utilizado como suporte e batente para a passagem de um parafuso soldado a um extensor para que o comprimento do experimento atinja o limite mínimo de ajuste da máquina de tração, que aplicará a força de tração até o rompimento da peça.

Figura 27: Parafuso soldado ao extensor para teste de tração.



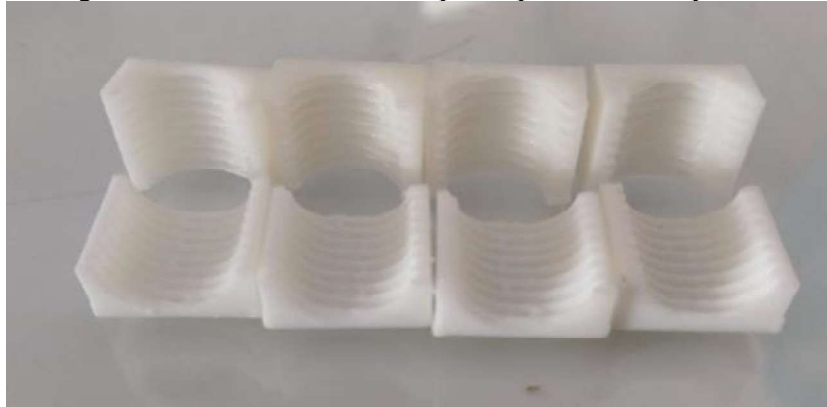
Fonte: O autor (2022).

Portanto a máquina de tração mediu a força aplicada sobre o parafuso que tenciona o corpo de prova e seu interior.

As tolerâncias dimensionais dos corpos de prova roscados foram avaliadas a partir de um parafuso sextavado de aço carbono encontrado em comércio local com dimensões 12mm de diâmetro, 1,75mm de passo de rosca grossa com 25mm de comprimento. O parafuso definido para pesquisa foi escolhido pela acessibilidade e rosca triangular por ser convencionalmente mais utilizados em elementos de fixação. O parafuso de aço, médio carbono de classe 8.8 onde a especificação ISO 898 Parte I determina valores mínimos para o Limite de Resistência à Tração de 800 Mpa, limite de escoamento de 640 Mpa e torque de 87,36 N.m.

Os blocos bipartidos foram confeccionados para uma análise de qualidade interna dessas roscas juntamente com análise de rosqueamento manual, como mostra a Figura 28 abaixo, o que foi levado em consideração para a resistência do parafuso que será rosqueado.

Figura 28: Filetes de rosca corpo de prova PLA bipartido.



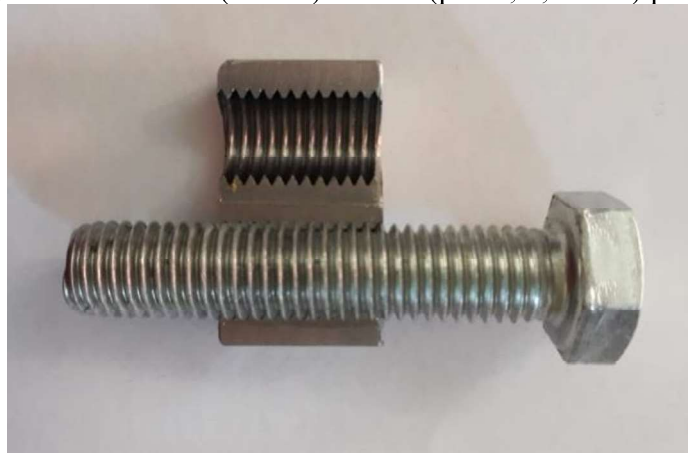
Fonte: O autor (2022).

Foram utilizados os seguintes parâmetros de impressão: Altura da camada igual 0,25 mm que diz respeito à espessura de filamento que será depositado durante o processo de impressão, 3 camadas de parede, preenchimento de 55% e velocidade de deposição 50 mm/min.

Foi posicionado em um bloco bipartido fabricado em PLA e ABS e levado ao microscópio para inspeção e medição do desvio de forma da rosca interna, por meio do ângulo interno dos filetes.

O experimento de medição atende a norma ABNT NBR NM ISO-1, estabelecendo uma temperatura de 20° Celsius no ambiente para análise da tolerância. Na Figura 29 é demonstrado o posicionamento do parafuso dentro de um bloco de aço bipartido.

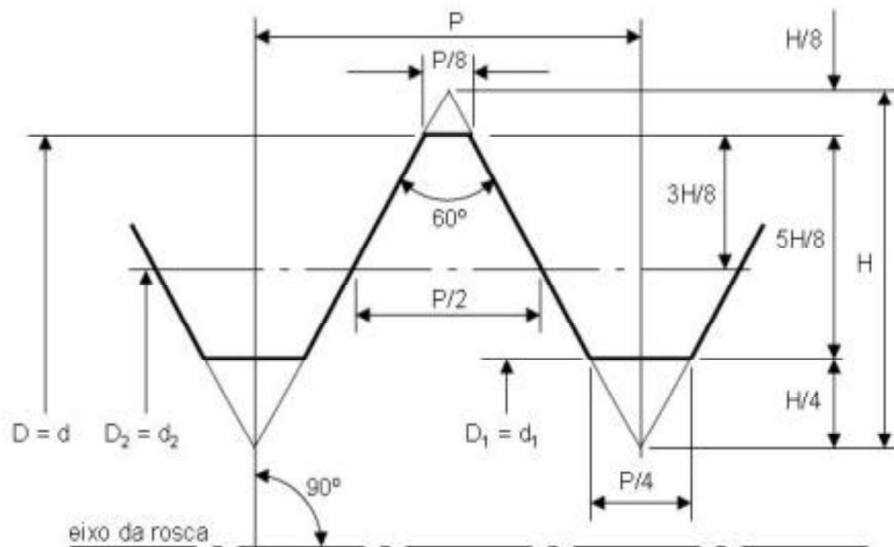
Figura 29: Parafuso (12mm) e rosca (passo, 1,75mm) padrão.



Fonte: O autor (2022).

O parecer da análise do ângulo interno do corpo de prova em aço bipartido, foi constituída da confecção da rosca interna por um macho M12x1,75mm, assim indicado na Figura 30 a seguir:

Figura 30: ABNT – “NBR 5876 – Roscas – Terminologia”.



Fonte: Macedo, Nathan e Souza (2021).

A Norma NBR 5876 foi a base de comparação para verificação através do Microscópio da angulação formada após a deposição do material, seja PLA, ou ABS. Estes desvios foram mensurados e apresentados no Capítulo 4 – Resultados e Discussões.

Como procedimento de realização dos testes de tração, o corpo de prova, blocos de ambos materiais, foi encaixado dentro de um bloco de PetG fabricado também por MA, como mostrado na figura 26. As dimensões do suporte são 41 x 41 x 22 mm e paredes com 10 mm de espessura em todo o perímetro, considerando uma folga de 1mm nas laterais para encaixe.

O roteiro do experimento foi dividido em duas partes, no primeiro momento, foi realizado pré-testes das três primeiras peças para avaliar se a metodologia utilizada seria adequada para ser replicada a todos os ensaios. O pré-teste teve a finalidade de introduzir um resultado prévio do bloco de maior resistência do material ABS considerando suas características de composição e dimensão, sem comparativo com o PLA que até então não havia sido produzido. No segundo momento, com todos os 48 blocos produzidos, 24 em PLA e 24 em ABS, foram ensaiados todos os materiais.

Para o primeiro momento de pré-testes, foram selecionados três (3) peças de material ABS com as seguintes características apresentadas na Figura 31.

Figura 31: Peças para pré-testes (ABS).

Peças para Pré - Testes (ABS)	
Peça 1	→ h = 10 / P = 15% / w = 2
Peça 2	→ h = 15 / P = 55% / w = 6
Peça 3	→ h = 20 / P = 15% / W=6
Legenda:	
h = altura da camada da peça	
P = preenchimento da peça em %	
w = quantidade de paredes da peça	

Fonte: O autor (2022).

No segundo momento, para a realização da comparação entre os materiais, foram utilizadas 48 peças, sendo 24 de ABS e 24 de PLA, com três testes para cada condição de cada material para que se pudesse ser feita posteriormente a comparação de cada material usando um programa para estatística e definição das influências de cada condição com teste, réplica e tréplica. A análise estatística serviu para avaliar o quão significativo é o efeito de cada resultado. A caracterização se dá conforme a Figura 32 abaixo:

Figura 32: Peças para Testes (PLA e ABS).

Peças para Testes (PLA e ABS)	
Peça 1	→ h = 10 / P = 15% / w = 2
Peça 2	→ h = 10 / P = 55% / w = 2
Peça 3	→ h = 10 / P = 15% / w = 6
Peça 4	→ h = 10 / P = 55% / w = 6
Peça 5	→ h = 20 / P = 15% / w = 2
Peça 6	→ h = 20 / P = 55% / w = 2
Peça 7	→ h = 20 / P = 15% / w = 6
Peça 8	→ h = 20 / P = 55% / w = 6
Legenda:	
h = altura da camada da peça	
P = preenchimento da peça em %	
w = quantidade de paredes da peça	

Fonte: O autor (2022).

Ademais, os resultados obtidos foram tabulados e os gráficos foram produzidos e apresentados no próximo Capítulo.

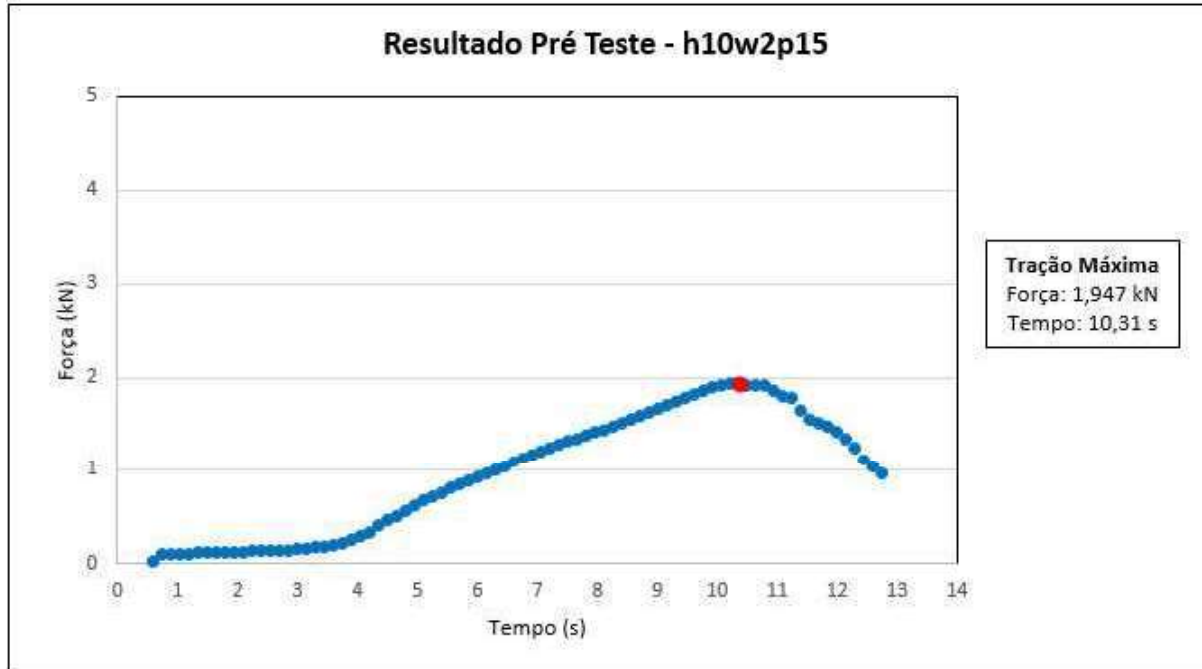
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos pré-testes

O Gráfico de Força x Tempo demonstra a quantidade de força na tração aplicada sob o material até o momento de sua ruptura, definindo sua resistência para posteriores comparações com as peças em PLA. Os mesmos foram plotados através dos dados do experimento obtidos pelo ensaio na máquina de testes de tração. A comparação foi posteriormente realizada, apontando quais características suportaram maior resistência no ensaio.

Os gráficos 3, 4 e 5 (Figura 33-35) apresentam então, o ponto máximo de tração aplicada na peça, considerando as variáveis de Força (kN) no eixo y, medida de força adotada pela máquina de ensaio, e tempo (s) em segundos no eixo x, medida que indica quanto tempo a peça resistiu o esforço de tração.

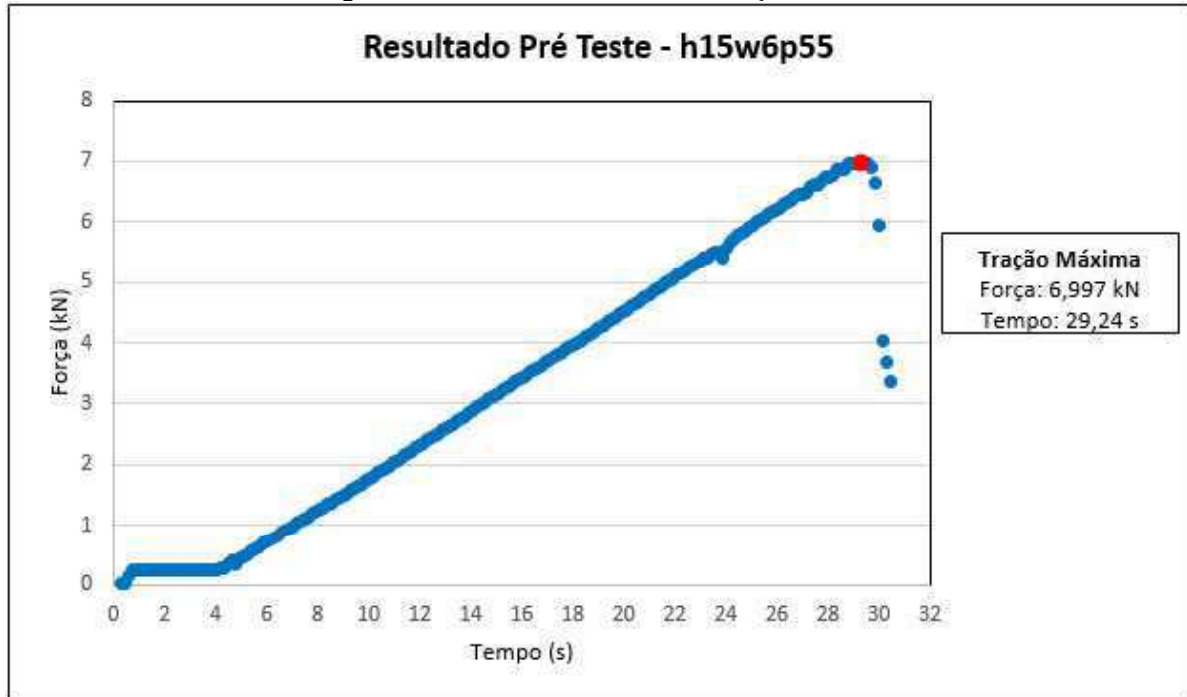
Figura 33: Gráfico 3 - Pré-teste Peça ABS 1.



Fonte: O autor (2022).

Observa-se como resultado do pré-teste da peça 1 (Figura 33), com tempo total do experimento de 12,83 s que o material suportou uma força de tração máxima ($FT_{m\acute{a}x}$) de 1,947 kN no instante $t = 10,31$ s, sendo indicado no gráfico pelo ponto vermelho.

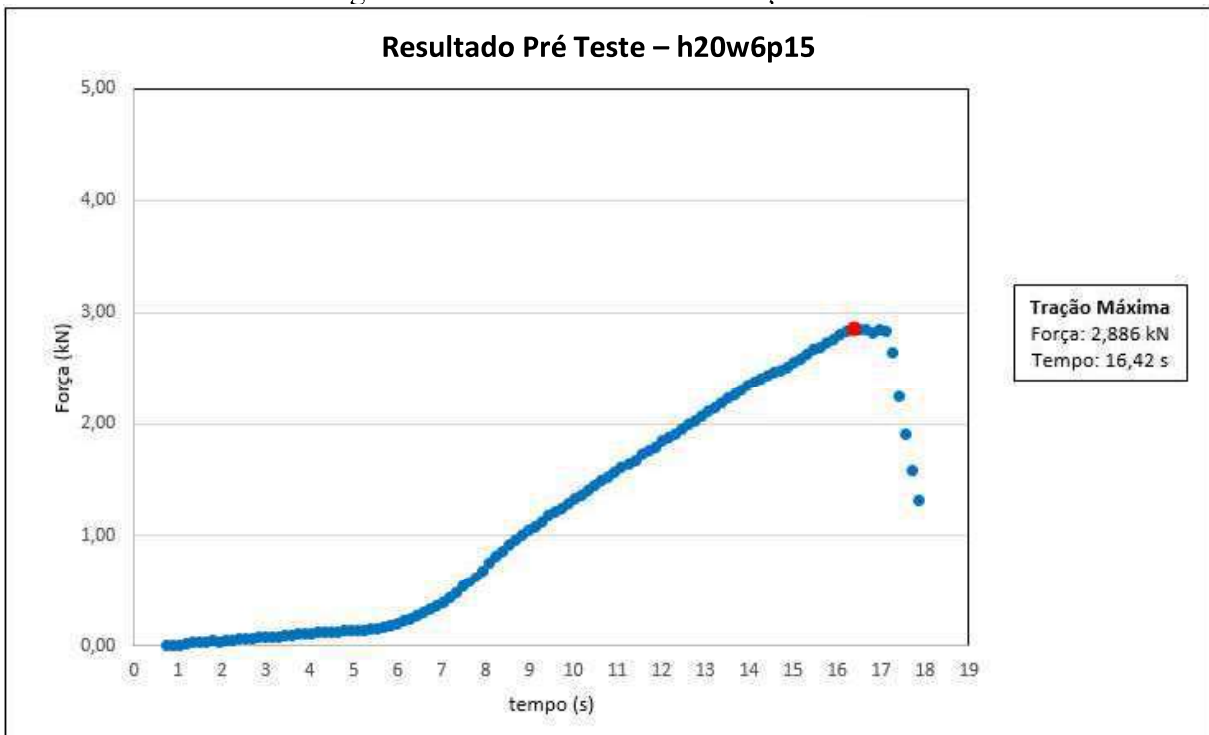
Figura 34: Gráfico 4 - Pré-teste Peça ABS 2.



Fonte: O autor (2022).

No pré-teste da peça 2 (Figura 34), com tempo total de 30,49 s, destaca-se a tração máxima aplicada de 6,997 kN, no instante $t = 29,24$ s onde houve o rompimento da peça, indicado no gráfico o ponto máximo em vermelho.

Figura 35: Gráfico 5 - Pré-teste Peça ABS 3.



Fonte: O autor (2022).

O último pré-teste realizado, da peça 3 (Figura 35), com tempo total de $t = 17,87s$, observa-se o ponto de tração máxima aplicada de 2,886 kN aplicada no instante $t = 16,42s$ resultando no rompimento da peça.

Como observado nos gráficos analisados acima, o rompimento dos materiais ocorreu em diferentes forças de tração, definindo que, a peça 2 do pré-teste realizado, apresentou maior resistência mecânica no ensaio, com uma força de tração máxima aplicada de $FT_{m\acute{a}x.}: 6,98 \text{ kN}$, até no instante $t = 29,24 \text{ s}$.

Destaca-se que cada peça possuía valores diversos de altura (h), preenchimento (p) e quantidade de paredes (w). Os resultados mostraram que a peça 2 possui suas características de maior valor (h: 15; p: 55%; w: 6), se comparado às outras duas do pré-teste.

Apesar de não haver um planejamento estatístico no pré-teste, estes foram conduzidos apenas para verificação da sensibilidade da máquina à variação dos parâmetros de fabricação. Ou seja, para os pré-testes foram selecionadas condições simplificadas de fabricação (mínimos preenchimentos e paredes) e condições de fabricação mais completas (máximo preenchimento e maior quantidade de paredes).

Após confecção dos gráficos, foi verificado que a metodologia atende às expectativas propostas no trabalho, sendo em seguida, realizados os testes para obtenção dos dados para análise estatística de influência de parâmetros.

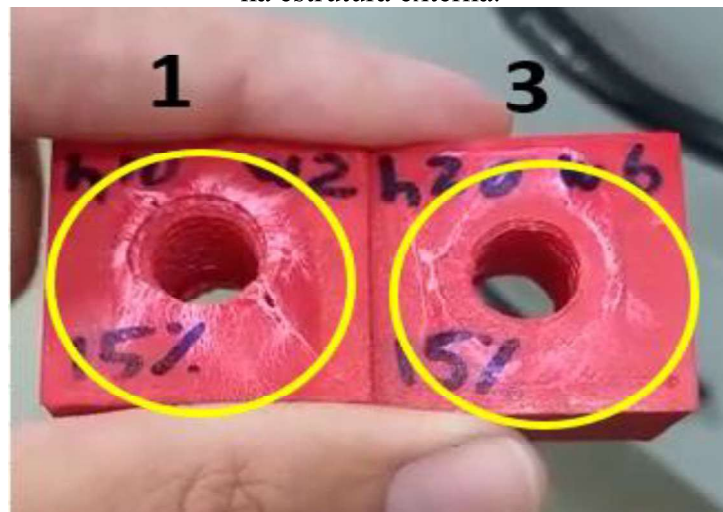
Com o pré-teste de ensaio de tração concluído, foi realizada uma análise visual analisando os corpos de prova das Peças 1, 2 e 3 utilizadas no pré-teste. Evidencia-se que a peça 2 obteve o melhor resultado, tendo a fratura apenas na rosca interna que é o principal objeto de estudo da pesquisa (Figura 36). A fratura na rosca ocorreu devido a tração máxima aplicada, apresentando uma alta resistência do corpo de prova, não presente com corpos de prova 1 e 3 (Figura 37) que pode ser relacionado ao percentual de preenchimento das peças serem menores que o da peça 2, ambos com 15%.

Figura 36: Peça 2 de ABS após o pré-teste, onde a seta azul aponta para local de rompimento dos filetes de roscas.



Fonte: O autor (2022).

Figura 37: Peças 1 e 3 de ABS após o pré-teste, onde os círculos amarelos apontam os danos na estrutura externa.



Fonte: O autor (2022).

As roscas das peças 1 e 3 suportaram as diferentes trações máximas aplicadas até ocorrer o cisalhamento nos corpos de prova, que consiste em cortar ou causar deformação numa superfície a partir da tensão provocada pelas forças geradas durante o ensaio de tração. Porém, a falha dos corpos de prova não ocorreu na rosca, e sim na estrutura externa como é apontado nos círculos amarelos na Figura 37. Destaca-se, de acordo com Martinez *et al.* (2019) os materiais ABS apresentam maior deformação dimensional.

Considerando os valores de altura (h), preenchimento (p) e quantidade de paredes (w) de cada peça e os resultados encontrados, se torna evidente que o preenchimento (p) com valores mais baixos, como nas Peças 1 e 3 com as respectivas condições h10w2p15 e h20w6p15, ambas com 15% de preenchimento, não são resistentes o suficiente para manter a

estrutura roscada aderida ao corpo de prova. Portanto, quando aplicado uma carga, o elemento roscado mantém-se íntegro, sendo que a estrutura auxiliar da peça, no caso o preenchimento, não consegue fazer essa estrutura continuar aderida à peça, levando à ruptura do corpo de prova. Já no caso da Peça 2 com h15w6p55, o preenchimento mais elevado demonstra maior resistência para manter a estrutura roscada, sendo possível analisar a resistência do elemento roscado, foco deste trabalho.

Tais resultados se assemelham com os resultados do estudo de Pirog, Pionhevick e Ferreira, onde analisaram as porcentagens de preenchimento 33%, 66% e 99% acerca da tensão de escoamento (Mpa), tensão máxima (MPa), deformação específica, força máxima (Kfg) e deformação – ruptura (mm). No referido estudo foi identificado uma correlação entre a densidade e resistência à tração, onde o material que possui menor preenchimento tem seu comportamento mais alinhado a uma malha, enquanto o mais preenchido, se comporta com um sólido (PIROG; PIONHEVICZ; FERREIRA, 2021). Assim, quando maior a porcentagem de preenchimento, maior a resistência.

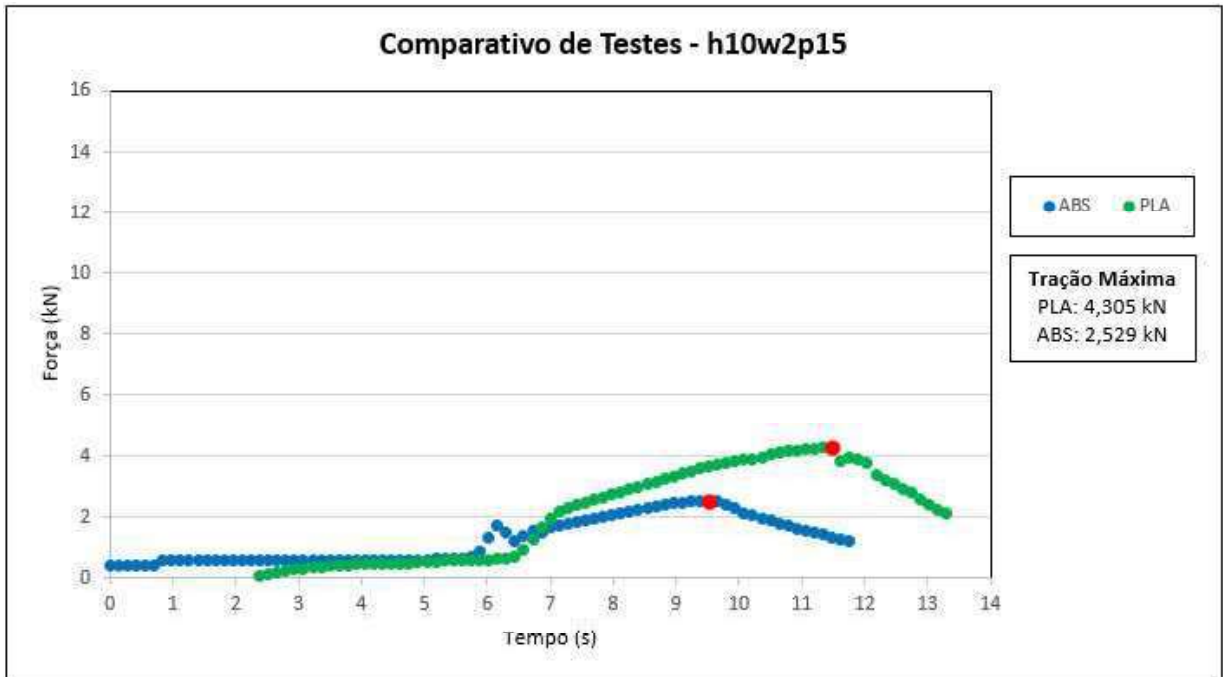
4.2 Resultados dos testes

Subsequentes aos pré-testes, foram realizados no segundo momento, testes de tração com 8 (oito) peças de ambos materiais (PLA e ABS), com características distintas de altura da camada da peça (h), de preenchimento (p) e quantidade de paredes (w) conforme descrito na Figura 32. Para efeito comparativo, foram elaborados gráficos através de dados amostrais dos testes que foram obtidos pelos relatórios fornecidos da máquina de tração. Logo, foram evidenciados os resultados dos testes de tração de ambos os materiais com suas respectivas propriedades, comprovando a força máxima de tração na peça antes do seu rompimento (seja da rosca interna, seja no corpo de prova).

Pelos dados apresentados em cada gráfico, é possível observar o tempo total de condução do experimento entre as peças dos dois materiais, e a força de tração aplicada (kN) em cada peça. Os dados auxiliaram na análise da peça mais resistente com suas devidas proporções do mesmo material, e permite a checagem do material mais resistente de mesmas características para ambas as peças.

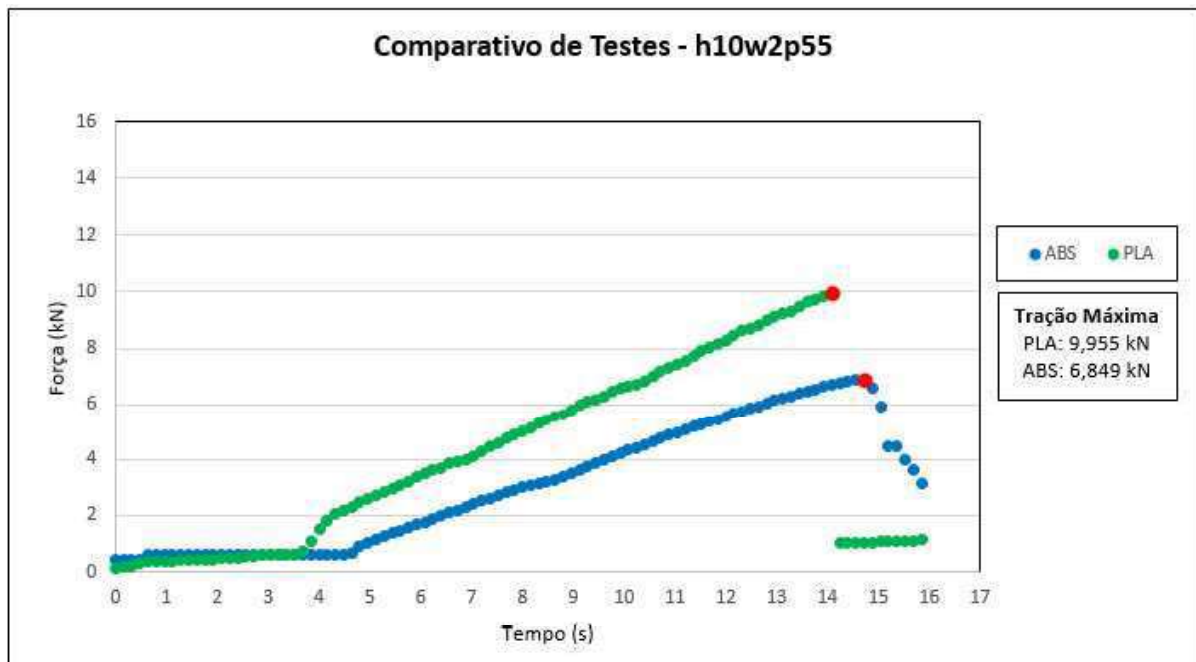
Para efeito de análise, os gráficos 6-13 (Figuras 38-45) apresentam a comparação de testes realizados com as peças do material PLA e ABS.

Figura 38: Gráfico 6 - Comparativo de testes Peça 1 (h10w2p15).



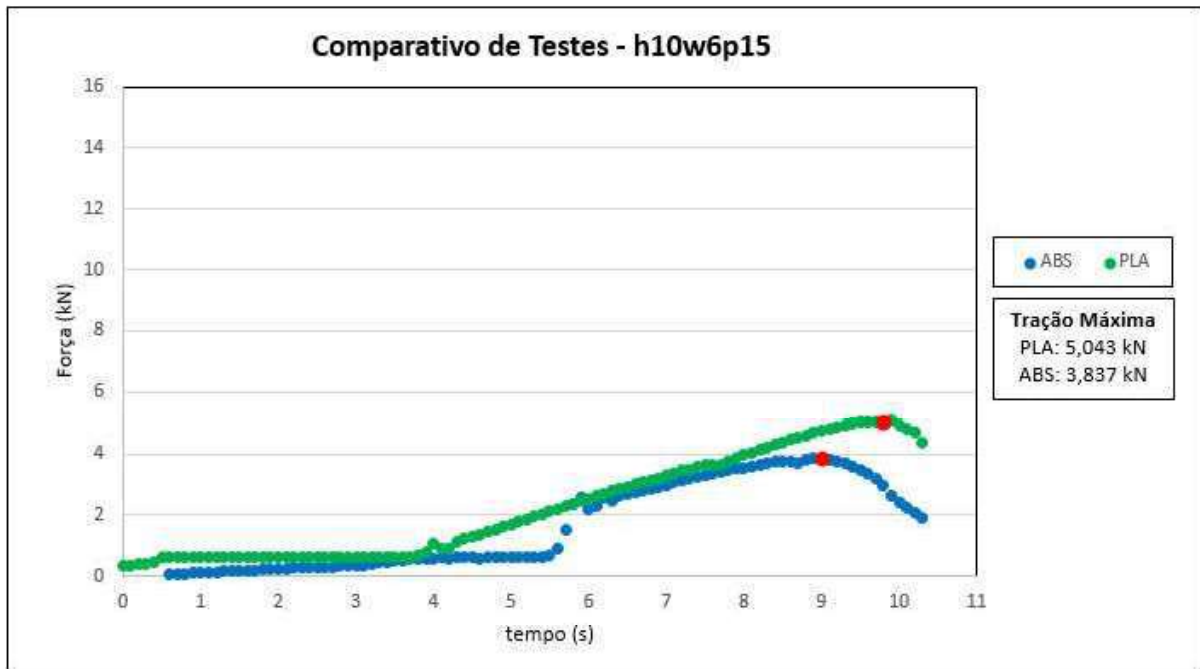
Fonte: O autor (2022).

Figura 39: Gráfico 7 - Comparativo de testes Peça 2 (h10w2p55).



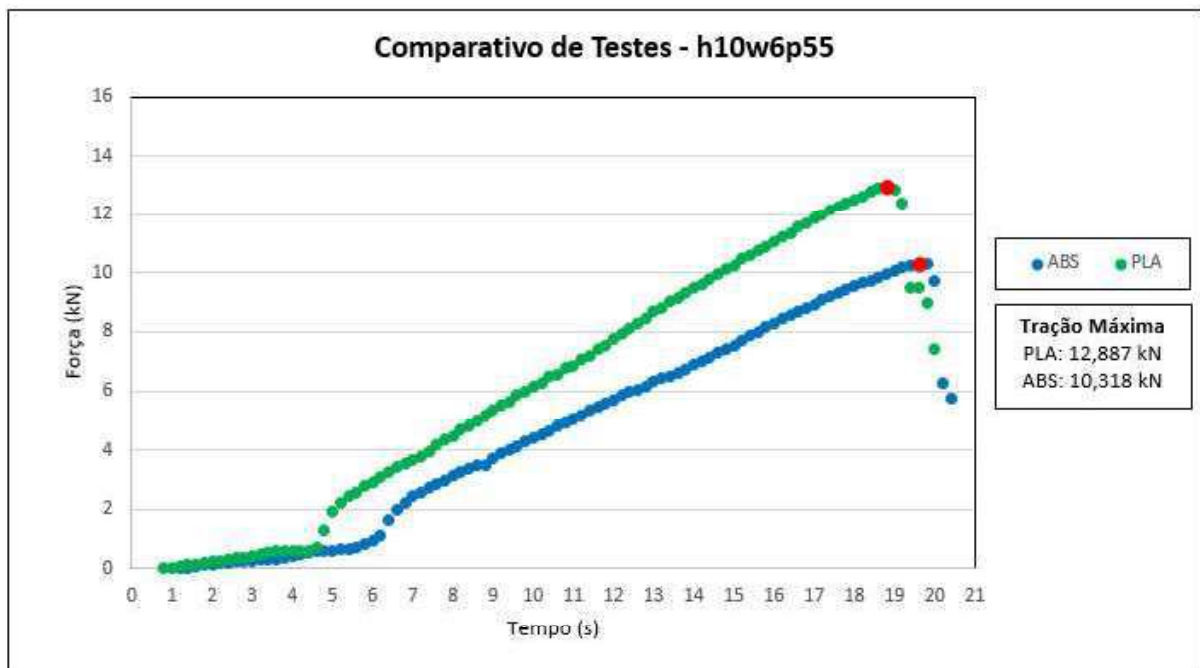
Fonte: O autor (2022).

Figura 40: Gráfico 8 - Comparativo de testes Peça 3 (h10w6p15).



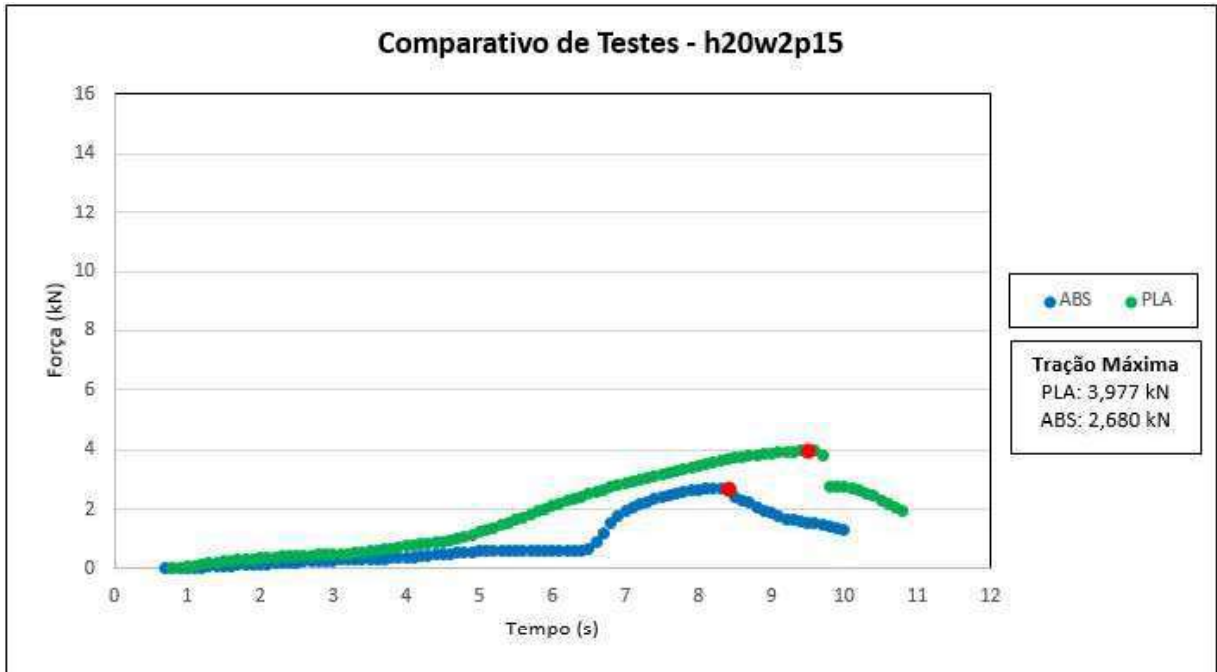
Fonte: O autor (2022).

Figura 41: Gráfico 9 - Comparativo de testes Peça 4 (h10w6p55).



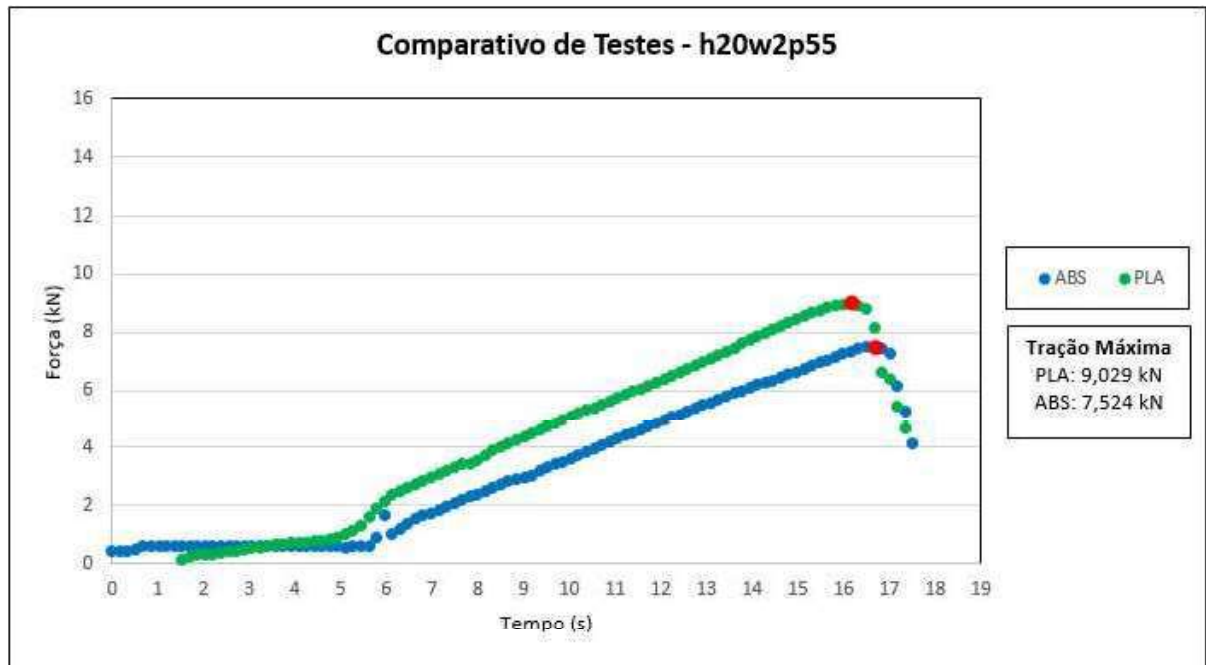
Fonte: O autor (2022).

Figura 42: Gráfico 10 - Comparativo de testes Peça 5 (h20w2p15).



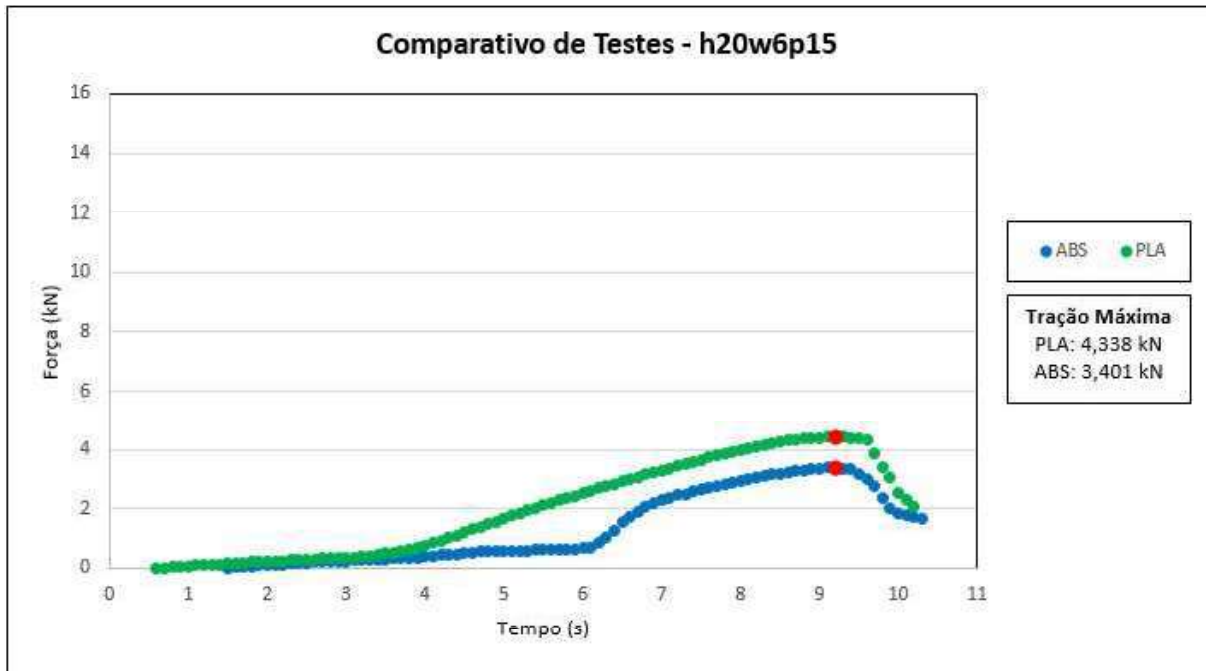
Fonte: O autor (2022).

Figura 43: Gráfico 11 - Comparativo de testes Peça 6 (h20w2p55).



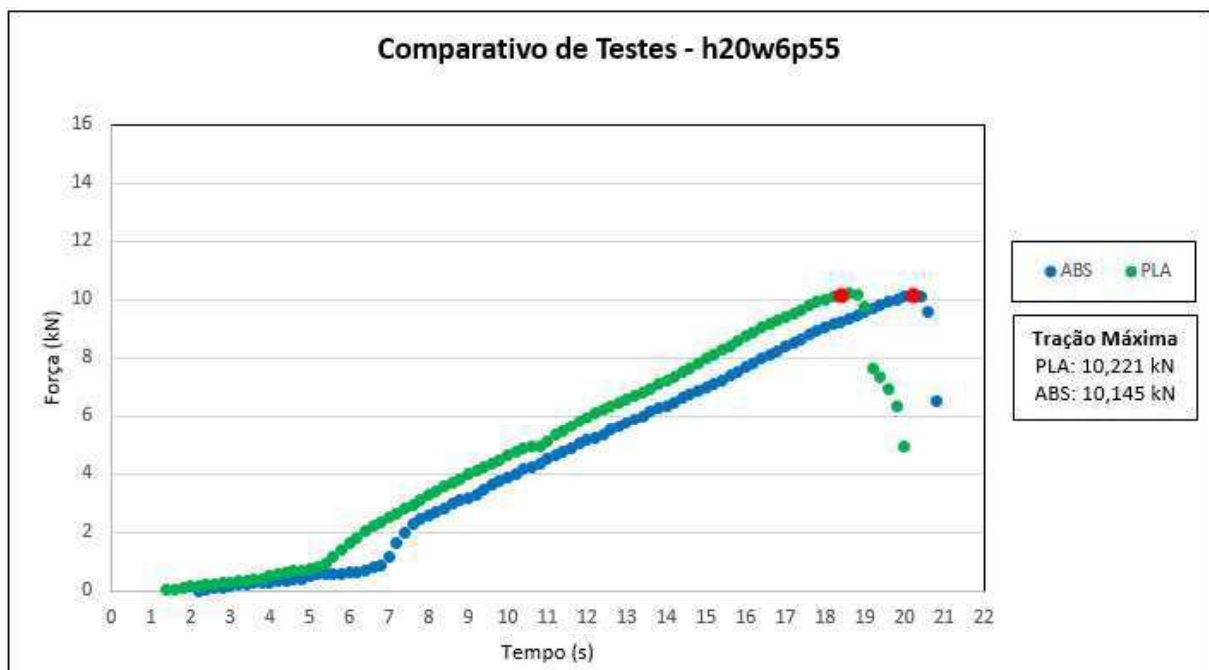
Fonte: O autor (2022).

Figura 44: Gráfico 12 - Comparativo de testes Peça 7 (h20w6p15).



Fonte: O autor (2022).

Figura 45: Gráfico 13 - Comparativo de testes Peça 8 (h20w6p55).



Fonte: O autor (2022).

Visto a análise dos gráficos apresentados acima, foi possível observar que, no geral, em quase todos os testes realizados, as peças do material PLA se sobressaíram em relação as peças de ABS no quesito de resistência à tração aplicada, conforme publicado por Harshitha e

Srinivasa (2019) com exceção da condição de h20w6p55 (Figura 46), onde a resistência do PLA foi proximamente semelhante ao do ABS, com uma diferença apenas de 0,076 kN para PLA. Entretanto, é importante destacar que apesar da semelhança entre os materiais exposta na Figura 46, ainda assim, o material PLA se sobressai. Indo ao encontro do resultado de Harshitha e Srinivasa (2019), em seu estudo com uma porta e parafuso dos materiais PLA e ABS, onde destaca-se que o material PLA é mais resistente que o ABS.

Martinez *et al.* (2019), em seu estudo de avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural, também encontraram maiores índices de resistência nos materiais PLA quando comparados ao ABS, no que se refere ao momento fletor máximo, tensão de flexão de ruptura, esforço cortante e tensão de cisalhamento. Entretanto, o ABS possui desempenho superior no módulo de elasticidade e índices semelhantes (MARTINEZ *et al.*, 2019).

Quando comparamos a influência do preenchimento (p), temos uma variação do parâmetro de 15% para 55%. O menor aumento registrado nos gráficos mostrados é de 125% na condição de h20w2 do PLA. A maior variação é de 190% quando analisamos a condição de h20w6 no ABS. Destaca-se que o preenchimento foi feito na retangular (padrão) com velocidade de 50 mm/s. Outros estudos apresentam a importância da definição da proporção de ocupação do espaço interno da peça pelo preenchimento (GALINA, 2017; VOLPATO, 2017; VELOSO, 2020; CAMPOS, 2022). Visto que, quanto maior o percentual de preenchimento, maior será a quantidade de material necessário e o tempo de impressão. Entretanto, ao definir a forma de preenchimento, os padrões que aplicam maior deposição como a hexagonal (CAMPOS, 2022), conferem maior resistência, mas também demanda mais tempo na deposição e maior gasto de material.

A análise da variação da espessura da parede (w), a menor variação acontece para o PLA, sendo de 7,5% para a condição de h20p15 e a maior variação de aumento de resistência à tração para a variação da espessura da camada acontece com o ABS na condição de h10p15, de 52% de aumento da resistência.

Esperava-se que a altura da camada (h) tivesse uma grande participação no efeito da resistência à tração. A maior variação com aumento de resistência à tração ocorreu para o PLA, na condição de w6p55, onde houve um aumento de 25% na redução da altura da camada. Para o ABS, em duas ocasiões houve um decréscimo da resistência mecânica com a diminuição da altura da camada, sendo que com a redução da altura da camada, houve uma redução de quase 10% na condição de h10w2p55. Ao serem comparados os materiais, as peças de ambos

materiais que resistiram à maior tração aplicada foram as de características h10w6p55, com tração máxima de 12,887 kN pra PLA e 10,318 kN para ABS.

Outro ponto que precisa ser considerado na resistência à tração é a deposição das camadas, durante a presente pesquisa a deposição foi realiza na vertical. De acordo com Pelegrino *et al.* (2019), em um estudo sob a comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA produzidos pelo método FDM, a impressão na horizontal apresentou maior resistência evidente, enquanto a impressão na vertical apresentou pouca resistência antes de romper. Apesar de Pelegrino *et al.* (2019) terem encontrado diferenças na resistência na impressão devido as direções da deposição de camadas, quando aplicado as peças na MA, a deposição na horizontal aumentaria a resistência em ambas as peças, e possivelmente o PLA ainda apresentaria maior resistência.

4.3 Análise estatística

4.3.1 Tabulação dos dados para análise estatística

Visto as análises realizadas, esperava-se que todos os parâmetros avaliados tivessem grande significância para a variação do limite de resistência à tração, sendo assim, tornou-se necessário a realização do teste estatístico de Análise de Variância (*ANOVA*) para confirmação de tal premissa e identificar a ordem de importância na contribuição da variação dos parâmetros.

Para dar prosseguimento as análises estatísticas, afim de contribuir na maior assertividade dos resultados e resguardar um maior grau de confiabilidade dos dados, foram realizadas réplicas dos testes permitindo avaliar se os efeitos observados são realmente consistentes e não apenas uma coincidência ou resultado de fatores aleatórios, podendo ainda de forma mais precisa avaliar relações entre variáveis, se houver.

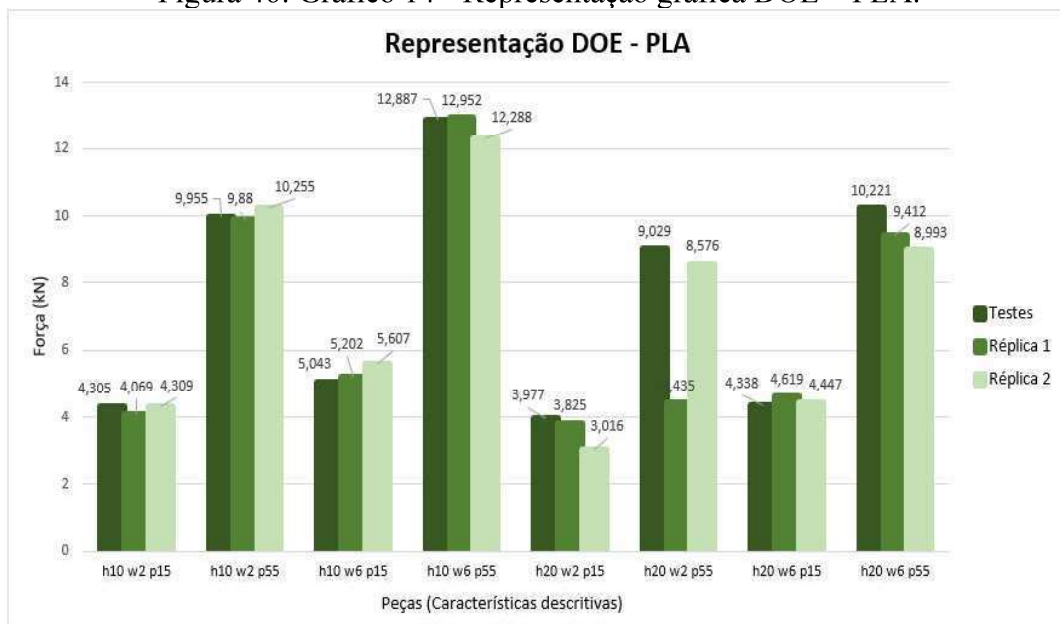
As Tabelas 7 e 8 abaixo demonstram a quantidade de réplicas com seus respectivos resultados, o que permite obter uma média (\bar{x}) e desvio padrão dos valores de tração máxima sofrida pelas peças, relacionadas as características de manufatura de ambos materiais e que foram levadas à tração máxima. Os respectivos gráficos (Figura 46-47) contribuem para uma análise visual o que permite observar a relação e veracidade dos resultados dos testes, ao serem comparados com as réplicas 1 e 2.

Tabela 7: Dados do experimento (DOE) – PLA.

Ensaio	Altura (h)	Qtd. Parede (w)	Preenchimento (p)	Tração Máxima (kN)	Média (\bar{x})	Desvio Padrão Amostral (s)
Teste				4,305		
replica 1	10	2	15	4,069	4,2277	0,1374
replica 2				4,309		
Teste				9,955		
replica 1	10	2	55	9,88	10,0300	0,1984
replica 2				10,255		
Teste				5,043		
replica 1	10	6	15	5,202	5,2840	0,2908
replica 2				5,607		
Teste				12,887		
replica 1	10	6	55	12,952	12,7090	0,3660
replica 2				12,288		
Teste				3,977		
replica 1	20	2	15	3,825	3,6060	0,5166
replica 2				3,016		
Teste				9,029		
replica 1	20	2	55	4,435	7,3467	2,5317
replica 2				8,576		
Teste				4,338		
replica 1	20	6	15	4,619	4,4680	0,1417
replica 2				4,447		
Teste				10,221		
replica 1	20	6	55	9,412	9,5420	0,6242
replica 2				8,993		

Fonte: Autor (2023).

Figura 46: Gráfico 14 - Representação gráfica DOE – PLA.



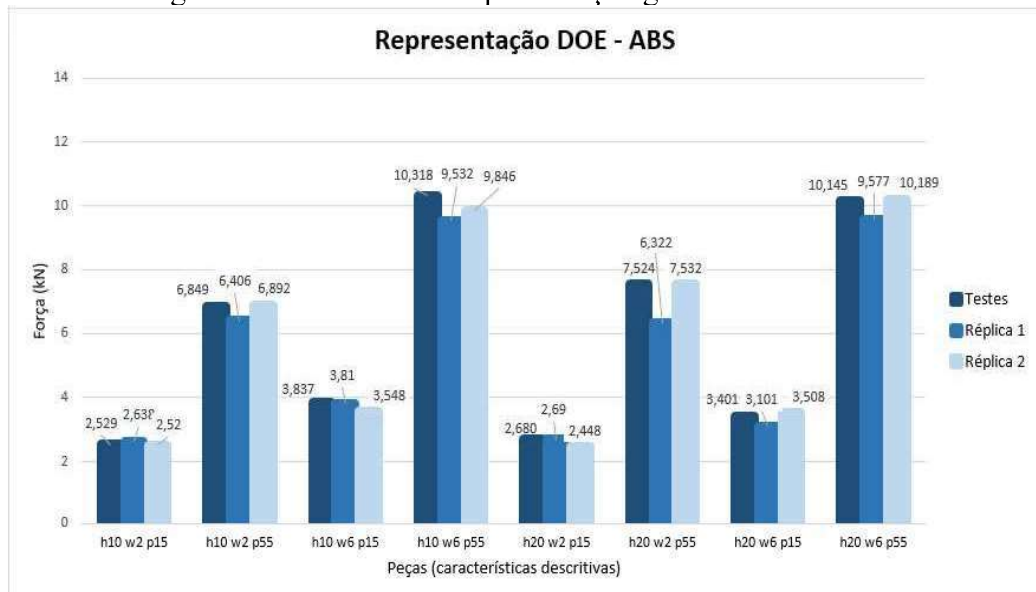
Fonte: Autor (2023).

Tabela 8: Dados do experimento (DOE) – ABS.

Ensaio	Altura (h)	Qtd. Parede (w)	Preenchimento (p)	Tração Máxima (kN)	Média (\bar{x})	Desvio Padrão Amostral (s)
Teste				2,529		
replica 1	10	2	15	2,638	2,5623	0,0657
replica 2				2,52		
Teste				6,849		
replica 1	10	2	55	6,406	6,7157	0,2690
replica 2				6,892		
Teste				3,837		
replica 1	10	6	15	3,81	3,7317	0,1596
replica 2				3,548		
Teste				10,318		
replica 1	10	6	55	9,532	9,8987	0,3956
replica 2				9,846		
Teste				2,68		
replica 1	20	2	15	2,69	2,6060	0,1369
replica 2				2,448		
Teste				7,524		
replica 1	20	2	55	6,322	7,1260	0,6963
replica 2				7,532		
Teste				3,401		
replica 1	20	6	15	3,101	3,3367	0,2110
replica 2				3,508		
Teste				10,145		
replica 1	20	6	55	9,577	9,9703	0,3413
replica 2				10,189		

Fonte: Autor (2023).

Figura 47: Gráfico 15 - Representação gráfica DOE – ABS.



Fonte: Autor (2023).

Como complemento dos resultados dos testes, observa-se pelas Figuras (46-47) que as peças em PLA resistiram maior a tração quando comparados as médias de tração máxima com as mesmas médias das peças em ABS.

Os resultados se tornaram condizentes devido à similaridade e baixa dispersão de tração máxima de ambas as réplicas. Os desvios padrão amostral (s) de ambos conjuntos de ensaios define que, 100% dos resultados de tração máxima das peças de PLA, e ABS estão dentro dos seus respectivos desvios padrão de suas médias, não resultando em nenhum erro nos valores de tração máxima das amostras.

4.3.2 Análise estatística dos ensaios

Para efeitos de resultados, o estudo contemplou com análise estatística que teve como objetivo discriminar a preponderância das características em comum das peças de ambos materiais, a altura da camada (h), preenchimento da peça (p) pelos materiais de MA e a quantidade de paredes das peças (w).

Com a premissa de que os resultados foram obtidos através da comparação da tração máxima aplicada em dois grupos de materiais, justificou-se de maior necessidade utilizar a Análise de Variância (*Analysis of Variance* ou *ANOVA*) pelo *software* estatístico, o qual ponderou e determinou através de seus resultados a importância dos parâmetros no experimento de resistência dos distintos materiais de MA.

A análise estatística ANOVA dispôs em seu resultado a investigação dos quatro parâmetros julgados nos ensaios (h ; p ; w ; material), identificando sua significância no experimento através de interações linear, dupla e tripla entre os mesmos, definindo assim no parâmetro de maior efeito nos resultados. A Figura 48 aponta a relação dos parâmetros verificados de forma linear, de dupla interação e tripla interação, relacionando-os de forma em que é definido todas as interações possíveis. Tais definições são possíveis pelos resultados dos ensaios plotados no *software*.

Figura 48: Resultados de significância dos fatores investigados.

Source	P-Value		
Model	0,000		
Blocks	0,054		
Linear	0,000		
H - Altura da camada	0,000		
W - Quantidade de parede	0,000		
P - Preenchimento	0,000		
Material	0,000		
2-Way Interactions	0,000		
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede	0,431		
H - Altura da camada*P - Preenchimento	0,013		
H - Altura da camada*Material	0,000		
W - Quantidade de parede*P - Preenchimento	0,000		
W - Quantidade de parede*Material	0,520		
P - Preenchimento*Material	0,622		
3-Way Interactions	0,030		
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*P - Preenchimento	0,957		
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*Material	0,959		
H - Altura da camada*P - Preenchimento*Material	0,002		
W - Quantidade de parede*P - Preenchimento*Material	0,447		
4-Way Interactions	0,767		
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*P - Preenchimento*Material	0,767		
Error			
Total			
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,684330	97,09%	95,45%	92,56%

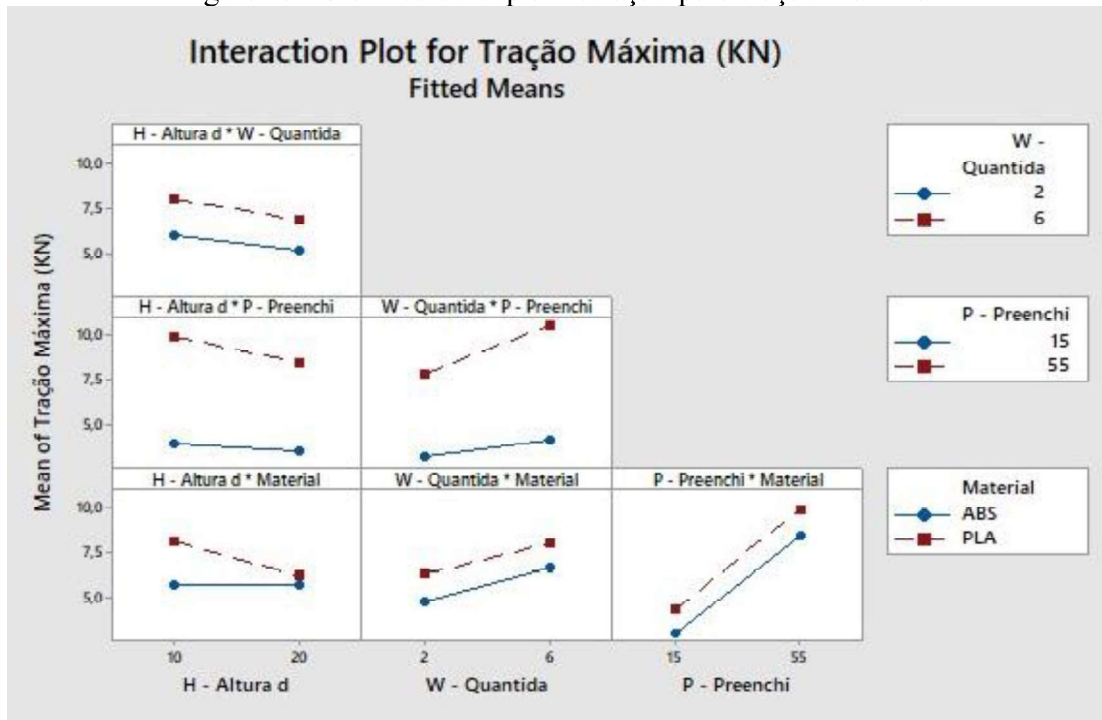
Fonte: *Software* estatístico (2022).

Observa-se na coluna à direita, os resultados dos valores de significância (P-Value) de cada parâmetro e suas respectivas interações dimensionais. Para efeito de análise, a significância é descrita pelo menor valor dentro das interações definidas, como é notável na coluna “P-value” nos parâmetros sublinhados em vermelho. Portanto, nas interações lineares, os quatro parâmetros (h; P; w; material) possuem significância no experimento. Na análise de interação dupla, a interação entre os parâmetros h x P, h x material, w x P, foram significativos. Na análise de interação tripla é significativo apenas a interação entre h x P x material.

Ainda na parte inferior da Figura 49 tem-se o cálculo de desvio padrão dos dados representado por “S = 0,684330”, representando baixo desvio. É exposto também o coeficiente de determinação “ $r^2 = 97,09\%$ ”, porcentagem que é próxima a 100%, julgado que o modelo analisado define a sua variabilidade dos dados de resposta em torno de sua média, revelando a importância dos dados para a análise estatística de variância.

O *software* possui como ferramenta a plotagem dos gráficos de ANOVA, direcionados à interação, o que foi condizente para o estudo estatístico dos dados. Como complemento da análise de interação entre os parâmetros, a Figura 49 apresenta os gráficos relacionando os quatro parâmetros por interações duplas, definindo a sua relação e inferência com os ensaios de resistência de tração aplicados, julgando qual interação entre parâmetros foi de importância para maior resistência da peça na máquina de tração.

Figura 49: Gráficos de dupla interação para tração máxima.



Fonte: *Software* Estatístico (2022).

O segundo conceito demonstrado nos resultados da análise foi o de influência, relacionando o parâmetro do ensaio que mais teve influência nos resultados de tração obtidos, com relação a resistência dos corpos de prova impressos em 3D. A Figura 50 aponta a composição dos fatores de influência, sendo ponderado na coluna à direita "F-value".

Figura 50: Resultados de influência dos fatores investigados.

Source	F-Value
Model	58,98
Blocks	3,23
Linear	233,55
H - Altura da camada	22,97
W - Quantidade de parede	85,98
P - Preenchimento	772,52
Material	52,74
2-Way Interactions	8,24
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede	0,64
H - Altura da camada*P - Preenchimento	6,90
H - Altura da camada*Material	22,40
W - Quantidade de parede*P - Preenchimento	18,86
W - Quantidade de parede*Material	0,42
P - Preenchimento*Material	0,25
3-Way Interactions	3,10
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*P - Preenchimento	0,00
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*Material	0,00
H - Altura da camada*P - Preenchimento*Material	11,80
W - Quantidade de parede*P - Preenchimento*Material	0,59
4-Way Interactions	0,09
H - Altura da camada*W - Quantidade de parede*P - Preenchimento*Material	0,09
Error	
Total	

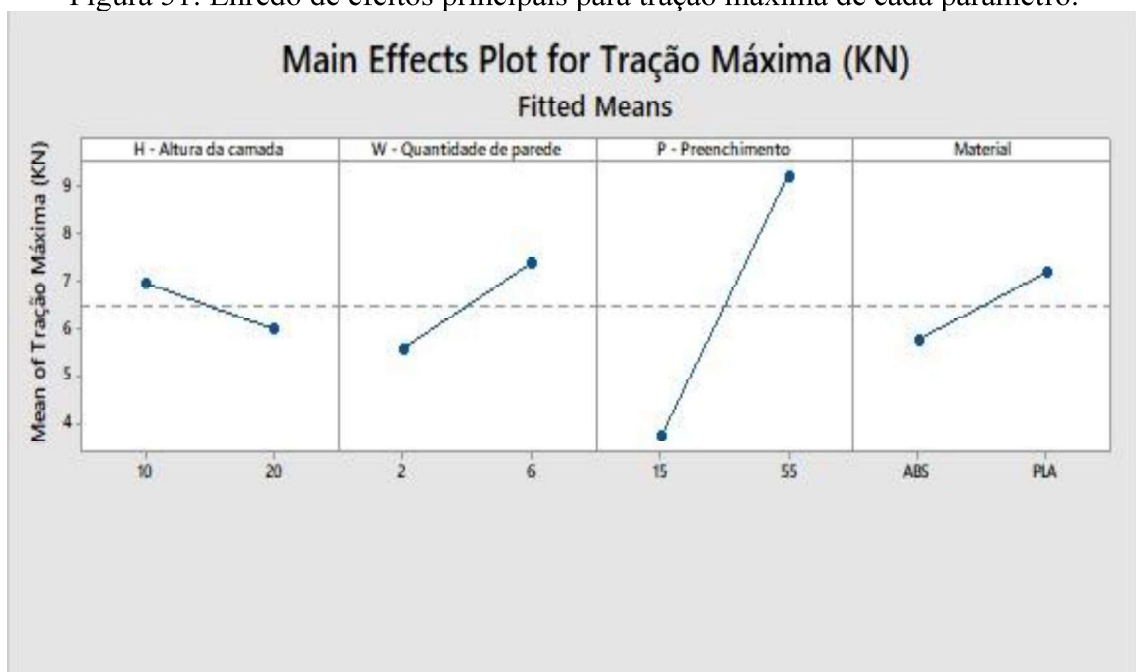
Fonte: *Software* estatístico (2022).

A comprovação do parâmetro de maior influência é destacada pelo maior valor na coluna à direita “F-value”, onde destaca-se o parâmetro de preenchimento com o maior valor de influência (772,52). Ou seja, a ANOVA determinou que para o ensaio, o preenchimento é o parâmetro de maior influência nos resultados, independentemente do tipo de material composto em cada peça, quanto maior a quantidade de preenchimento maior será a resistência da peça no ensaio de tração.

Tais resultados encontrados vão de acordo com os resultados obtidos por Pirog, Pionheviz e Ferreira (2021) no estudo da influência das porcentagens de preenchimento na resistência à tração de corpos de prova impressos na MA, onde é exposto que quanto maior a densidade do corpo de prova, maior será sua resistência.

Para análise de preponderância dos principais efeitos para tração máxima, o *software* estatístico dispôs também, a plotagem dos gráficos através da estatística ANOVA, onde os efeitos dos quatro parâmetros podem ser observados. Logo, os gráficos representados na Figura 51, apontam os parâmetros relacionando o eixo de tração máxima suportada, com o eixo de valores característicos de cada parâmetro.

Figura 51: Enredo de efeitos principais para tração máxima de cada parâmetro.



Fonte: *Software* estatístico (2022).

A figura aponta a variação de efeito principal para cada parâmetro de acordo com sua característica, descrevendo o maior valor como o de maior efeito para o ensaio, ou seja, de maior resistência. No parâmetro altura da camada (h), aponta a camada de altura 10 mm de

espessura como a de maior resistência no ensaio. Indo em concordância com o estudo de Martinez *et al.* (2019), onde relataram que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido.

O parâmetro quantidade de parede (w), a quantidade de parede mais resistente é a de 6 camadas. Para o “parâmetro preenchimento (p), como resultado o valor de 55% obteve a maior resistência. E por último, no parâmetro material, o de maior resistência apresentado, foi o de PLA com maior valor no gráfico, confirmando os resultados dos testes apresentados nos gráficos comparativos anteriores.

Com tais dados, nota-se que o material que possui maior resistência, possui menor espessura das camadas, maior quantidade de parede e preenchimento. Assim, pode afirmar que a quantidade de paredes e o preenchimento estão diretamente relacionados, visto que, quando aumenta a quantidade de paredes, aumenta-se o preenchimento e, portanto, tende-se maior resistência do material. Em outras palavras, a quantidade de paredes (w) está associada com o preenchimento, e ambos conferem maior resistência ao material.

Neste quesito, também é importante destacar a aderência de camadas, visto que é um parâmetro significativo na aplicação dos esforços de tração (SANTANA *et al.*, 2021). De acordo com Prada, Bossio e Bruno (2023), os materiais que possuem menor preenchimento, resultam na redução da área de adesão de cada camada, o que pode ser a causa de diminuição das propriedades mecânicas que conferem resistência ao material. Em outras palavras, materiais com menor preenchimento possuem baixa aderência entre as camadas o que resulta em fracas ligações entre as camadas (BELLINI; GÜÇERI, 2003; PRADA; BOSSIO; BRUNO, 2023).

A comparação entre peças com roscas fabricadas em PLA e ABS revelou que o limite de resistência à tração tende a ser maior nas peças fabricadas em PLA. Esse resultado sugere que o material PLA apresenta propriedades mecânicas superiores, o que pode ser atribuído à sua maior resistência e rigidez. Essa descoberta é relevante para a seleção de materiais em aplicações onde a resistência à tração das peças é um fator crítico.

A análise dos parâmetros de fabricação dos corpos de prova demonstrou que todos eles exercem influência significativa no limite de resistência à tração. Isso indica que cada aspecto do processo de fabricação, desde o preenchimento do material até a quantidade de parede e a altura da camada, desempenha um papel fundamental na determinação da resistência mecânica das peças com rosca fabricadas por FDM. Essa compreensão detalhada dos fatores que afetam a resistência à tração permite otimizar o processo de fabricação para obter resultados desejados.

Dentre os parâmetros analisados, o preenchimento foi identificado como o de maior significância para o limite de resistência à tração das peças com rosca fabricadas por FDM.

Quanto maior o preenchimento do material, maior foi o limite de resistência à tração observado. Além disso, foi constatado que a altura da camada e a quantidade de parede também influenciam positivamente a resistência à tração. Essas descobertas fornecem *insights* valiosos para a otimização do processo de fabricação de peças com rosca por FDM, permitindo a obtenção de resultados mais robustos e confiáveis.

Conclui-se que a metodologias utilizadas para a pesquisa experimental foram adequadas juntamente à análise descritiva aplicada no estudo, trazendo o resultado embasado em dados dimensionais e resultados de ensaios. A caracterização das propriedades mecânicas dos materiais impressos em 3D é essencial para a obtenção de projetos voltados a estruturas confiáveis, e também para a capacitação de prover simulações sob diferentes condições de carga. Os resultados deste trabalho contribuem com uma parcela considerável na forma de implementação de modelos completos do comportamento deste tipo de polímeros, no entanto, ainda se julga necessário caracterizar propriedades mecânicas em outras condições de carga, como cisalhamento, laminação entra camadas, compressão, entre outras, afim de implementar modelos construtivos completos de materiais impressos em 3D.

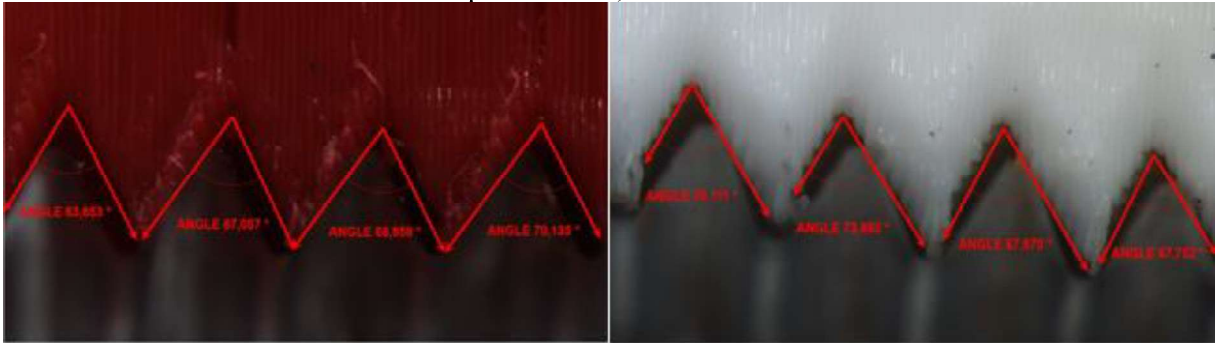
As metodologias utilizadas para a pesquisa experimental foram adequadas juntamente à análise descritiva aplicada no estudo, trazendo o resultado embasado em dados dimensionais e resultados de ensaios. A discriminação do material mais versátil e resistente (PLA), auxilia no desenvolvimento de novos produtos com baixo custo e de materiais com maior resistência.

4.4 Avaliação das dimensões da rosca fabricadas

A angulação interna dos filetes de rosca é o parâmetro que pode dar uma significância para a resistência dos mesmos. De acordo com a norma ABNT NBR 5876-Roscas-terminologia, a qual especifica os valores nominais, as tolerâncias de fabricação e de desgaste, o filete padrão possui forma triangular uma angulação interna de 60°, e com raiz arredondada.

A angulação interna dos filetes de rosca impressos possui diferentes medidas, como podemos observar na Figura 52 abaixo como exemplo, duas peças sendo uma de cada material, com seus respectivos ângulos. Tal especificação diverge da angulação de fabricação das peças para os ensaios.

Figura 52: Imagem microscópica da angulação interna dos filetes de rosca (peça h10w6p15) – Esquerda ABS, direita PLA.



Fonte: Autor (2023).

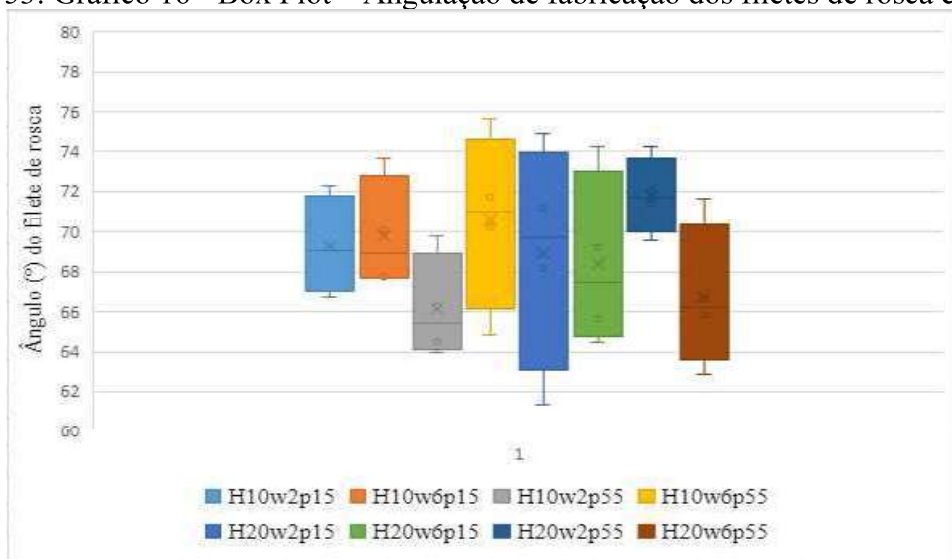
Nas Tabelas 9-10 é possível observar as angulações dos filetes de rosca fabricados para cada peça com sua respectiva média (\bar{x}) e desvio padrão (s), para ambos os polímeros. Os gráficos “boxplot” (Figuras 53-54) representam a variação de angulação para cada peça de ambos materiais.

Tabela 9: Dados de angulação dos filetes de rosca fabricados – PLA.

Peça	(h; P; W;)	Ângulo 1	Ângulo 2	Ângulo 3	Ângulo 4	Média (\bar{x})	Desv. Pad. (s)
Peça 1	H10w2p15	70,226	72,259	67,937	66,727	69,287	2,455646877
Peça 2	H10w6p15	70,111	73,692	67,670	67,752	69,806	2,826979115
Peça 3	H10w2p55	69,836	66,283	64,512	63,949	66,145	2,654030269
Peça 4	H10w6p55	64,815	70,266	75,625	71,719	70,606	4,475131683
Peça 5	H20w2p15	61,349	74,923	71,170	68,218	68,915	5,741987287
Peça 6	H20w6p15	69,243	65,662	64,463	74,238	68,401	4,388982304
Peça 7	H20w2p55	69,556	74,230	72,024	71,393	71,801	1,928406834
Peça 8	H20w6p55	65,832	66,635	62,911	71,613	66,748	3,616748943

Fonte: Autor (2023).

Figura 53: Gráfico 16 - Box Plot – Angulação de fabricação dos filetes de rosca em PLA.



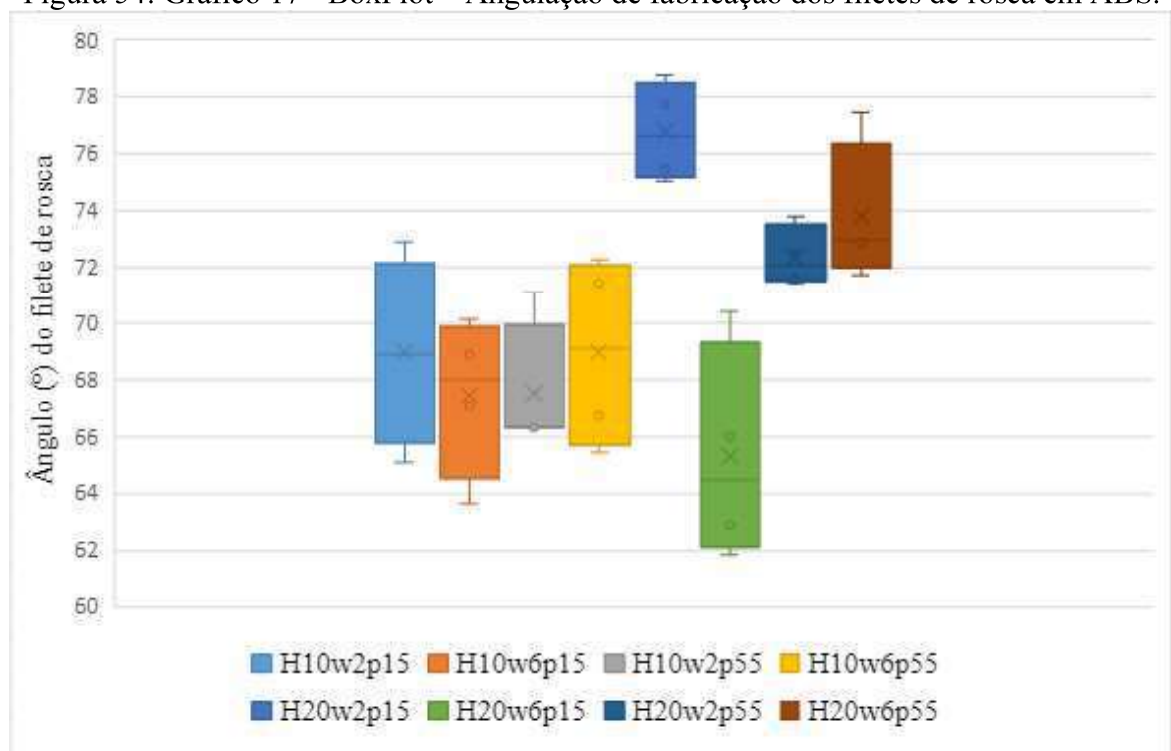
Fonte: Autor (2023).

Tabela 10: Dados de angulação dos filetes de rosca fabricados – ABS.

Peça	(h; P; W;)	Ângulo 1	Ângulo 2	Ângulo 3	Ângulo 4	Média (\bar{x})	Desv. Pad.(s)
Peça 1	H10w2p15	65,113	72,873	70,031	67,747	68,941	3,302925168
Peça 2	H10w6p15	63,653	67,057	68,859	70,135	67,426	2,814478045
Peça 3	H10w2p55	66,290	71,071	66,395	66,290	67,512	2,373516168
Peça 4	H10w6p55	65,399	72,301	66,721	71,427	68,962	3,412828543
Peça 5	H20w2p15	77,751	75,044	75,468	78,764	76,757	1,789969716
Peça 6	H20w6p15	70,378	62,894	61,828	66,007	65,277	3,835248395
Peça 7	H20w2p55	72,507	71,470	71,574	73,808	72,340	1,084215346
Peça 8	H20w6p55	72,864	73,052	77,419	71,685	73,755	2,516471471

Fonte: Autor (2023).

Figura 54: Gráfico 17 - BoxPlot – Angulação de fabricação dos filetes de rosca em ABS.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se nas representações gráficas (Figura 53-54) a discrepância das medidas dos filetes impressos, quanto a sua angulação se comprada com a angulação padrão da norma ABNT NBR 5876-Roscas-terminologia. Tendo uma variação entre $61,349^\circ$ a $74,238^\circ$ para peças em PLA, e de $61,828^\circ$ a $78,764^\circ$ para as peças impressas em ABS. Todos os resultados apresentados obtiveram ângulos maiores do que o explicitado pela norma, provavelmente a folga de projeto de 0,2 mm no diâmetro para que o parafuso entrasse no corpo de prova sem grande interferência pode ter influenciado nesta análise.

A variação nos ângulos de filetes de rosca já foi estudada por pesquisadores como Durgun e Ertan (2014), Fernandes (2016), Lovo e Furlan (2016). Destaca-se que a variação entre 60° e

90° é uma variação aceitável para peças impressas verticalmente, visto que apresentam melhor comportamento mecânico se comparado com peças produzidas a ângulo de 45°.

Portanto, tal variação foi considerada ao analisar os resultados de tração máxima de cada peça, revelando se a disparidade de angulação padrão e a impressora tem interferência nos resultados. É preciso considerar que tais variações na angulação pode ter ocorrido visto as condições de impressão, pois a impressão das peças em polímeros necessita da exposição a temperaturas altas.

Para PLA a temperatura precisa estar em torno de 60°C ou mais, com a impressora aberta ou fechada, visto que não é tóxico, ou seja, é inofensivo para o organismo humano. Já para as peças em ABS necessitam de mesa aquecida para sua impressão, além de impressora fechada, pois, por ser derivado de petróleo gera uma fumaça considerada toxica durante o processo de impressão, portanto, também é importante operar a impressora em uma área ventilada (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

Destaca-se que para cada um dos polímeros utilizados (PLA e ABS), possui suas particularidades de ajuste devido a temperatura de deposição, expansão térmica e características inerentes a cada material. Tais particularidades são apresentadas na tabela abaixo descrita como Figura 55.

Figura 55: Propriedades material PLA e ABS.

Propriedades Materia Prima 3D LAB - Grãos			
Propriedades	PLA	ABS Premium	PETG
Densidade	1,24 [g/cm ³]	1,04 [g/cm ³]	1,27 [g/cm ³]
Temp. Fusão	185 [°C]	220 [°C]	240 [°C]
Tg	60 [°C]	100 [°C]	85 [°C]
Tensão de Escoamento	66 [Mpa]	38 [Mpa]	51 [Mpa]
Resistencia a Flexão	130 [Mpa]	66 [Mpa]	72 [Mpa]
Modulo de Elasticidade	4350 [Mpa]	2200 [Mpa]	2120[Mpa]
Resultado ensaio de Tração segundo a Norma ASTM D 638 - Corpo de provas Impresso			
Propriedades	PLA	ABS Premium	PETG
Tensão de Escoamento	24,8 [Mpa]	14,7[Mpa]	18,6 [Mpa]
Modulo de Elasticidade	1896,0 [Mpa]	1335,9 [Mpa]	1067,9 [Mpa]
Tensão de Ruptura	46 [Mpa]	29 [Mpa]	32,6 [Mpa]
Alongamento	3,69 [%]	7,08 [%]	7,74 [%]
Resultado ensaio de Dureza segundo a Norma ASTM D 2240 - Corpo de provas Impresso			
Dureza Shore D	85 [Shore D]	74 [Shore D]	75 [Shore D]
Resultado ensaio HTD segundo a Norma ISO 75 - Corpo de provas Impresso			
Temperatura HDT	55,11°C	86,13°C	67,3 °C

Fonte: <https://www.3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/> (2022).

As características foram tomadas como padrão por meio de análise experimental de acordo com as normas ASTM D 638, ASTM D 2240 e ISSO 7, que dispõe características

padrões dos resultados dos ensaios de dureza, tração e HTD (ensaio com carga de flexão constante durante o aumento de temperaturas). É de grande ressalva que o perfil de roscas escolhido para os testes foi de características triangular por apresentarem vantagem significativa em termos de rigidez, tolerâncias de fabricação e de desgaste, além de serem as mais comuns em mercado para sistema de fixação parafuso e porca entre peças.

5. CONCLUSÕES

Peças com roscas fabricadas em PLA tendem a possuir um limite de resistência à tração maior do que peças fabricadas em ABS, principalmente pelo próprio processo sobreposição de camadas quando ambos impressos em impressoras abertas.

- Todos os parâmetros analisados para a fabricação dos corpos de prova possuem influência significativa para o limite de resistência à tração.
- O preenchimento é o parâmetro de maior significância para o limite de resistência à tração de peças fabricadas com rosca por FDM, segundo o autor deste trabalho, pois permite a aderência do elemento roscado à estrutura da peça.
- Quanto menor a altura da camada, maior o limite de resistência à tração.
- Quanto maior o preenchimento do material, maior o limite de resistência à tração.
- Quanto maior a quantidade de paredes, maior o limite de resistência à tração.
- Para todos os corpos de prova analisados, em ambos materiais, o preenchimento possui uma função de deixar o elemento roscado aderido ao corpo da peça fabricado. Apenas para os preenchimentos de 55% foi verificado um dano severo às roscas fabricadas por FDM.
- A análise dos ângulos internos e a discrepância do ideal, não influenciaram no resultado de tração máxima relacionando-os com os parâmetros com a média mais próxima do padrão e menor desvio padrão.
- A metodologia utilizada para os ensaios de tração é satisfatória, eliminando a influência da pressão exercida pelas garras da máquina de ensaios nos resultados obtidos.

Trabalhos futuros:

- Avaliar diferentes tipos de preenchimento, com relação à geometria de deposição para verificar a influência deste parâmetro na resistência mecânica das peças.
- Verificar se após a deposição, a dureza de cada um dos materiais é diferente da fornecida pelo fabricante do filamento.
- Analisar a resistência ao desgaste de peças feitas em PLA e ABS. A princípio, sugere-se que o PLA possua uma resistência à abrasão maior do que o ABS.
- Verificar os desvios de tolerância das roscas, fabricadas por FDM em ambos materiais e a influência destes mesmos parâmetros nessa variável. Aparentemente, nas imagens

dos resultados, a folga entre as roscas e o parafuso pode ser maior ou menor, dependendo dos parâmetros utilizados.

- Analisar a influência dos ângulos das roscas em relação ao preenchimento (%), quantidade de paredes (w) e altura das camadas (h).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 5876 – Roscas – Terminologia.
- Alves, D. A. C. (2018). Tecnologia e Aplicação da Manufatura Aditiva: A viabilidade funcional, vantagens e desvantagens do processo (Trabalho de Conclusão de Curso). Faculdade Pitágoras, Uberlândia, MG.
- Ahn, S.-H., Wright, S., Montero, P., Odell, M., D. and Roundy, S.(2002), “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257.
- Araújo, G. G. (2017). Fabricação Aditiva: Tecnologias e Parâmetros. REGRAD, UNIVEM/Marília (SP), 10(1), 417-432.
- Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2016). *Additive Manufacturing*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Basavaraj, C. K., & Vishwas, M. (2016). Studies on Effect of Fused Deposition Modelling Process Parameters on Ultimate Tensile Strength and Dimensional Accuracy of Nylon. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 149, 012035.
- Bathista, A. L. B., & Da Silva, E. O. (2003). *Conhecendo Materiais Poliméricos*.
- Bellini, A., & Güçeri, S. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 252-264.
- Besko, M., Bilyk, C., Sieben, P. G. (2017). Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. *Gest. Tecnol. Inov.* 1(3), 9-18.
- Bontempo, K. P., *et al.* (2021). A Importância da Manufatura Aditiva no Processo de Design de Embalagens: O caso das Memórias de Resultado (MRs). *Revista de Tecnologia*, 11(22), 1-10.
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc.
- Campos, P. P., Silva, L. G., Silva, M. J., Medeiros, M. F. (2020). Análise de Resistência Mecânica e Térmica de Sacolas Plásticas Ecológicas em comparação às Sacolas Plásticas de Polietileno de Alta (PEAD) e Baixa Densidade (PEBD). *Revista Científica Do Centro Universitário De Itajubá*, 7(1).
- Campos, L. (2022). Avaliação do efeito do nível e do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por impressão 3D utilizando o material ABS (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará, Russas.

Canevarolo Jr, S. V. (2010). *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros* (3ª ed.). Artliber Editora.

Carpinski, E. B., & Rodrigues, W. V. (2022). *Relação entre o envelhecimento natural de curto período e a resistência mecânica de diferentes polímeros termoplásticos comerciais* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). *Rapid prototyping: principles and applications* (with companion CD-ROM). World Scientific Publishing Company.

Croucillo, A. P. R., Arruda, J. D., Franco, L. J. V., Leite, J. F., & Carvalho, M. R. (2018). Avaliação das características mecânicas do PLA, impressa em 3D, para aplicação em próteses em animais de pequeno e médio porte. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 15(3), 221-225.

Da Silva, F. P., *et al.* (2010). A Digitalização Tridimensional Móvel e sua aplicação no Design de Produto. *Design e Tecnologia*, 1(01), 60-65.

Dinesh, S. K., Arun Prakash, S., Senthil Kumar, K. L., & Megalingam, A. (2020). Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials. *Materials Today: Proceedings*.

Dizon, J. R. C., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44-67.

Durgun, I. & Ertan, R. (2014). Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3) 228-235.

Fernandes, J. F. M. (2016). *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA* (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Ferreira, J. (2003). Integration of reverse engineering and rapid tool in foundry technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 374-382.

Galina, D. M. (2017). *Influência da espessura da camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS* (Monografia). Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES.

Gebhardt, A., & Hötte, J. A. (2016). *Additive Manufacturing: 3D printing for Prototyping and Manufacturing*. Hanser Publish.

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer.

Gomes, F. V., de Oliveira, F. M., Ribeiro, A. C., & Castro, J. T. (2021). Avaliação da qualidade superficial de protótipos impressos em 3D utilizando diferentes softwares CAD. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 7(1), 175.

- Harshitha, V., & Srinivasa, S. (2019). Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 19(2), 583-588.
- Jesus, R. C. *et al.* (2018). Caracterização de materiais para impressão 3D na medicina: uma revisão. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 34(4), 316-326.
- Júnior Júnior, O. C., *et al.* (2015). Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos. *Gest. Prod. PUC/PR*, 22(2), 345-255.
- Lages, M. da S., Abrão, A. M., Dos Santos, A. J., & Câmara, M. A. (2019). Desenvolvimento de uma máquina para ensaio de fadiga por flexão. *Matéria (Rio J.)*, 24(1).
- Liu, Z., Lei, Q., & Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3741-3751.
- Lovo, J. F. P., & Fortulan, C. A. (2016). Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM. 1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1-6.
- Lucas, E. F., Soares, B. G., & Monteiro, E. E. C. (2001). Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica. E-papers Editora.
- Macedo, N. S. MacAnálise da influência de parâmetros de usinagem na temperatura de rosqueamento interno por macho de corte. [manuscrito] / Nathan Souza Macedo. - 2021. Mac50 f.: il.: color., tab..
- Mano, E. B. (2019). Polímeros como materiais de engenharia (8ª ed.). Artliber Editora.
- Martinez, A. C. P., Souza, D. L., Santos, D. M., Pedroti, L. G., Carlo, J. C., & Martins, M. A. D. (2019). Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, 14(1), 125-141.
- Mathias, R. F. (2019). Análise Experimental de Amostras Produzidas por Manufatura Aditiva em PLA Através de Ensaio de Tração (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). UFU/MG, Uberlândia, MG.
- Mello, F. R., *et al.* (2020). Introdução à impressão 3D: análise de arquivos STL e processo de impressão. *Revista Eletrônica Científica do IFSC*, 6(1), 1-11.
- Mohan, R. G., *et al.* (2021). Análise comparativa de propriedades mecânicas de peças impressas FDM com base em ângulo de varredura. *Materiais hoje: Procedimentos*.
- Nemoto, Y. L. (2004). Determinação da curva de tensão-deformação verdadeira de metais isotrópicos usando corpos de prova de chapa fina (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

Oliveira, L. R. M., Campos, R. F. G., & Ferreira, P. H. D. (2017). Análise de métodos de digitalização 3D para engenharia reversa. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, 2(1), 1-16.

Prada, R. E., Bossio, G. R., & Bruno, M. M. (2023). Effect of FDM printing patterns on mechanical properties of ABS. *Rapid Prototyping Journal*. ISSN: 1355-2546. DOI 10.1108/RPJ-04-2023-0130.

Pelegriño, A. N., Monteiro, C. K., Mikolayczyk, K. R., & Santos, A. M. (2019) Comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA produzidos pelo método FDM." *Memorial TCC Caderno da Graduação*, 5(1), 239-260.

Pirog, A., Pionhievicz, J., & Ferreira, A. M. (2021). Influência das porcentagens de preenchimento na resistência à tração de corpos de prova impressos na manufatura aditiva utilizando PETG. *Artigo Científico*.

Prado, F. A., & Santos, D. R. (2017). Prototipagem rápida aplicada ao design e desenvolvimento de produtos. In D. C. F. Oliveira & F. R. Almeida (Orgs.), *Introdução à Engenharia de Produção: abordagens de sistemas de produção e gestão empresarial* (p. 365-400). Saraiva.

Quiroz Cevallos, G., Chacón Flores, L., Guevara Guamán, K., Celi Gonzaga, M., Cangas Bedoya, P., Quinapallo López, V., & Cascante Calderón, M. G. (2022). Influencia del arenado sobre la resistencia adhesiva de un polímero HPP para CAD CAM. *Odontología Activa Revista Científica*, 7(1), 17-22.

Raulino, B. R. (2011). *Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida* (Trabalho de graduação em Engenharia de Controle e Automação). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Reis, P., *et al.* (2017). Estudo das propriedades mecânicas do alumínio e suas ligas utilizadas na indústria aeronáutica. In *10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 1-8.

Ribeiro, J. L. D., *et al.* (2018). Processamento de arquivos STL para manufatura aditiva: uma revisão. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 37(3), 201-210.

Samykan, M., Selvamani, S.K., Kadirgama, K., Ngui, W.K., Kanagaraj, G. and Sudhakar, K. (2019), "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters", *The International Journal of Advanced Manu-facturing Technology*, 102(9/12), 2779-2796.

Santana, A. F., Ribeiro, A. C., Teixeira, A. C., & Castro, J. T. (2021). Avaliação da qualidade superficial de protótipos impressos em 3D utilizando diferentes materiais e parâmetros de impressão. *Revista de Tecnologia Aplicada*, 8(1), 30-43.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Brown Jr, T. H. (2004). *Standard handbook of machine design*. McGraw-Hill Education.

Sousa, J. G. Q. (2022). Efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de peças impressas com filamento ABS (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará, Russas, CE.

Sokovic, M., & Kopac, J. (2006). RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 398-403.

Tanveer, M., Mishra, G., Mishra, S. & Sharma, R. (2022), “Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed parts – a current review”, *Materials Today: Proceedings*, 62, 100-108.

Tymrak, B.M., Kreiger, M. and Pearce, J.M. (2014), “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions”, *Materials & Design*, 58, 242-246.

Tokumoto, S. (2003). Deformação Plástica do Polipropileno Isotático: aspectos do mecanismo, propriedades e morfologia (PGCIMAT – Pós-Graduação em Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS).

Torrado Perez, A.R., Roberson, D.A. and Wicker, R.B. (2014), “Fracture surface analysis of 3D-Printed tensile specimens of novel ABS-Based materials”, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3) 343-353.

Veloso, V. (2020). I Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva–I CBMAAdi (I Brazilian Conference on Additive Manufacturing). Recuperado de [URL].

Volpato, N., *et al.* (2017). *Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Blucher.

Zanini, M. A., da Silva, F. J. G., de Faria, P. E. R., & Franco, A. C. (2019). Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio para caracterização de peças de materiais impressas em 3D. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 41, e20180374.