

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

Túlio Teles Vieira Filho

**Análise de Resistência Mecânica de Elementos Roscados Fabricados
em PLA pelo Processo de Impressão 3D Considerando Diferentes
Tipos de Preenchimentos**

Goiânia – 2024



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

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 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 dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) 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 Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Túlio Teles Vieira Filho

Título do trabalho: Análise de Resistência Mecânica de Elementos Roscados Fabricados em PLA pelo Processo de Impressão 3D Considerando Diferentes Tipos de Preenchimentos

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] 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(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. 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.

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



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha**, Professor do Magistério Superior, em 03/06/2025, às 15:01, 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 **Túlio Teles Vieira Filho**, Discente, em 04/06/2025, às 18:16, 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 **5413725** e o código CRC **CB7BA88C**.

Referência: Processo nº 23070.019741/2025-01

SEI nº 5413725

Túlio Teles Vieira Filho

Análise de Resistência Mecânica de Elementos Roscados Fabricados em PLA pelo Processo de Impressão 3D Considerando Diferentes Tipos de Preenchimentos

Trabalho de conclusão de curso apresentado com o objetivo de cumprir como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Área de concentração: Materiais e Fabricação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha

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

Vieira Filho, Túlio Teles

Análise de Resistência Mecânica de Elementos Roscados Fabricados em PLA pelo Processo de Impressão 3D Considerando Diferentes Tipos de Preenchimentos [manuscrito] / Túlio Teles Vieira Filho. - 2025.

65 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Rosca. 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 TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) três dia(s) do mês de Junho do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ Análise de Resistência Mecânica de Elementos Roscados Fabricados em PLA pelo Processo de Impressão 3D Considerando Diferentes Tipos de Preenchimentos ”, de autoria de Túlio Teles Vieira Filho, do curso de Engenharia Mecânica, do(a) EMC da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha - orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira EMC/UFG e Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo EMC/UFG. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,7 , tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 03/06/2025, às 15:08, 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 **Kleber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 03/06/2025, às 16:14, 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 **Ademyr Goncalves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 03/06/2025, às 19:30, 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 **5413690** e o código CRC **ACA25003**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Daniel Fernandes da Cunha, pela motivação nessa reta final, pela disponibilidade na realização dos ensaios em laboratório e pelo auxílio para elaboração do projeto.

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal de Goiás, por todo conhecimento transmitido ao longo do curso de graduação.

Por fim e não menos importante, agradeço a minha família e amigos por fazer parte dessa jornada.

RESUMO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras para a fabricação de componentes em diferentes indústrias, como automotiva, biomédica e aeroespacial. Essa técnica possibilita a criação de geometrias complexas, redução de custos e personalização de peças com rapidez e precisão. Entre os materiais mais utilizados, o ácido polilático (PLA) destaca-se por ser um polímero biodegradável, acessível e de fácil processamento, amplamente empregado na produção de protótipos e componentes funcionais.

No entanto, a resistência mecânica das peças impressas em PLA é fortemente influenciada por fatores como o tipo e a densidade do preenchimento interno. Esse aspecto é particularmente relevante para elementos roscados, amplamente utilizados em montagens mecânicas devido à sua função de fixação e união. Analisar como diferentes padrões de preenchimento afetam a resistência mecânica desses elementos é essencial para garantir a segurança e a integridade estrutural de projetos que utilizem a impressão 3D.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica de elementos roscados fabricados em PLA por impressão 3D, considerando diferentes padrões e densidades de preenchimento. Para isso, serão desenvolvidos protótipos e realizados testes experimentais de tração, compressão e torque, investigando a influência dessas variáveis no comportamento mecânico dos elementos. Os resultados obtidos buscarão preencher lacunas na literatura científica, contribuindo para o uso mais eficiente do PLA em projetos de engenharia e fornecendo recomendações práticas para a indústria.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, resistência mecânica, PLA, Testes experimentais.

ABSTRACT

Additive manufacturing, or 3D printing, has established itself as one of the most promising technologies for component production across various industries, such as automotive, biomedical, and aerospace. This technique enables the creation of complex geometries, cost reduction, and customization of parts with speed and precision. Among the most commonly used materials, polylactic acid (PLA) stands out as a biodegradable, affordable, and easily processed polymer, widely employed in prototyping and functional component manufacturing.

However, the mechanical strength of PLA-printed parts is strongly influenced by factors such as the type and density of internal infill. This is particularly relevant for threaded elements, extensively used in mechanical assemblies for fixation and connection. Analyzing how different infill patterns affect the mechanical strength of these elements is essential to ensure the safety and structural integrity of projects utilizing 3D printing.

This study aims to evaluate the mechanical strength of threaded elements manufactured in PLA using 3D printing, considering different infill patterns and densities. Prototypes will be developed, and experimental tests will be conducted, including tensile, compression, and torque tests, to investigate the influence of these variables on the mechanical behavior of the elements. The results will address gaps in the scientific literature, contributing to the efficient use of PLA in engineering projects and providing practical recommendations for industry applications.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical strength, PLA, Experimental tests.

LISTA DE FIGURAS

- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO FDM	25
- PROPRIEDADE DOS MATERIAIS NA IMPRESSÃO 3D.....	28
- PREENCHIMENTO DE ESTRUTURAS FABRICADAS POR FDM.....	29
- PADRÕES DE PREENCHIMENTO.....	31
- GRÁFICO DE TENSÃO (MPa) X DEFORMAÇÃO (%) PARA DIFERENTES MATERIAIS	33
- DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	35
- MODELO DE ANÁLISE FEA	37
- ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO.....	38
- CORPOS DE PROVA APÓS OS TESTES	42
- IMPRESSORA CREALITY ENDER 3 V2	43
- ADAPTAÇÃO FICHA TÉCNICA CREALITY ENDER 3 V2.....	43
- MÁQUINA SERVO-HIDRÁULICA DE ENSAIOS 600kN - SHIMADZU UHF- 600.....	44
- GRÁFICO 1: AMOSTRA 1 - LIGHTNING.....	46
- GRÁFICO 2: AMOSTRA 2 - LIGHTNING.....	46
- GRÁFICO 3: AMOSTRA 3 - LIGHTNING.....	47
- GRÁFICO 4: AMOSTRA 1 – CROSS 3D.....	48
- GRÁFICO 5: AMOSTRA 2 - CROSS 3D.....	48
- GRÁFICO 6: AMOSTRA 3 - CROSS 3D.....	49
- GRÁFICO 7: AMOSTRA 1 - CUBIC SUBDIVISION	50
- GRÁFICO 8: AMOSTRA 2 - CUBIC SUBDIVISION	50
- GRÁFICO 9: AMOSTRA 3 - CUBIC SUBDIVISION	51
- GRÁFICO 10: AMOSTRA 1 - GYROID	52
- GRÁFICO 11: AMOSTRA 2 - GYROID.....	52
- GRÁFICO 12: AMOSTRA 3 - GYROID.....	53
- GRÁFICO 13: AMOSTRA 1 - CONCENTRIC	54
- GRÁFICO 14: AMOSTRA 2 - CONCENTRIC	54
- GRÁFICO 15: AMOSTRA 3 - CONCENTRIC	55
- GRÁFICO 16: MÉDIA DE ORÇA MÁXIMA POR TIPO DE PREENCHIMENTO	57
- GRÁFICO 17: MÉDIA DE TEMPO ATÉ A FALHA POR TIPO DE PREENCHIMENTO.....	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA DETERMINAR QUAIS AMOSTRAS SERIAM UTILIZADAS	41
TABELA 2 - DADOS DOS TESTES DO PREENCHIMENTO LIGHTNING	47
TABELA 3 - DADOS DOS TESTES DO PREENCHIMENTO CROSS 3D.....	49
TABELA 4 - DADOS DOS TESTES DO PREENCHIMENTO CUBIC SUBDIVISION	51
TABELA 5 - DADOS DOS TESTES DO PREENCHIMENTO GYROID.....	53
TABELA 6 - DADOS DOS TESTES DO PREENCHIMENTO CONCENTRIC	55
TABELA 7 – DADOS DA MÉDIA DE FORÇA DOS TESTES	57
TABELA 8 - DADOS DA MÉDIA DE TEMPO ATÉ A FALHA DOS TESTES.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PLA	Ácido Polilático
MA	Manufatura aditiva
FDM	Fused Deposition Modeling
CAD	Computer-Aided Design
FEA	Finite Element Analysis
IA	Inteligência Artificial
ML	Aprendizado de máquina

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
SUMÁRIO	17
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Objetivos Gerais	20
1.2. Objetivos específicos.....	20
1.3. Estruturação textual.....	20
1.4. Justificativa do trabalho.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Manufatura Aditiva (MA) e FDM	22
2.2. Propriedades Mecânicas dos Polímeros na Impressão 3D	24
2.3. Parâmetros de Preenchimento e sua Influência na Resistência Mecânica....	28
2.4. Elementos Roscados em PLA Fabricados por FDM	31
2.5. Ensaio de resistência à tração	33
2.6. Estudos Experimentais sobre Resistência à Tração de Peças em PLA.....	34
2.7. Avanços e Tendências no Uso de Parâmetros Otimizados para Resistência Mecânica	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1. Corpos de prova	42
3.2. Equipamentos.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5. CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, tem se destacado como uma das tecnologias mais inovadoras e acessíveis para a fabricação de componentes em diversas indústrias, como automotiva, biomédica e aeroespacial. Essa tecnologia permite a criação de geometrias complexas, redução de custos de produção e personalização de peças com rapidez e precisão, o que seria difícil ou economicamente inviável por métodos tradicionais. Entre os materiais mais utilizados nesse processo, o ácido polilático (PLA) se destaca por ser um polímero biodegradável, de baixo custo e fácil de processar, tornando-se uma escolha popular tanto para usuários domésticos quanto industriais.

No entanto, a resistência mecânica dos componentes impressos em PLA pode variar significativamente dependendo de vários fatores. Entre eles, destaca-se o tipo de preenchimento utilizado no interior das peças durante o processo de impressão, um fator crucial que pode influenciar diretamente a capacidade de carga, durabilidade e desempenho dos elementos fabricados. Elementos roscados, por exemplo, são amplamente empregados em montagens mecânicas devido à sua função de fixação e união de peças. Analisar a resistência desses elementos quando impressos em PLA, considerando diferentes tipos de preenchimento, é fundamental para garantir a integridade estrutural e a segurança de projetos que utilizem a impressão 3D.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar a resistência mecânica de elementos roscados fabricados em PLA por meio da impressão 3D, levando em consideração diferentes padrões de preenchimento utilizados no processo. Para tal, serão realizados testes experimentais com variações nos parâmetros de impressão, como densidade e geometria de preenchimento, a fim de avaliar o impacto desses fatores sobre a capacidade de suportar cargas mecânicas. Além disso, será investigada a influência do tipo de preenchimento na resistência à falha e deformação dos elementos roscados, proporcionando uma melhor compreensão dos limites e possibilidades dessa tecnologia na produção de componentes funcionais.

O desenvolvimento deste estudo é relevante, pois a utilização de elementos roscados fabricados por impressão 3D está em ascensão em diversos setores. No entanto, a literatura científica ainda apresenta lacunas no que diz respeito ao comportamento mecânico específico

de tais elementos sob diferentes configurações de impressão. Portanto, os resultados obtidos poderão contribuir tanto para o avanço acadêmico quanto para a prática industrial, oferecendo diretrizes mais seguras e eficazes para a aplicação do PLA em projetos de engenharia.

1.1. Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é analisar os diferentes tipos de preenchimentos das amostras de PLA, na resistência mecânica dos elementos roscados.

1.2. Objetivos específicos

Estruturar e compreender o comportamento dos diferentes tipos de preenchimento nas amostras de PLA, por meio de testes experimentais de tração, identificando assim, as configurações que proporcionam maior resistência mecânica e eficiência estrutural nas regiões adjacentes ao elemento roscado. Isso será possível utilizando a ferramenta de ensaio de tração do laboratório, análise dos gráficos gerados e com as experiências adquiridas durante o processo de graduação além de boas práticas de engenharia.

1.3. Estruturação textual

A estrutura deste trabalho foi planejada para apresentar, de forma clara e organizada, o desenvolvimento da pesquisa desde a fundamentação teórica até a análise dos resultados experimentais. O estudo é iniciado com a Introdução, que contextualiza o tema, destacando a relevância da manufatura aditiva e da impressão 3D utilizando o PLA. Nesta seção, são apresentados os objetivos gerais e específicos, além da justificativa do estudo, evidenciando as lacunas existentes na literatura e a contribuição esperada para o avanço acadêmico e industrial.

Em seguida, a Revisão Bibliográfica aborda os fundamentos teóricos que sustentam o trabalho, dividindo-se em tópicos relacionados à manufatura aditiva e tecnologias de impressão 3D, com foco no processo FDM; às propriedades do PLA, enfatizando suas características físicas, químicas e mecânicas; à utilização de elementos roscados em projetos mecânicos, destacando os desafios na fabricação desses componentes em PLA; e à influência dos tipos e densidades de preenchimento no desempenho mecânico de peças impressas.

A seção de Metodologia detalha os métodos empregados na pesquisa. Inclui a descrição do processo de desenvolvimento dos protótipos de elementos roscados, especificando os parâmetros de impressão, como tipos e densidades de preenchimento e orientação das camadas. Também apresenta os ensaios mecânicos realizados, incluindo testes de tração bem como a instrumentação e os equipamentos utilizados para coleta e análise dos dados experimentais.

Os Resultados e Discussão são apresentados em seguida, onde os dados experimentais obtidos nos ensaios mecânicos são expostos e analisados. Essa seção inclui a comparação dos diferentes padrões de preenchimento sobre a resistência mecânica e a análise das falhas estruturais observadas nos elementos testados. A discussão aprofunda-se nos resultados, relacionando-os aos fundamentos teóricos e às aplicações práticas.

Por fim, na Conclusão, são apresentadas as principais descobertas do estudo, respondendo ao problema de pesquisa e indicando as configurações mais eficientes para a fabricação de elementos roscados em PLA por impressão 3D. Além disso, são discutidas as limitações do trabalho e sugeridas direções para pesquisas futuras, como a aplicação da metodologia a outros materiais ou condições de impressão. O trabalho é finalizado com as Referências, onde são listadas todas as fontes consultadas, incluindo artigos científicos, livros, normas técnicas e outros materiais utilizados no embasamento teórico e metodológico da pesquisa.

Esse fluxo organizacional visa garantir clareza e coesão no desenvolvimento do tema, facilitando a compreensão dos resultados e de suas implicações práticas e teóricas.

1.4. Justificativa do trabalho

A manufatura aditiva, com destaque para a impressão 3D utilizando PLA (ácido polilático), tem ganhado espaço como uma tecnologia de grande potencial em diversos setores devido à sua acessibilidade e à capacidade de produzir componentes personalizados com alta precisão. Entretanto, a resistência mecânica de peças produzidas por esse processo, especialmente elementos roscados, ainda representa um desafio técnico relevante, particularmente no que diz respeito aos diferentes tipos de preenchimento utilizados durante a impressão.

Na tese Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica de elementos de fixação por rosca fabricados através de manufatura aditiva de Thiago Menezes do Prado, 2023, foi destacada a necessidade de aprofundar os estudos sobre como os tipos de preenchimentos influenciam a resistência mecânica de componentes funcionais, como os elementos roscados, peças que desempenham um papel crucial tanto em aplicações industriais quanto domésticas. A falta de investigações aprofundadas sobre o impacto de diferentes padrões de preenchimento na resistência desses elementos reforça a importância de estudos adicionais sobre o tema.

Outro fator que evidencia a relevância deste estudo é o aumento do interesse por soluções sustentáveis e econômicas na produção de peças. O PLA, por ser um material biodegradável, se alinha com os princípios de sustentabilidade e amplia o potencial de contribuição desta pesquisa, especialmente no desenvolvimento de projetos sustentáveis e na democratização da impressão 3D para pequenos negócios e usuários finais.

Dessa forma, este trabalho busca preencher a lacuna apontada, contribuindo tanto para o avanço da literatura técnica quanto para a oferta de subsídios práticos aplicáveis a projetos nas áreas de engenharia, design e fabricação. Espera-se também que os resultados obtidos incentivem novas pesquisas voltadas à otimização dos parâmetros de impressão, ampliando as possibilidades de uso do PLA e impulsionando o desenvolvimento de tecnologias baseadas em manufatura aditiva.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva (MA) e FDM

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação que ocorre pela adição de camadas de material, criando peças complexas a partir de modelos digitais. Desde a década de 1980, a MA tem revolucionado setores industriais ao permitir a produção rápida e customizada, sendo especialmente útil na prototipagem e na fabricação de peças sob demanda. Essa tecnologia é utilizada por empresas para a reposição e produção de peças de alta complexidade, reduzindo custos e tempo de produção (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

Entre as tecnologias de MA, o Fused Deposition Modeling (FDM) é uma das mais difundidas, devido à sua simplicidade e baixo custo. O FDM utiliza filamentos termoplásticos,

como PLA e ABS, que são extrudidos por uma cabeça de impressão sobre uma plataforma de construção. Cada camada do material se solidifica ao esfriar, permitindo a deposição subsequente até que a peça esteja completa (Chacón et al., 2017).

A principal vantagem do processo FDM é a sua acessibilidade. Impressoras 3D FDM são amplamente comercializadas, com modelos de baixo custo disponíveis para uso doméstico, educacional e industrial. Essa democratização do acesso à impressão 3D impulsionou o surgimento de uma comunidade global de usuários que compartilham modelos digitais e desenvolvem inovações na personalização de peças e componentes (Guo & Leu, 2013). Além disso, o FDM permite a fabricação de geometrias complexas e peças personalizadas com alta precisão, que seriam difíceis ou caras de produzir com técnicas convencionais, como usinagem ou moldagem por injeção (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014).

Outro aspecto relevante do FDM é a ampla gama de materiais que podem ser utilizados. Os filamentos termoplásticos mais comuns são o PLA (ácido polilático) e o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), cada um com suas propriedades mecânicas e térmicas particulares. O PLA é um material biodegradável, amplamente utilizado devido à sua facilidade de impressão, menor retração e custo acessível. Por outro lado, o ABS possui maior resistência térmica e impacto, sendo preferido para aplicações que requerem maior durabilidade e resistência ao calor (González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodríguez-Hernández, 2019). Além disso, novos filamentos compostos com fibras de carbono, madeira e metais têm surgido, ampliando as possibilidades de aplicação do FDM (Ferreira et al., 2017).

A qualidade das peças impressas por FDM está diretamente relacionada aos parâmetros de impressão, como orientação das camadas, altura da camada, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e tipo de preenchimento. A orientação das camadas, por exemplo, é um fator crucial para a resistência mecânica, uma vez que a anisotropia das peças impressas faz com que as tensões se concentrem entre as camadas. Estudos mostram que peças impressas com orientação de camadas paralelas à direção de carga apresentam maior resistência, enquanto orientações perpendiculares reduzem a capacidade de suportar cargas (Ahn et al., 2002).

Outro parâmetro crítico é o tipo e a densidade de preenchimento, que afetam diretamente o desempenho mecânico e o peso da peça. Preenchimentos como hexagonal,

gyroid, reticulado e triangular oferecem diferentes níveis de resistência, rigidez e consumo de material. Estudos mostram que preenchimentos do tipo gyroid e subdivisão cúbica têm desempenho superior em resistência à compressão e tração, enquanto preenchimentos lightning e concentric são mais leves e adequados para protótipos de baixa carga (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020).

A precisão dimensional também é uma preocupação importante no FDM, especialmente em aplicações que exigem alto rigor dimensional, como componentes mecânicos. Devido ao resfriamento do material e à retração térmica, as peças podem apresentar pequenas variações em suas dimensões finais. Estratégias para mitigar esse problema incluem o ajuste da temperatura de extrusão e o uso de materiais com menor retração, como o PLA (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014).

Por fim, a sustentabilidade da manufatura aditiva é frequentemente destacada na literatura. O uso de materiais biodegradáveis, como o PLA, aliado à produção sob demanda, evita desperdícios e reduz o consumo de recursos naturais. Diferentemente dos métodos de fabricação subtrativa, como a usinagem, que gera uma grande quantidade de resíduos, o FDM utiliza apenas a quantidade necessária de material para criar a peça, tornando o processo mais sustentável e eficiente do ponto de vista ambiental (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

Portanto, o FDM se apresenta como uma tecnologia de manufatura aditiva acessível, versátil e sustentável, com capacidade de produzir componentes funcionais e protótipos com eficiência e precisão. Seu potencial de personalização e a flexibilidade na escolha de materiais permitem a sua aplicação em uma ampla gama de indústrias, incluindo as áreas automotiva, biomédica, eletrônica e de bens de consumo. No entanto, ainda existem desafios associados à anisotropia das peças e à precisão dimensional, que exigem ajustes no processo de impressão e novos desenvolvimentos nos materiais utilizados (Guo & Leu, 2013; Ferreira et al., 2017).

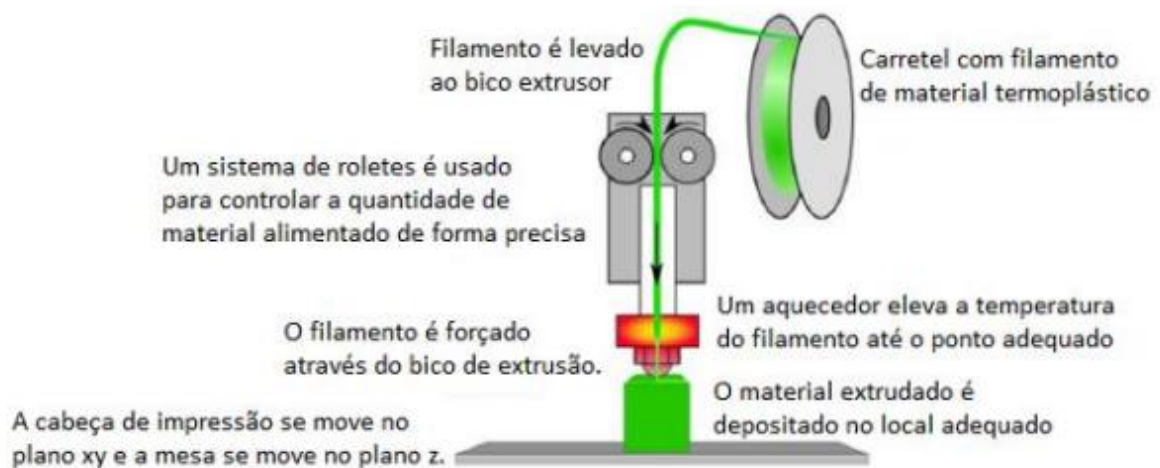
2.2. Propriedades Mecânicas dos Polímeros na Impressão 3D

Os materiais poliméricos utilizados na impressão 3D, como o PLA, possuem características específicas que influenciam diretamente na resistência mecânica das peças. O PLA (ácido polilático) é um biopolímero biodegradável com características de rigidez e baixa flexibilidade. Embora seja mais frágil que outros materiais, como o ABS, o PLA é amplamente

utilizado na impressão 3D devido à sua facilidade de uso, boa resolução e adesão eficiente entre as camadas (González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodríguez-Hernández, 2019). Sua baixa temperatura de fusão (cerca de 180-220°C) facilita a impressão e reduz a necessidade de câmaras aquecidas, além de minimizar a contração térmica e os efeitos de deformação (warping) comuns no ABS (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014).

As propriedades mecânicas dos polímeros impressos por FDM (Fused Deposition Modeling) variam significativamente com base nos parâmetros de impressão, como a orientação das camadas, a temperatura de extrusão, a velocidade de impressão e o tipo de preenchimento. Esses fatores afetam diretamente a adesão entre as camadas, que é o ponto de maior vulnerabilidade das peças impressas, uma vez que a anisotropia resultante do processo de fabricação faz com que a resistência na direção perpendicular às camadas seja menor do que na direção paralela (Ahn et al., 2002). De forma geral, peças impressas com orientação de camadas paralelas à direção de carga apresentam maior resistência mecânica à tração e à compressão, enquanto a orientação perpendicular apresenta maior tendência à delaminação (Chacón et al., 2017).

Figura 1 - Diagrama esquemático do processo FDM



Fonte: OLIVEIRA (2018)

Outro fator crucial para as propriedades mecânicas é a densidade e o tipo de preenchimento. O preenchimento interno da peça não apenas afeta a resistência, mas também influencia o peso e o tempo de fabricação. Preenchimentos mais densos e com padrões geométricos mais resistentes, como gyroid e cubic subdivision, garantem maior

rigidez e suporte a cargas mais elevadas. Em contrapartida, preenchimentos leves, como lightning e concentric, são mais adequados para protótipos onde a resistência não é o principal requisito (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020). O ajuste da densidade de preenchimento permite um equilíbrio entre a resistência mecânica e a economia de material, possibilitando uma personalização de acordo com a aplicação desejada (Ferreira et al., 2017).

Outro aspecto relevante das propriedades mecânicas dos polímeros na impressão 3D é a temperatura de extrusão. Para o PLA, temperaturas que variam entre 180°C e 220°C são as mais comuns. Temperaturas mais baixas podem gerar má adesão entre as camadas, enquanto temperaturas muito altas podem causar degradação térmica do material, resultando em uma superfície áspera e na perda de algumas propriedades mecânicas (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014). O controle adequado da temperatura de extrusão é fundamental para garantir uma boa ligação entre as camadas e reduzir a porosidade, que também influencia a resistência mecânica.

Além disso, a velocidade de impressão impacta a resistência final das peças. Velocidades muito altas podem reduzir o tempo de deposição e a fusão adequada entre as camadas, levando a falhas de adesão. Por outro lado, velocidades muito lentas aumentam o tempo de fabricação e podem gerar superaquecimento de algumas regiões da peça, provocando deformações indesejadas (Chacón et al., 2017). Assim, o ajuste da velocidade de impressão precisa considerar o tipo de material, o padrão de preenchimento e a geometria da peça.

As propriedades de resistência à tração, compressão e flexão também são amplamente estudadas para avaliar a aplicabilidade dos polímeros impressos. No caso do PLA, a resistência à tração é menor na direção perpendicular às camadas devido à menor coesão entre as mesmas. Por outro lado, a orientação das camadas paralelas à força de tração apresenta melhor desempenho, pois a força se distribui uniformemente pelas linhas de extrusão (Ahn et al., 2002). Estudos realizados por Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) mostraram que a resistência à tração de peças impressas em PLA pode variar de 28 MPa a 56 MPa, dependendo da orientação de impressão e do tipo de preenchimento adotado.

A resistência à compressão também é sensível à densidade de preenchimento e ao tipo de geometria interna. Estudos demonstram que preenchimentos de padrão contínuo, como

o gyroid, têm maior capacidade de suportar compressão, pois distribuem uniformemente as tensões internas. Por outro lado, padrões mais simples, como o triangular ou o lightning, tendem a concentrar tensões em pontos específicos, resultando em falhas mais rápidas e deformações localizadas (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020).

Outro ponto relevante a se considerar é a fadiga e o impacto. O comportamento dos polímeros impressos em FDM sob carregamento cíclico é diferente dos materiais fabricados de forma convencional. Devido à anisotropia, a resistência à fadiga depende diretamente da orientação das camadas e do padrão de preenchimento. Materiais impressos com camadas orientadas perpendicularmente à direção de carga geralmente falham mais rapidamente do que aqueles com camadas alinhadas na mesma direção da força (Ahn et al., 2002). Estudos sobre impacto mostram que o PLA possui menor resistência ao impacto em comparação com o ABS, mas isso pode ser compensado com a adição de fibras curtas de carbono ou partículas de reforço no material, conforme descrito por Ferreira et al. (2017).

Diante de todos esses fatores, fica evidente que as propriedades mecânicas dos polímeros na impressão 3D são altamente influenciadas pelos parâmetros de impressão, pela configuração de preenchimento e pelas características intrínsecas do material. Para obter peças com melhor desempenho mecânico, é necessário otimizar variáveis como orientação de camadas, densidade de preenchimento, temperatura de extrusão e velocidade de impressão. Isso permite obter peças personalizadas e com propriedades adequadas para cada tipo de aplicação. Em aplicações de engenharia, onde a resistência mecânica é um fator crítico, o uso de padrões de preenchimento contínuos, orientações de camada alinhadas com a força e densidades de preenchimento mais altas são práticas recomendadas para aumentar a durabilidade e a capacidade de carga dos componentes.

Figura 2 - Propriedade dos materiais na impressão 3D

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

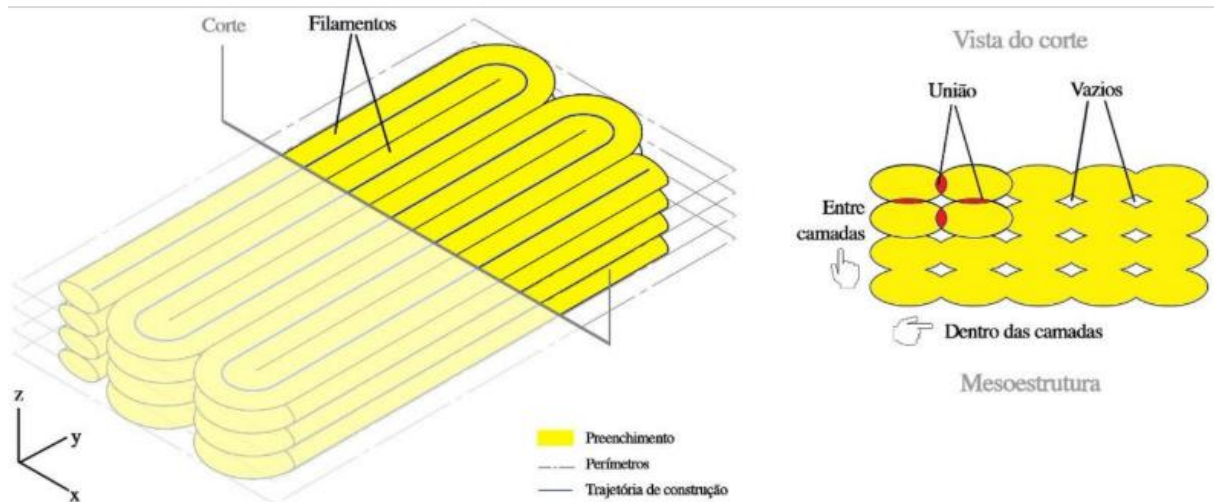
Fonte: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>

2.3. Parâmetros de Preenchimento e sua Influência na Resistência Mecânica

O preenchimento das peças impressas em 3D desempenha um papel crucial na resistência mecânica, especialmente em peças submetidas a cargas estruturais. A porcentagem de preenchimento e o padrão de preenchimento (por exemplo, hexagonal, triangular ou reticular) afetam a distribuição de carga dentro da peça e, portanto, sua capacidade de suportar tensões sem falhar (Tanveer et al., 2022). Preenchimentos mais densos e padrões geométricos específicos, como o preenchimento hexagonal e o gyroid, proporcionam uma distribuição de carga mais uniforme e aumentam a resistência à tração e compressão (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020).

A densidade de preenchimento é normalmente expressa em porcentagem, variando de 0% (vazio) a 100% (sólido). Uma densidade de 100% é equivalente a uma peça maciça, enquanto densidades mais baixas criam espaços vazios no interior da peça, tornando-a mais leve, mas também menos resistente. De acordo com Ferreira et al. (2017), peças com densidades de preenchimento acima de 70% apresentam um aumento significativo na resistência à compressão, mas também resultam em maior consumo de material e maior tempo de fabricação. Assim, a escolha da densidade de preenchimento requer um equilíbrio entre resistência, peso e custo de produção.

Figura 3 - Preenchimento de estruturas fabricadas por FDM



Fonte: Santana (2018)

Os padrões de preenchimento, por sua vez, determinam a forma geométrica do interior da peça. Os padrões mais comuns utilizados no FDM incluem hexagonal, gyroid, cúbico, triangular, lightning e concêntrico. Cada um desses padrões possui características únicas de distribuição de tensão. O padrão gyroid, por exemplo, é conhecido por oferecer uma estrutura tridimensional contínua que distribui uniformemente as tensões, proporcionando alta resistência mecânica (Chacón et al., 2017). O padrão hexagonal, por sua vez, se assemelha a uma estrutura de favo de mel, sendo eficiente em termos de resistência à compressão e leveza, enquanto o padrão cúbico apresenta uma boa combinação de rigidez e facilidade de impressão.

A relação entre a escolha do preenchimento e o desempenho mecânico é evidenciada em estudos experimentais. Stojanović et al. (2020) destacam que o padrão de preenchimento influencia não só a resistência, mas também a rigidez e a absorção de impacto, sendo uma escolha determinante em aplicações que requerem alta durabilidade. Para aplicações que exigem alta resistência ao impacto, preenchimentos do tipo gyroid e cúbico são preferidos, enquanto o padrão lightning é mais adequado para protótipos e peças de uso temporário, onde o baixo consumo de material é a prioridade.

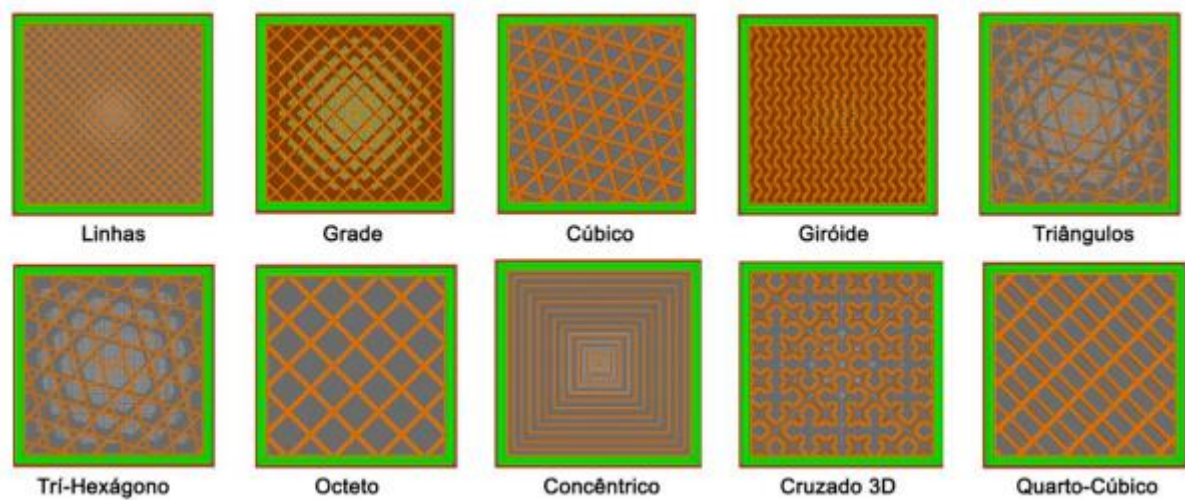
Outro fator importante na escolha do preenchimento é o tempo de produção e o consumo de material. Padrões mais densos, como 100% de preenchimento cúbico, consomem muito material e aumentam o tempo de impressão, enquanto padrões menos densos, como

lightning e concêntrico, reduzem significativamente o consumo de material e o tempo de impressão, mas com menor resistência. Isso faz com que a escolha do padrão e da densidade de preenchimento seja uma decisão estratégica no design para impressão 3D (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Para peças que requerem resistência média, uma densidade de preenchimento entre 20% e 50% com padrões do tipo triangular ou hexagonal costuma ser suficiente.

Com base nos princípios de projeto mecânico apresentados por Shigley (2008) e Juvinall e Marshek (2012), a análise estrutural de componentes sujeitos a carregamentos mecânicos deve considerar aspectos como distribuição de tensões, deformações plásticas e aplicação adequada de fatores de segurança. Em estruturas impressas em 3D, preenchimentos internos com geometria complexa, como gyroid e cubic subdivision, favorecem uma melhor distribuição das tensões ao longo do corpo da peça, reduzindo concentrações localizadas e prolongando a vida útil do componente. Essa característica está em conformidade com os conceitos de tensão admissível e distribuição uniforme de carga, essenciais para o desempenho de elementos mecânicos. Por outro lado, preenchimentos como o lightning, devido à sua natureza descontínua e menor densidade, tendem a atingir rapidamente o regime de deformação plástica, o que os torna menos indicados para aplicações onde se exige resistência estrutural. Dessa forma, a utilização de preenchimentos mais robustos permite a aplicação de fatores de segurança menores, otimizando o uso de material e aumentando a eficiência do projeto, como preconizado nos critérios clássicos de dimensionamento de componentes mecânicos.

Outro aspecto fundamental é a capacidade do preenchimento de resistir à fadiga e à deformação sob cargas cíclicas. De acordo com Ahn et al. (2002), os padrões de preenchimento contínuos, como o gyroid, possuem maior resistência à fadiga devido à sua estrutura tridimensional contínua, enquanto os padrões reticulares e hexagonais apresentam regiões de concentração de tensão, tornando-se mais suscetíveis à fadiga. Isso é especialmente relevante em peças sujeitas a cargas cíclicas, como dobradiças, engrenagens e molas.

Figura 4 - Padrões de preenchimento



Fonte: Campos (2022)

2.4. Elementos Roscados em PLA Fabricados por FDM

Elementos roscados, como parafusos, porcas e buchas, fabricados por impressão 3D via FDM (Fused Deposition Modeling) apresentam desafios únicos em termos de resistência mecânica, aderência entre as camadas e durabilidade. A fabricação de roscas por FDM exige atenção especial ao design geométrico, à orientação de impressão e aos parâmetros de preenchimento. Isso ocorre porque a adesão entre camadas é uma das maiores limitações no FDM, influenciando diretamente a resistência ao cisalhamento e à tração nas roscas (Ahn et al., 2002).

De acordo com Harshitha e Srinivasa (2019), a resistência dos elementos roscados depende do preenchimento interno e do número de paredes externas. Um aumento na densidade de preenchimento (por exemplo, de 20% para 50%) reduz a presença de vazios internos, proporcionando uma estrutura mais densa e resistente. Da mesma forma, o aumento do número de paredes externas cria uma camada adicional de suporte para as roscas, o que aumenta a capacidade de resistência ao torque e reduz o risco de falha por cisalhamento. Isso é particularmente importante em parafusos e porcas, onde a carga aplicada é frequentemente uma combinação de forças de compressão, tração e torque.

A orientação de impressão também tem um impacto significativo na resistência dos elementos roscados. Quando as roscas são impressas na posição vertical (rosca alinhada com o eixo Z), as linhas de extrusão não acompanham o perfil helicoidal, o que aumenta a

probabilidade de falhas por delaminação. Por outro lado, imprimir as roscas horizontalmente (eixo de rosca paralelo ao plano XY) permite que as linhas de extrusão acompanhem melhor o contorno helicoidal, resultando em maior resistência mecânica (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014). Entretanto, essa orientação pode aumentar o tempo de impressão e o uso de suportes.

O PLA (ácido polilático) é amplamente utilizado para a impressão de elementos roscados devido à sua facilidade de impressão, baixo custo e boa definição de detalhes, o que é crucial para a precisão da rosca. No entanto, o PLA apresenta fragilidade e baixa resistência ao impacto quando comparado a outros materiais, como o ABS e o nylon (González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodríguez-Hernández, 2019). Isso se deve à sua estrutura molecular, que oferece alta rigidez, mas baixa ductilidade. Para contornar essa limitação, alguns estudos sugerem o uso de revestimentos superficiais (com epóxi, por exemplo) ou o uso de enchimentos de fibra de carbono no PLA, o que aumenta a rigidez e a resistência à tração (Ferreira et al., 2017).

Outro fator importante é a resolução das camadas, que se refere à espessura de cada camada depositada. Para elementos roscados, uma espessura de camada menor (por exemplo, 0,1 mm) permite a criação de filetes de rosca mais precisos e suaves, melhorando o acoplamento entre parafuso e porca. Quando se utiliza camadas maiores (como 0,3 mm), as bordas dos filetes se tornam mais ásperas, resultando em maior atrito e possível falha prematura por desgaste (Chacón et al., 2017).

Para melhorar a resistência dos elementos roscados fabricados por FDM, algumas práticas recomendadas com base na literatura incluem:

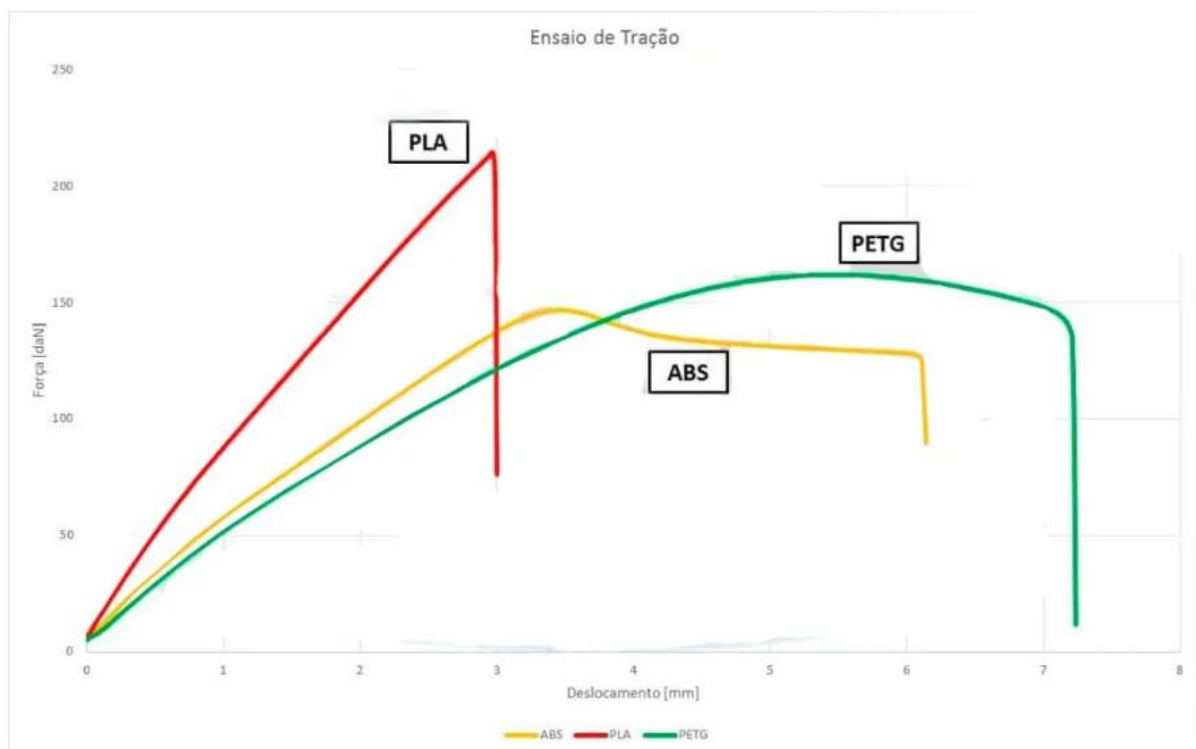
- Aumentar o número de paredes externas: O uso de 3 ou mais paredes aumenta a espessura da borda das roscas, melhorando a resistência ao torque.
- Aumentar a densidade de preenchimento interno: Densidades de preenchimento de 50% a 100% proporcionam maior resistência estrutural e reduzem a delaminação.
- Utilizar orientação horizontal de impressão: Imprimir as roscas no plano XY (horizontal) garante que as linhas de extrusão acompanhem o perfil da rosca, resultando em uma resistência superior.

- Reduzir a espessura de camada: Camadas de 0,1 mm permitem uma maior precisão na fabricação dos filetes da rosca, proporcionando melhor ajuste e menor folga entre parafuso e porca.
- Utilizar filamentos reforçados com fibras: O uso de filamentos PLA reforçados com fibras de carbono melhora a resistência à tração e ao torque.

2.5. Ensaio de resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração são fundamentais para avaliar o comportamento mecânico de materiais, especialmente no caso de peças fabricadas por impressão 3D. Este tipo de teste permite determinar a tensão máxima que um material pode suportar antes de falhar, além de informações importantes como o alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade. Para peças fabricadas em PLA pelo processo de FDM (Fused Deposition Modeling), o ensaio de tração é ainda mais relevante, pois permite identificar as limitações e a anisotropia resultantes do processo de fabricação por camadas (Ahn et al., 2002).

Figura 5 - Gráfico de tensão (MPa) x deformação (%) para diferentes materiais



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

De acordo com Chacón et al. (2017), a orientação das camadas de impressão desempenha um papel essencial na resistência à tração. Peças impressas com camadas

paralelas à direção de carga apresentam maior resistência, enquanto peças impressas com camadas perpendiculares têm menor capacidade de suportar esforços de tração. Isso ocorre devido à natureza anisotrópica das peças impressas em FDM, onde as forças de adesão entre camadas são inferiores às forças de coesão dentro de uma camada. Assim, os testes de tração são cruciais para avaliar a resistência real dos componentes e prever falhas que podem ocorrer em condições de uso real.

O ensaio de resistência à tração segue a norma ASTM D638, que define o formato do corpo de prova, a velocidade de aplicação de carga e a forma de registrar os resultados. O corpo de prova geralmente tem uma forma de “dog bone” (osso de cachorro), projetado para concentrar a falha no meio da amostra. O ensaio consiste em prender o corpo de prova em uma máquina universal de ensaio, que aplica uma carga de tração de forma contínua e controlada até a ruptura da peça. Durante o teste, sensores medem a força aplicada e o alongamento do corpo de prova. Esses dados são utilizados para calcular a tensão (força por área) e o alongamento (deformação relativa) do material (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

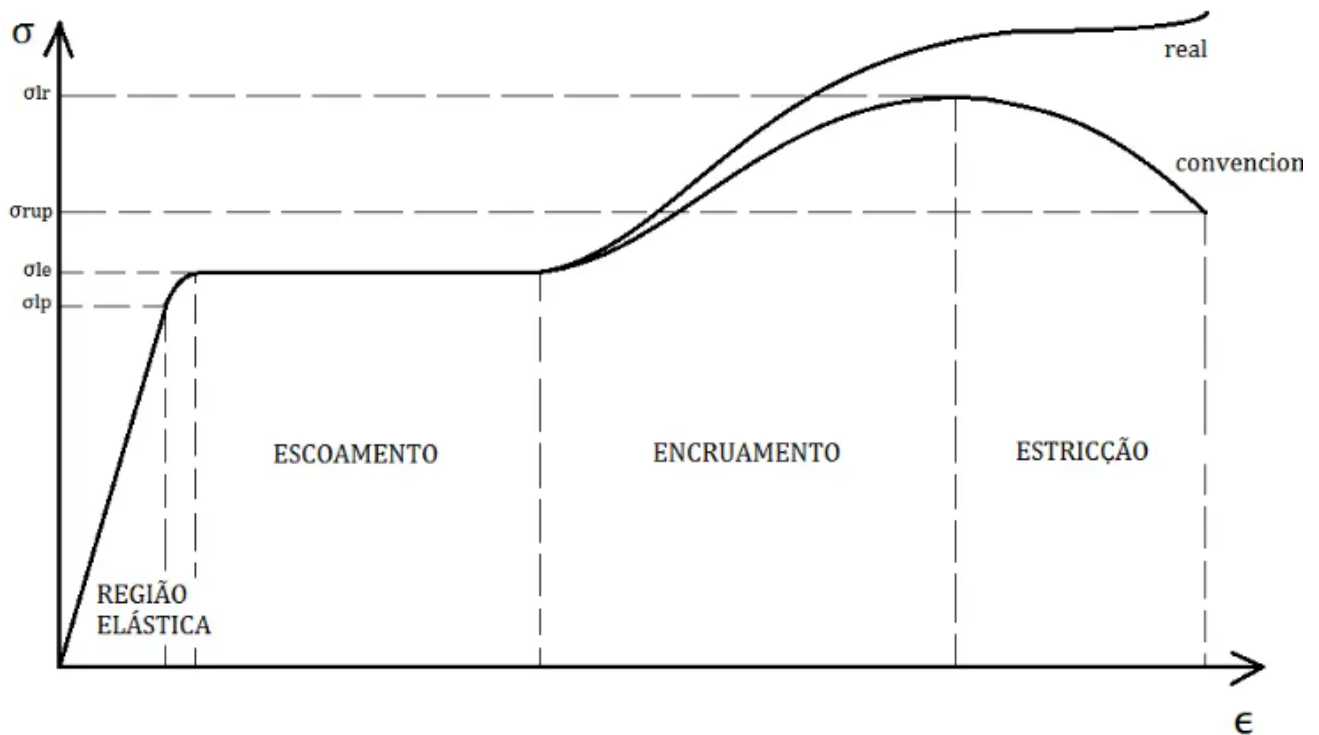
Os principais resultados obtidos nos ensaios de tração são:

- Tensão máxima (MPa): É a força máxima suportada pela peça antes da falha.
- Alongamento na ruptura (%): Mede o quanto a peça se alongou antes de se romper. No PLA, geralmente é baixo (cerca de 5%).
- Módulo de Elasticidade (MPa): Representa a rigidez do material e é calculado pela relação entre tensão e deformação na região linear da curva tensão-deformação.

2.6. Estudos Experimentais sobre Resistência à Tração de Peças em PLA

A resistência à tração de peças fabricadas em PLA (ácido polilático) pelo processo de FDM (Fused Deposition Modeling) é uma das propriedades mais investigadas na literatura. Isso ocorre devido à necessidade de avaliar a aplicabilidade das peças em ambientes de uso real, onde o material pode estar sujeito a forças de tração constantes ou cíclicas. Os resultados experimentais mostram que fatores como a altura de camada, a quantidade de paredes externas, o tipo de preenchimento e a orientação de impressão afetam de forma significativa o desempenho mecânico final das peças (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014).

Figura 6 - Diagrama tensão-deformação



Fonte: <https://precisaoeng.com/blogprecisao/ensaio-tracao/>

A altura de camada, que se refere à espessura de cada camada depositada, é um dos fatores mais críticos. Peças impressas com camadas mais finas (0,1 mm) apresentam maior coesão entre as camadas, o que resulta em uma maior resistência à tração. Isso ocorre porque a maior transferência de calor entre as camadas melhora a adesão, reduzindo as falhas de delaminação. Em contrapartida, o uso de camadas mais grossas (0,3 mm) aumenta a probabilidade de formação de lacunas entre as camadas, resultando em uma resistência mecânica inferior (Chacón et al., 2017).

Outro fator determinante é a quantidade de paredes externas, que são as bordas sólidas criadas no perímetro da peça. O aumento do número de paredes (de 2 para 4, por exemplo) proporciona um reforço significativo, pois cria uma estrutura sólida ao redor da área de preenchimento, oferecendo maior resistência ao alongamento causado pela tração. Isso se deve ao fato de que a carga de tração se distribui melhor ao longo das paredes sólidas, reduzindo o efeito de delaminação nas regiões internas (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020).

O tipo de preenchimento interno também tem uma influência significativa na resistência mecânica das peças. Preenchimentos geométricos como hexagonal, gyroid e cúbico proporcionam maior suporte estrutural e resistência mecânica, enquanto preenchimentos mais leves, como triangular e lightning, são adequados para peças onde a resistência não é o principal critério. No contexto de ensaios de tração, preenchimentos mais densos e contínuos, como o gyroid, têm mostrado desempenho superior (Ferreira et al., 2017).

A orientação de impressão é um dos aspectos mais complexos a ser controlado, pois afeta diretamente a forma como as tensões são distribuídas na peça. Quando as camadas de impressão estão alinhadas de forma paralela ao eixo de aplicação da força de tração, o material apresenta maior resistência. Isso ocorre porque a carga é distribuída de forma homogênea ao longo das linhas de extrusão. No entanto, quando a orientação das camadas é perpendicular ao eixo de aplicação da força, a resistência diminui consideravelmente devido à menor adesão entre as camadas (Prado et al., 2023).

Prado et al. (2023) investigaram o impacto do ângulo de impressão na resistência de roscas fabricadas em PLA. Eles descobriram que quando as camadas são orientadas paralelamente ao eixo de aplicação de carga, a peça apresenta maior resistência à tração, enquanto camadas perpendiculares ao eixo geram falhas prematuras por delaminação. Essa observação é particularmente relevante para o design de elementos roscados, pois a orientação incorreta das camadas pode comprometer o desempenho da peça em condições de uso real.

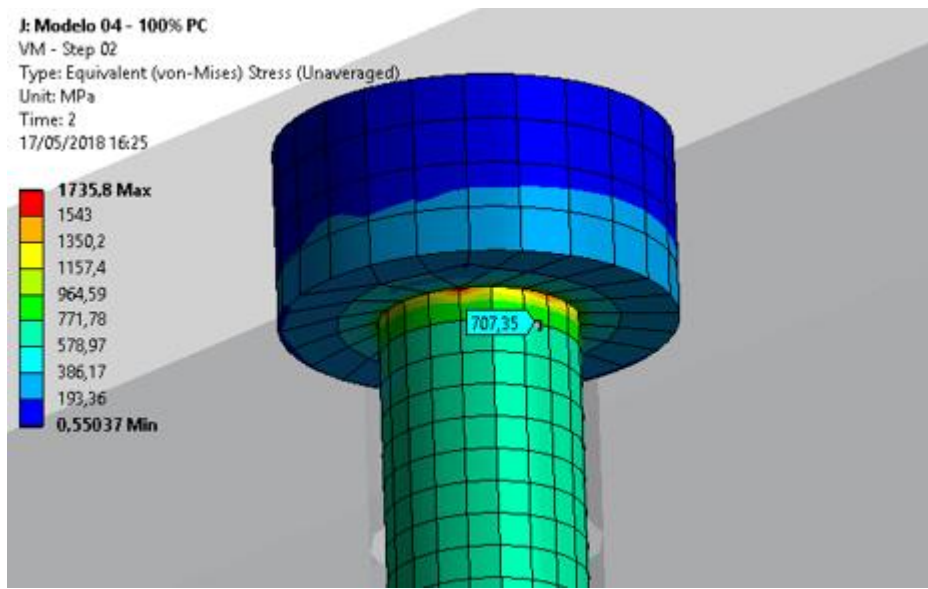
Os estudos experimentais sobre a resistência à tração de peças de PLA fabricadas por FDM mostram que a altura de camada, o número de paredes, a densidade de preenchimento e a orientação de impressão são os principais fatores que determinam o desempenho mecânico. Para peças que precisam suportar grandes esforços de tração, recomenda-se o uso de orientação paralela ao eixo de carga, aumento do número de paredes e camadas mais finas.

2.7. Avanços e Tendências no Uso de Parâmetros Otimizados para Resistência Mecânica

Os avanços no uso de parâmetros otimizados para a resistência mecânica de peças fabricadas por impressão 3D têm sido impulsionados pelo desenvolvimento de técnicas computacionais, como a modelagem CAD (Computer-Aided Design) e as simulações de análise

por elementos finitos (FEA - Finite Element Analysis). Essas tecnologias permitem prever com maior precisão o comportamento das peças sob diferentes condições de carga, facilitando a identificação de configurações de impressão mais eficientes e resistentes (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

Figura 7 - Modelo de análise FEA



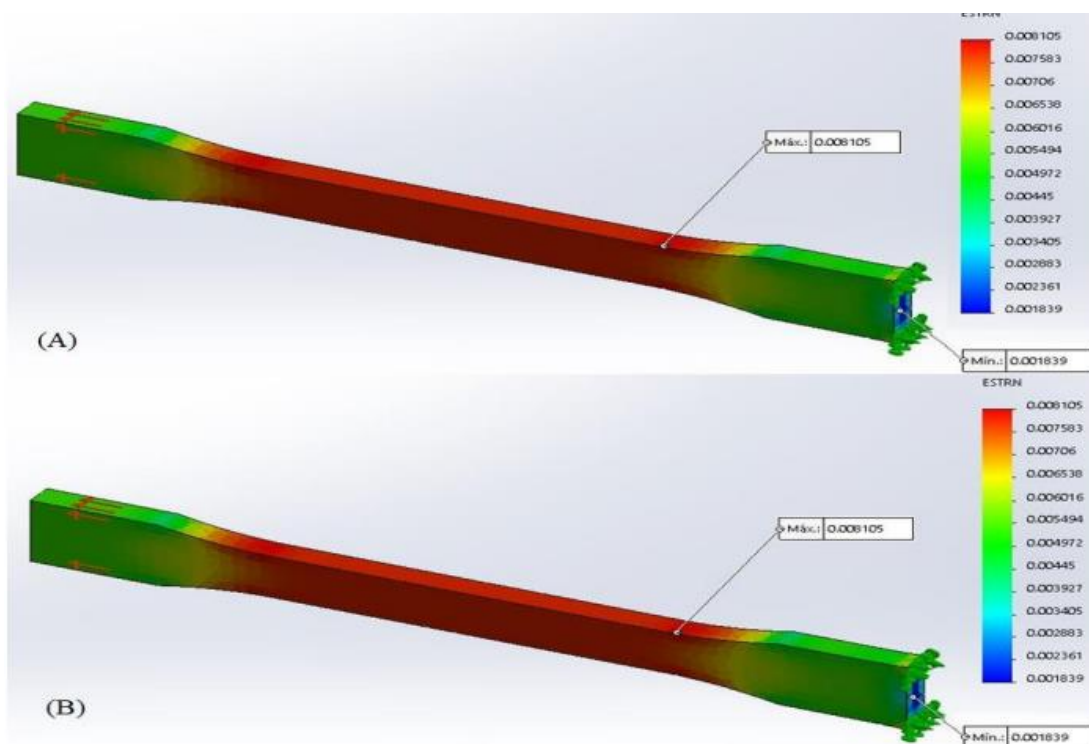
Fonte: <https://ensus.com.br/tag/fea-parafusos/>

A análise de elementos finitos (FEA) tem se destacado como uma ferramenta indispensável para prever o desempenho de peças impressas em 3D antes mesmo de serem fabricadas. Na prática, as simulações FEA permitem testar diferentes combinações de preenchimento, orientação de camada, densidade e número de paredes, sem a necessidade de produzir fisicamente as peças. De acordo com Chacón et al. (2017), a aplicação de FEA em peças de PLA fabricadas por FDM possibilitou a identificação de regiões de maior concentração de tensões, o que permitiu o ajuste da densidade de preenchimento nessas áreas para aumentar a resistência. Isso contribuiu para a redução do uso de material e do tempo de impressão, enquanto a resistência mecânica foi preservada.

Além disso, softwares de simulação computacional como ANSYS, SolidWorks Simulation e Fusion 360 oferecem recursos específicos para simulações de impressão 3D. Nesses ambientes, é possível realizar análises de carga estática e dinâmica, além de observar a deformação, tensões e modos de falha nas peças. Com essas ferramentas, os projetistas

conseguem prever o comportamento das roscas e outras peças mecânicas submetidas a torques, tensões de tração e compressão. Segundo Ferreira et al. (2017), o uso de simulações em FEA reduziu o tempo de desenvolvimento de peças mecânicas impressas em PLA em mais de 30%, além de reduzir a quantidade de material utilizado nas peças finais.

Figura 8 - Análise da deformação



Fonte: Alves (2021)

Outro avanço importante é o uso de algoritmos de otimização estrutural, que automatizam o processo de busca pelo melhor conjunto de parâmetros de impressão. Esses algoritmos baseiam-se em técnicas de otimização topológica, onde o software busca a melhor configuração geométrica para reduzir o peso e o consumo de material, sem comprometer a resistência. Ao utilizar essa abordagem, designers e engenheiros conseguem gerar geometrias não convencionais que não seriam possíveis com métodos tradicionais de fabricação (Stojanović, Ognjanović & Mladenović, 2020).

Os preenchimentos geométricos, como gyroid, hexagonal e reticular, são exemplos de geometrias otimizadas que combinam rigidez, leveza e economia de material. O preenchimento do tipo gyroid, por exemplo, possui uma estrutura tridimensional contínua, o que melhora a distribuição de tensões e evita falhas localizadas. Isso é especialmente útil em

elementos roscados, onde a força de torque pode causar cisalhamento nas bordas da rosca. As simulações de FEA, quando aplicadas a essas estruturas, permitem ajustar a densidade de preenchimento apenas nas regiões críticas, otimizando o uso do material e melhorando o desempenho geral (Chacón et al., 2017).

Além disso, os algoritmos de otimização estrutural também são capazes de realizar análises em tempo real para sugerir modificações automáticas no design das peças. Com isso, é possível obter recomendações automáticas de orientação de impressão, número de paredes externas e tipos de preenchimento, gerando soluções personalizadas para cada aplicação. Essa abordagem é especialmente útil em peças complexas, como engrenagens e peças roscadas, onde a distribuição de tensões não é uniforme.

O uso de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) na otimização de parâmetros de impressão 3D está ganhando cada vez mais destaque. Com o uso de algoritmos de aprendizado supervisionado, é possível treinar modelos que aprendem a partir de ensaios mecânicos anteriores, prevendo quais combinações de parâmetros de impressão (orientação, preenchimento, densidade) proporcionam maior resistência (González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodríguez-Hernández, 2019).

Modelos baseados em redes neurais artificiais são capazes de identificar padrões de desempenho, reduzindo a necessidade de ensaios físicos e acelerando o desenvolvimento de novos projetos. Um exemplo prático seria o treinamento de uma IA para prever a resistência de elementos roscados com base em diferentes combinações de preenchimento, orientação de camada e densidade de preenchimento. Isso permitiria a identificação de configurações mais eficientes para peças personalizadas.

Os avanços no uso de parâmetros otimizados para resistência mecânica de peças impressas em PLA têm permitido a produção de peças mais resistentes, leves e eficientes. Ferramentas de simulação por elementos finitos (FEA), algoritmos de otimização topológica e o uso de inteligência artificial são recursos que garantem a otimização do design e a redução de custos de produção. O uso de técnicas de otimização possibilita a produção de peças mais resistentes e personalizadas, utilizando menos material e com menor tempo de impressão. A inclusão de imagens, como simulações de FEA, comparações de preenchimentos e gráficos de

desempenho, facilita a compreensão e contribui para o entendimento da importância desses avanços.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a escolha dos tipos de preenchimento que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho, foi levado em consideração além do tipo de preenchimento, o tempo para confecção da amostra e quantidade de material, em gramas, que cada uma utilizava para ser produzidas. Dessa forma foram realizados testes no software de simulação de fatiamento Ultimaker Cura, para avaliar esses parâmetros e chegou a seguinte Tabela 1, apresentada abaixo:

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para determinar quais amostras seriam utilizadas

Tipo Preenchimento	Tempo	Massa (g)
Gyroid	1h56min	15
Cross	1h55min	15
Cross 3D	1h44min	14
Line	1h37min	15
Triangles	1h36min	15
Grid	1h35min	15
Octet	1h35min	15
Quarternubic	1h35min	15
Zig Zag	1h34min	15
Cubic	1h34min	15
Tri-hexagon	1h33min	15
Cubic subdivision	1h29min	14
Concentric	1h28min	15
Lightning	1h16min	11

Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, foram escolhidos os preenchimentos Gyroid e Cross 3D, devido ao maior tempo para confecção e quantidade de material utilizada, os preenchimentos Cubic subdivision e Concentric, devido ao menor tempo para confecção e a mesma quantidade de material utilizada nos dois primeiros, além do Lightning, que de todas as simulações resultou no menor tempo e na menor quantidade de material.

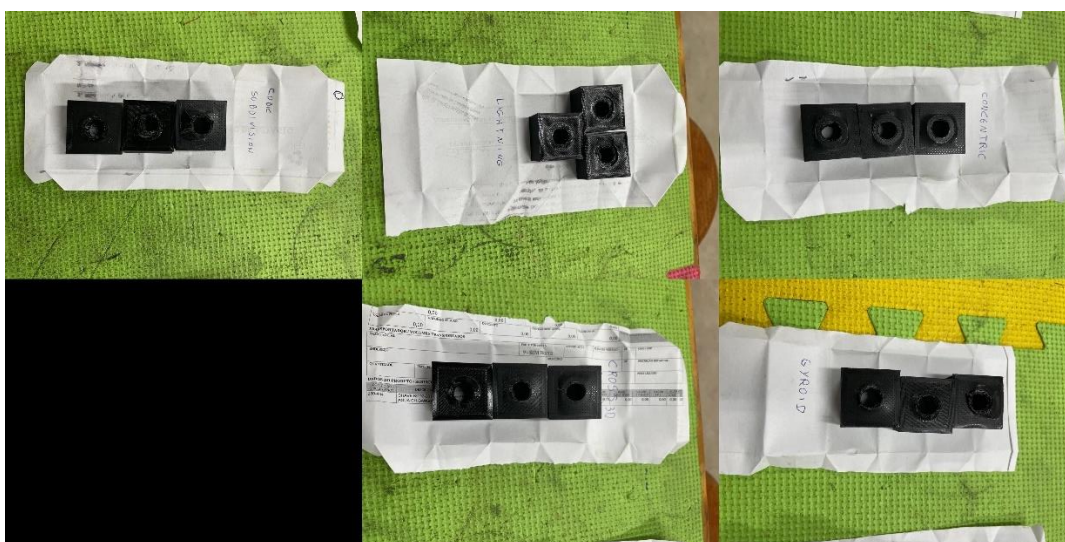
Dessa forma, podemos ter uma melhor percepção da diferença da resistência mecânica de cada um dos tipos de preenchimento durante os testes de tração, além de sempre ter uma maior confiabilidade em relação aos dados gerados, devido a conseguir um tempo menor, porém com a mesma quantidade de material depositada para realizar o preenchimento.

3.1. Corpos de prova

Foram realizados testes de tração nos corpos de prova confeccionados em PLA, sempre utilizando os mesmos parâmetros de fabricação, tais como: altura da camada, deposição do polímero, porcentagem de preenchimento e quantidade de parede, alterando assim, apenas o tipo de preenchimento, para que gere dados suficientes para analisar a diferença de resistência mecânica do elemento roscado em cada tipo de preenchimento.

Os parâmetros utilizados para a fabricação foram baseados nos resultados apresentados por Prado (2023), onde a altura da camada foi de 0,1 mm, a quantidade de paredes externas foi de seis camadas e o preenchimento adotado foi de 55%. Tais parâmetros foram escolhidos tanto para corroborar com a pesquisa realizada pelo autor quanto para permitir a comparação dos resultados obtidos nesta investigação, evidenciando possíveis melhorias e variações no desempenho mecânico a partir da alteração do tipo de preenchimento em ensaios de tração.

Figura 9 - Corpos de prova após os testes



Fonte: Próprio autor

3.2. Equipamentos

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma impressora 3D, fabricante Creality, modelo Ender 3 V2, as especificações técnicas e a impressora são apresentadas a seguir por meio das Figuras 10 e 11 a seguir:

Figura 10 - Impressora Creality Ender 3 V2



Fonte: Site oficial Creality

Figura 11 – Adaptação ficha técnica Creality Ender 3 V2

Parâmetro	Ender 3	Ender 3 V2
Tecnologia de Modelagem	FDM (Modelagem por Deposição Fundida)	FDM (Modelagem por Deposição Fundida)
Área de Impressão	220×220×250 mm	220×220×250 mm
Tamanho da Máquina	440×410×465 mm	475×470×620 mm
Peso da Embalagem	8 kg	9,6 kg
Filamentos Compatíveis	PLA / ABS / TPU	PLA / ABS / TPU / PETG
Entrada de Energia	AC 100–265V 50–60Hz	AC 115V / 230V
Saída de Energia	DC 24V 15A 360W	DC 24V 270W
Precisão	±0,1 mm	±0,1 mm
Detecção de Falta de Material	Não	Não
Gaveta de Ferramentas (Toolbox)	Não	Sim
Retomada após Queda de Energia	Não	Sim
Plataforma de Impressão	Adesivo de plataforma	Plataforma de vidro Carborundum
Tubo de Teflon	Tubo de Teflon comum	Tubo de Teflon comum
Espessura da Camada	0,1–0,4 mm	0,1–0,4 mm
Tela	Interface normal	Nova interface de usuário (UI)

Fonte: Próprio Autor

Para os testes de tração nas peças modeladas em 3D, foi utilizada a máquina universal de ensaios do fabricante Shimadzu, modelo UHF 600kNX, com capacidade máxima de 600kN, como apresentado na Figura 12 a seguir:

Figura 12 - Máquina servo-hidráulica de ensaios 600kN - Shimadzu UHF- 600



Fonte: Próprio autor

Foram realizados testes de tração em três (3) amostras de PLA de cada tipo de preenchimento, dessa forma, foram realizados um total de quinze (15) testes para verificar a diferença de resistência mecânica que cada tipo de preenchimento gera nas peças que foram confeccionadas. Para realizar a análise desses dados, foram gerados gráficos da Força (kN) exercida em função do tempo que demora para que o elemento roscado aderido ao tipo de preenchimento, chegue ao limite, levando assim ao rompimento da peça.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

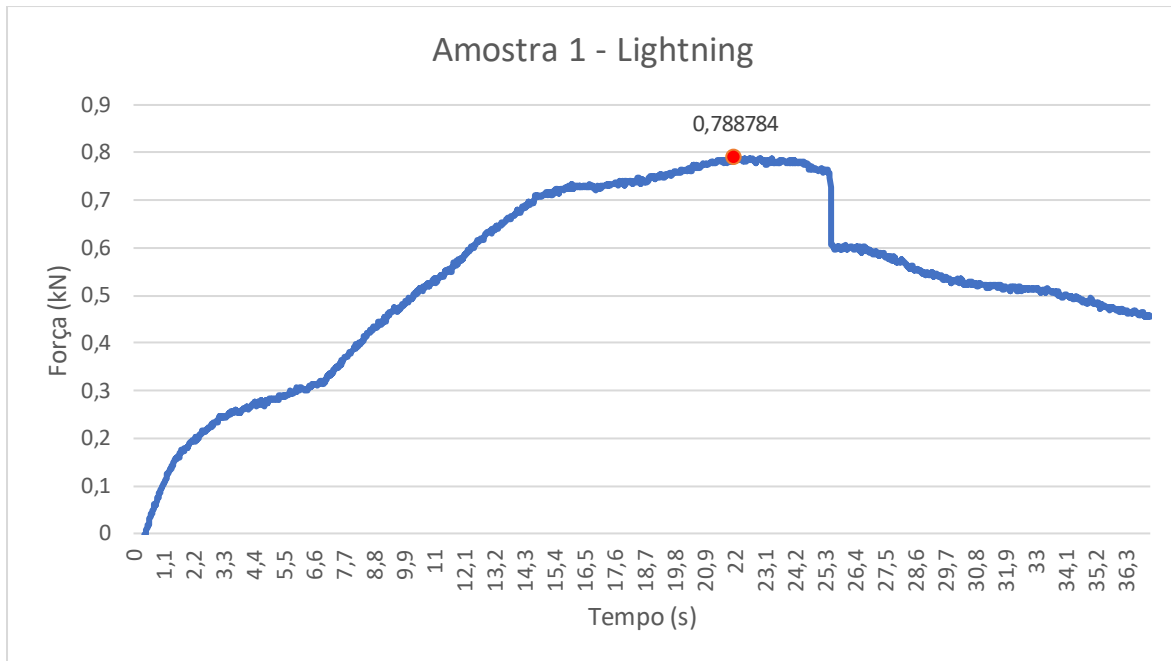
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com elementos roscados fabricados em PLA por impressão 3D, considerando diferentes padrões de preenchimento. Os dados foram organizados e analisados para identificar como esses parâmetros de impressão afetam a resistência mecânica dos componentes, avaliando o aspecto da carga suportada na região adjacente ao elemento roscado.

Os testes de tração permitiram comparar o desempenho dos elementos em diferentes configurações. O comportamento mecânico dos protótipos foi examinado com base nos padrões específicos dos tipos de preenchimento utilizados (Lightning, Gyroid, Cross 3D, Concentric e Cubic subdivision). Além disso, as observações qualitativas das falhas ocorridas durante os ensaios complementaram os resultados quantitativos, proporcionando uma visão mais abrangente sobre os fatores que influenciam a integridade estrutural dos elementos roscados.

Os resultados são apresentados de forma a facilitar a análise das influências individuais e combinadas do tipo de preenchimento, destacando quais configurações oferecem o melhor equilíbrio entre resistência mecânica e eficiência no uso do material. Essas informações contribuem para uma análise detalhada e para a formulação de diretrizes práticas que otimizem o uso do PLA em projetos que utilizam a impressão 3D como método de fabricação.

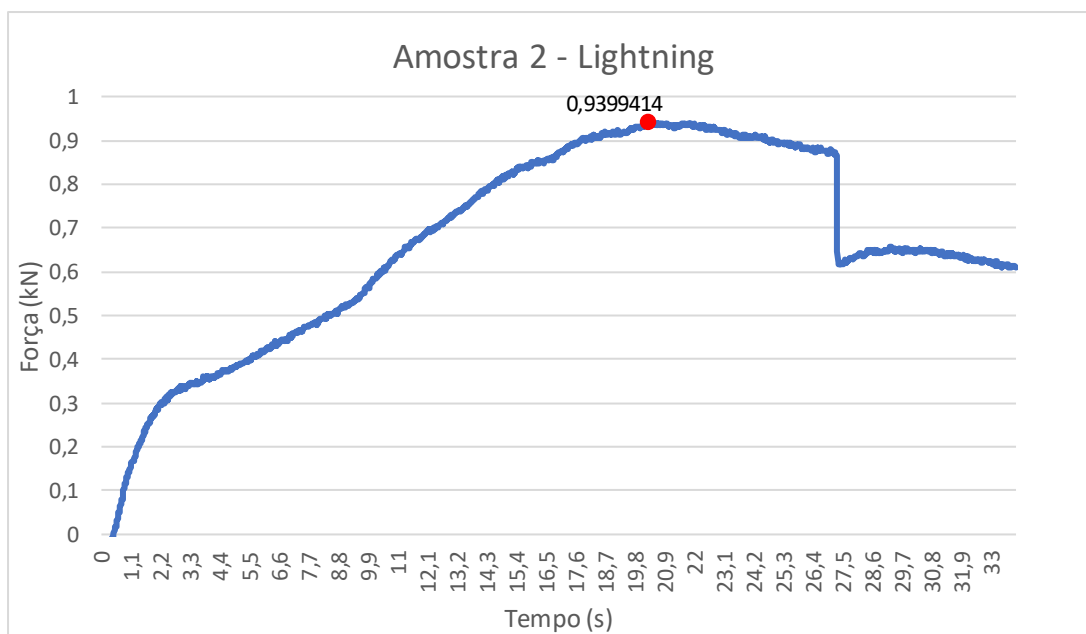
Dessa forma foram feitos ensaios em 3 amostras de cada tipo de preenchimento e os gráficos gerados a partir desses testes serão apresentados a seguir, sendo os primeiros relativos ao preenchimento do tipo lightning:

Figura 13 - Gráfico 1: Amostra 1 - Lightning



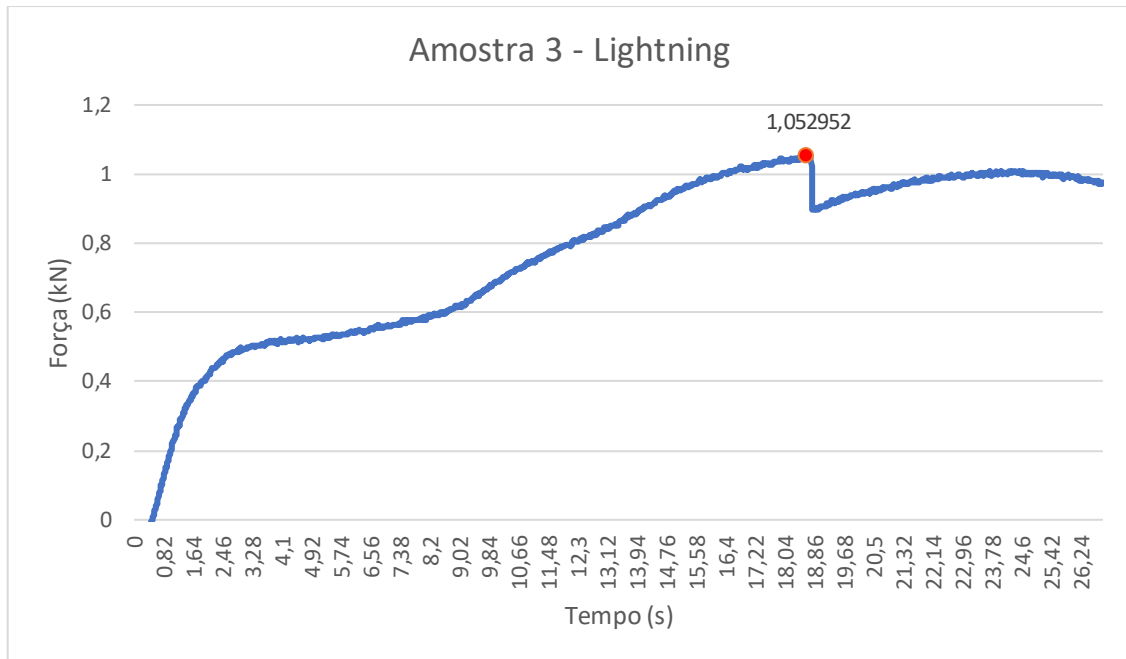
Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Gráfico 2: Amostra 2 - Lightning



Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Gráfico 3: Amostra 3 - Lightning



Fonte: Próprio autor

Observa-se como resultado dos testes das amostras, se tratando do preenchimento do tipo lightning, a força que leva as amostras a ruptura varia de 0,78 kN até 1,05 kN, com tempo de ruptura, pontos indicados em vermelho nos gráficos, entre 18,26 a 21,98 segundos, como mostra a Tabela 2, detalhando os três (3) testes abaixo:

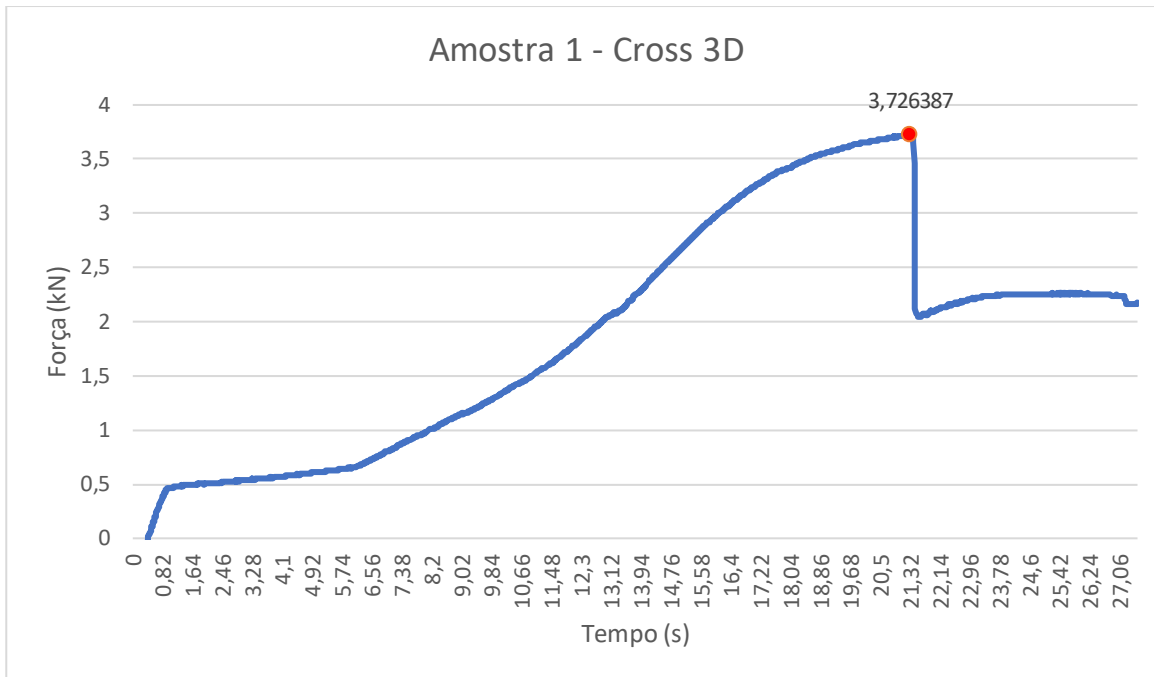
Tabela 2 - Dados dos testes do preenchimento lightning

Tipo de preenchimento	Força (kN)	Tempo (s)
Lightning 1	0,788784	21,98
Lightning 2	0,939941	20,29
Lightning 3	1,052952	18,66

Fonte: Próprio autor

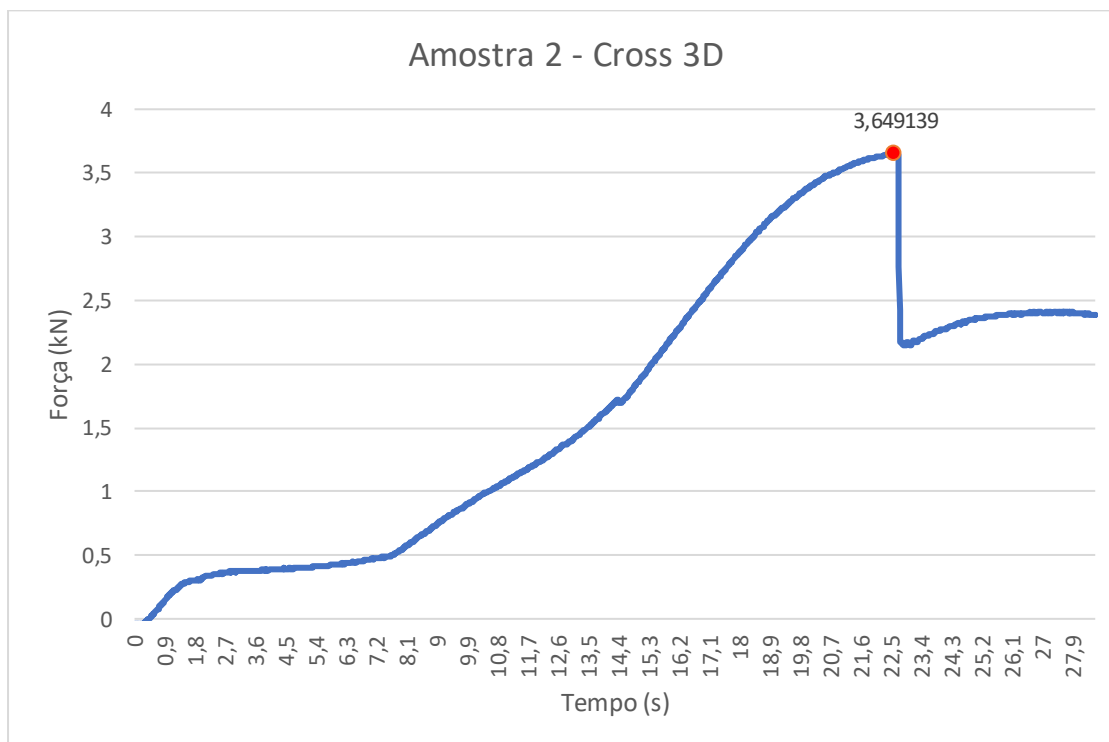
A seguir estão os gráficos, com os resultados obtidos após os testes de tração nas amostras relativas ao preenchimento do tipo Cross 3D.

Figura 16 - Gráfico 4: Amostra 1 – Cross 3D



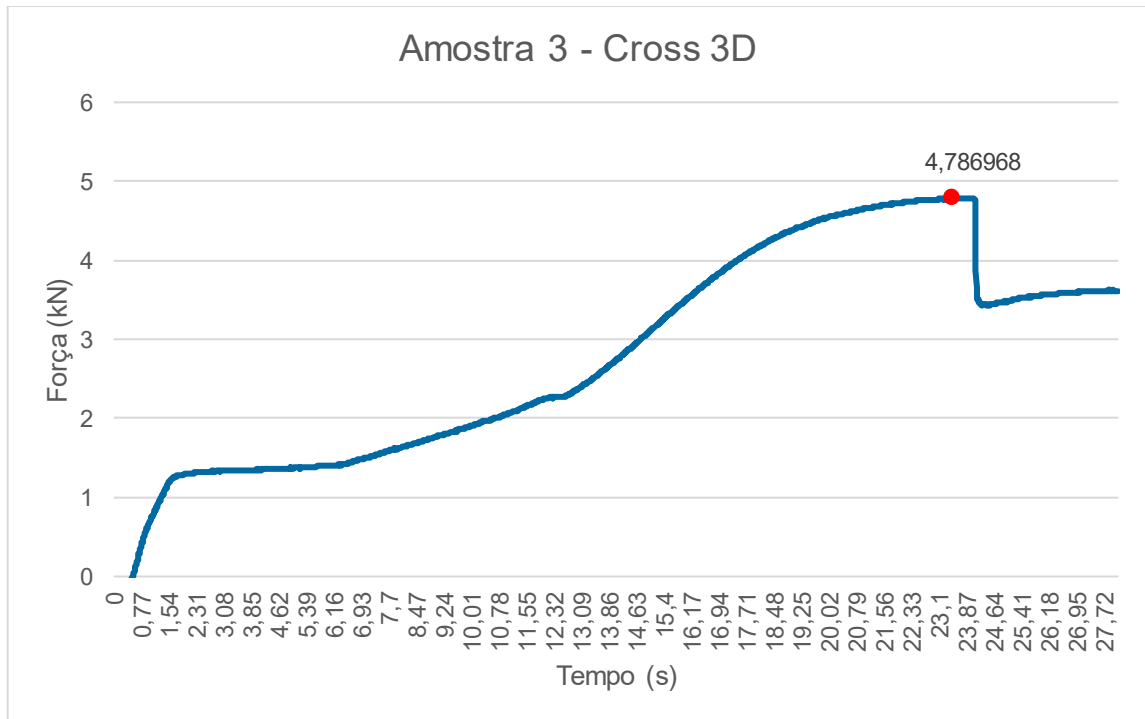
Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Gráfico 5: Amostra 2 - Cross 3D



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Gráfico 6: Amostra 3 - Cross 3D



Fonte: Próprio autor

Observa-se como resultado dos testes das amostras, se tratando do preenchimento do tipo Cross 3D, a força que leva as amostras a ruptura varia entre 3,64 kN até 4,78 kN, com tempo de ruptura, pontos indicados em vermelho nos gráficos, entre 21,31 a 23,47 segundos, como mostra a Tabela 3, detalhando os três (3) testes abaixo:

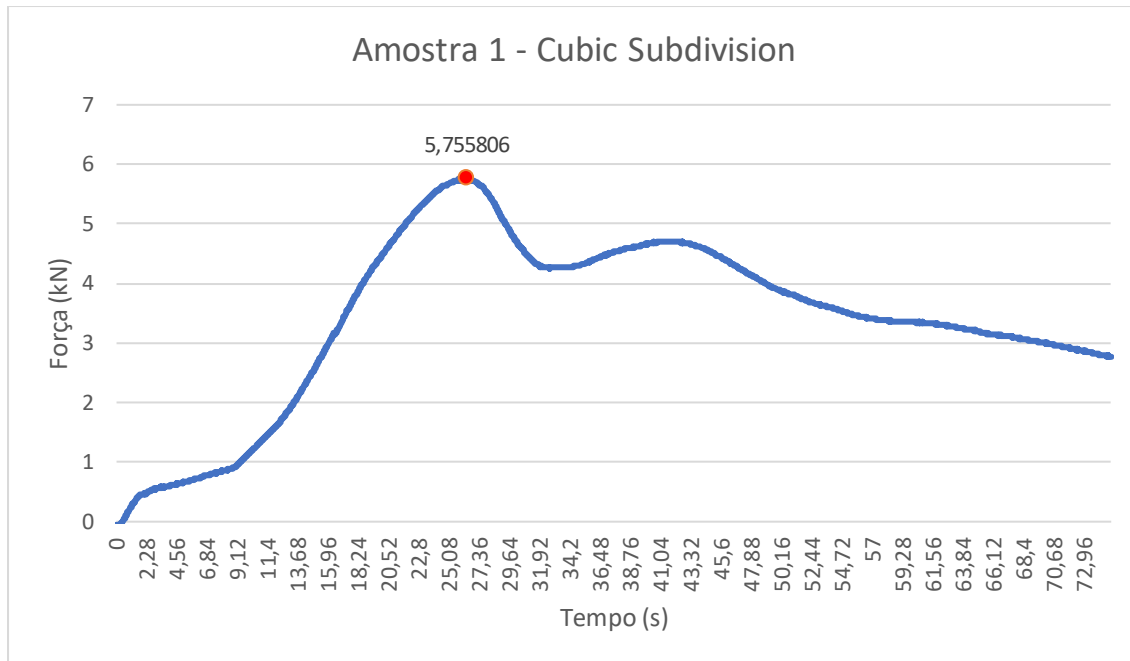
Tabela 3 - Dados dos testes do preenchimento Cross 3D

Tipo de preenchimento	Força (kN)	Tempo (s)
Cross 3D_1	3,726387	21,31
Cross 3D_2	3,649139	22,63
Cross 3D_3	4,786968	23,47

Fonte: Próprio autor

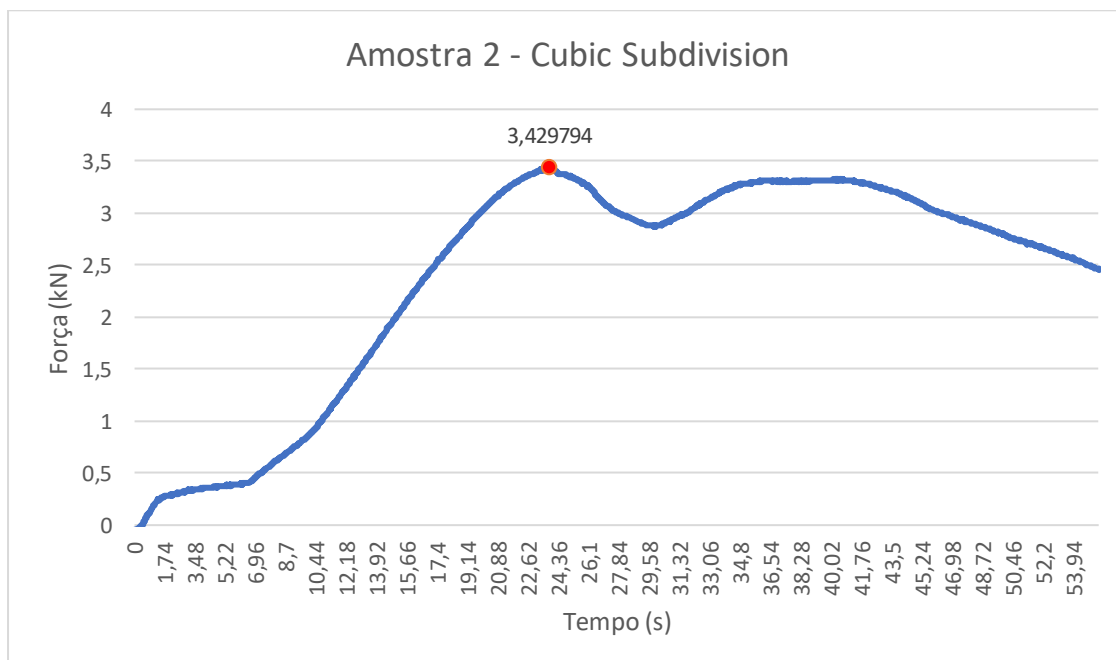
A seguir estão os gráficos, com os resultados obtidos após os testes de tração nas amostras relativas ao preenchimento do tipo Cubic Subdivision.

Figura 19 - Gráfico 7: Amostra 1 - Cubic Subdivision



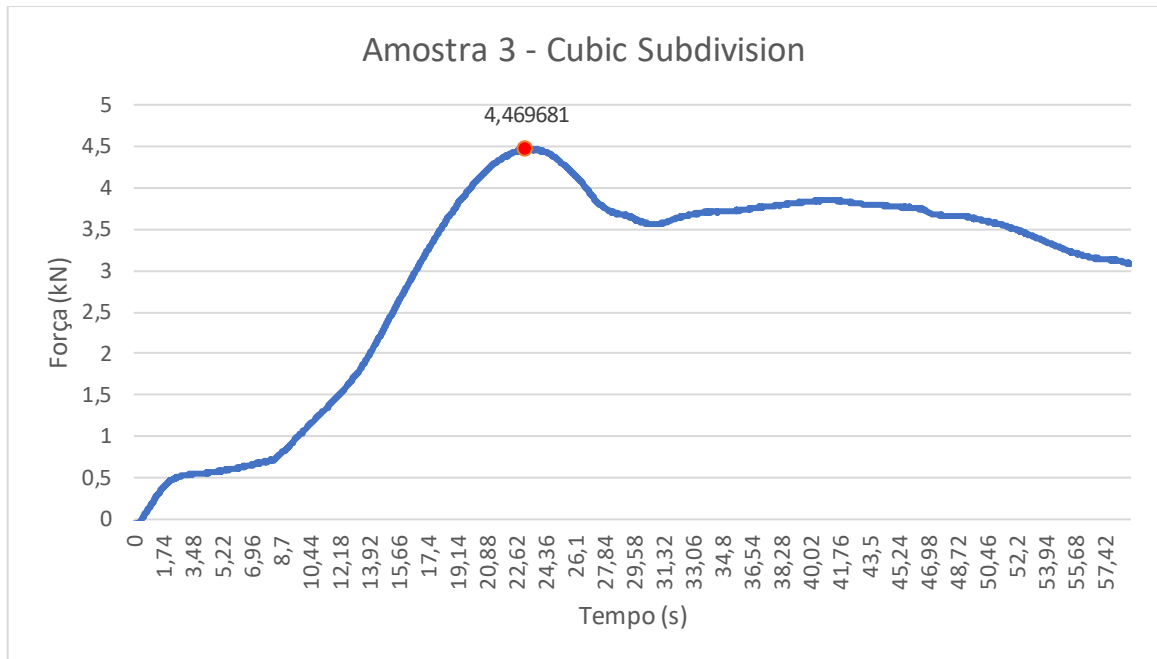
Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Gráfico 8: Amostra 2 - Cubic Subdivision



Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Gráfico 9: Amostra 3 - Cubic Subdivision



Fonte: Próprio autor

Observa-se como resultado dos testes das amostras, se tratando do preenchimento do tipo Cubic Subdivision, a força que leva as amostras a ruptura varia entre 3,42 kN até 5,75 kN, com tempo de ruptura, pontos indicados em vermelho nos gráficos, entre 23,23 a 26,43 segundos, como mostra a Tabela 4, detalhando os três (3) testes abaixo:

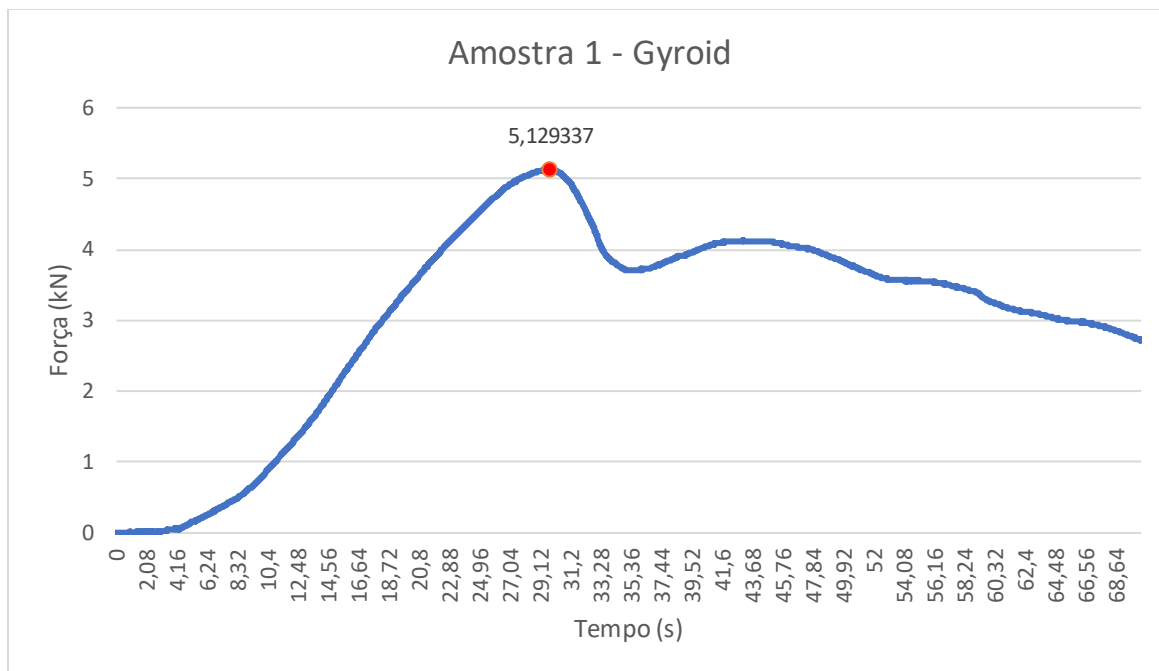
Tabela 4 - Dados dos testes do preenchimento Cubic Subdivision

Tipo de preenchimento	Força (kN)	Tempo (s)
Cubic subdivision 1	5,755806	26,43
Cubic subdivision 2	3,429794	23,85
Cubic subdivision 3	4,469681	23,23

Fonte: Próprio autor

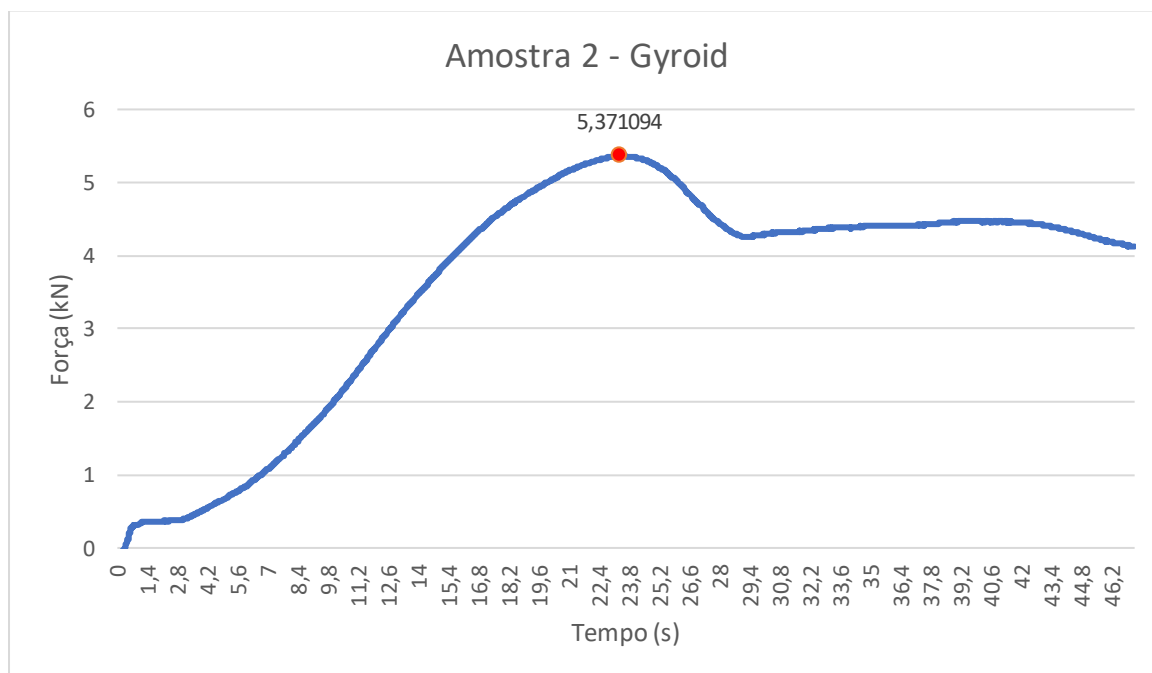
A seguir estão os gráficos, com os resultados obtidos após os testes de tração nas amostras relativas ao preenchimento do tipo Gyroid.

Figura 22 – Gráfico 10: Amostra 1 - Gyroid



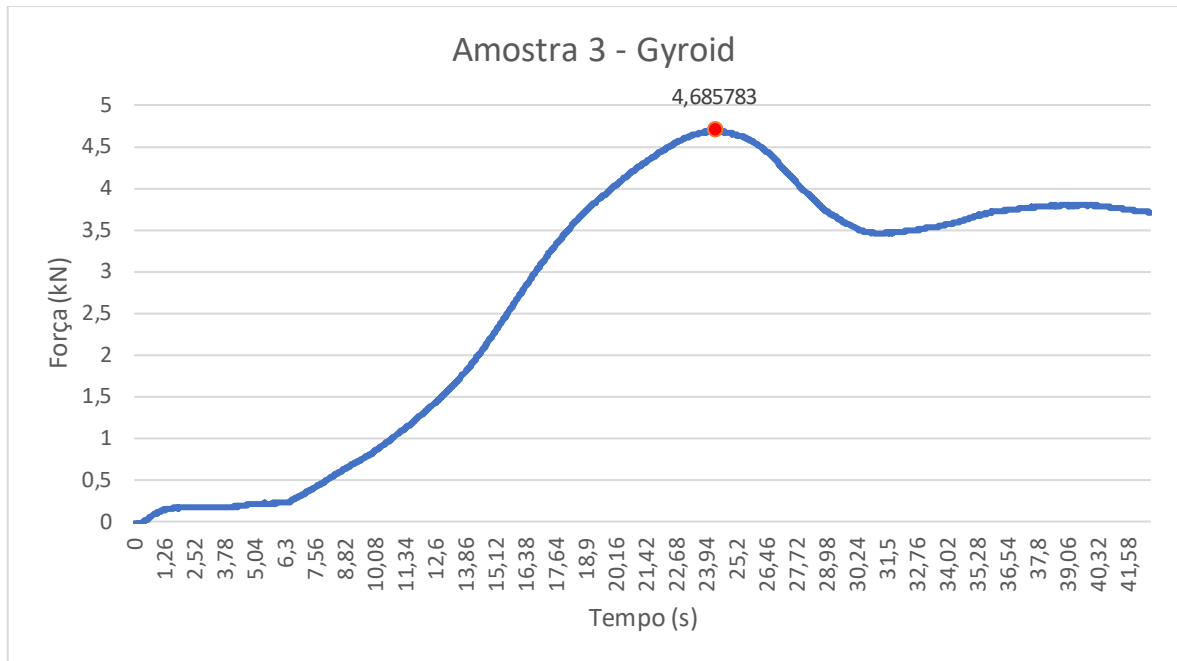
Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Gráfico 11: Amostra 2 - Gyroid



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Gráfico 12: Amostra 3 - Gyroid



Fonte: Próprio autor

Observa-se como resultado dos testes das amostras, se tratando do preenchimento do tipo Gyroid, a força que leva as amostras a ruptura varia entre 4,68 kN até 5,37 kN, com tempo de ruptura, pontos indicados em vermelho nos gráficos, entre 23,35 a 29,80 segundos, como mostra a Tabela 5, detalhando os três (3) testes abaixo:

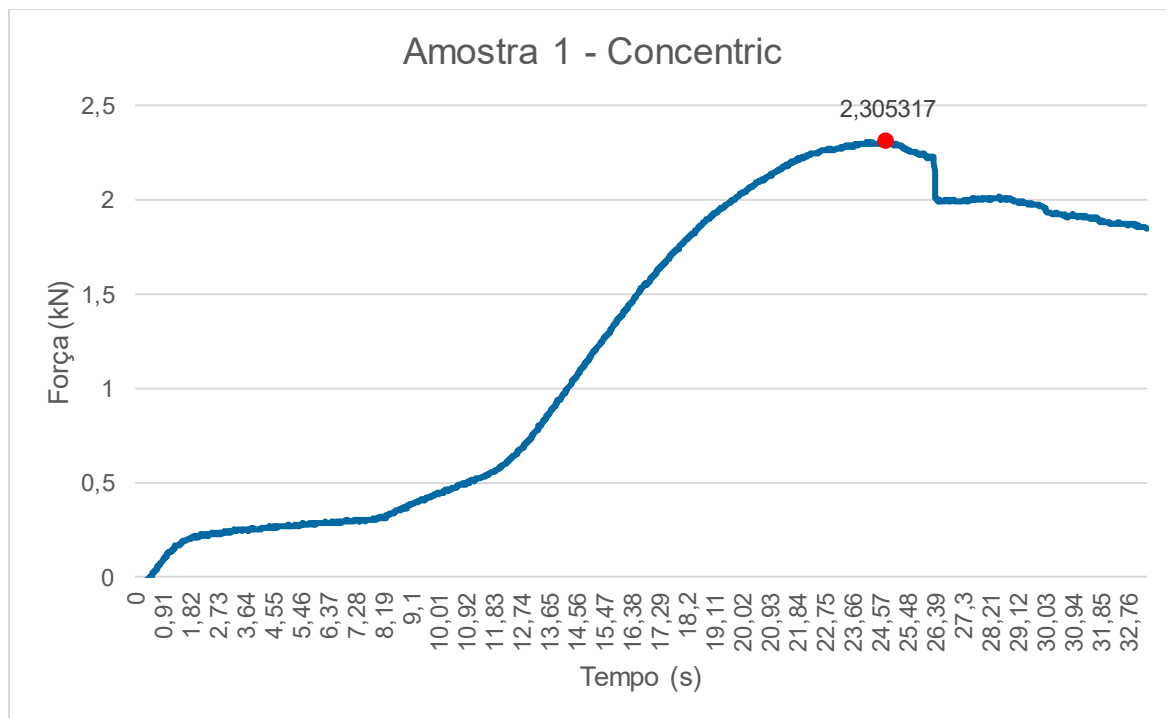
Tabela 5 - Dados dos testes do preenchimento Gyroid

Tipo de preenchimento	Força (kN)	Tempo (s)
Gyroid 1	5,129337	29,80
Gyroid 2	5,371094	23,35
Gyroid 3	4,685783	24,31

Fonte: Próprio autor

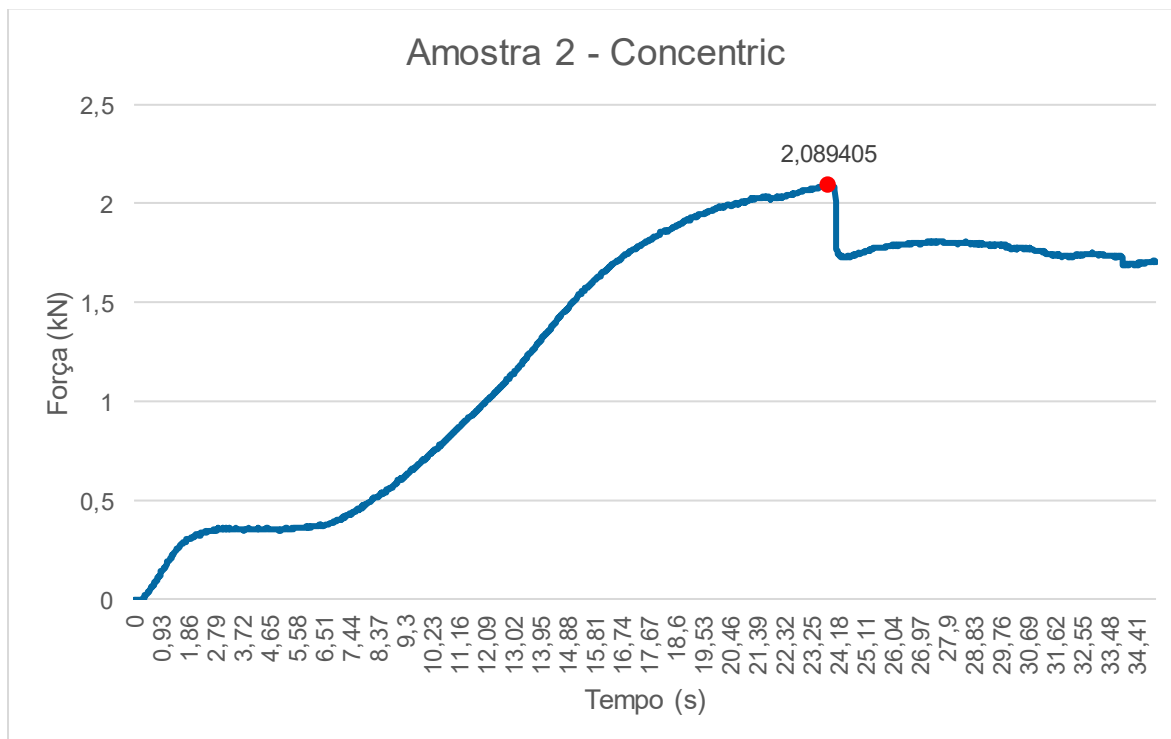
A seguir estão os gráficos, com os resultados obtidos após os testes de tração nas amostras relativas ao preenchimento do tipo Concentric.

Figura 25 – Gráfico 13: Amostra 1 - Concentric



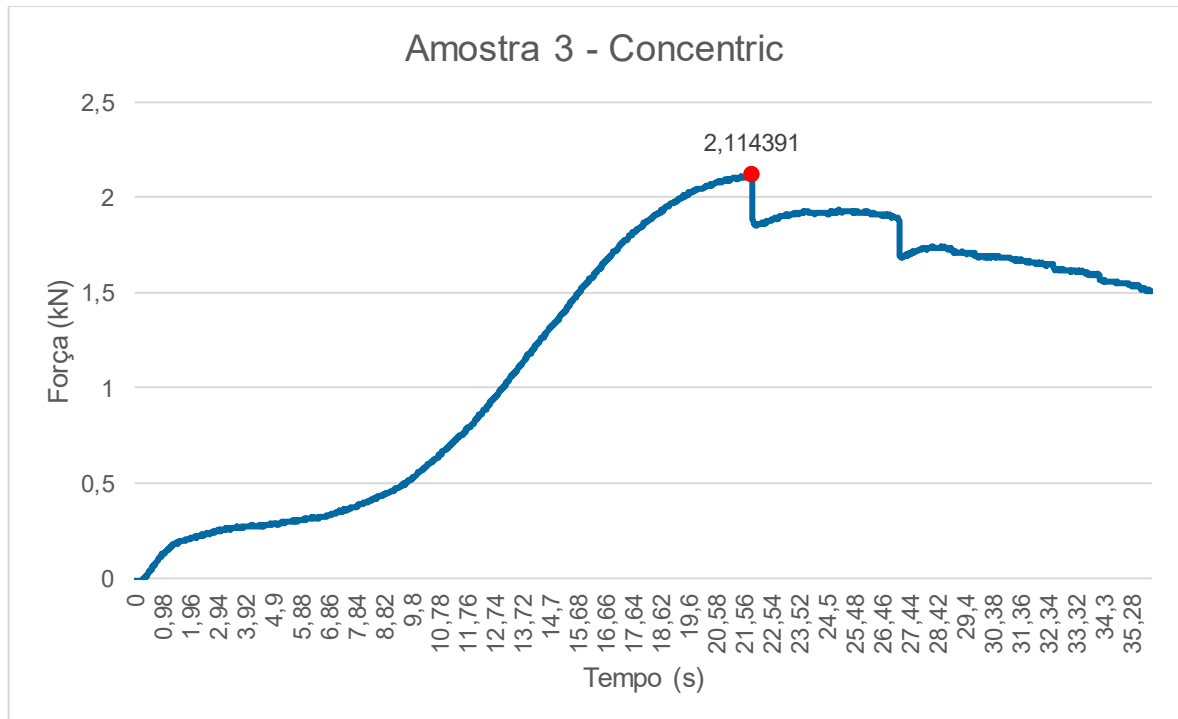
Fonte: Próprio autor

Figura 26 - Gráfico 14: Amostra 2 - Concentric



Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Grafico 15: Amostra 3 - Concentric



Fonte: Próprio autor

Observa-se como resultado dos testes das amostras, se tratando do preenchimento do tipo Concentric, a força que leva as amostras a ruptura varia entre 2,08 kN até 2,30 kN, com tempo de ruptura, pontos indicados em vermelho nos gráficos, entre 21,85 a 24,82 segundos, como mostra a Tabela 6, detalhando os três (3) testes abaixo:

Tabela 6 - Dados dos testes do preenchimento Concentric

Tipo de preenchimento	Força (kN)	Tempo (s)
Concentric 1	2,305317	24,82
Concentric 2	2,089405	23,87
Concentric 3	2,114391	21,85

Fonte: Próprio autor

Mediante os gráficos e as tabelas apresentadas, os testes de tração realizados demonstram como o tipo de preenchimento influencia a resistência mecânica e o comportamento de deformação do material. Os principais parâmetros considerados foram a força máxima suportada (em kN) e o tempo até a falha (em segundos).

Analisando os resultados apresentados para cada tipo de amostra, é possível observar que o preenchimento lightning obteve um comportamento esperado, por se tratar de algo voltado a economia de material e peso, uma vez que a quantidade de material depositada, a complexidade da geometria e o tempo para confecção são menores, resultando em uma menor resistência mecânica e um tempo mais curto para sua ruptura.

Levando em consideração os preenchimentos que necessitavam de uma maior quantidade de material depositada, 14 gramas, que foram o Cross 3D e o Cubc Subdivision, o primeiro apresentou um tempo intermediário para ruptura e conseqüentemente uma boa resistência mecânica, que está atrelado a sua configuração estrutural mais complexa, já o segundo, apresenta um tempo maior para sua ruptura, e uma resistência mecânica média entre os padrões apresentados, devido a geometria e design que distribui as tensões de maneira mais uniforme.

Por fim, os preenchimentos que necessitavam da maior quantidade de material depositadas, 15 gramas, que foram o Gyroid e o Concentric, apresentaram padrões um pouco diferentes, sendo o primeiro, com excelente desempenho a melhor variação da força aplicada, devido a sua estrutura tridimensional contínua, podendo suportar cargas multidirecionais, resultando em uma maior resistência mecânica. O segundo por sua vez, apesar de necessitar de muito material para manufatura, apresentou uma resistência moderada, não garantindo grande resistência, mas apresenta alta flexibilidade.

De acordo com os princípios apresentados em "Elementos de Máquinas de Shigley" e "Fundamentals of Machine Component Design":

- Distribuição de Tensão: Preenchimentos como Gyroid e Cubic Subdivision favorecem uma melhor distribuição de tensão devido à sua geometria complexa.
- Falha por Deformação Plástica: Lightning, com baixa resistência, atinge deformação plástica mais rapidamente, tornando-o inadequado para aplicações estruturais.
- Fator de Segurança: Preenchimentos mais resistentes, como Gyroid e Cubic, permitem fatores de segurança menores, aumentando a eficiência estrutural.

Então para uma seleção do tipo de preenchimento para aplicação final, podemos utilizar além dos gráficos dos testes, complementar com outros gráficos e tabelas mostrando

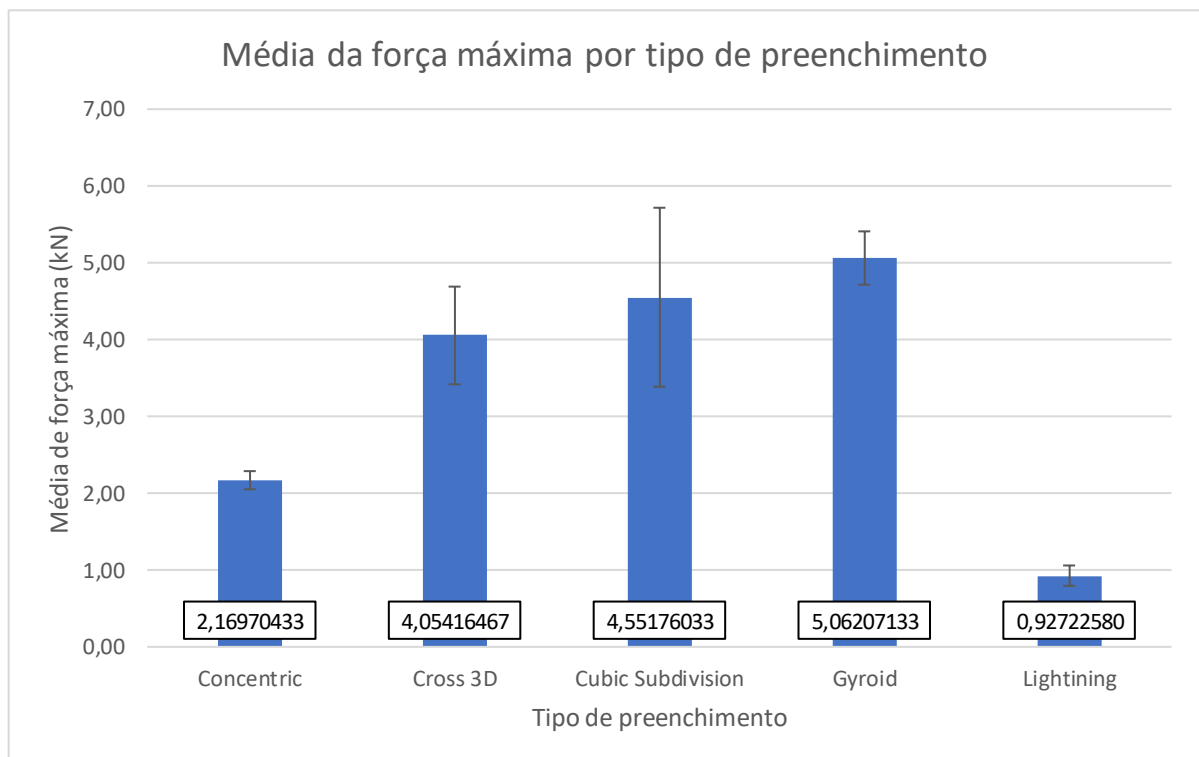
de maneira mais ampla e visual a diferença entre os tipos de preenchimento em relação a força e em relação ao tempo que eles levam até sua ruptura.

Tabela 7 – Dados da média de força dos testes

Tipo de preenchimento	Média de força máxima (kN)	Desvio padrão amostral
Concentric	2,16970433	0,118106611
Cross 3D	4,05416467	0,635800564
Cubic Subdivision	4,55176033	1,165176261
Gyroid	5,06207133	0,347571998
Lightining	0,92722580	0,132542250

Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Gráfico 16: Média de orça máxima por tipo de preenchimento



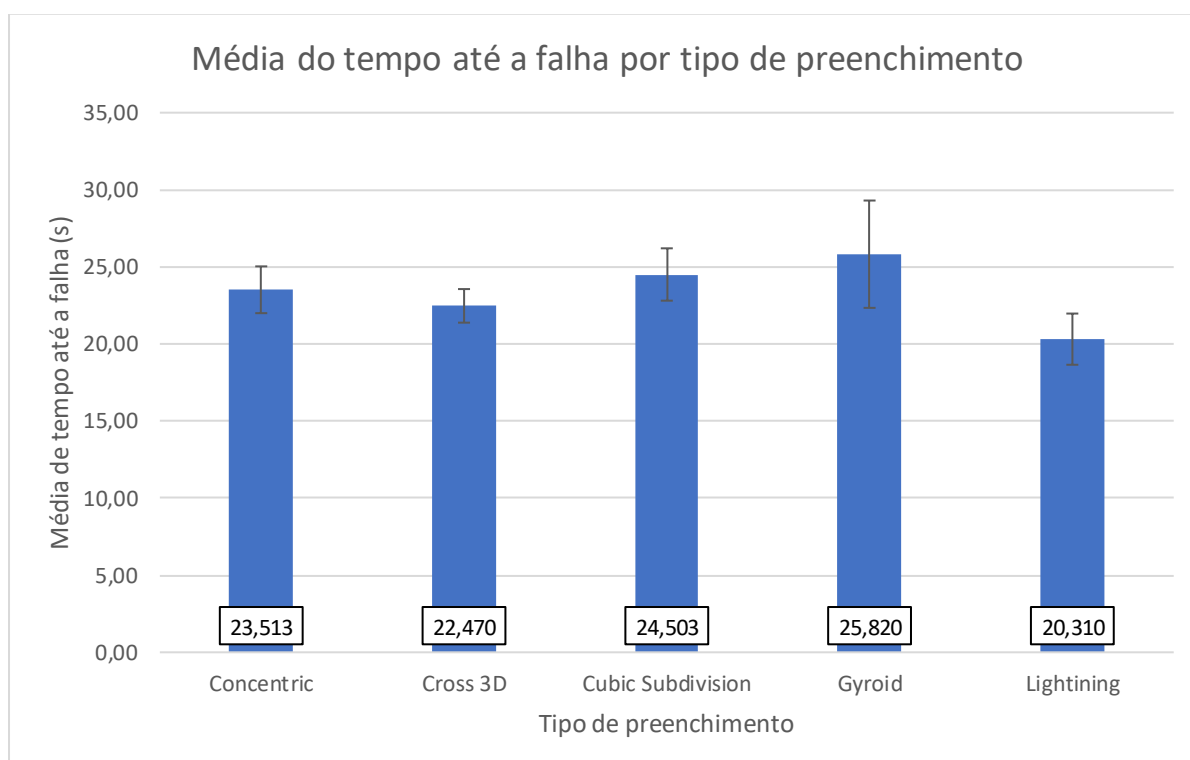
Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Dados da média de tempo até a falha dos testes

Tipo de preenchimento	Média do tempo até a falha (s)	Desvio padrão amostral
Concentric	23,513	1,516783878
Cross 3D	22,470	1,088852607
Cubic Subdivision	24,503	1,697095558
Gyroid	25,820	3,480043103
Lightning	20,310	1,660090359

Fonte: Próprio autor

Figura 29 - Gráfico 17: Média de tempo até a falha por tipo de preenchimento



Fonte: Próprio autor

As análises realizadas neste estudo mostraram diferenças significativas no desempenho mecânico na área adjacente dos elementos roscados fabricados em PLA com diferentes padrões de preenchimento. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos

destacaram como o tipo de preenchimento influencia diretamente a força máxima suportada, o tempo até a falha e a adequação de cada padrão para diferentes finalidades.

Em termos de força máxima, o padrão Cubic Subdivision 1 demonstrou ser o mais robusto, alcançando 5,76 kN, evidenciando sua alta resistência estrutural. O padrão Gyroid também apresentou bons resultados, com valores de força variando entre 4,69 kN e 5,37 kN. Já o preenchimento Lightning registrou os menores valores, entre 0,78 kN e 1,05 kN, refletindo sua baixa resistência.

O tempo até a falha também variou entre os padrões. O Gyroid 1 teve o melhor desempenho, resistindo por 29,80 segundos antes de falhar, seguido pelo Cubic Subdivision 1, com 26,43 segundos. Esses resultados estão alinhados com a alta resistência registrada para ambos os padrões. Em contraste, o preenchimento Lightning 3 resistiu por apenas 18,66 segundos, confirmando sua fragilidade sob cargas prolongadas.

No aspecto estrutural, o padrão Gyroid destacou-se pela sua geometria tridimensional contínua, que distribui tensões de forma eficiente, resultando em alta resistência e ductilidade. O Cubic Subdivision demonstrou eficiência em suportar cargas unidirecionais, graças à sua subdivisão cúbica que facilita a distribuição de tensões. Por outro lado, o padrão Lightning, apesar de ser leve e econômico em termos de material, apresentou rápida falha sob carga, limitando seu uso para aplicações estruturais.

Na análise de aplicações práticas, o preenchimento Lightning mostrou-se adequado para peças onde leveza é prioritária e resistência mecânica não é um requisito crítico, como protótipos. Já os padrões Gyroid e Cubic Subdivision foram os mais indicados para componentes estruturais submetidos a altas cargas, devido à sua robustez e maior resistência ao longo do tempo. O padrão Concentric, com desempenho intermediário, é uma escolha válida para peças que demandam resistência moderada.

Esses resultados evidenciam a influência do tipo de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças impressas em PLA, reforçando a importância de escolher o padrão de preenchimento conforme as exigências específicas de cada projeto. Também destacam a necessidade de ajustar outros parâmetros de impressão, como densidade e direção, para equilibrar resistência e economia de material.

Além da necessidade de verificar e controlar alguns fatores que possam influir no resultado, tais como a umidade dos filamentos, controle da temperatura do bico extrusor para controlar a adesão entre camadas evitando os espaços vazios internos, podendo assim evitar delaminação, fraturas prematuras e falhas por fadiga, influenciando diretamente na resistência mecânica e durabilidade das peças produzidas por esse tipo de processo de fabricação.

Por fim, os dados obtidos sugerem a importância de estudos adicionais, como ensaios de fadiga e impacto, para avaliar o desempenho dos preenchimentos em condições mais severas. Essas informações servem como um guia útil para a escolha do padrão de preenchimento em projetos com impressão 3D, contribuindo para melhorar a eficiência, reduzir custos e garantir a segurança das peças produzidas.

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados de testes de tração em amostras de PLA revelou informações valiosas sobre o desempenho mecânico de diferentes padrões de preenchimento. Os resultados, suportados por gráficos, oferecem insights práticos e estratégicos para melhorar a aplicação desses materiais em projetos estruturais e funcionais.

- O preenchimento Gyroid apresentou a maior resistência mecânica, com média de forças máximas acima de 5 kN e tempos até a falha superiores a 23 segundos. Esses resultados destacam sua adequação para aplicações que demandam alta resistência e durabilidade estrutural, sendo amplamente utilizados em estruturas de drones e alguns tipos de próteses.
- Lightning, embora tenha exibido os menores valores de força e tempo, demonstrou eficiência em aplicações que priorizam economia de material e baixo peso, muito aplicados em protótipos e modelos arquitetônicos.
- O preenchimento Concentric oferece desempenho intermediário, podendo ser útil em situações que combinam moderada resistência com flexibilidade estrutural, com aplicação conhecidas em tampas de potes e encaixe de carcaças.
- A análise de custo-eficiência revelou que preenchimentos mais robustos, como Gyroid e Cubic Subdivision, apresentam boa relação força-custo (kN/R\$), embora sejam mais caros por unidade. Já o Lightning mostrou-se menos eficiente em termos de resistência por custo, mas seu baixo preço justifica seu uso em projetos onde resistência mecânica não é prioritária.
- Concentric surge como uma alternativa interessante para aplicações de custo intermediário, combinando economia com desempenho moderado.
- A correlação entre tempo até a falha e força máxima confirma que padrões estruturais mais complexos distribuem melhor as tensões, resultando em maior durabilidade e resistência.
- O preenchimento Cross 3D, tem sua aplicação baseada em componentes que necessitam de rigidez em eixos ortogonais, como suporte para pequenos motores e hastes conectivas.

- O preenchimento Cubic subdivision, apresenta uma boa economia de material com uma certa rigidez, normalmente utilizado em capas protetoras e suporte para sensores.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Incorporar indicadores de desempenho específicos, como densidade relativa, rigidez por unidade de custo, e eficiência estrutural.
- Investigar como fatores como umidade dos filamentos, velocidade e temperatura do bico extrusor influenciam nos vazios das peças e diminuem a resistência das peças.
- Expandir o estudo para incluir outras geometrias de preenchimento, permitindo uma comparação mais abrangente entre diferentes configurações.
- Investigar possíveis tratamentos pós-impressão, como recozimento ou revestimentos, para melhorar propriedades mecânicas.
- Realizar um levantamento detalhado dos custos reais de impressão, incluindo consumo de material, tempo de fabricação e energia, para aprimorar a análise econômica.
- Adicionar testes complementares ao estudo, como fadiga, impacto e temperatura.

REFERÊNCIAS

- AMINERO, M. Á.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, v. 124, p. 143–157, 2017.
- CAMPOS, L. 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. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. Á.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, v. 124, p. 143–157, 2017.
- DIZON, J. R. C.; ESPERA JR, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, v. 20, p. 44–67, 2018.
- DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 3, p. 228–235, 2014.
- ES-SAID, O. S.; FOYOS, J.; NOORANI, R.; MENDELSON, M.; MARLOTH, R.; PREGGER, B. A. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 15, n. 1, p. 107–122, 2000.
- FAFENROT, S.; GRIMMELSMANN, N.; WORTMANN, M.; EHRMANN, A. Three-Dimensional Printing of PLA and ABS Fibers: Impact on tensile strength and embedding in polymer matrices. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 134, n. 24, 2017.
- FERREIRA, R. T. L.; AMATTE, I. C.; DUTRA, T. A.; BÜRGER, D. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, v. 124, p. 88–100, 2017.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015.

GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ, C. M.; SARABIA-VALLEJOS, M. A.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J. Polylactic acid (PLA) composites: General overview and new developments. *Materials Science and Engineering: C*, v. 98, p. 1241–1251, 2019.

HARSHITHA, V.; SRINIVASA, S. Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, v. 19, n. 2, p. 583–588, 2019.

LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM. *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, p. 1–6, 2016.

OLIVEIRA, Emerson Luis de; DIAS, Kelly Patricia; GILAPA, Leonidas Cayo Mamani; HESSE, Rubens. Estudo da resistência mecânica nos protótipos fabricados através do processo FDM. In: XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, Maceió, 2018.

PRADO, M. R.; GOMES, L. C.; SANTOS, J. P.; FERREIRA, T. P. Influence of infill patterns on the mechanical performance of PLA threads produced by 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 89, p. 45–63, 2023.

PRADO, Thiago Menezes do. Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica de elementos de fixação por rosca fabricados através de manufatura aditiva. 2023. Dissertação (Pós-Graduação) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. *Shigley's mechanical engineering design*. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

STOJANOVIĆ, B.; OGNJANOVIĆ, M.; MLADENOVIĆ, D. Mechanical properties and failure analysis of 3D printed PLA components with different types of infill. *Materials Testing*, v. 62, n. 8, p. 754–764, 2020.

TANVEER, M.; MISHRA, G.; MISHRA, S.; SHARMA, R. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed parts – a current review. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 100–108, 2022.

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

ZIEMIAN, S.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, C. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. *Additive Manufacturing*, v. 1, n. 1, p. 16–29, 2012.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. *Fundamentals of machine component design*. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.