



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

**Influência de aditivos metálicos em propriedades
térmicas e mecânicas de filamentos de ABS aplicados
em estruturas de quadricópteros**

Autor: Rana Mayeli Piêgas Taborda
Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Brasília, DF
2023



Rana Mayeli Piêgas Taborda

Influência de aditivos metálicos em propriedades térmicas e mecânicas de filamentos de ABS aplicados em estruturas de quadricópteros

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Brasília, DF
2023

Rana Mayeli Piêgas Taborda

Influência de aditivos metálicos em propriedades térmicas e mecânicas de filamentos de ABS aplicados em estruturas de quadricópteros/ Rana Mayeli Piêgas Taborda. – Brasília, DF, 2023-

77 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Artem Andrianov

Trabalho de Conclusão de Curso –

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Polímero aditivado. 2. Manufatura Aditiva. I. Prof. Dr. Artem Andrianov. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Influência de aditivos metálicos em propriedades térmicas e mecânicas de filamentos de ABS aplicados em estruturas de quadricópteros

CDU 02:141:005.6

Rana Mayeli Piêgas Taborda

Influência de aditivos metálicos em propriedades térmicas e mecânicas de filamentos de ABS aplicados em estruturas de quadricópteros

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Prof. Dr. Artem Andrianov
Orientador

Prof.^a Dr. Sandra Maria da Luz
Convidado 1

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias
Barcelos Júnior**
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Agradecimentos

Destaco meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação. Em especial, ao professor Cristian Vendittozzi e ao professor William Reis Silva, pelo seu entusiasmo e por me incentivarem na jornada acadêmica. Ao professor Artem Andrianov, cuja dedicação e orientação fizeram uma grande diferença no resultado final deste trabalho. Aos meus pais e amigos, obrigada.

Resumo

Visando uma solução para os desafios da engenharia e tecnologia de materiais, principalmente em relação à indústria aeroespacial, novos materiais são criados a cada dia para empregabilidade na impressão 3D. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o desenvolvimento de filamentos poliméricos aditivados de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reforçados por pós de alumínio e titânio, com diferentes variações percentuais em peso. Dentre os processos de manufatura aditiva atualmente disponíveis, optou-se por utilizar a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) devido ao baixo custo. As propriedades dos polímeros aditivados estão intrinsecamente relacionadas à maneira com a qual estes são preparados. Os filamentos produzidos foram caracterizados quanto às suas propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas. Foi possível desenvolver filamentos com diâmetro em torno de 1,75 mm, o que viabiliza futuras aplicações em FDM. As propriedades mecânicas foram aumentadas para os filamentos compostos com 5% de reforço particulado. Ademais, constatou-se por meio das análises realizadas que a combinação da impressão 3D com o ABS oferece flexibilidade de design e a capacidade de produzir componentes resistentes e funcionais para drones quadricópteros de maneira eficiente.

Palavras-chaves: Polímeros aditivados. Manufatura aditiva. Deposição de Material Fundido. Pós metálicos. Drones quadricópteros.

Abstract

With the aim of addressing the challenges in engineering and materials technology, particularly in the aerospace industry, new materials are being developed every day for use in 3D printing. In this study, research was conducted on the development of additive polymer filaments reinforced with aluminum and titanium powders with different weight percentage variations using acrylonitrile butadiene styrene (ABS). Among the currently available additive manufacturing processes, the Fused Deposition Modeling (FDM) method was chosen due to its low cost and availability of equipment at the University of Brasilia-Gama Campus (FGA). The properties of the additive polymers are inherently linked to the way they are prepared. It is crucial to ensure a good interface between the polymer and the additives through the distribution and dispersion of particles within the polymer matrix. The produced filaments were characterized for their thermal, mechanical, and morphological properties. Filaments with a diameter of approximately 1.75 mm were successfully developed, enabling future applications in FDM. The mechanical properties were enhanced for filaments composed of 5% particulate reinforcement. Furthermore, the analyses conducted demonstrated that the combination of 3D printing with ABS provides design flexibility and the ability to efficiently produce durable and functional components for drones.

Key-words: Additivated polymers. Additive manufacturing. Fused deposition modeling. Metallic powders. Drones.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação dos polímeros (adaptado de [Billmeyer 2020])	17
Figura 2 – Representação da estrutura macromolecular de polímeros sintéticos (adaptado de [Billmeyer 2020])	18
Figura 3 – Copolímero Acrilonitrila butadieno estireno.	19
Figura 4 – Esquemático de uma extrusora de parafuso único (adaptado de [Scott 2015]).	24
Figura 5 – Desenho esquemático do processo FDM (adaptado de [processing 2015]).	25
Figura 6 – Dinâmica de um drone quadricóptero (adaptado de Chen et al. 2016).	26
Figura 7 – Materiais utilizados na produção dos filamentos.	34
Figura 8 – (a) Extrusora Filmaq3D CV, (b) Resfriadora e tracionadora, (c) Enroladora de filamentos (adaptado de [Filmaq3D 2023]).	34
Figura 9 – Agitador industrial utilizado.	35
Figura 10 – Esquemático do moinho de esferas.	36
Figura 11 – Moinho de esferas utilizado.	36
Figura 12 – (a) Pellets aditivados inseridos no bocal da extrusora. (b) Filamento formado após passar pelo bico extrusor.	37
Figura 13 – Filamento enrolado no carretel.	37
Figura 14 – Impressora Creality Ender 5 plus. Fonte: [3DLab 2023]	38
Figura 15 – Parâmetros do corpo de prova de tração (adaptado de ASTM:D638-03).	38
Figura 16 – (a) Analisador térmico utilizado (adaptado de [Instruments 2023]). (b) Máquina 8801 (adaptado de [Instron 2023]).	39
Figura 17 – Microscópios utilizados (adaptado de [LECO 2023]).	40
Figura 18 – Amostras embutidas em resina.	40
Figura 19 – Dimensões do braço.	41
Figura 20 – Relação da geometria.	42
Figura 21 – Condições de contorno do braço.	43
Figura 22 – Geometria da estrutura do drone pré otimização.	44
Figura 23 – Comparação entre os pellets aditivados e o pellet virgem.	46
Figura 24 – Filamento de ABS-alumínio com 1,79mm de diâmetro.	47
Figura 25 – CPs impressos para o teste de tração. Acima, CP ABS-Al 5 %. Abaixo, ABS-Ti 5 % abaixo.	48
Figura 26 – Curvas TGA-DSC ABS puro e ABS-Alumínio.	48
Figura 27 – Curvas TGA-DSC ABS puro e ABS-Titânio.	49
Figura 28 – Curva de Tensão vs Deformação.	51
Figura 29 – Exemplo de fratura durante o ensaio de tração.	52
Figura 30 – Amostra de ABS puro: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX	53
Figura 31 – Amostra de ABS-alumínio com 2,5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX	53
Figura 32 – Amostra de ABS-alumínio com 5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX	54
Figura 33 – Amostra de ABS-alumínio com 7,5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX	54

Figura 34 – Amostra de ABS-titânio com 5% de aditivo: Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX	55
Figura 35 – Observações com o microscópio confocal laser. a) ABS-Al 5%, Magnificação 500x; b) ABS-Ti 5%, Magnificação 500x	55
Figura 36 – Malha com elementos hexagonais de 8 nós.	56
Figura 37 – Malha com elementos tetraédricos de 10 nós.	57
Figura 38 – Convergência da tensão normal para a análise linear.	57
Figura 39 – Deslocamento da análise linear.	58
Figura 40 – Tensão equivalente de von Mises da análise linear.	58
Figura 41 – Tensão normal da análise linear.	58
Figura 42 – Tensão normal analisada na metade da geometria.	59
Figura 43 – Tensão normal para o ABS-alumínio.	59
Figura 44 – Tensão normal para o ABS-titânio.	60
Figura 45 – Deslocamento para o ABS-alumínio.	60
Figura 46 – Deslocamento para o ABS-titânio.	60
Figura 47 – Tensão equivalente de von Mises para o ABS-alumínio.	61
Figura 48 – Tensão equivalente de von Mises para o ABS-titânio.	61
Figura 49 – Análise do deslocamento da geometria pré-otimização.	62
Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises da geometria pré-otimização.	62
Figura 51 – Tensão normal principal da geometria pré-otimização.	62
Figura 52 – Análise do deslocamento da geometria otimizada.	63
Figura 53 – Tensão equivalente de von Mises para a geometria otimizada.	63
Figura 54 – Tensão normal principal para a geometria otimizada.	63
Figura 55 – Detalhe de visualização da malha.	64
Figura 56 – Estrutura otimizada.	64
Figura 57 – Estrutura otimizada.	64
Figura 58 – Desenho técnico do braço do drone com formato de viga em I com seção H variável.	75
Figura 59 – Desenho técnico do drone.	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características dos monômeros e porcentagens adicionadas à blenda (adaptado de [Nunes 2018]).	19
Tabela 2 – Temperaturas de transição vítrea (T_g) e degradação (T_d) do ABS	21
Tabela 3 – Tabela comparativa de drones quadricópteros mais populares, [DJI].	27
Tabela 4 – Composição das misturas de ABS e metais.	36
Tabela 5 – Dimensões do corpo de prova, ASTM:D638-03	38
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do ABS no Ansys	43
Tabela 7 – Condições de contorno.	44
Tabela 8 – Temperaturas de extrusão das amostras.	47
Tabela 9 – Temperaturas obtidas através das curvas de DSC	50
Tabela 10 – Análise estatística dos resultados da DSC	50
Tabela 11 – Comparação de $E = 2200MPa$ e $\sigma_m = 29MPa$ fornecido pelo fabricante e os testados.	51
Tabela 12 – Descrição do método e estatísticas de qualidade da malha	56
Tabela 13 – Resultado do cálculo analítico	59
Tabela 14 – Comparação entre a estrutura pré e pós otimização.	64
Tabela 15 – Diferença percentual das análises em relação ao ABS linear no Workbench.	65

Lista de abreviaturas e siglas

FDM	Deposição de Material Fundido
PLA	Ácido poliláctico
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol modificado
AM	Additive Manufacturing
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _f	Temperatura de fusão
T _c	Temperatura de cristalização
T _d	Temperatura de degradação
TG	Termogravimetria
DTG	Termogravimetria Derivada
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DSX	Digital Scanning Microscope
CLSM	Confocal Laser Scanning Microscopy
SLA	Estereolitografia
SLS	Selective laser sinterin
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
MEF	Método de elementos finitos
SIMP	Material Sólido Isotrópico com Penalização
CP	Corpo de prova
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
CAD	Computer-Aided Design

Lista de símbolos

m	massa
T	temperatura
t	tempo
H	entalpia
C_p	capacidade calorífica específica
K	rigidez
F	força
A_0	área da seção
σ	tensão normal
τ	tensão de cisalhamento
E	Módulo de elasticidade
ϵ	deformação
ω_i	velocidade angular
k_i	constante de proporcionalidade
u	força impulsiva
τ_0	momento angular de arfagem
τ_ϕ	momento angular de rolagem
τ_ψ	momento angular de guinada
ρ	densidade
ϵ_i	deformações infinitesimais lineares no campo
λ_{ij}	deformações infinitesimais angulares
g	gravidade
M	momento fletor
I	momento de inércia
Δ	variação
T_{of}	temperatura do "ombro de fusão"

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Motivação e justificativa	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivos específicos	15
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização do trabalho	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Materiais poliméricos	17
2.1.1	Acrilonitrila butadieno estireno	18
2.2	Propriedades térmicas	19
2.2.1	Temperatura de transição vítrea	20
2.2.2	Temperatura de processamento de polímeros	20
2.2.3	Temperatura de degradação	21
2.2.4	Caracterização térmica	21
2.2.4.1	Termogravimetria	21
2.2.4.2	Calorimetria exploratória diferencial	21
2.3	Propriedades mecânicas	22
2.3.1	Caracterização mecânica	22
2.4	Análise morfológica	23
2.5	Produção de filamentos poliméricos aditivados	23
2.5.1	Manufatura aditiva	24
2.6	Drones quadricópteros	26
2.7	Análise estrutural	28
2.7.1	Método de elementos finitos	28
2.7.2	Análise não linear	29
2.7.3	Qualidade da malha	30
2.7.3.1	<i>Skewness</i>	31
2.7.4	Convergência	31
2.7.5	Análise de otimização	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Processo de fabricação do filamento	34
3.1.1	Mistura simples	35
3.1.2	Moinho de esferas	35
3.1.3	Processo de extrusão	37
3.1.4	Processo de impressão 3D	38
3.1.5	Caracterização dos materiais	39
3.2	Análise morfológica	39
3.3	Modelo analítico	41

3.4	Análise estrutural	42
3.4.1	Ansys Workbench	43
3.4.2	Ansys Discovery	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Pellets aditivados	46
4.2	Extrusão dos filamentos	46
4.3	Impressão 3D dos corpos de prova	47
4.4	Caracterização dos materiais	48
4.4.1	Termogravimetria (TGA/DSC)	48
4.4.2	Ensaio de tração	51
4.5	Análise Microscópica	52
4.6	Análise estrutural	56
4.7	Análise de otimização	61
5	CONCLUSÕES	66
5.1	Trabalhos futuros	66
	Referências	68
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO BRAÇO	75
	APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DO DRONE	77

1 Introdução

1.1 Contextualização

A fabricação de drones quadricópteros é uma área que tem crescido consideravelmente nos últimos anos, com o avanço das tecnologias e a popularização de seu uso em diversas aplicações, como fotografia e filmagem aéreas, inspeções industriais, mapeamento de áreas geográficas, operações militares, entre outras. Com o objetivo de aprimorar o desempenho desses equipamentos, a indústria busca constantemente novas soluções que permitam a fabricação de peças mais resistentes, leves e customizadas [Shahmoradi et al. 2020]. Nesse contexto, a impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia promissora, permitindo a produção de peças complexas e personalizadas com grande precisão. No entanto, um dos principais desafios da impressão 3D de peças de drones é a garantia de sua resistência mecânica, uma vez que as estruturas desses equipamentos estão sujeitas a cargas e tensões significativas durante o voo. Os filamentos poliméricos tradicionais podem não ser suficientes para suportar essas cargas, resultando em peças frágeis e com baixa durabilidade. Para superar essa limitação, tem sido proposta a utilização de filamentos poliméricos aditivados com partículas metálicas [Werken et al. 2019]. O desenvolvimento de filamentos poliméricos aditivados com pós metálicos é uma área de pesquisa em expansão, com o objetivo de criar filamentos com propriedades mecânicas superiores, como maior resistência à tração, compressão, flexão e resistência a impactos. Os pós metálicos podem ser adicionados aos filamentos em diferentes proporções, de acordo com a aplicação, e sua escolha depende do tipo de carga e tensão que a peça deverá suportar. Entre os metais utilizados, destacam-se o alumínio, o cobre, o ferro, o titânio, entre outros [Mazzali 2022]. A adição de pós metálicos aos filamentos poliméricos pode trazer uma série de benefícios para a fabricação de peças de drones, como maior resistência, rigidez e durabilidade, além de possibilitar a produção de peças customizadas. A impressão 3D de peças aditivadas com pós metálicos também pode ser mais eficiente, uma vez que reduz a necessidade de pós-processamento das peças, como usinagem e acabamento [Edgar e Tint 2015]. O desenvolvimento de novos filamentos poliméricos aditivados é relevante não apenas para a indústria aeroespacial, mas também para outras áreas que requerem peças com alta resistência mecânica, como automotiva e de construção civil. Nesse cenário, surgem novas possibilidades para a fabricação de equipamentos mais resistentes, leves e duráveis e com baixo custo de produção, trazendo benefícios tanto para as empresas quanto para os consumidores finais. Nesse sentido, nota-se a necessidade de pesquisas que aprimorem as propriedades desses materiais, contribuindo para o desenvolvimento de novas aplicações em impressão 3D [Rezende e Botelho 2000].

1.2 Motivação e justificativa

A fabricação de drones tem se tornado cada vez mais acessível, especialmente devido aos avanços na tecnologia de impressão 3D. Nesse contexto, a tecnologia de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) tem se destacado como uma opção viável em comparação aos métodos industriais tradicionais, como injeção de plástico e moldagem. A FDM utiliza um

processo de construção de objetos tridimensionais por meio de camadas de filamento termoplástico fundido. Uma das principais vantagens dessa tecnologia é o seu custo inicial de investimento em equipamentos, que é consideravelmente menor em comparação às máquinas de injeção e moldagem, as quais demandam altos custos de aquisição e manutenção. Além disso, a FDM elimina a necessidade de ferramentas dispendiosas e demoradas, como moldes, matrizes ou machos, o que resulta em uma redução significativa nos custos de produção. Essa acessibilidade oferecida pela FDM possibilita que empresas e indivíduos realizem prototipagem rápida, produção personalizada e até mesmo a fabricação de pequenos lotes de peças. Tal flexibilidade não só acelera o processo de desenvolvimento de drones, mas também proporciona economia de recursos financeiros. A impressão 3D de peças de drones pode ser realizada utilizando diferentes tipos de filamentos poliméricos, como PLA (Ácido Polilático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol-Modificado), entre outros. Contudo, uma das limitações desses filamentos é que eles geralmente não possuem propriedades mecânicas suficientemente resistentes para suportar as cargas e tensões que as estruturas de drones estão sujeitas durante o voo [Shahmoradi et al. 2020]. Para superar essa limitação, uma solução é aditivar esses filamentos com pós metálicos, aumentando assim a resistência mecânica das peças impressas. O desenvolvimento de filamentos poliméricos aditivados com pós metálicos para a fabricação de estruturas de drones por impressão 3D tem como objetivo criar filamentos com propriedades mecânicas superiores, como maior resistência à tração, compressão, flexão e resistência a impactos. Os pós metálicos utilizados no aditivo podem variar de acordo com a aplicação, como alumínio, cobre, ferro, titânio, entre outros [Edgar e Tint 2015].

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é avaliar as alterações nas propriedades mecânicas e térmicas do filamento ABS ao adicionar baixos teores de aditivos metálicos, em comparação com o filamento ABS puro. Os aditivos considerados são pós metálicos de titânio e alumínio. As propriedades de interesse são aquelas relacionadas às características térmicas que influenciam a qualidade da impressão 3D, assim como as propriedades mecânicas essenciais para análise estrutural das peças impressas. A realização desse objetivo permitirá investigar se é possível agregar ao polímero matriz escolhido, o ABS, as características térmicas e mecânicas presentes nos metais, por meio do processo de extrusão. Busca-se obter um material que apresente propriedades mecânicas e térmicas superiores às do ABS por si só. Dessa forma, é necessário verificar se esses filamentos aditivados apresentam vantagens em relação ao filamento de ABS puro durante a fabricação das estruturas, considerando critérios como resistência mecânica, rigidez, dureza, tenacidade e estabilidade dimensional. Por conseguinte, busca-se contribuir para o desenvolvimento de drones mais resistentes e duráveis, que possam ser utilizados em aplicações diversas.

1.3.1 Objetivos específicos

- Definição dos parâmetros necessários para a fabricação de filamentos de ABS aditivados com partículas metálicas.
- Medir as propriedades térmicas (temperatura de transição vítrea e de decomposição) e as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e tensão de ruptura) do filamento ABS

puro e dos aditivados.

- Realizar análise microestrutural dos corpos de prova impressos com filamento puro e aditivado para verificar as alterações na forma do filamento impresso, sua aderência e possíveis defeitos.
- Escolher um filamento dentre os estudados para a construção de um drone.
- Realizar a análise de tensões e deformações para uma configuração de drone.

1.4 Metodologia

Os métodos experimentais foram iniciados com a seleção de pellets virgens de ABS e micropartículas de titânio e alumínio. Uma cuidadosa investigação do método de mistura mais adequado precedeu o processo de extrusão para a fabricação dos filamentos. Após a impressão dos corpos de prova, estes foram submetidos a testes mecânicos e térmicos, visando uma avaliação precisa das propriedades do material produzido. Com base na análise das propriedades obtidas, o estudo progrediu para a seleção do material mais promissor a ser aplicado em um drone. Foram conduzidas análises estruturais estáticas por meio do método dos elementos finitos, explorando abordagens lineares e não lineares. Por fim, uma análise de otimização topológica da estrutura foi realizada, culminando em resultados ainda mais refinados e otimizados.

1.5 Organização do trabalho

A organização do presente trabalho conduz o leitor por um encadeamento lógico que transita sobre os conhecimentos teóricos cruciais para o desenvolvimento deste estudo, a metodologia desenvolvida, resultados e discussões e a conclusões da pesquisa. A revisão bibliográfica apresentada é necessária para a formulação de conceitos e conclusões como consequência da pesquisa. Dessa forma, são abordados os assuntos mais relevantes para entender o desenvolvimento de filamentos poliméricos aditivados com pós metálicos. Além disso, é apresentada a abordagem escolhida para o estudo e sua configuração. A metodologia descreve os processos de fabricação e técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho para caracterizar os filamentos produzidos, bem como a análise da estrutura de um drone considerando o material estudado. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos e as respectivas discussões e análises realizadas. Por fim, são apresentadas as conclusões desse trabalho, bem como as perspectivas para um trabalho futuro.

2 Revisão de literatura

2.1 Materiais poliméricos

Por definição, os polímeros são constituídos por macromoléculas formadas a partir da união de múltiplas unidades de moléculas menores, denominadas monômeros [Ruão 2022]. Vários polímeros sintéticos foram descobertos e desenvolvidos em uma taxa exponencial ao longo dos anos 1930 e 1940. Cientistas de universidades e da indústria estudaram abordagens de síntese para converter monômeros abundantes e baratos em materiais poliméricos ao longo dessas décadas. Simultaneamente, os métodos de polimerização foram aprimorados para aumentar a eficiência e o rendimento [Billmeyer 2020]. A Figura 1 apresenta a classificação dos materiais poliméricos:

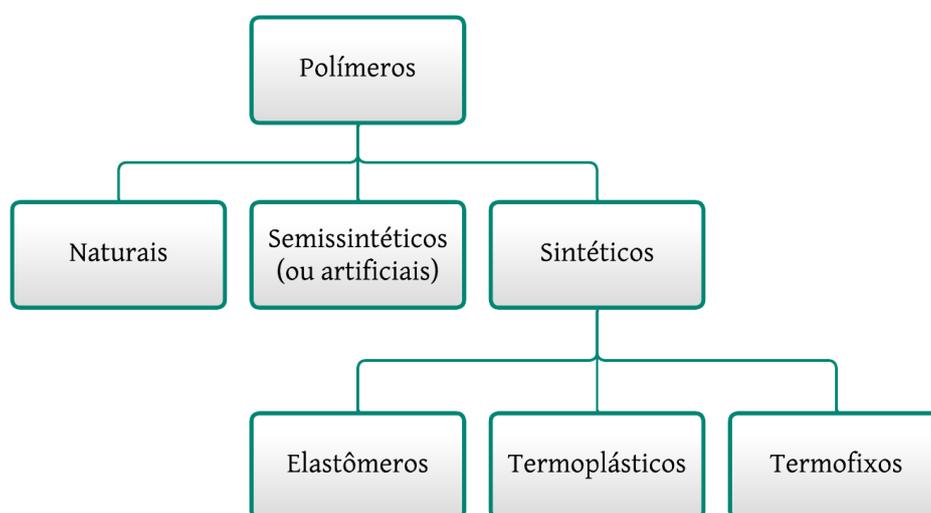


Figura 1 – Classificação dos polímeros (adaptado de [Billmeyer 2020])

Os polímeros sintéticos são desenvolvidos por ação humana, mediante processos de transformação, como reações químicas. Dentre eles, os elastômeros possuem alta elasticidade. Ou seja, deforma consideravelmente mesmo sob cargas de tração baixas. Essa deformação é reversível e o material retorna às suas dimensões originais quando a tensão é removida [Gorni 2003]. Os termoplásticos podem suportar vários ciclos térmicos (fusão e solidificação) sem degradar significativamente suas propriedades. Eles são compostos de macromoléculas lineares ou levemente ramificadas e a agregação intermolecular é assegurada por ligações químicas fracas. Os termofixos atingem sua forma final quando expostos a um único ciclo térmico, não podendo ser reaquecidos sem degradar suas propriedades. Eles são formados por estruturas poliméricas altamente ramificadas e a agregação intermolecular é assegurada por fortes ligações químicas [SANFELICE et al. 2022]. A representação das estruturas macromoleculares dos polímeros sintético descritos é mostrada na Figura 2.

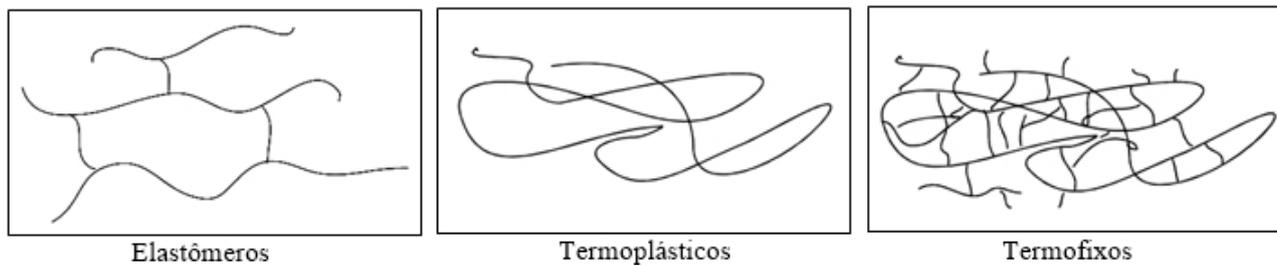


Figura 2 – Representação da estrutura macromolecular de polímeros sintéticos (adaptado de [Billmeyer 2020])

Os polímeros aditivados são materiais poliméricos que foram modificados com a adição de substâncias conhecidas como aditivos [Werken et al. 2019]. Os aditivos podem ser classificados em diferentes categorias, como estabilizadores térmicos, antioxidantes, lubrificantes, plastificantes, retardadores de chama, entre outros. Cada tipo de aditivo tem uma função específica na melhoria das propriedades do polímero, e a seleção dos aditivos adequados depende das propriedades finais que se deseja obter [Lee et al. 2016]. Os pós metálicos, como os de alumínio e titânio, podem ser classificados como aditivos de carga para polímeros, sendo incorporados na matriz polimérica durante o processo de fabricação. Tais aditivos são adicionados às matrizes poliméricas para melhorar suas propriedades mecânicas, como resistência, rigidez e dureza. Eles também podem aumentar a condutividade térmica do polímero aditivado, permitindo que o calor seja dissipado mais rapidamente. Além disso, os pós metálicos podem ajudar a reduzir a expansão térmica do material, o que pode ser útil em aplicações onde a estabilidade dimensional é importante [Rabello e Paoli 2013]. A estabilidade dimensional se refere à capacidade do material de manter suas dimensões e forma original após ser submetido a alterações de temperatura, umidade e tensões mecânicas. A estabilidade dimensional é muito importante na impressão de estruturas de drones quadricópteros. Essas estruturas são projetadas para ter uma geometria específica que permita um voo estável, com boa manobrabilidade e controle. Qualquer deformação ou mudança nas dimensões das peças pode afetar significativamente o desempenho do drone, levando a problemas como vibrações excessivas, dificuldades de controle, ou até mesmo falhas mecânicas [Quiroga e Vargas 2020]. Portanto, é fundamental que as peças impressas em 3D para drones tenham alta precisão dimensional e estabilidade estrutural para garantir a segurança e a eficiência do voo.

2.1.1 Acrilonitrila butadieno estireno

Copolímeros são decorrentes de mais de uma espécie de monômero, sendo assim, formado por, no mínimo, duas cadeias de unidades químicas idênticas (meros). A maioria dos copolímeros são amorfos, ou seja, as cadeias poliméricas não apresentam uma estrutura cristalina ordenada em seu arranjo molecular. O ABS é um copolímero predominantemente amorfo e termoplástico bastante utilizado para obter produtos leves, rígidos e moldados, como tubulações, peças automobilísticas e até em brinquedos, como os blocos de Lego® [Pereira 2019]. A Figura 3 apresenta a estrutura molecular do ABS:

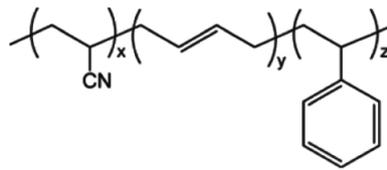


Figura 3 – Copolímero Acrilonitrila butadieno estireno.

Em 2008, com a popularização das impressoras 3D desktop de código aberto, o consumo de ABS no mercado aumentou significativamente. Essas impressoras tornaram possível imprimir suas próprias peças, o que alavancou o uso da AM através da tecnologia FDM [Federation 2015]. Na indústria, o ABS é obtido a partir da mistura de polibutadieno e estireno-acrilonitrila, que é então sintetizada para obter o copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno, ou, como é comumente conhecido, ABS, para as iniciais de seus monômeros constituintes. As características dos monômeros que compõem o ABS, bem como as suas porcentagens nas blendas (mistura física de polímeros) definem o resultado final das propriedades mecânicas do ABS, como pode ser visualizado na Tabela 1:

Tabela 1 – Características dos monômeros e porcentagens adicionadas à blenda (adaptado de [Nunes 2018]).

	<i>Acrilonitrila</i>	<i>Estireno</i>	<i>Butadieno</i>
<i>Característica do monômero</i>	<i>Resistência térmica e química</i>	<i>Moldabilidade e rigidez</i>	<i>Resistência ao impacto e ao alongamento</i>
<i>Porcentagem adicionada à blenda</i>	20 a 30%	20 a 30%	20 a 60%

O ABS é amplamente utilizado na impressão 3D de drones quadricópteros devido às suas propriedades, como resistência à tração e tenacidade, que são cruciais para garantir que o drone tenha uma estrutura forte o suficiente para suportar seu peso e outros equipamentos instalados, além de manter a estabilidade dimensional do drone durante o voo e evitar deformações causadas por mudanças de temperatura [Werken et al. 2019]. O ABS é facilmente impresso usando equipamentos de impressão 3D FDM. No entanto, é importante salientar que o ABS pode apresentar algum grau de contração e deformação durante a impressão, o que pode afetar a precisão das medidas e dimensões finais do drone. Para minimizar esses problemas, é essencial escolher a temperatura de extrusão adequada e usar uma mesa de impressão com aderência suficiente [Goh et al. 2017]. De acordo com Pereira 2019, é altamente recomendado secar o ABS antes do processamento para evitar problemas relacionados à umidade. Condições de secagem adequadas, como temperatura de aproximadamente 80 °C e tempo de secagem de 3 a 4 horas, são indicadas para garantir a remoção eficaz da umidade e obter melhores propriedades mecânicas e de processamento do material.

2.2 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas, que estão descritas nas seções subsequentes, desempenham um papel fundamental na capacidade do polímero de resistir a altas temperaturas, suportar variações térmicas e manter a estabilidade dimensional durante processos de fabricação [Rubinstein e Colby 2003].

2.2.1 Temperatura de transição vítrea

A temperatura na qual o movimento das frações moleculares da cadeia polimérica amorfa se torna expressivo é denominada temperatura de transição vítrea (T_g). Ela representa o valor de temperatura abaixo do qual um material amorfo se comporta como um sólido vítreo [Ferry 1980]. Na prática, a T_g marca a fronteira entre o estado amorfo vítreo e o estado amorfo emborrachado, que é um líquido muito rígido caracterizado por uma alta viscosidade. A transição vítrea não é uma transição termodinâmica, mas uma cinética, à qual não corresponde nenhuma mudança na disposição dos átomos/moléculas no espaço, como é o caso na transição de estado de sólido para líquido. Alterações na T_g impactam em diversas propriedades dos materiais polímeros, como seu comportamento mecânico. Polímeros amorfos devem ser processados, em média, a 100°C acima da T_g [Rubinstein e Colby 2003]. Como a T_g é correlacionada à mobilidade das cadeias poliméricas, que podem ser alteradas de acordo com a inserção de aditivos, é possível que a T_g também sofra algum tipo de alteração. Além disso, partículas metálicas podem incitar maior condutividade térmica ao polímero, promovendo a dissipação de calor. Isso ocorre devido às vibrações térmicas e aos elétrons livres na interface partícula/matriz [Bartolomei 2016].

2.2.2 Temperatura de processamento de polímeros

A temperatura de fusão (T_f) é a temperatura na qual uma substância passa do estado sólido para o estado líquido, à pressão atmosférica normal. É uma propriedade física importante para diversos materiais, incluindo os polímeros, pois afeta a sua processabilidade e as propriedades finais do material. Nos polímeros cristalinos, a T_f representa o rompimento de ligações secundárias entre as cadeias, já o rompimento de ligações covalentes primárias define a decomposição do mesmo [Rubinstein e Colby 2003]. No caso do ABS, é importante mencionar que ele é um polímero amorfo, o que significa que não possui uma temperatura de fusão definida como os polímeros cristalinos. Ao contrário dos polímeros cristalinos, que possuem uma temperatura de fusão bem definida em que passam do estado sólido para o líquido, o ABS passa por uma transição gradual de amolecimento à medida que a temperatura aumenta. No entanto, é importante observar que o ABS ainda possui uma temperatura de processamento que deve ser respeitada para evitar a degradação térmica e a perda de propriedades. Portanto, embora o ABS não tenha uma temperatura de fusão específica, é fundamental considerar as faixas de temperatura adequadas para garantir a qualidade e o desempenho desejados durante o processamento do material [Goh et al. 2017].

A temperatura de cristalização (T_c) é um processo essencial para os materiais poliméricos, no qual as moléculas se organizam em uma estrutura regular para formar cristais, conferindo maior rigidez e resistência mecânica. No caso do ABS aditivado com pós metálicos, esses pós podem atuar como centros de nucleação durante o resfriamento, promovendo a formação de pequenas regiões cristalinas [Bartolomei 2016]. A temperatura de cristalização do ABS aditivado dependerá das características específicas do metal adicionado, sua concentração e distribuição dentro da matriz polimérica. A cristalização do ABS aditivado com pós metálicos pode afetar propriedades como resistência mecânica, rigidez e estabilidade térmica, além de influenciar a morfologia da matriz polimérica. É fundamental considerar fatores como o tipo de metal, a concentração dos pós e as condições de processamento e resfriamento ao trabalhar com ABS aditivado, realizando análises e estudos para compreender e controlar adequadamente o processo

de cristalização do material [Harris et al. 2019].

2.2.3 Temperatura de degradação

A temperatura de degradação (T_d) avalia a estabilidade térmica de materiais poliméricos, pois acima dela ocorre a quebra das ligações químicas da cadeia polimérica, o que pode levar à perda de massa e redução do peso molecular do material. Para o ABS, a T_d varia de acordo com sua composição e taxa de aquecimento [Hu et al. 2012]. O primeiro monômero a se degradar é o butadieno, seguido pelo estireno e a acrilonitrila. É importante destacar que fatores como a presença de aditivos, cargas e estabilizadores térmicos também podem afetar significativamente a temperatura de degradação do ABS. Além disso, a velocidade de degradação aumenta com o aumento da temperatura, pressão e teor de acrilonitrila [Li et al. 2019]. Na Tabela 2 seguir, estão apresentadas as temperaturas do ABS de acordo com Hu et al. 2012:

Tabela 2 – Temperaturas de transição vítrea (T_g) e degradação (T_d) do ABS

	$T_g(°C)$	$T_d(°C)$
Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	100-115	300-500

2.2.4 Caracterização térmica

2.2.4.1 Termogravimetria

A Termogravimetria (TG) analisa variações na massa devido à transformações como decomposição, absorção, adsorção, vaporização, sublimação, oxidação e redução [Seifi et al. 2020]. O experimento é realizado através de uma termobalança, capaz de pesar continuamente uma amostra em função da temperatura [Ionashiro 2004]. A partir das curvas geradas, é possível inferir sobre a estabilidade térmica e a composição da amostra analisa, de acordo com a Equação 2.1 ou 2.2:

$$m = f(T) \quad (2.1)$$

$$m = f(t) \quad (2.2)$$

Onde m é a massa, T a temperatura e t o tempo. A Termogravimetria Derivada (DTG, pelo inglês Derivative Thermogravimetry), apresenta a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt). Com ela são obtidas curvas que se referem à derivada primeira da curva TG, de acordo com a Equação 2.3 ou 2.4:

$$dm/dt = f(T) \quad (2.3)$$

$$dm/dt = f(t) \quad (2.4)$$

2.2.4.2 Calorimetria exploratória diferencial

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, pelo inglês Differential scanning calorimetry) é um método termoanalítico, baseado na medição de propriedades físicas em função direta ou

indireta da temperatura (em condições controladas de temperatura). A DSC analisa a troca de calor, sendo utilizada para entender transições de fase sob influência de diferentes atmosferas, temperaturas e taxas de aquecimento/resfriamento [Ionashiro 2004]. A análise por meio da técnica DSC é capaz de determinar curvas de aquecimento e resfriamento com os recursos quantitativos da calorimetria. A temperatura é definida de forma contínua e uma ferramenta diferencial é empregada, afim de analisar o fluxo de calor na amostra. Em pressão constante, a energia interna é descrita como entalpia (H). O que se analisa é, contudo, a variação de entalpia entre dois estados, descrita pela Equação 2.5:

$$H = \int C_p \cdot dT \quad (2.5)$$

Onde C_p é a capacidade calorífica específica. Segundo Ionashiro 2004, no método DSC a área (A) abaixo da curva é diretamente proporcional à variação de entalpia e K independe da temperatura, de acordo com a Equação 2.6:

$$A = \frac{H_m}{K} \quad (2.6)$$

2.3 Propriedades mecânicas

É possível que a rigidez (resistência à deformação elástica) e resistência à tração (tensão máxima suportada pelo material antes da falha) sejam melhoradas devido à interação entre a matriz polimérica e os aditivos particulados. Tendo isso em vista, uma fratura que outrora se propagaria por todo o material, agora ao se deparar com uma estrutura particulada dispersa na matriz pode ter sua progressão suspensa. Assim, é importante garantir que haja uma dispersão uniforme do aditivo na matriz, a fim de evitar pontos concentradores de tensão, [Coleman e Khan 2006].

2.3.1 Caracterização mecânica

O ensaio de tração fundamenta-se na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado, proporcionando uma deformação do material em direção ao esforço, tendendo a alongá-lo até a fratura [Jr 2006]. Segundo Jr 2006, com o gráfico de Tensão x Deformação, é possível encontrar as propriedades de Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade, Tensão no Escoamento, Tensão na Ruptura, Deformação no Escoamento, Deformação na Ruptura etc. A tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura sob tração é calculada de acordo com a Equação 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.7)$$

Onde F é a força aplicada em uma direção ortogonal à A_0 , que representa a área da seção antes da aplicação da força. O Módulo de elasticidade relaciona a proporcionalidade entre a tensão aplicada σ e a deformação ϵ :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.8)$$

A Deformação Plástica corresponde à medida que o material continua a ser deformado além do regime elástico, promovendo uma deformação permanente e irreversível. O Limite elástico corresponde à tensão máxima que um material elástico pode suportar sem que ocorra deformações permanentes. A Ductilidade mede o grau de deformação plástica que o material suporta até fraturar. A Tenacidade mede a capacidade de um material de absorver energia até a fratura. O escoamento observado nos corpos de prova após um ensaio de tração se localiza na região de seção reduzida ("garganta"), em que a maior parcela da deformação se concentra [Jr 2006].

2.4 Análise morfológica

Investigar a morfologia de polímeros aditivados com pós metálicos é fundamental para compreender a influência desses aditivos nas propriedades do material final. A morfologia se refere à estrutura e disposição dos componentes de um material e pode ser investigada através de técnicas de microscopia [Lawes et al. 1992]. Os microscópios óptico digitais utilizam câmeras ópticas e digitais para capturar as imagens e apresentar na tela de um monitor através do seu software [LECO 2023]. A utilização de técnicas avançadas como o Digital Scanning Microscope (DSX) e o Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) pode fornecer informações detalhadas sobre a morfologia dos materiais. O DSX é uma ferramenta que permite a visualização de amostras em alta resolução e a obtenção de imagens tridimensionais da superfície. Além disso, ele pode ser utilizado para analisar a distribuição dos pós metálicos no polímero e verificar a presença de eventuais aglomerados. Já o CLSM é uma técnica que permite a análise da morfologia em três dimensões, com alta resolução e contraste. Ele é capaz de fornecer informações sobre a distribuição dos pós metálicos no polímero e a presença de aglomerados em diferentes profundidades da amostra. O microscópio confocal laser forma imagens com base na luz refletida pela amostra. Através de uma eletrônica embarcada, define-se o ponto mais alto e ponto mais baixo (eixo-Z) da área de interesse e, então, ocorre o fatiamento de imagens, possibilitando que sejam adquiridas várias imagens da mesma região com pontos diferentes no eixo-Z [Santos e Xavier 2019]. Ao objetivo principal deste trabalho, de definir o processo de produção dos filamentos poliméricos aditivados com pós metálicos, está naturalmente associado a otimização das diversas fases que os compõem, tais como a de garantir uma distribuição homogênea das partículas dispersas no produto final, qualquer que seja sua geometria. Homogeneidade diz respeito tanto à uniformidade da dispersão das partículas, em todas as partes do componente fabricado, quanto à do tamanho das mesmas.

2.5 Produção de filamentos poliméricos aditivados

Um filamento consiste em um polímero termoplástico e é fabricado na forma de um fio contínuo enrolado em um carretel. É esse fio que é usado para alimentar a impressora 3D durante o processo de impressão e é derretido pela extrusora para criar as camadas que compõem a peça a ser impressa [Nunes 2018]. Geralmente, os filamentos são produzidos a partir do derretimento de pellets, que são grânulos geralmente de 7 a 23 mm de diâmetro [Oliveira 2019]. A preparação de filamentos poliméricos aditivados precisa viabilizar uma distribuição uniforme do aditivo na matriz polimérica, além de uma boa adesão da interface entre os dois componentes

[Ates et al. 2020]. SANFELICE et al. 2022 afirma que, entre as técnicas utilizadas na síntese de polímeros aditivados, destacam-se: extrusão termoplástica, intercalação por fusão, polimerização *in situ*, mistura em solução, eletrofiação, reação sol-gel, *spray mixing* e *hand-lay-up*.

A extrusão termoplástica é uma das técnicas mais empregadas tratando-se de processo de transformação de polímeros. Em relação a extrusão de mistura de polímeros aditivados, é preciso garantir que esteja bem misturada e homogeneizada durante o processo [Miranda 2018]. O processo de extrusão tem como requisitos: transporte homogêneo do material, produção de um filamento fundido termicamente e mecanicamente de forma homogênea e evitar a degradação do material. Este processo deve suscitar a boa distribuição das aditivos no polímero [Miranda 2018]. Segundo Gale 1997, é preciso garantir um bom desempenho no processo de extrusão para atingir uma mistura homogênea. Existem dois tipos de mistura: a mistura dispersiva e a mistura distributiva. O caráter da mistura é definido pelas propriedades dos materiais, como a viscosidade e a tensão superficial, e dos parâmetros de operação, como velocidade e temperatura. A mistura dispersiva é atingida quando altas forças de cisalhamento são aplicadas aos aditivos. Já a mistura distributiva é obtida através de algum processo de mistura de “agitação”, que também pode ser realizado em um outro estágio da preparação dos aditivos [Miranda 2018]. As extrusoras de rosca única podem promover a aparição de aglomerados de partículas, sendo essa uma desvantagem na obtenção de boas dispersões. Isso acontece porque os aditivos em pó fino interferem na fusão dos pellets. No entanto, é possível obter um bom resultado a depender do tamanho da partícula do aditivo e da forma usada para realizar a pré mistura mecânica (um bom exemplo é um misturador de alta velocidade) [Gale 1997]. A Figura 4 apresenta o desenho esquemático de uma extrusora de rosca única:

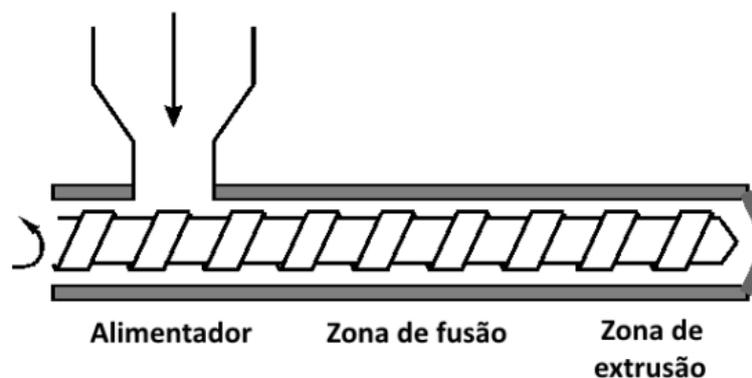


Figura 4 – Esquemático de uma extrusora de parafuso único (adaptado de [Scott 2015]).

2.5.1 Manufatura aditiva

A Manufatura aditiva (AM) é um método de manufatura camada por camada, fabricando peças por fusão ou deposição de materiais, que podem ser metais, cerâmicas, plásticos ou até mesmo material orgânico [Inácio et al. 2020]. Esse método se tornou popular no âmbito da engenharia devido ao baixo custo, a viabilidade de arquiteturas complexas e ao curto tempo de produção. Dentre as técnicas de impressão 3D, podemos citar a Modelagem por Deposição Fundida (do inglês Fused Deposition Modeling, FDM), estereolitografia (Stereolithography – SLA), sinterização seletiva por laser (Selective laser sintering – SLS) e jato de tinta (ou inkjet printing).

A técnica FDM destaca-se por ser bastante utilizada para a fabricação de peças com polímeros termoplásticos [Fernandes et al. 2022]. Muitos desafios com a impressão 3D estão relacionados não apenas à complexidade da geometria do objeto impresso, mas, também, às propriedades dos materiais (térmicas, anisotrópicas, porosidade, estabilidade a longo prazo, custo, resistência à corrosão, etc.) que muitas vezes é insuficiente para imprimir peças com funções estruturais ou mecânicas [Volpato 2017].

Na técnica FDM, o princípio de extrusão é utilizado para derreter um polímero termoplástico, que é então depositado pelo cabeçote de impressão. Quando se atinge a temperatura de derretimento, o mesmo passa a ser um material com viscosidade característica. Esse processo de extrusão cria camadas sucessivas do material fundido que se solidificam, permitindo a criação de objetos tridimensionais com precisão de detalhes [Popescu et al. 2018]. A Figura 5 apresenta o processo FDM:

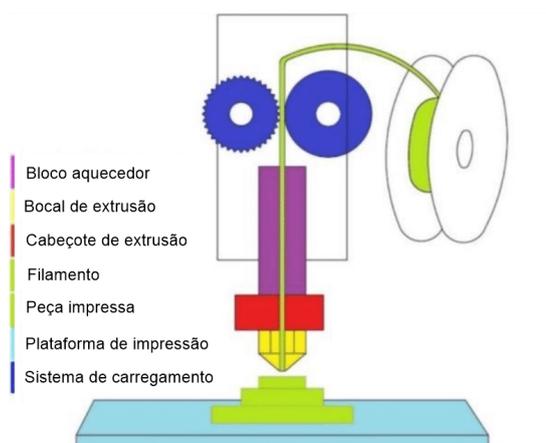


Figura 5 – Desenho esquemático do processo FDM (adaptado de [processing 2015]).

Dentre as demais técnicas de impressão existentes no mercado, FDM é o processo que utiliza a forma mais acessível se tratando de impressão 3D [Martins et al. 2018]. Há um vasto acesso a informação em fóruns online, sendo que a maioria das impressoras 3D deste tipo possuem componentes baratos e fáceis de serem montados. Neste contexto, os filamentos poliméricos aditivados produzidos neste trabalho pretendem ser aplicados dentro dos limites permitidos pela tecnologia de impressão FDM. Ademais, o emprego da técnica FDM para fabricar drones impressos em 3D é uma tendência crescente na indústria aeronáutica. Essa tecnologia permite a criação de drones personalizados, mais leves e resistentes, além de possibilitar designs complexos que seriam desafiadores de serem obtidos com outras técnicas de produção. Dessa forma, é possível atingir uma produção mais ágil e econômica, reduzindo o desperdício de material utilizado e tornando a produção dos drones mais sustentável [Rayegani et al. 2019]. A fabricação de novos filamentos poliméricos aditivados com ABS é um tópico crescente na academia, algo que pode ser atribuído à expansão da AM em vários campos, como medicina e indústria aeroespacial. Dessa forma, a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais se torna uma peça chave para o avanço contínuo da impressão 3D e para a produção de peças com desempenho superior. A adição de pós metálicos ao polímero pode trazer vantagens significativas para o processo de impressão 3D. Um desses benefícios é o aumento da condutividade térmica do material, o que pode ajudar a dissipar o calor durante a impressão e prevenir problemas como deformação e

delaminação das camadas. Por outro lado, a adição de pós metálicos pode afetar a viscosidade do filamento, tornando-o mais difícil de extrudar e causando problemas como entupimento da extrusora e deformação da peça impressa [Valino et al. 2019]. Por essa razão, é importante encontrar uma proporção adequada de pós metálicos a ser adicionada ao polímero, levando em conta as propriedades desejadas e as limitações do processo de impressão. De acordo com Marchini 2018, é recomendada uma concentração entre 5% e 10% em peso de pó metálico ao polímero para obter um equilíbrio ideal entre propriedades mecânicas e processabilidade do material. Adicionalmente, é fundamental ajustar corretamente os parâmetros de impressão, como temperatura e velocidade de extrusão, para garantir a precisão dimensional e um bom acabamento superficial da peça, sendo suave e uniforme, sem deformações ou falhas. Além disso, a peça deve ser capaz de suportar as cargas e tensões esperadas sem se deformar ou quebrar.

2.6 Drones quadricópteros

Um drone é uma aeronave não tripulada, controlada remotamente ou por meio de software de computador. Os drones são divididos em diversos tipos com características e aplicações distintas. O mais popular é o drone quadricóptero, que é utilizado principalmente em fotografia e filmagem aérea, inspeção de estruturas, mapeamento e monitoramento ambiental. Existem ainda os hexacópteros, octocópteros, drones com asa fixa, drones subaquáticos, entre outros, cada um com peculiaridades relacionadas à quantidade e disposição das hélices, que afetam sua estabilidade, manobrabilidade, autonomia de voo e capacidade de carga útil [Trindade 2016]. No Brasil, drones com peso superior a 250g exigem registro na ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e regulamentação específica, enquanto drones com peso inferior não precisam de registro. O uso comercial exige licença emitida pela ANAC, enquanto o uso recreativo não exige licença, mas requer a observância das normas de segurança. No mercado de drones, a DJI é uma das empresas mais conhecidas e seus modelos são amplamente utilizados em aplicações diversas, como fotografia e filmagem profissional, mapeamento aéreo, inspeção de estruturas, etc [Vasconcelos e Mello 2019]. Entre os modelos de drones quadricópteros mais vendidos estão o DJI Mavic Air 2, DJI Phantom 4 Pro V2.0 e DJI Mini 2. O drone é uma aeronave rotativa que utiliza dois ou mais rotores para gerar força de propulsão e sustentação, possuindo configuração de decolagem e pouso vertical. É crucial o controle da velocidade angular de cada rotor para manter a aeronave no ar. O quadricóptero é controlado por quatro motores elétricos, responsáveis por gerar impulso vertical e torques a partir de suas velocidades angulares, o que possibilita o movimento constante das hélices [Leishman 2000]. A Figura 6 apresenta os movimentos translacionais e rotacionais do quadricóptero.

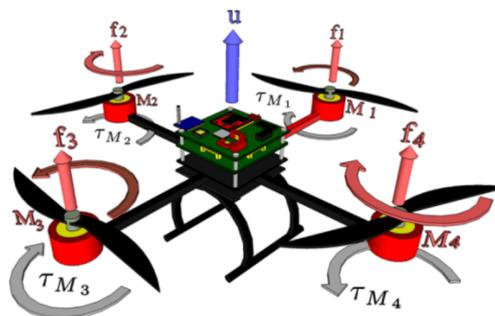


Figura 6 – Dinâmica de um drone quadricóptero (adaptado de Chen et al. 2016).

Cada motor de um quadricóptero produz uma força proporcional ao quadrado de sua velocidade angular, representada por $f_i = k_i \omega_i^2$ (em N), onde ω_i é a velocidade angular de cada motor em rad/s e k_i é uma constante de proporcionalidade em Ns^2 . Os motores são dispostos em pares com rotações opostas, garantindo equilíbrio nos efeitos giroscópicos e torques aerodinâmicos. A força impulsiva total u em N é dada pela soma das forças de cada motor. O momento angular de arfagem, τ_θ , é determinado pela diferença $f_1 - f_3$, enquanto o momento angular de rolagem, τ_ϕ , é dado por $f_2 - f_4$. O momento angular de guinada, τ_ψ , é a soma dos momentos de reação de cada motor. Para manobras quasi-estáticas, pode-se aproximar $\tau_{M_i} \approx \tau_{arrasto}$, onde $\tau_{arrasto}$ é o torque de arrasto aerodinâmico dado por $\tau_{arrasto} = \frac{1}{2} \rho A v^2 l$. Com essa restrição, o controle do movimento pode ser obtido pelo aumento ou redução das velocidades dos motores apropriados. As manobras quasi-estáticas em drones são realizadas por meio do controle das velocidades dos motores, mantendo o equilíbrio do sistema. Para analisar essas manobras, utiliza-se o princípio de d'Alembert, que estabelece que o somatório das forças externas e das forças inerciais em um sistema estático é igual a zero. Além disso, é necessário considerar as forças geradas pelos motores e as externas que atuam no sistema, como a força gravitacional e as de arrasto aerodinâmico. Uma análise estrutural estática pode ser feita para garantir que o drone seja capaz de suportar as forças geradas durante as manobras. Isso envolve a análise da distribuição de cargas nas estruturas do drone e a determinação das forças que atuam em cada componente [Beard e McLain 2012]. Os materiais mais utilizados na impressão 3D de peças de drones incluem o ABS e o Nylon [Shahmoradi et al. 2020]. Na Tabela 3 é feita uma comparação entre os drones quadricópteros mais populares da empresa DJI, uma empresa consolidada no mercado de drones:

Tabela 3 – Tabela comparativa de drones quadricópteros mais populares, [DJI].

	DJI Mavic Air 2	DJI Phantom 4	DJI Mini 2
Comprimento diagonal	350 mm	350 mm	213 mm
Peso	570 g	1375 g	249 g
Autonomia de voo	34 minutos	28 minutos	31 minutos
Alcance máximo	6,2 km	7 km	10 km
Resolução da câmera	4K (3840x2160)	4K (4096x2160)	4K (3840x2160)
Velocidade máxima	68,4 km/h	72 km/h	57,6 km/h
Empuxo máximo	28,2 N	59,4 N	13,8 N
Carga útil máxima	500 g	800 g	249 g
Aplicações	Fotografia e filmagem profissional	Fotografia e filmagem profissional	Uso recreativo

A combinação de análises experimentais e numéricas é essencial para a otimização do processo de impressão 3D e design de peças com alto desempenho e durabilidade. No caso de peças impressas em 3D, podem ocorrer variações de densidade e porosidade e desalinhamento de camadas na microestrutura da peça, promovendo a concentração de tensões em certas áreas, aumentando a possibilidade de falha sob carga. A análise numérica é uma ferramenta útil para avaliar a concentração de tensões e as regiões mais críticas da peça, que afetam diretamente o desempenho mecânico, [Werken et al. 2019]. O princípio de St. Venant é um conceito importante na análise estrutural que descreve o comportamento de uma estrutura quando sujeita a cargas aplicadas em sua região distante. Segundo esse princípio, os efeitos de deformação e tensão resultantes dessas cargas se dissipam rapidamente ao longo da estrutura, permitindo que a

resposta da estrutura seja determinada principalmente pela região local onde as cargas são aplicadas [Beard e McLain 2012]. Na análise estrutural realizada neste trabalho, aplica-se esse conceito para estabelecer as relações de restrição da geometria, que serão abordadas no próximo capítulo.

2.7 Análise estrutural

A simetria é uma característica comum em muitas estruturas de drones quadricópteros, em que a configuração e as propriedades estruturais são repetidas em relação a um ou mais planos de simetria. Um dos principais conceitos envolvidos na análise estrutural considerando a simetria é a redução da modelagem. Ao identificar os planos de simetria, é possível modelar apenas uma parte da estrutura e replicar as condições e propriedades estruturais nas demais partes simétricas. Essa abordagem reduz o tamanho do modelo e, conseqüentemente, o esforço computacional necessário para a análise. Outro conceito importante é a aplicação correta das condições de contorno simétricas. Os planos de simetria são usados para definir as condições de contorno, como restrições de deslocamento, em partes simétricas do modelo. Essas condições refletem a simetria estrutural e ajudam a simplificar a análise, eliminando a necessidade de modelar detalhes simétricos redundantes. A consideração da simetria também tem um impacto significativo na distribuição de tensões e deformações na estrutura tal que, sob cargas simétricas, é possível inferir que as tensões e deformações nas partes simétricas serão iguais [Kassimali 2016]. Considerando que os quatro braços e hélices são idênticos e posicionados simetricamente em relação ao centro do corpo, é possível aplicar as cargas e condições de contorno em um único braço e considerar que os demais braços são idênticos, inferindo-se, assim, que as tensões serão iguais nos quatro braços. A análise estrutural estática é uma etapa crucial no projeto e na verificação de estruturas. O software Ansys é amplamente utilizado para realizar esse tipo de análise. Existem duas abordagens principais para a análise estrutural no Ansys: análise linear e análise não linear. A análise linear é uma técnica simplificada que assume que o comportamento da estrutura é linear, ou seja, as deformações são proporcionais às cargas aplicadas. Nesse método, a rigidez das estruturas não é alterada durante a análise. A análise linear é adequada para situações em que as deformações são pequenas e as cargas aplicadas estão dentro da faixa elástica do material [Lee 2021]. Uma das principais vantagens da análise linear é a sua eficiência computacional, pois requer menos tempo de processamento. No entanto, a análise linear tem suas limitações, especialmente quando se lida com estruturas sujeitas a grandes deformações, materiais não lineares ou contato entre peças. Softwares de simulação numérica, como o Ansys, que é utilizado neste trabalho, são baseados no método de elementos finitos [Miwa 2022].

2.7.1 Método de elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) é baseado nas equações da mecânica dos sólidos, que descrevem o comportamento mecânico dos materiais. Essas equações são compostas por equações de equilíbrio, equações de compatibilidade de deformação e equações constitutivas [Bueno et al. 2021]. Esse método é empregado com a finalidade de determinar o estado de tensão e deformação de um sólido que está sujeito a cargas externas, por meio da formulação baseada no método dos deslocamentos clássico. Essa abordagem utiliza a equação de equilíbrio para particionar a geometria em vários elementos finitos com dimensões finitas, com o propósito

de identificar os graus de liberdade e a interação com os elementos vizinhos. De acordo com Vaz 2011, o processo tem início com as equações de compatibilidade, que se fundamentam nos campos de deslocamento de um sólido, descritos pelas funções $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$ e $w(x, y, z)$ nos eixos x , y e z . A partir desses campos de deslocamento, obtêm-se as componentes de deformação.

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, & \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, & \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, & \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, & \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases}$$

Vaz 2011 explica que as deformações infinitesimais lineares no campo são representadas por ϵ_i , e as deformações infinitesimais angulares são representadas por γ_{ij} . As derivadas podem ser combinadas na equação $\epsilon = Lu$, na qual ϵ é o vetor de deformações, L é a matriz de operação da diferenciação e u é o vetor de componentes de deslocamento. As deformações podem ser determinadas a partir do campo de deslocamentos por meio de operações de diferenciação. Para modelar elementos finitos mais simples, considera-se que o material utilizado é homogêneo, uniforme e isotrópico, sob regime elástico, submetido a pequenos deslocamentos, rotações e deformações, com sistema linear e princípio de superposição de efeitos, e com simetria do elemento avaliado. Com base nessas considerações, é possível utilizar a lei de Hooke e o efeito de Poisson, rearranjando as relações constitutivas. As relações constitutivas para um material isotrópico linear elástico, considerando pequenas deformações, rotações e deslocamentos, podem ser escritas em forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

As variáveis ϵ_i e γ_{ij} são empregadas para representar as deformações lineares e angulares, respectivamente, no campo de interesse. As grandezas σ_i e τ_{ij} , para $i \neq j$, referem-se às tensões normais e de cisalhamento, respectivamente. O parâmetro E denota o módulo de elasticidade do material analisado, enquanto ν representa o coeficiente de Poisson. A Equação 2.9 é simplificada para $\epsilon = \mathbf{D}\sigma$ e $\sigma = \mathbf{C}\epsilon$ na forma matricial, onde \mathbf{D} é a matriz de relação constitutiva direta e \mathbf{C} é a matriz inversa constitutiva para materiais isotrópicos e lineares elásticos em estruturas tridimensionais. A matriz \mathbf{D} representa a relação constitutiva direta e \mathbf{C} é a matriz inversa constitutiva para materiais isotrópicos e lineares elásticos em estruturas tridimensionais, tal que $\mathbf{D}^{-1} = \mathbf{C}$. Essas equações permitem modelar um elemento finito sólido tetraédrico parabólico. Para calcular a rigidez geral do elemento finito sólido, \mathbf{K} , que é usada na análise estática de $\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{d}$, a matriz \mathbf{K} é obtida por $\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \mathbf{V}$, em que \mathbf{B} é a matriz que transforma o deslocamento nodal em deformação real no interior do elemento, \mathbf{C} é a matriz de relação constitutiva e \mathbf{V} é a matriz de volume do elemento finito [Azevedo 2003].

2.7.2 Análise não linear

A análise não linear é uma técnica avançada amplamente utilizada para simular o comportamento de estruturas sujeitas a deformações grandes e materiais não lineares. Nela, as não

linearidades presentes em um sistema estrutural são consideradas, o que permite uma modelagem mais precisa do comportamento real da estrutura. Entre as não linearidades mais comuns estão as grandes deformações, a plasticidade, o contato entre peças e a resposta não proporcional às cargas aplicadas. Uma das aplicações da análise não linear é a simulação de materiais não lineares, como o ABS. O ABS exibe um comportamento não linear devido a sua natureza viscoelástica, sendo capaz de suportar deformações plásticas antes de falhar [Lee 2021]. Durante a análise, as deformações plásticas do ABS são consideradas, assim como a resposta não linear do material sob diferentes níveis de carga. Isso permite prever com maior precisão a capacidade de carga da peça, identificar possíveis áreas de concentração de tensão ou deformação excessiva e otimizar o projeto para melhorar a resistência e durabilidade da peça impressa em 3D. A ferramenta "Large Deflection" (em português, grande deformação) no Ansys é uma opção disponível para a análise não linear de estruturas sujeitas a grandes deformações. Quando ativada, essa ferramenta permite que o software leve em consideração a não linearidade geométrica, ou seja, as deformações que ocorrem durante o carregamento de uma estrutura. Na análise linear, assume-se que as deformações são pequenas o suficiente para que as relações lineares entre tensão e deformação sejam válidas [Azevedo 2003]. No entanto, em muitos casos práticos, as deformações podem ser significativas e a aplicação da análise linear pode levar a resultados imprecisos. Ao ativar essa opção, o Ansys realiza uma reavaliação contínua da geometria deformada da estrutura durante a análise, atualizando as posições dos nós e elementos de acordo com as deformações. Isso permite uma representação mais precisa do comportamento da estrutura, levando em consideração as interações não lineares entre os componentes [Lee 2021].

2.7.3 Qualidade da malha

Na análise por elementos finitos, a malha é uma representação discreta da geometria da estrutura. Ela é dividida em elementos finitos e conectados por nós. Os elementos da malha são polígonos ou poliedros com características geométricas, como vértices, arestas e faces, que representam o comportamento simplificado da estrutura, considerando as propriedades do material e as condições de contorno. Os nós são pontos discretos dentro dos elementos da malha, que definem as coordenadas espaciais e as deformações nos elementos. Cada nó é associado a uma variável, como deslocamento determinado pelas equações da análise estrutural. Os nós são conectados uns aos outros por meio de elementos, formando uma rede que representa a estrutura completa. A escolha adequada dos elementos de malha e a distribuição dos nós são importantes para obter resultados precisos [Ansys 2012]. A densidade da malha e a forma dos elementos devem ser selecionadas com base na geometria da estrutura, nas características do problema e nos requisitos de precisão. Para geometrias complexas, como objetos tridimensionais com formas irregulares ou detalhes intrincados, o uso de elementos tetraédricos é comum no Ansys. Os elementos tetraédricos são poliedros de quatro faces, semelhantes a um tetraedro. Eles são flexíveis e se adaptam bem a geometrias complexas, permitindo capturar detalhes e curvas suaves. Os elementos hexaedros são poliedros de seis faces, semelhantes a um cubo, adequados para geometrias regulares e retangulares, pois se encaixam naturalmente nessas formas. Quando a geometria possui regiões dominadas por elementos hexaedros, a malha hexaédrica pode fornecer uma solução mais eficiente e precisa, reduzindo o número total de elementos necessários [Ansys 2012]. Ao selecionar entre elementos tetraédricos e hexaedros, é importante considerar a qualidade da malha, que se refere à uniformidade e regularidade dos

elementos. Elementos com formas irregulares ou distorcidas podem resultar em imprecisões nos resultados da análise. Os elementos tetraédricos têm maior flexibilidade para se adaptar a geometrias complexas, mas podem levar a uma malha com qualidade inferior em comparação com os hexaedros. Outro conceito importante é a eficiência computacional. Malhas tetraédricas podem exigir mais elementos para representar uma geometria complexa em comparação com as malhas hexaédricas, o que aumenta o tempo de processamento e a demanda computacional [Lee 2021]. Existem vários critérios de qualidade de malha que ajudam a avaliar a adequação da discretização da estrutura em elementos finitos. Um desses critérios é o *skewness*.

2.7.3.1 *Skewness*

O *skewness* é um parâmetro utilizado para medir a distorção ou não-idealidade dos elementos finitos em uma malha, proporcionando uma medida da uniformidade e regularidade dos elementos. Idealmente, um elemento com *skewness* próximo a zero indica uma forma regular e bem ajustada, enquanto um *skewness* alto revela uma distorção significativa, podendo resultar em imprecisões nos resultados da análise. A presença de elementos com *skewness* alto na malha pode acarretar problemas numéricos, tais como instabilidades, dificuldades de convergência e resultados imprecisos [Ansys 2012]. Isso ocorre porque esses elementos distorcidos podem introduzir erros consideráveis na representação do comportamento da estrutura. Outros critérios de qualidade de malha podem ser considerados, como a relação de aspecto, que é a razão entre o comprimento e a altura de um elemento, sendo que uma relação de aspecto alta pode indicar uma malha distorcida e resultar em resultados imprecisos. A razão de estiramento é outro critério relevante, que mede a diferença entre os comprimentos dos lados de um elemento, indicando se há distorção. A ortogonalidade refere-se à perpendicularidade entre as arestas dos elementos, onde elementos não ortogonais podem resultar em erros de discretização que afetam a precisão dos resultados. Neste trabalho será utilizado o critério *skewness* [Lee 2021].

2.7.4 Convergência

A convergência da malha é um conceito fundamental na análise de elementos finitos, indicando a capacidade da malha de fornecer resultados cada vez mais próximos da solução exata à medida que sua densidade é aumentada. Isso implica que, à medida que a malha é refinada, as soluções numéricas se aproximam cada vez mais da solução real do problema. A importância da convergência da malha está diretamente relacionada à precisão dos resultados obtidos na simulação. Se a malha não for suficientemente refinada, os resultados podem ser imprecisos e não refletir corretamente o comportamento real da estrutura. Por outro lado, uma malha excessivamente refinada pode resultar em custos computacionais elevados e um tempo de processamento prolongado [Azevedo 2003]. Em análises com material não linear, a malha utilizada na análise estrutural desempenha um papel ainda mais crucial. Isso ocorre devido à sensibilidade do comportamento não linear aos elementos finitos e à discretização da estrutura. Quando há grandes deformações e redistribuição de tensões ao longo da estrutura, é essencial contar com uma malha adequada que capture com precisão os gradientes de tensão e deformação nos pontos críticos. Caso a malha seja grosseira ou insuficientemente refinada, a resposta não linear do material pode não ser representada corretamente, comprometendo a precisão e a confiabilidade dos resultados. Além disso, a escolha da malha também influencia a eficiência computacional da análise [Ansys 2012]. Malhas excessivamente densas aumentam o tempo de

processamento e a demanda de recursos computacionais, enquanto malhas pouco densas resultam em resultados imprecisos ou até mesmo em erros numéricos. Outro aspecto relevante é que uma malha muito densa pode gerar singularidades, que são pontos ou regiões com gradientes extremos de tensão ou deformação, causadas pela discretização da malha e que não refletem o comportamento real da estrutura. Embora uma malha densa capture com precisão as variações locais, em regiões críticas como cantos afiados ou concentração de tensões os elementos finitos muito pequenos podem superestimar as tensões ou deformações. Isso ocorre porque a distribuição real é mais suave e gradual, mas a malha densa não a representa adequadamente e surgem singularidades que comprometem a precisão e a interpretação correta dos resultados. Para lidar com isso, a análise de sensibilidade de malha é utilizada. Essa análise permite identificar e otimizar áreas críticas, considerando critérios de convergência, refinando a malha em regiões com gradientes significativos de tensão ou deformação [Lee 2021]. O critério de convergência é um parâmetro fundamental na análise estrutural por elementos finitos, que verifica se os resultados estão convergindo para uma solução precisa. Por exemplo, no critério de convergência de deformação, verifica-se se as deformações estão convergindo à medida que a malha é refinada. Compara-se as deformações em diferentes tamanhos de malha e busca-se diferenças aceitáveis. Caso as deformações não mostrem uma tendência clara de convergência, é necessário refinar ainda mais a malha. A convergência é alcançada quando as deformações ou tensões normais convergem para valores consistentes e estáveis à medida que a malha é refinada. A escolha dos critérios de convergência depende da natureza do problema e dos objetivos da análise estrutural [Lee 2021].

2.7.5 Análise de otimização

A otimização topológica é uma metodologia eficaz para aprimorar a eficiência e o desempenho de estruturas, possibilitando a geração de geometrias otimizadas. Um método amplamente utilizado nesse contexto é conhecido como Método SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*, em português, Material Sólido Isotrópico com Penalização). Essa abordagem tem como objetivo encontrar a distribuição ideal de material em uma estrutura, com o intuito de maximizar sua rigidez, levando em consideração restrições de volume. O Método SIMP se baseia em uma formulação matemática que penaliza regiões com alta densidade de material, permitindo a redistribuição otimizada de material nas regiões menos solicitadas. Essa abordagem é governada por uma variável de projeto denominada "densidade" (ρ), a qual varia de 0 a 1 e representa a fração do material sólido presente em cada ponto da estrutura. A densidade 1 indica a presença total de material sólido, enquanto a densidade 0 indica que o material foi totalmente removido [Lewiński et al. 2013]. A função objetivo do Método SIMP consiste em maximizar a rigidez da estrutura, geralmente representada pela soma das tensões de von Mises ponderadas pelos volumes elementares. A rigidez (K) é expressa por meio da seguinte equação:

$$K = \int (\rho^p \cdot E) \cdot \epsilon dV \quad (2.10)$$

Onde p é um parâmetro que controla a penalização das regiões com alta densidade de material (normalmente $p=3$ ou $p=4$), E é o módulo de elasticidade do material e ϵ representa a deformação. O objetivo é encontrar a distribuição de densidade que maximize a rigidez, sujeita a restrições de volume, carga e outras restrições específicas do problema em questão

[Bendsoe e Sigmund 2003]. A maximização da rigidez é uma função objetivo comumente adotada na otimização topológica, uma vez que uma estrutura mais rígida é capaz de suportar cargas de maneira mais eficiente e minimizar deformações. Neste trabalho adotou-se a maximização da rigidez como função objetivo, contudo, é importante ressaltar que outros objetivos também podem ser considerados, como a minimização do peso, a redução dos deslocamentos máximos ou a otimização das frequências naturais [Belegundu e Chandrupatla 2019]. O método de elementos finitos desempenha um papel fundamental na otimização topológica com a abordagem SIMP. Ele é utilizado para calcular as tensões e deformações em diferentes configurações da estrutura, levando em consideração as restrições de volume e carga. Com base nessas informações, a distribuição de densidade do material é atualizada para maximizar a rigidez da estrutura. Esse método permite obter análises precisas das tensões e deformações, identificando as regiões onde há alta concentração de material. Assim, o método SIMP otimiza a distribuição de densidade, removendo material onde não é necessário e redistribuindo-o nas regiões mais solicitadas. Essa combinação de técnicas resulta em geometrias otimizadas que proporcionam estruturas mais eficientes e de alto desempenho em diversas aplicações, [Bendsoe e Sigmund 2003].

3 Metodologia

Neste estudo, foram escolhidos pellets de ABS virgem da empresa 3D Lab para compor a matriz polimérica. Para o reforço, foram utilizadas micropartículas de alumínio e titânio, na escala de $500nm$ a $2\mu m$.



Figura 7 – *Materiais utilizados na produção dos filamentos.*

3.1 Processo de fabricação do filamento

O equipamento utilizado é composto por uma extrusora monorosca (Fig. 8a), uma resfriadora e tracionadora (Fig. 8b), a qual é utilizada para tracionar, resfriar e mensurar o diâmetro do filamento e uma enroladora de filamentos (Fig. 8c), que é utilizada para tornar o processo de enrolamento do filamento mais controlado, rápido e limpo, evitando que o filamento fique embaraçado.

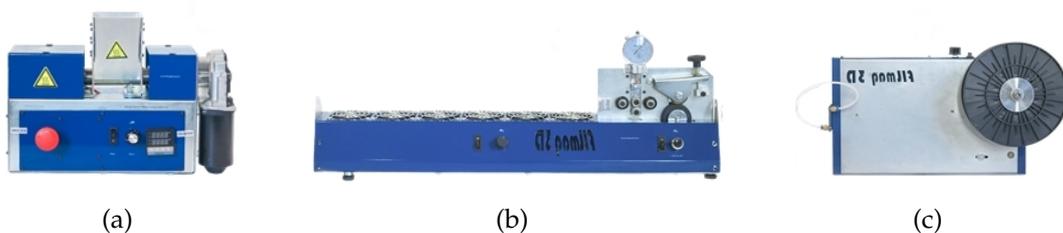


Figura 8 – (a) *Extrusora Filmaq3D CV*, (b) *Resfriadora e tracionadora*, (c) *Enroladora de filamentos* (adaptado de [Filmaq3D 2023]).

Com os primeiros testes realizados na extrusora, observou-se que o pó metálico não estava aderindo ao pellet completamente, tendendo a se acumular no funil alimentador. Para evitar esse efeito, foi preciso misturar o material antes de passar pelo processo de extrusão. Dois métodos de mistura diferentes foram testados: mistura mecânica por meio de um moinho de esferas e mistura simples através de solvente seguida de agitação mecânica com um agitador industrial. Nesse

sentido, foi possível avaliar qual método de mistura se mostrou mais eficiente para promover a mistura do pó metálico ao pellet, a ser discutido no próximo capítulo (4).

3.1.1 Mistura simples

O método de mistura simples consiste na dispersão das partículas em solução polimérica, seguida da evaporação do solvente. O resultado desse processo é a formação de uma estrutura intercalada [Kshetri et al. 2021]. A desvantagem desse método é que não é possível preparar o material com composição e estruturas controladas [SANFELICE et al. 2022]. Neste trabalho, utilizou-se a acetona Supelco EM Sure ACS como solvente na mistura dos pellets de ABS e pó de alumínio. Após a mistura dos componentes e completa evaporação do solvente, o material resultante foi picotado em tamanhos variando de 1 a 2cm e transferido para o agitador industrial, onde prosseguiu-se com as etapas subsequentes do processo.

O agitador industrial Hamilton Beach Modelo HMD200 de 230V 60 Hz foi empregado na tentativa de realizar uma mistura mecânica que demandasse menos tempo de agitação do que o moinho de esferas. Foram feitas três tentativas de processamento do material com o agitador, todas realizadas em 30 minutos cada. O material foi inserido no equipamento conforme a Fig.9. Três modos de velocidade foram selecionados no equipamento, 13,000 rpm, depois 16,000 rpm e 18,000 rpm.



Figura 9 – Agitador industrial utilizado.

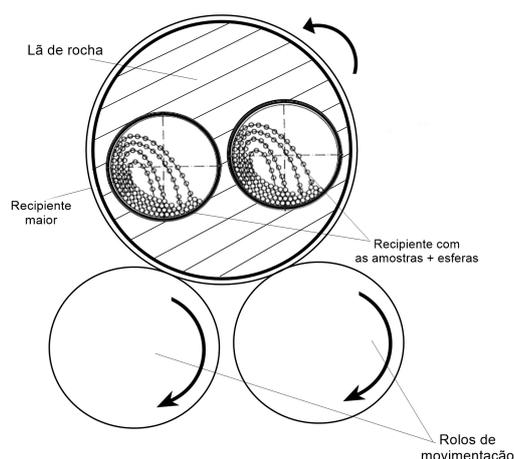
3.1.2 Moinho de esferas

Um moinho de esferas é um dispositivo que, por meio de rotação, promove a sucessiva colisão de esferas, proporcionando a miscibilidade dos materiais. Para iniciar o experimento com o moinho de esferas, foram separados os pellets de ABS, denominados Amostra 1. As Amostras 2-4 contém variações de porcentagem em peso de pó de alumínio e pellets de ABS, bem como as Amostras 5-6 contém variações de porcentagem em peso de pó de titânio e pellets de ABS, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição das misturas de ABS e metais.

Amostras	ABS	% Alumínio	% Titânio
ABS 100%	100g	-	-
ABS + 2,5% Al	100g	2,5	-
ABS + 5% Al	100g	5	-
ABS + 7,5% Al	50g	7,5	-
ABS + 2,5% Ti	100g	-	2,5
ABS + 5% Ti	100g	-	5

Os pellets de ABS e os aditivos foram colocados cada qual dentro de um recipiente fechado inserido no moinho, juntamente com 1kg de esferas de aço. Como o espaço do recipiente precisou ser reduzido para que o processo da mistura mecânica fosse mais eficiente, o recipiente que continha as amostras era menor que o moinho em si, sendo necessário preencher o espaço excedente. Para esse preenchimento utilizou-se lã de rocha, pois é um excelente isolante térmico, além de ser quimicamente neutro, o que evitaria qualquer acidente por composto pirotécnico caso os aditivos vazassem dos recipientes durante o processo de rotação do moinho. O moinho rotacionou por 36 horas para cada amostra. O desenho esquemático apresentado na Figura 11 ilustra esse processo.

**Figura 10** – Esquemático do moinho de esferas.**Figura 11** – Moinho de esferas utilizado.

3.1.3 Processo de extrusão

Antes de levar os pellets para a extrusão, foi realizada a secagem das amostras em uma estufa a uma temperatura de 80°C por 4 horas. Conforme apresentado na Figura 8, a extrusora Filmaq3D CV foi utilizada para fabricação dos filamentos, com bico extrusor de 1,75 mm. De acordo com o fabricante, a taxa de extrusão é de 2,2 m/min ou 350 g de filamento por hora e a velocidade da rosca de alimentação é de 0 a 30 rpm. No processo de extrusão, os pellets aditivados foram introduzidos no bocal alimentador da extrusora, como mostra a Figura 12a. Em seguida, o material é arrastado ao longo do parafuso e aquecido até atingir a sua temperatura de processamento. Simultaneamente, a homogeneização do material ocorre e o mesmo é pressurizado e forçado a passar pelo canal até o bico extrusor, onde adquire então a geometria do bico, apresentado na Figura 12b. O filamento formado é então conduzido pela resfriadora até a tracionadora e enroladora, onde é enrolado no carretel de forma ordenada para, então, ser utilizado na impressora 3D (13). Assim que o processo de produção do filamento é finalizado, o carretel é guardado imediatamente em recipiente vedado, contendo sílica, com a finalidade de evitar a absorção de umidade.

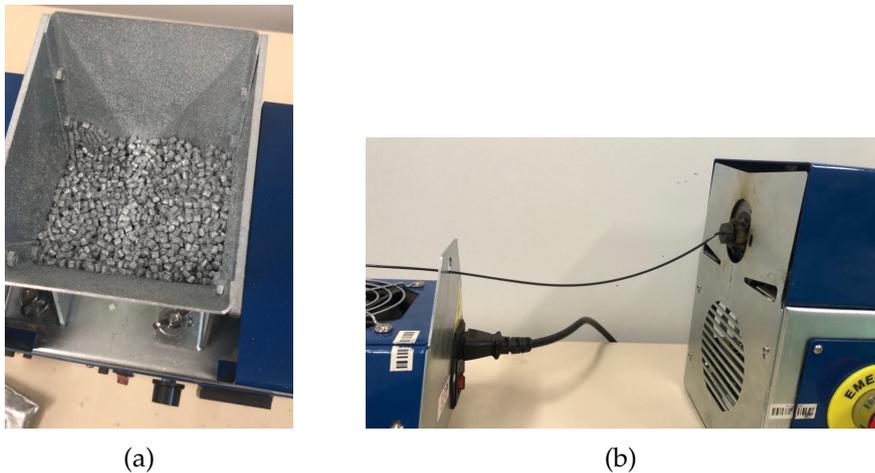


Figura 12 – (a) Pellets aditivados inseridos no bocal da extrusora. (b) Filamento formado após passar pelo bico extrusor.



Figura 13 – Filamento enrolado no carretel.

3.1.4 Processo de impressão 3D

Os corpos de prova (CPs) foram produzidos utilizando uma impressora 3D do tipo FDM de marca e modelo Creality Ender 5 plus (Figura 14), com uma área de impressão de 350 mm de comprimento, 350 mm de largura e 400 mm de altura. Os parâmetros de impressão definidos foram: temperatura do bico extrusor a 240 °C, temperatura da mesa a 100 °C com uma velocidade de deposição de material por camada de 1800 mm/min, diâmetro do bico de 0.4mm, altura da camada de 0,2 mm, e 100% de preenchimento.



Figura 14 – Impressora Creality Ender 5 plus. Fonte: [3DLab 2023]

Os CPs foram modelados com o auxílio do software de modelagem 3D CATIA V5R21 e conforme a norma [ASTM:D638-03](#). A geometria dos CPs está disposta na Figura 15. As dimensões indicadas estão resumidas na tabela 5.

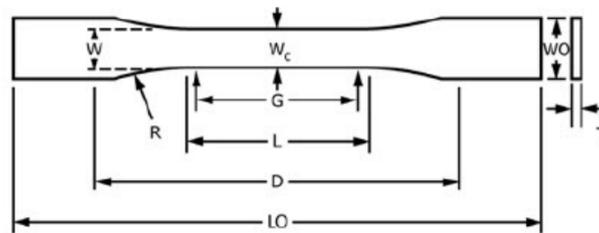


Figura 15 – Parâmetros do corpo de prova de tração (adaptado de [ASTM:D638-03](#)).

Tabela 5 – Dimensões do corpo de prova, [ASTM:D638-03](#)

	Dimensões (mm)
W - Largura da seção estreita	13
L - Comprimento da seção estreita	57
WO - Largura total	19
LO - Comprimento total	165
G - Comprimento de calibração	50
D - Distância entre pinças	115
R - Raio do contorno	76
T - Espessura	3.2

3.1.5 Caracterização dos materiais

Para a realização do ensaio térmico foi utilizado um analisador simultâneo TGA-DSC da TA Instruments, modelo SDT-Q600 (Figura 16a), com uma massa aproximada de 10 mg de amostras obtidas a partir do filamento produzido, submetidas a uma faixa temperatura de 30 a 600°C, com rampa de aquecimento de 20°C/min sob atmosfera de N_2 (fluxo de 100 mL/min). As amostras foram cortadas em lascas de aproximadamente 0,4 mm com auxílio de um estilete. Em seguida, foram submetidas a uma secagem em estufa a uma temperatura de aproximadamente 80°C por 4 horas, com o objetivo de remover a umidade absorvida pelo polímero desde a sua produção. Após a secagem, as amostras foram transferidas para recipientes vedados contendo sílica gel e levadas diretamente para o equipamento de ensaio. A temperatura ambiente durante o ensaio era de aproximadamente 25°C.

Para caracterização mecânica, foram realizados testes de tração para 5 CPs de cada filamento produzido e também do filamento de ABS da empresa 3D Lab. Todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições de temperatura ambiente, 25°C e 30% de umidade no Laboratório de materiais da Faculdade do Gama. Foi utilizado o equipamento Instron 8801 (Figura 16b), que é um instrumento com funcionamento hidráulico. A velocidade do teste foi definida em 1,2 mm/min, conforme a norma ASTM D638. Extensômetros foram acoplados na seção central dos corpos de prova, de modo a mensurar as variações das dimensões.

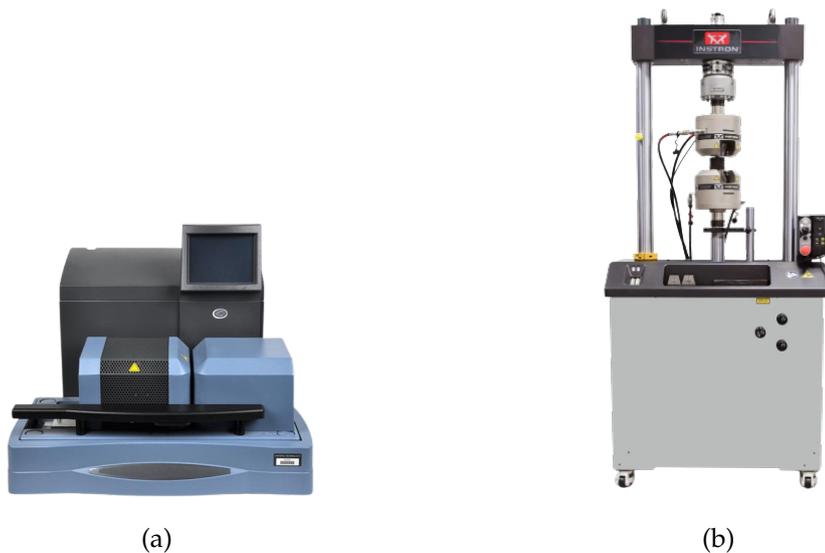


Figura 16 – (a) Analisador térmico utilizado (adaptado de [Instruments 2023]). (b) Máquina 8801 (adaptado de [Instron 2023]).

3.2 Análise morfológica

Foram realizadas observações em escala microscópica dos materiais através do Microscópio opto-digital Olympus DSX 1000 (17a) com lentes de magnificação 10x e 40x, e do microscópio confocal de varredura a laser Olympus LEXT OLS 4100 (17b), com lentes de 20x, 50x, e 100x, no laboratório de microscopia eletrônica de varredura e confocal laser da Faculdade de Tecnologia do campus Darcy Ribeiro.

Na tentativa de obter uma melhor qualidade no foco das imagens durante as observações, foram preparadas amostras embutidas em resina e, então, realizou-se o polimento das mesmas. O objetivo desse processo é obter uma superfície lisa e uniforme para facilitar a visualização dos detalhes da amostra. Inicialmente, foi feito o corte de cada amostra. Em seguida, cada amostra foi lixada para remover quaisquer imperfeições ou marcas de corte. Foram utilizadas lixas com grãos que variam de grosseiros a finos, dependendo da aspereza da superfície a ser polida, seguindo uma ordem crescente de granulação das lixas para obter uma superfície uniforme.

Depois da etapa de lixamento, cada amostra foi embutida em resina epoxi. O tempo de cura da resina foi de 24 horas. Para o polimento propriamente dito, é utilizado um equipamento chamado politriz, que consiste em um suporte giratório para a amostra e discos de polimento com diferentes materiais abrasivos, como alumina e óxido de cerâmica. O processo de polimento começa com um disco de lixa com grão mais grosso, e vai progredindo para grãos mais finos, até a obtenção da superfície desejada.

Os equipamentos utilizados foram os disponíveis no Laboratório de materiais da Faculdade do Gama: Cortadeira de Amostras modelo Pancut 100, Prensa de Embutimento modelo Panpress 3, Politriz da Pantec modelo Polipan 2d. As amostras foram preparadas a partir dos CPs impressos.

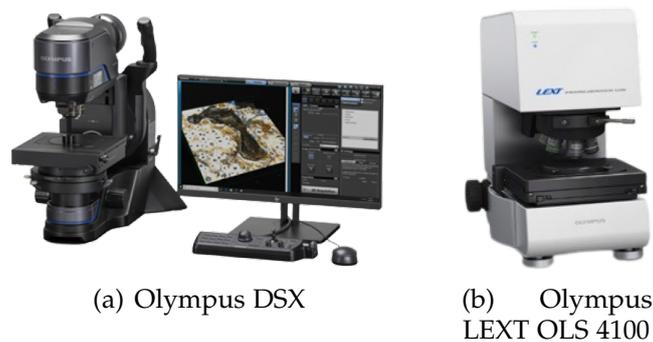


Figura 17 – Microscópios utilizados (adaptado de [LECO 2023]).

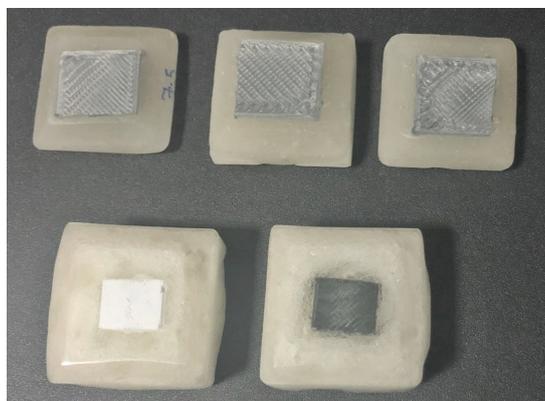


Figura 18 – Amostras embutidas em resina.

3.3 Modelo analítico

Para o processo inicial de modelagem do drone quadricóptero foi preciso supor os dados referentes à massa total de seus componentes. Para isso, baseou-se nos dados referentes a Tabela 3 para o modelo DJI Phantom 4, assumindo que o drone simulado neste trabalho possui características semelhantes a esse modelo. A fim de garantir um equilíbrio adequado e possibilitar a decolagem e aterrissagem segura do drone, considerou-se a força resultante máxima dos motores seja superior à massa total do drone. Esse requisito assegura que a força de impulso seja maior que a força peso, permitindo que o drone possa decolar e se manter no ar.

De acordo com Carrillo et al. 2011, cada motor M_i gera uma força f_i (N), que é proporcional ao quadrado da velocidade angular ω_i do motor. Essa relação pode ser descrita como $f_i = k_i \omega_i^2$, em que k_i é uma constante de proporcionalidade (N s²). Considera-se que os motores podem girar em uma direção fixa, o que implica que as forças produzidas f_i são sempre positivas, sendo que os motores dianteiro e traseiro giram no sentido anti-horário, enquanto os demais motores giram no sentido horário. Essa configuração assegura o equilíbrio dos efeitos giroscópicos e dos torques aerodinâmicos. A condição de equilíbrio do drone é expressa pela equação descrita a seguir:

$$\sum_{i=1}^4 f_i \geq -m_{total}g \quad (3.1)$$

Neste trabalho, foi escolhido o motor T-Motor F40 Pro III 2400KV com a hélice de 5x4.5 polegadas. De acordo com o fabricante, o torque máximo (T) e a força de impulso máxima (F) para essa configuração são de 0.25 Nm e 11 N, respectivamente. Dessa forma, obtém-se a seguinte relação:

$$44N \geq -m_{total}g \quad (3.2)$$

O método analítico foi elaborado a fim de validar o modelo utilizado na análise estrutural da próxima seção. Como critério, utilizou-se a tensão normal na direção perpendicular onde estão os máximos estados de tensão considerando a utilização de uma viga em formato de I para representar o braço do drone, que é simétrico em relação aos demais. A geometria foi feita no ambiente *Mechanical design* do software CATIA V5, com altura h variável, conforme a Figura 19:

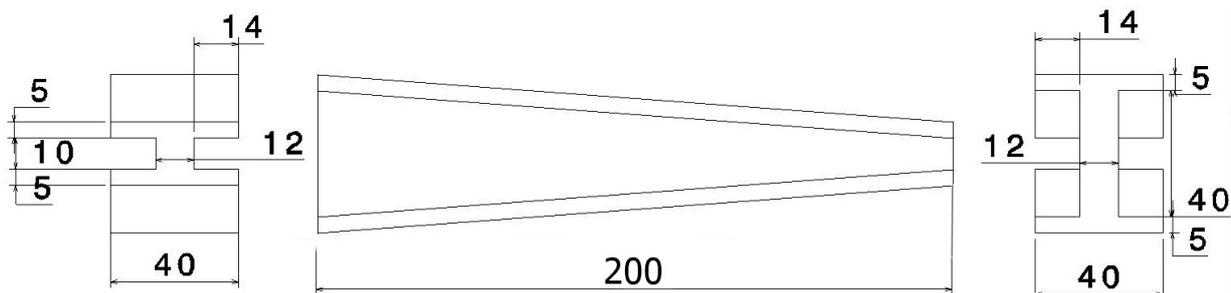


Figura 19 – Dimensões do braço.

Para a análise de tensão, considera-se a equação:

$$\sigma_y = \pm \frac{Mx \cdot z}{I_{xx}} \quad (3.3)$$

Onde M_x é o momento fletor, z é a coordenada da seção e I_{xx} é o momento de inércia da seção transversal da Figura 20.

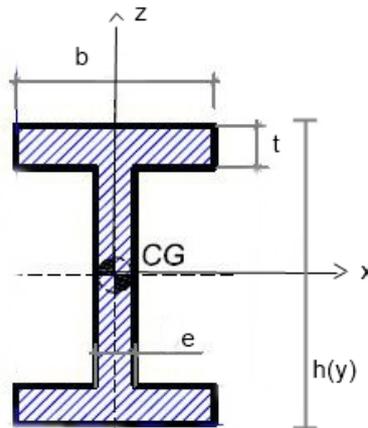


Figura 20 – Relação da geometria.

As tensões normais estão avaliadas na metade do comprimento da viga, num ponto afastado das superfícies onde as condições de contorno foram aplicadas:

- $z = \pm h(y)/2 = \pm(\frac{H}{2} + \frac{h}{2})/2$
- $y = L/2$
- $x = 0$
- $M = Fy$ representa a relação do momento M com a força F e a distância y ;

Dessa forma, as condições de contorno não têm influência na distribuição da tensão normal (Princípio de Saint Venant).

Para o momento de inércia, temos:

$$I_{xx} = 2 \left(\frac{t^3 b}{12} + tb \left(\frac{h(y) - t}{2} \right)^2 \right) + \frac{(h(y) - 2t)^3}{12} e \quad (3.4)$$

3.4 Análise estrutural

A análise estrutural estática foi realizada por meio de duas ferramentas do Ansys: Discovery e Workbench. No Ansys Workbench, foram realizadas dois tipos de análise: linear e não linear. A análise linear tem como objetivo a validação do modelo utilizado, já a análise não linear foi feita para avaliar o comportamento dos filamentos de ABS-alumínio e ABS-titânio produzidos. No Ansys Discovery a análise foi realizada com o intuito de avaliar a otimização da estrutura do drone.

3.4.1 Ansys Workbench

Para a análise linear, na seção *Engineering Data*, foi selecionado o ABS presente na própria biblioteca do software, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do ABS no Ansys

Módulo de Elasticidade E (Pa)	Poisson ν	Densidade (kg/m ³)	Tensão de Ruptura (Pa)
$1,63 \times 10^9$	0.409	1.03×10^3	$3,63 \times 10^7$

Criou-se um *Path* com pontos selecionados de modo a gerar uma linha localizada na metade da geometria, que servirá para avaliar a tensão máxima e mínima nessa localização. No módulo de geração de malha *Meshing*, foi selecionado o método *Skewness* para avaliar a qualidade da malha, o tamanho do elemento e as configurações de refinamento. Para o elemento de malha, foram avaliados dois tipos: hexagonal e tetraédrico. Foi inserido o método *Patch conforming*, primeiro selecionando o elemento tetraédrico e depois o modo automático, onde o elemento hexagonal foi gerado. Em seguida, definiu-se as condições de contorno. O braço do drone foi representado como uma viga em balanço, engastado na extremidade maior, onde foi aplicado o suporte fixo. A fim de evitar possíveis singularidades devido ao uso dos elementos sólidos na malha, a opção *weak springs* foi ativada, nesse caso, para tratar singularidades de rigidez. Essas singularidades podem causar concentração de tensões ou deformações em áreas específicas devido a transições abruptas nas propriedades de rigidez do modelo. As *weak springs* são elementos fictícios de rigidez muito baixa, inseridos para suavizar a rigidez nessas regiões, distribuindo de forma mais uniforme as tensões e deformações. Essa técnica ajuda a obter resultados mais realistas, especialmente em áreas com altos gradientes de tensões ou deformações. Em seguida, foi considerado o empuxo máximo do motor, então a força de 11 N foi aplicada na face da extremidade menor, para cima. O deslocamento foi aplicado na face da extremidade menor considerando (free, 0, free), conforme a Figura 21.

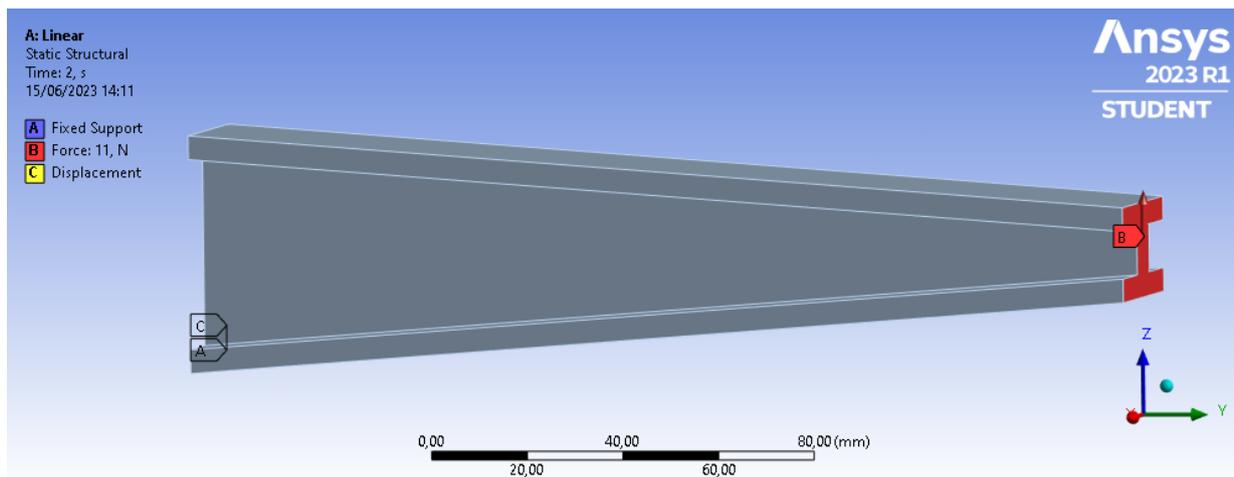


Figura 21 – Condições de contorno do braço.

Em *analysis settings* a opção *Large deflections* permaneceu off para a análise linear. Na seção de *Solution*, foi selecionado 5 para *Max refinement loops* e 2 para *Refinement Depth*. Foi inserida a

visualização de deformação no eixo Z, tensão equivalente de von Mises e tensão normal no eixo Y.

Para a análise não linear, na seção *Engineering Data*, foi selecionado o modo *Multilinear isotropic hardening*, onde foi possível inserir os dados do material de acordo com resultado obtido no teste de tração realizado, assim a análise se deu com um material não linear. A temperatura considerada foi 25°C, a mesma durante o ensaio. Foram realizadas duas análises dessa forma, a primeira com os dados referente a amostra ABS-alumínio com 5% e a segunda referente a amostra ABS-titânio 5%. As mesmas condições de contorno e configurações de malha permaneceram para a análise não linear, porém desta vez a ferramenta *Large deflections* foi incluída na simulação.

3.4.2 Ansys Discovery

Para a geometria neste caso foi considerado um drone com um frame central e, conectado a ele, os quatro braços sendo as vigas em I com seção variável utilizadas na análise do Workbench. O material foi considerado o mesmo da análise linear (Tabela 6). A Figura 22 apresenta o desenho CAD do drone, sendo que as dimensões podem ser conferidas no Anexo B.

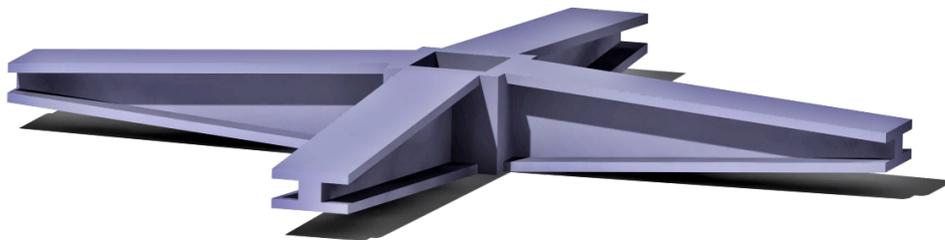


Figura 22 – Geometria da estrutura do drone pré otimização.

Após a confecção da geometria no ambiente de design do Ansys Discovery, foram estabelecidas as condições de contorno necessárias para realizar a simulação estrutural estática pré-otimização. No modelo, os braços do drone foram representados como vigas em balanço, engastadas na região onde são aparafusados ao frame central do drone, tendo a outra extremidade livre. O carregamento aplicado considerou o empuxo dos motores como uma força de 11N atuando para cima em cada extremidade dos braços, onde também foi aplicado *Displacement* na configuração (0, 0, free). A Tabela 7 apresentam os carregamentos:

Tabela 7 – Condições de contorno.

Carga	Peça aplicada	Intensidade
Empuxo do motor	Em cada braço	11N
Massa (componentes+carga util)	Frame central	18 N
Deslocamento	Em cada braço	(free,0,free)

A análise de otimização da estrutura foi feita com as mesmas condições de contorno e carregamentos. O processo de otimização topológica no Ansys Discovery ocorreu seguindo estes passos:

- Definição do domínio de projeto: Foi necessário definir o espaço onde a otimização ocorre. A região de interesse foi selecionada de forma a abranger todo o volume dos braços e frame central da estrutura.
- Configuração dos objetivos: Definiu-se como objetivo da otimização maximizar a rigidez da estrutura, os critérios estabelecidos foram de otimização 60%, restrição de manufatura com *minimum thickness* de 9mm e espessura mínima de 9mm nas regiões de contato entre os braços e o frame central e as superfícies de aplicações de carga.
- Geração da malha: Foi gerada a malha computacional com elementos triangulares de 1mm. A malha divide o domínio em elementos finitos, permitindo a análise numérica.
- Otimização: Com base nos resultados da análise estrutural, o algoritmo de otimização inicia o processo de modificar a distribuição de material na peça. A análise ocorre de forma iterativa. O algoritmo realiza sucessivas iterações, ajustando a distribuição de material e avaliando os resultados até que a solução seja convergente e atenda aos critérios de otimização estabelecidos.
- Visualização e validação: Ao final do processo de otimização, é possível visualizar a geometria resultante e analisar os resultados obtidos.

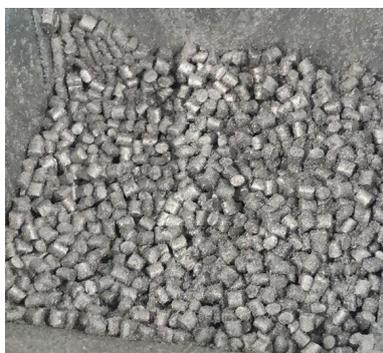
4 Resultados e Discussão

4.1 Pellets aditivados

Após a realização dos testes de mistura, foi constatado que a mistura mecânica utilizando o moinho de esferas obteve resultados superiores em termos de homogeneidade e aderência dos pós metálicos aos pellets de ABS. Diante disso, optou-se por empregar essa técnica na mistura dos aditivos ao polímero antes do processo de extrusão, mesmo que fosse preciso empregar um maior tempo de preparo nas amostras. A Figura 23 apresenta uma comparação entre os pellets virgens e os pellets aditivados.



(a) Pellets de ABS virgem.



(b) Pellets de ABS com pó de alumínio.



(c) Pellets de ABS com pó de titânio.

Figura 23 – Comparação entre os pellets aditivados e o pellet virgem.

4.2 Extrusão dos filamentos

Durante a produção dos filamentos, surgiram dificuldades para manter o controle de qualidade do filamento ao extrudar o material utilizando a temperatura de processamento recomendada para o ABS (em torno de 220°C). Isso pode ter acontecido devido a presença dos aditivos, além de que, em operações industriais, resfria-se o filamento com técnicas mais eficientes do que a utilizada pela resfriadora disponível no laboratório. Outro fator é que na extrusora utilizada é possível configurar apenas uma temperatura de processamento, enquanto em extrusoras a nível industrial é possível definir quatro temperaturas, sendo a temperatura inicial e final menores que as temperaturas de processamento, o que melhora o processo.

Nesse sentido, as curvas TGA-DSC obtidas no ensaio térmico foram essenciais para compreender a temperatura de processamento de cada amostra, que foram ajustadas conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Temperaturas de extrusão das amostras.

	Temperatura (°C)
ABS 100%	220
ABS + 2,5% Al	210
ABS + 5% Al	205
ABS + 7,5% Al	195
ABS + 2,5% Ti	203
ABS + 5% Ti	197

Segundo [Melo 2022](#) após passar pelo bico extrusor, o polímero sofre o efeito *die swell*, que é um inchaço devido à variação de pressão e temperatura, o que acarreta em um diâmetro diferente ao do bico extrusor. Observou-se que a razão entre a velocidade da tracionadora e a velocidade de extrusão atuam efetivamente no controle do diâmetro do filamento. Quanto maior a razão, maior a uniformização do filamento, implicando em uma variação de diâmetro mais baixa. A Figura 24 apresenta o medidor de diâmetro utilizado. Dessa forma, o diâmetro em torno de $1,75\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$, que é o diâmetro ideal para a impressão 3D via FDM de acordo com [Junior et al. 2021](#), foi obtido ao ajustar a velocidade de extrusão e a velocidade da tracionadora.

**Figura 24** – Filamento de ABS-alumínio com 1,79mm de diâmetro.

4.3 Impressão 3D dos corpos de prova

Quanto à impressão 3D, aparentemente é possível constatar que não houve qualquer defeito relevante na consistência das camadas dos corpos de prova impressos. Notou-se, também, que a ausência de bolhas na superfície dos CPs indica que a umidade foi mantida em um padrão aceitável, sem afetar a estrutura ou o acabamento superficial dos mesmos, conforme demonstrado na Figura 25.

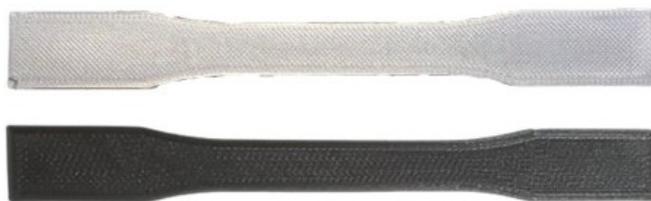


Figura 25 – CPs impressos para o teste de tração. Acima, CP ABS-Al 5 %. Abaixo, ABS-Ti 5 % abaixo.

4.4 Caracterização dos materiais

4.4.1 Termogravimetria (TGA/DSC)

A análise termogravimétrica (TGA) foi utilizada para caracterizar a estabilidade térmica das amostras, afim de obter a taxa de decomposição de cada filamento produzido. Já a calorimetria exploratória diferencial (DSC) avaliou a variação de entalpia das amostras, com ela foi possível obter as temperaturas características de cada material analisado. A Figura 26 apresenta a curva TGA, a curva DTG e a curva DSC para cada amostra conforme a legenda indicada no canto superior direito, comparando os resultados das amostras de ABS-Alumínio. A comparação das amostras ABS-Titânio é feita de forma semelhante na Figura 27.

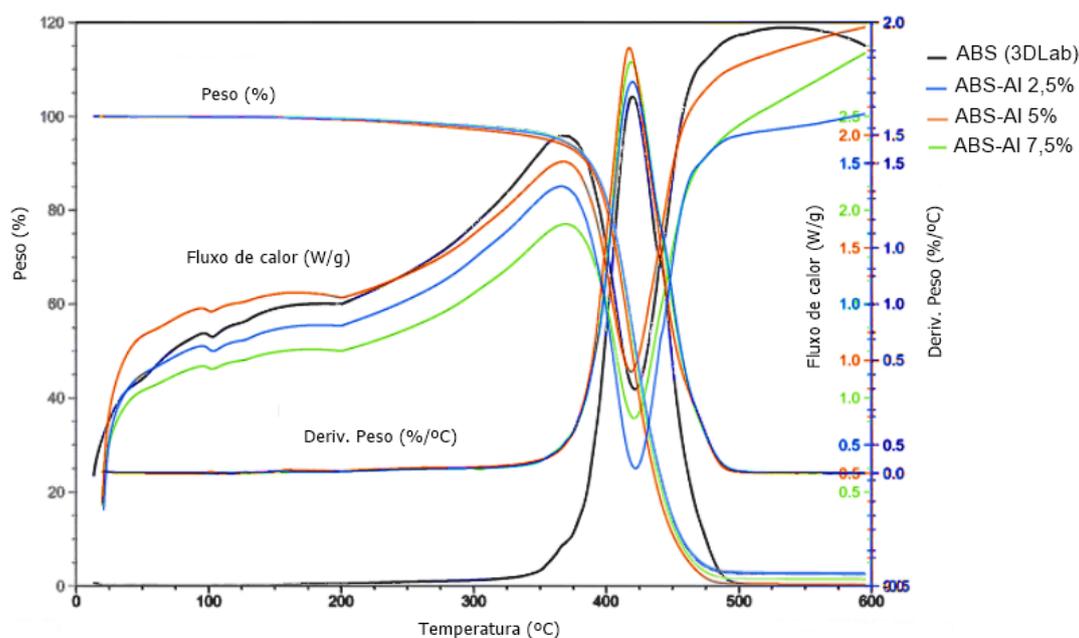


Figura 26 – Curvas TGA-DSC ABS puro e ABS-Alumínio.

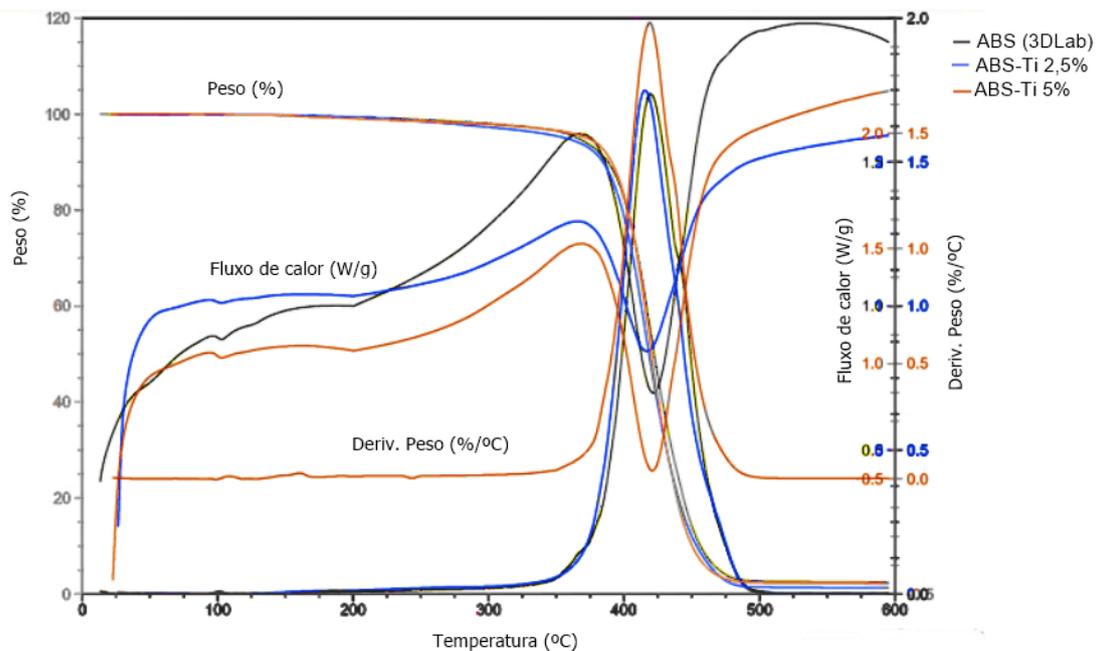


Figura 27 – Curvas TGA-DSC ABS puro e ABS-Titânio.

As Curvas DSC confirmam que a matriz polimérica trabalhada neste estudo é de um polímero predominantemente amorfo, pois não é possível visualizar um pico de fusão bem definido, mas sim uma faixa de transição térmica ampla, conhecida como "ombro de fusão" (T_{of}). Isso ocorre devido à natureza amorfa do polímero, que não possui uma estrutura cristalina bem definida. Já o pico de transição vítrea (T_g) pode ser observado, ele indica a temperatura em que o polímero amorfo passa de um estado rígido para um estado mais flexível, sem uma mudança estrutural significativa. A área sob o pico está relacionada à quantidade de energia envolvida na transição. Observa-se, também, os eventos de decomposição térmica (T_d), que são observados como uma queda acentuada na curva DSC. Esses eventos indicam a temperatura em que o polímero começa a se degradar e perder massa devido à quebra das ligações químicas.

Além dessas transições, também é importante observar as áreas sob os picos de transição, pois elas estão relacionadas à quantidade de energia absorvida ou liberada durante as transições térmicas. É preciso considerar as características específicas do material, como sua composição química e histórico de processamento. Nesse sentido, infere-se que os aditivos metálicos tiveram efeitos significativos nas curvas DSC observadas. O primeiro efeito é relativo ao aumento na condutividade térmica, resultando em uma transferência de calor mais eficiente durante o ensaio de DSC, levando a curvas DSC das amostras aditivadas com tempos de resposta mais rápidos e picos de transição térmica mais nítidos quando comparadas à curva do ABS comercial utilizado.

Outro aspecto relevante é a influência nas transições térmicas. A presença do pó metálico afetou as transições térmicas do polímero, atuando como um nucleante, promovendo a cristalização de algumas regiões do polímero e resultando em uma alteração que sugere um pequeno pico de cristalização (T_c) observado nas curvas DSC das amostras aditivadas. Nota-se, também, a alteração nas propriedades térmicas globais. A adição de pó metálico aumentou a estabilidade térmica do polímero, levando a uma maior resistência à degradação térmica.

As curvas TGA apresentam o estágio de decomposição. Observou-se, com base nas curvas

TGA, que a estabilidade térmica do ABS puro e da maioria dos filamentos produzidos foram muito semelhantes, em torno de 365°C. Já para os filamentos contendo 5% de aditivos, foi possível constatar que a temperatura na qual ocorre o início e final da decomposição é maior, aproximadamente 390°C. As curvas DTG apresentam a temperatura em que a taxa de variação de massa máxima é alcançada. A área sob a curva é diretamente proporcional à alteração de massa sofrida pela amostra. Para as curvas DTG, todas as amostras apresentaram somente um pico, o ABS em torno de 420 °C, as amostras de ABS-alumínio em torno de 440 °C e as amostras de ABS-titânio também em torno de 420 °C.

A Tabela 9 apresenta os valores extraídos das curvas experimentais e a variação percentual ($\Delta\%$) calculada em relação ao valor da amostra de ABS comercial (3D Lab)(i.e., não-aditivado), usado como referência.

Tabela 9 – Temperaturas obtidas através das curvas de DSC

	Tg °C	% Δ	Td°C	% Δ
ABS (3D Lab)	101.52	-	387.56	-
ABS + 2,5% Al	105.28	103.70%	387.02	99.90%
ABS + 5% Al	106.12	104.50%	386.96	99.80%
ABS + 7,5% Al	107.74	106.10%	388.23	100.20%
ABS + 2,5% Ti	104.70	103.10%	384.66	99.30%
ABS + 5% Ti	103.84	102.30%	382.62	98.70%

A Tabela 10 resume os resultados da análise estatística realizada na amostra de 6 medições (para todas as amostras testadas), incluindo a temperatura do "ombro de fusão"(T_{of}).

Tabela 10 – Análise estatística dos resultados da DSC

	Tg °C	T_{of} °C	Td °C
Média	104.867	200.262	386.175
Erro padrão	0.862	0.048	0.864
Mediana	104.990	200.255	386.990
Desvio padrão	2.111	0.119	2.117
Variância	4.456	0.014	4.481
Mínimo	101.520	200.130	382.620
Máximo	107.740	200.440	388.230
Contagem	6	6	6
Nível de Confiança (95,0%)	2.215	0.124	2.221

Com esses resultados, foi possível entender as mudanças térmicas das amostras, assim como os limites de temperatura aos quais podem ser submetidos os filamentos produzidos sem que se comprometam as suas propriedades. O conhecimento das propriedades térmicas também possibilita uma melhora nos processos de impressão, conservação e até mesmo nas futuras aplicações dos materiais. No caso de decomposição, pode ser útil investigar quais produtos e resíduos voláteis são formados em relação aos impactos biológicos ou ambientais.

4.4.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de obter as propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade de cada amostra produzida. Para realizar uma comparação, utilizou-se o valor fornecido pelo fabricante 3D Lab para a resistência à tração de corpos de prova impressos em filamento comercial de ABS puro (29 MPa), já que o fabricante utilizou a norma ASTM D638, que também foi adotada neste estudo.

Em relação ao módulo de elasticidade (E), o valor fornecido foi de 2200 MPa. No ensaio realizado neste trabalho com o filamento comercial, foi observada uma diferença de 24,13% para a tensão de ruptura e 1,35% para o módulo de elasticidade em comparação com os valores fornecidos pelo fabricante para o mesmo material. A Figura fig:au apresenta a configuração dos CPs com os extensômetros.

A Tabela 11 apresenta a comparação realizada. O gráfico Tensão/Deformação obtido no ensaio de tração pode ser visualizado na Figura 28.

Tabela 11 – Comparação de $E = 2200\text{MPa}$ e $\sigma_m = 29\text{MPa}$ fornecido pelo fabricante e os testados.

	(E) (MPa)	$\Delta\%E$	σ_m (MPa)	$\Delta\%\sigma_m$
ABS Comercial	2170	-1,4 %	22	-24,1%
ABS + 2,5% Al	1892	-13,9 %	18	-37,9%
ABS + 5% Al	1646	-25,1 %	11	-62,1%
ABS + 7,5% Al	2531	+15,0%	26	-10,3%
ABS + 2,5% Ti	1026	-53,3%	23	-20,6%
ABS + 5% Ti	2202	+0,1%	25	-13,7%

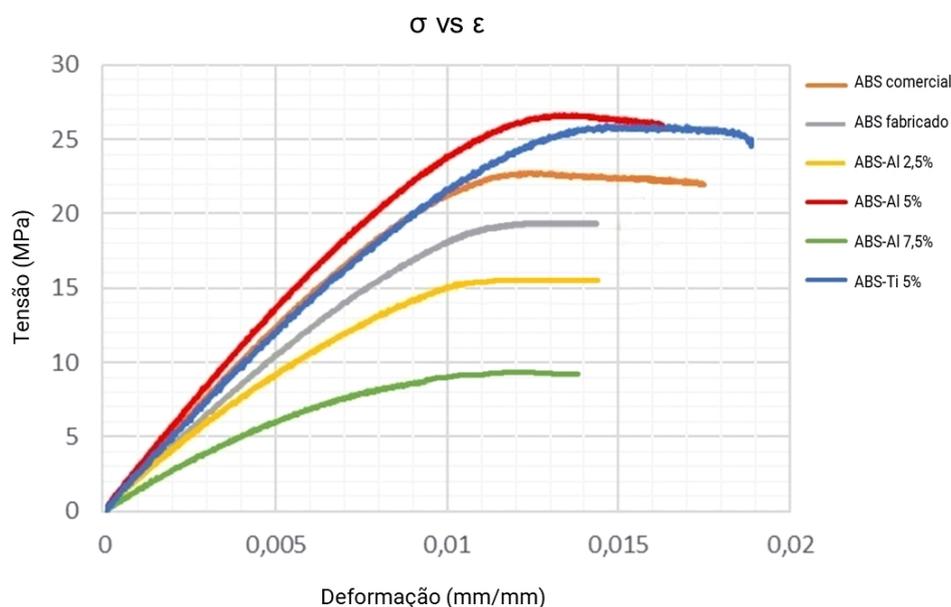


Figura 28 – Curva de Tensão vs Deformação.

Analisando os resultados demonstrados acima, nota-se que os filamentos fabricados com 5% de aditivo (Amostras III e VI) obtiveram os melhores resultados para o módulo de Elasticidade.

No entanto, percebe-se que os demais filamentos fabricados não atingiram um resultado superior ao fornecido pelo fabricante para o módulo de elasticidade e para as tensões de ruptura. Isso pode ter ocorrido devido aos erros associados ao processo de fabricação do filamento e ao processo de impressão dos corpos de prova.

Além disso, sabe-se que as orientações de impressão dos corpos de prova influenciam os resultados, pois as mesmas devem estar orientadas no sentido de maior esforço. Neste trabalho, todos os CPs foram impressos no sentido padrão de orientação de impressão, 0-45°. Em uma próxima tentativa de impressão, deve-se utilizar a orientação 0-90°, dessa forma, os CPs devem obter uma resposta melhor ao esforço durante o teste de tração. Os resultados encontrados apontam a curva característica de materiais frágeis e plásticos, pois analisando a Figura 29 percebe-se que o material apresentou pouca ou nenhuma região de empescoçamento.

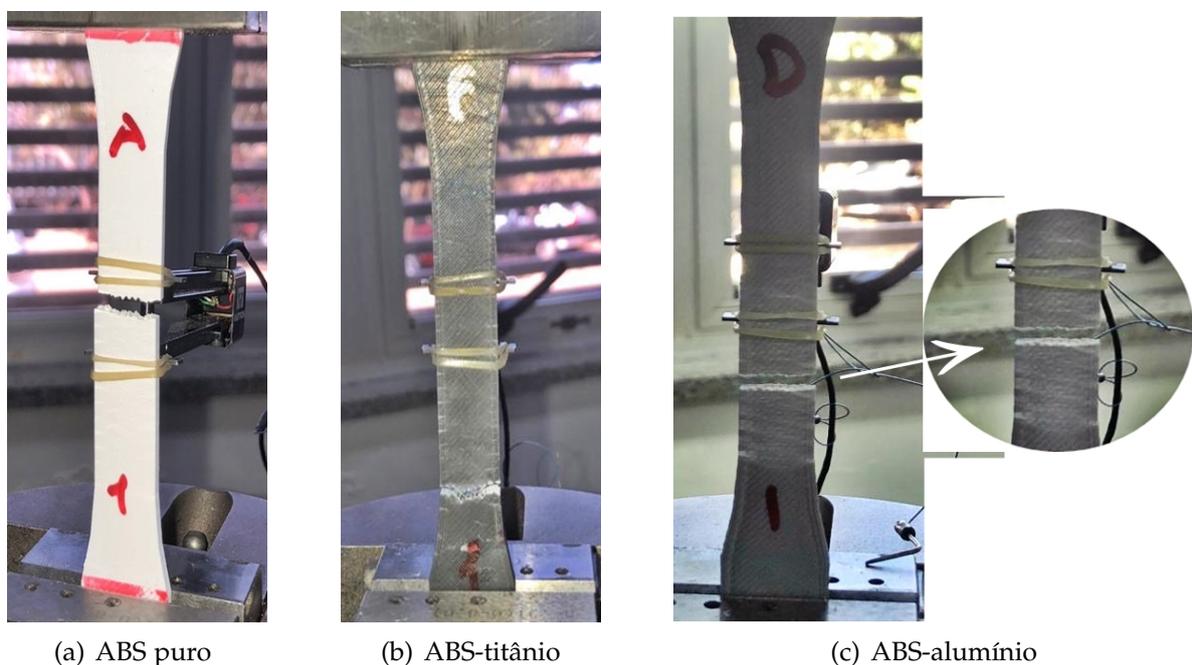


Figura 29 – Exemplo de fratura durante o ensaio de tração.

4.5 Análise Microscópica

A partir da análise microscópica, foi possível identificar as fases matriz e fase dispersa, bem como a adesão dos aditivos à matriz. Analisou-se, também, a distribuição dos aditivos na matriz polimérica. Com a Figura 30, foi possível observar que as camadas impressas estão uniformes, o que já era esperado para o filamento de ABS puro. Além disso, verificou-se a presença de impurezas na amostra, o que pode ser explicado pelos fatores associados ao armazenamento e polimento.

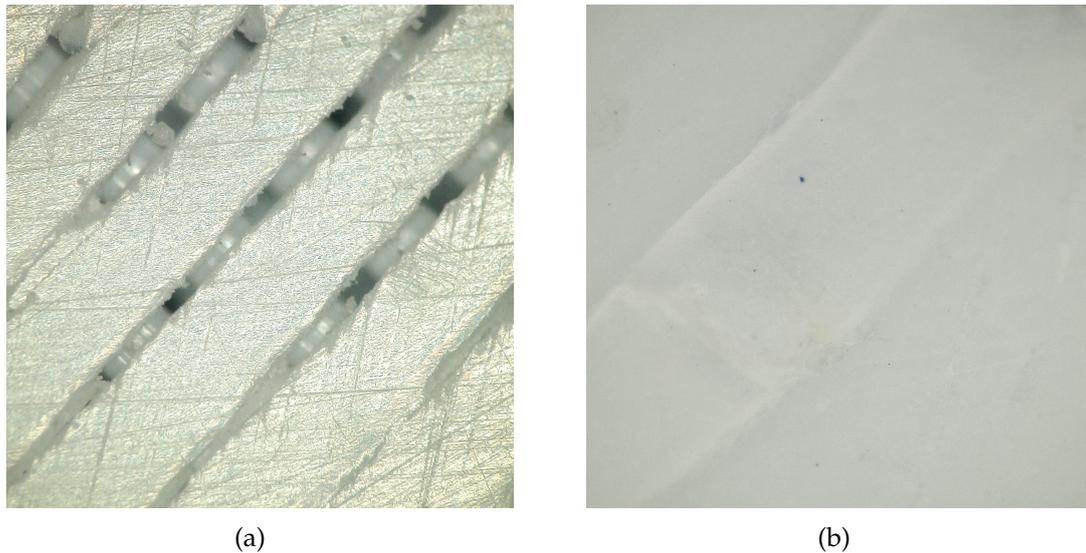


Figura 30 – Amostra de ABS puro: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX

Observa-se na Figura 31 a presença de aglutinação de material nas camadas, que ocorre quando o material se junta ou adere excessivamente. Essa aglutinação é um fenômeno comum em peças impressas por extrusão de filamento e tecnologia FDM e pode ser explicada pelo método de fabricação utilizado, sendo importante destacar que o filamento contendo 2,5% de aditivo também apresentou os resultados menos satisfatórios nos ensaios realizados. Além disso, foi observada uma influência significativa do aditivo nas propriedades tixotrópicas do material, relacionadas à sua viscosidade. A espessura do fio de deposição parece aumentar quando entra em contato com um fio logo abaixo, sugerindo que o fio não consegue resfriar-se rapidamente o suficiente para manter sua seção transversal no momento da deposição. Isso indica que o aditivo tem um impacto nas propriedades térmicas e tecnológicas do processo de fabricação.

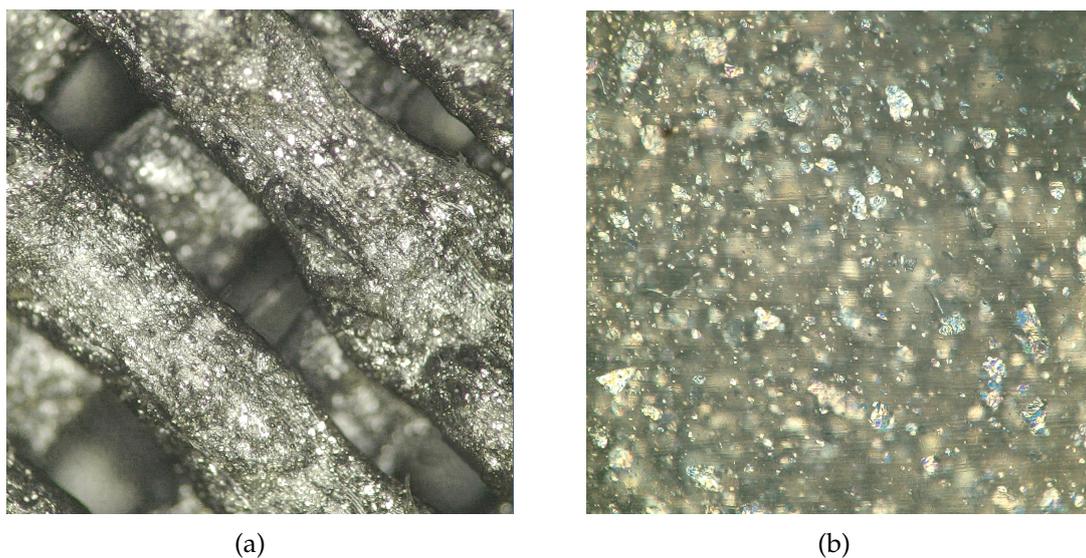


Figura 31 – Amostra de ABS-alumínio com 2,5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX

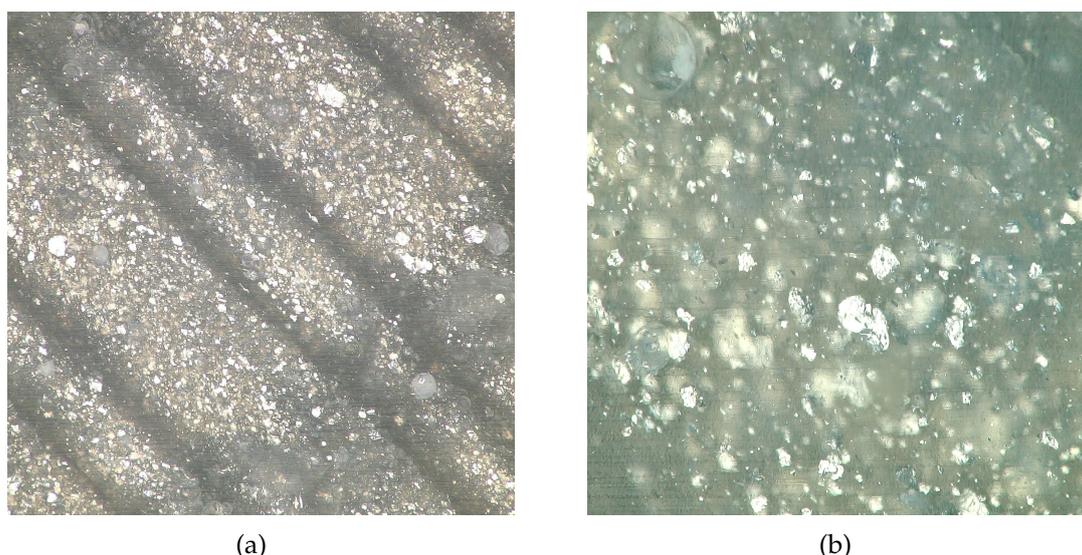


Figura 32 – Amostra de ABS-alumínio com 5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX

A partir da Figura 32 pode-se inferir que existe a presença de pequenas bolhas na amostra, o que pode ter sido causado pela presença de umidade. No entanto, as camadas impressas apresentam uma boa uniformidade. A Figura 33 revela a presença de irregularidades nas camadas da peça, como evidenciado na imagem (a). A partir dessa observação, pode-se inferir que quanto maior for a porcentagem de aditivo no polímero, menor será a distância entre os fios de deposição e as fronteiras entre as camadas se tornam menos visíveis. Esse comportamento sugere que o polímero aditivado possui características mais plásticas do que elásticas, pois não consegue resfriar-se rapidamente o suficiente. Essa peculiaridade pode ser explorada na fabricação de peças com propriedades impermeáveis, uma vez que a menor distância entre os fios reduz a permeabilidade do material. Essa conclusão pode ser corroborada por meio da análise microscópica da seção transversal da peça, que pode ser realizada em um trabalho futuro.

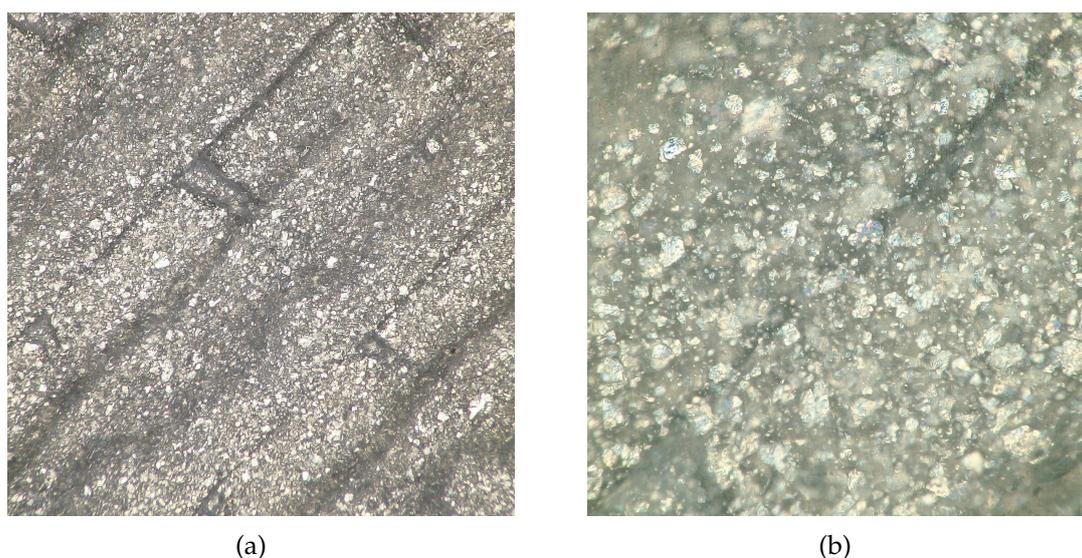


Figura 33 – Amostra de ABS-alumínio com 7,5% de aditivo: a) Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX

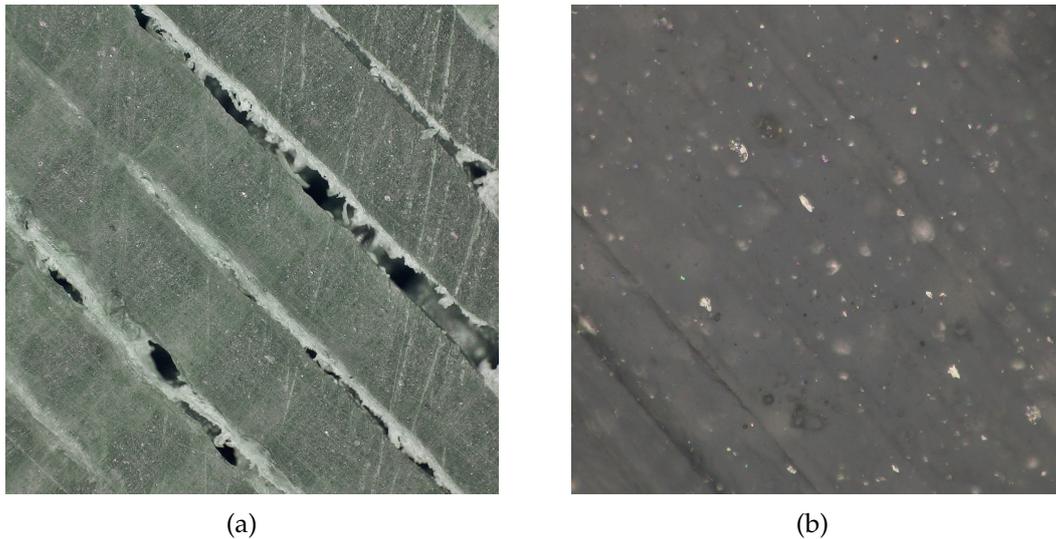


Figura 34 – Amostra de ABS-titânio com 5% de aditivo: Magnificação 100x, DSX; b) Magnificação 400x, DSX

Por meio da análise da Figura 34, observou-se uniformidade na impressão das camadas, o que está diretamente relacionado ao bom desempenho do filamento de ABS-titânio com 5% de aditivo nos ensaios realizados. Comparando-o com o filamento de alumínio, foi constatado que a camada de alumínio apresenta irregularidades, enquanto a de titânio exibe uma alta regularidade. Outro fator a ser considerado é a influência da forma das partículas presentes nos filamentos, que também desempenha um papel nas propriedades tixotrópicas. Para um trabalho futuro, seria interessante explorar essa relação com equipamentos de reologia para uma compreensão mais completa dos efeitos das partículas na viscosidade do material durante o processo de impressão 3D e utilizar equipamentos de alta resolução como o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para avaliar a forma das partículas metálicas. A partir da Figura 35 pode-se inferir que há uma diferença na forma com que os aditivos de alumínio e titânio se aglomeraram na matriz polimérica. Percebe-se que o pó de titânio se aglomerou em menores porções.

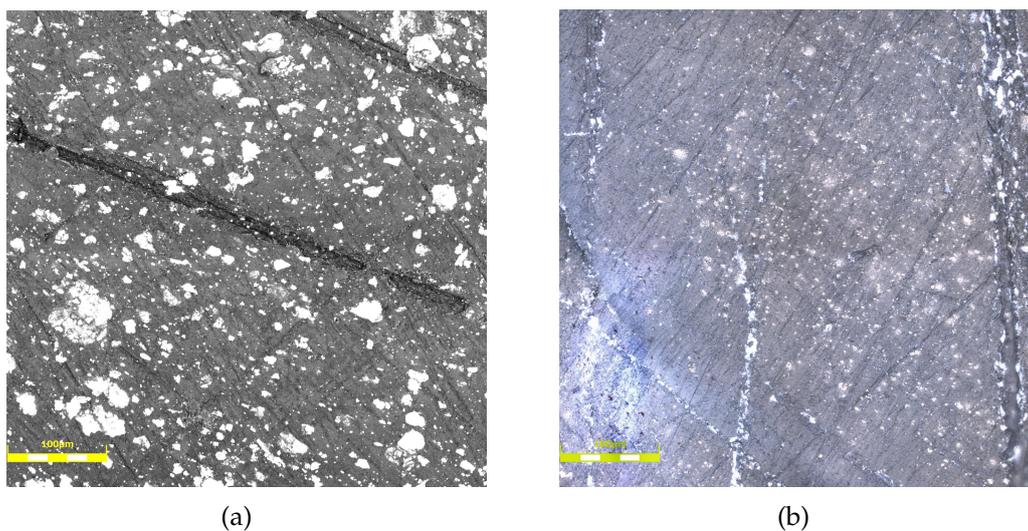


Figura 35 – Observações com o microscópio confocal laser. a) ABS-Al 5%, Magnificação 500x; b) ABS-Ti 5%, Magnificação 500x

4.6 Análise estrutural

De acordo com os resultados do estudo de malha dispostos na Tabela 12, o elemento hexagonal foi considerado satisfatório, pois a qualidade da malha segundo o critério *Skewness* foi mais adequada comparada ao elemento tetraédrico.

Tabela 12 – Descrição do método e estatísticas de qualidade da malha

Descrição do método			Estatística		Qualidade da malha – Skewness			
			Número de		Valor médio		Valor máximo	
Método	Tipo	Tamanho do elemento	Nós	Elementos	Valor	Qualidade da célula	Valor	Qualidade da célula
Padrão	Solid185	2,5mm	10692	7360	0,09	excelente	0,55	justo
Tetraédrico	Solid187	2,5mm	34190	19721	0,33	bom	0,91	ruim

A métrica apresentada em relação ao critério de *skewness* para os elementos tetraédricos indica que esses elementos possuem distorção maior em relação à forma ideal. A alta distorção dos elementos tetraédricos pode levar a resultados menos precisos e uma representação menos fiel da geometria original. Já a métrica obtida para os elementos hexaédricos indica que esses elementos têm uma forma mais próxima à forma ideal, com menor distorção. Isso é vantajoso porque a distorção baixa dos elementos hexaédricos resulta em uma melhor representação da geometria original e, portanto, uma maior precisão nos resultados da análise. Outra vantagem da malha hexaédrica mais uniforme é que ela oferece uma distribuição mais equilibrada dos elementos, proporcionando uma melhor representação da geometria e das características estruturais. Essa uniformidade ajuda a evitar concentração de erros ou distorções localizadas, resultando em resultados mais confiáveis e precisos. Além disso, a malha hexaédrica também pode permitir uma convergência mais rápida da solução numérica, pois os elementos bem formados e próximos à forma ideal têm melhores propriedades de convergência em comparação com elementos altamente distorcidos. As Figuras 36 e 38 apresentam as malhas obtidas em cada método:

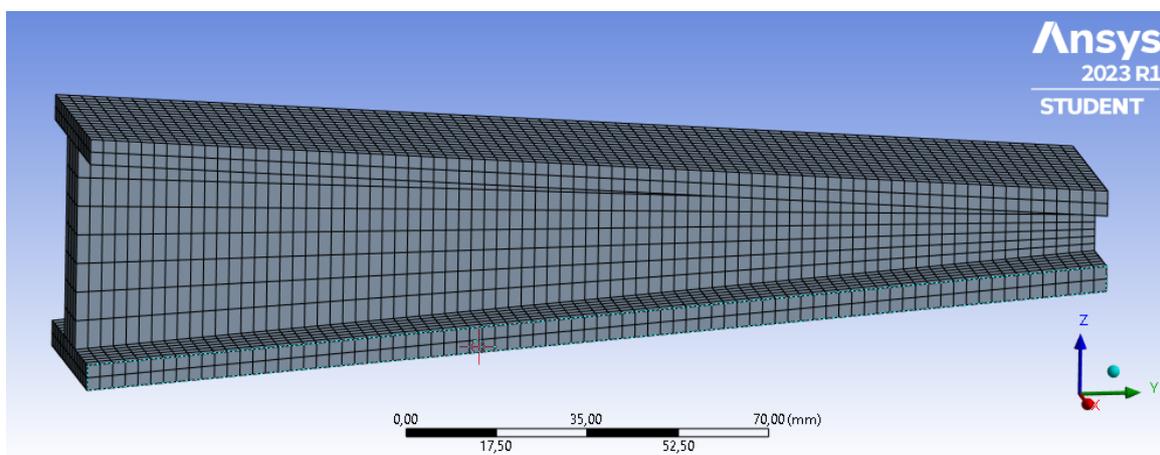


Figura 36 – Malha com elementos hexagonais de 8 nós.

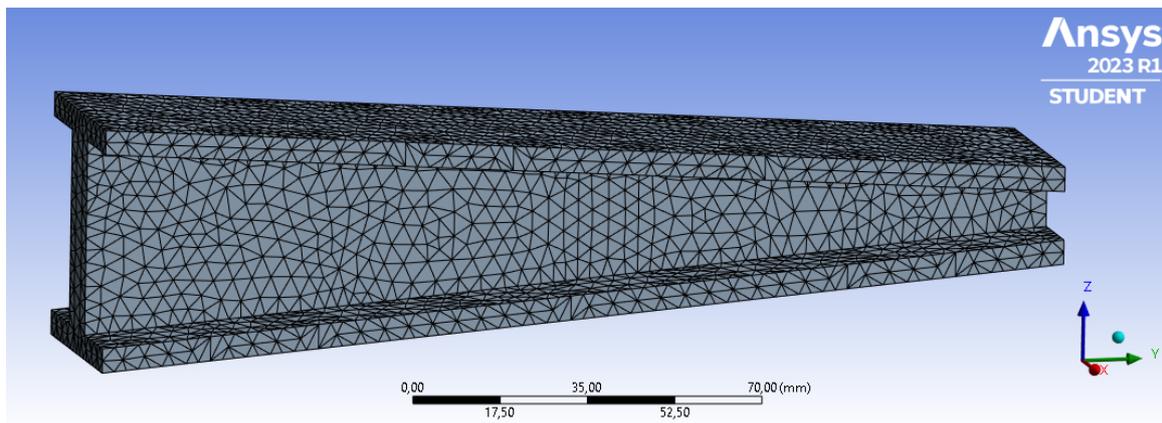


Figura 37 – Malha com elementos tetraédricos de 10 nós.

A análise de convergência da malha pelo critério da tensão normal foi utilizada para avaliar a convergência da solução da análise estrutural. Durante a análise, a malha é refinada e a solução é recalculada para diferentes níveis de refinamento. O critério da tensão normal é aplicado para verificar se a distribuição de tensão está convergindo à medida que a malha é refinada, sendo que a convergência foi alcançada quando a diferença nas tensões normais entre os diferentes níveis de refinamento se apresentou pequena o suficiente, indicando uma estabilidade nos resultados.

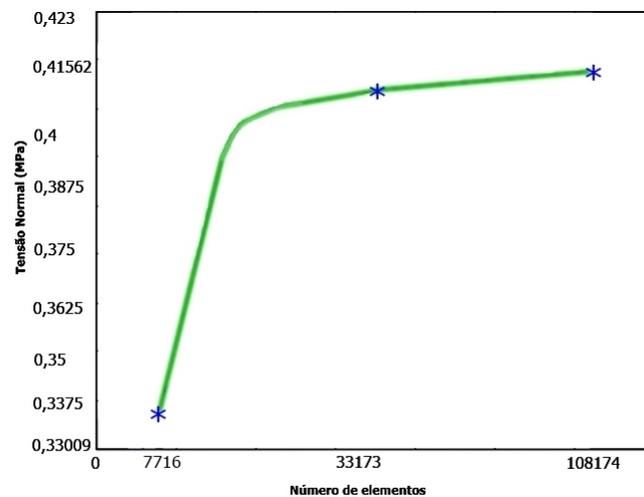


Figura 38 – Convergência da tensão normal para a análise linear.

Como resultados da simulação foram obtidas representações visuais das distribuições de tensão normal, von Mises e da deformação na direção Y. A tensão de von Mises é um parâmetro utilizado na mecânica dos materiais para avaliar a resistência de um material a falhas devido ao estado de tensão combinado, levando em consideração a tensão de cisalhamento e as tensões principais. Para a análise linear, os seguintes resultados foram obtidos:

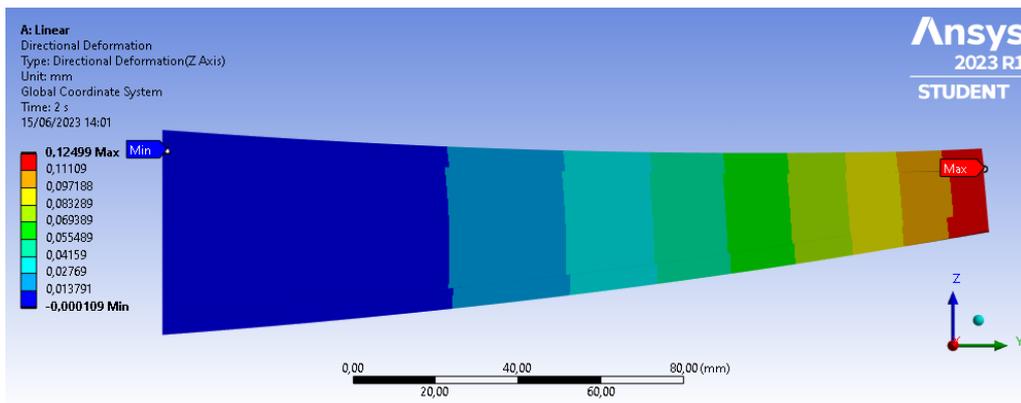


Figura 39 – Deslocamento da análise linear.

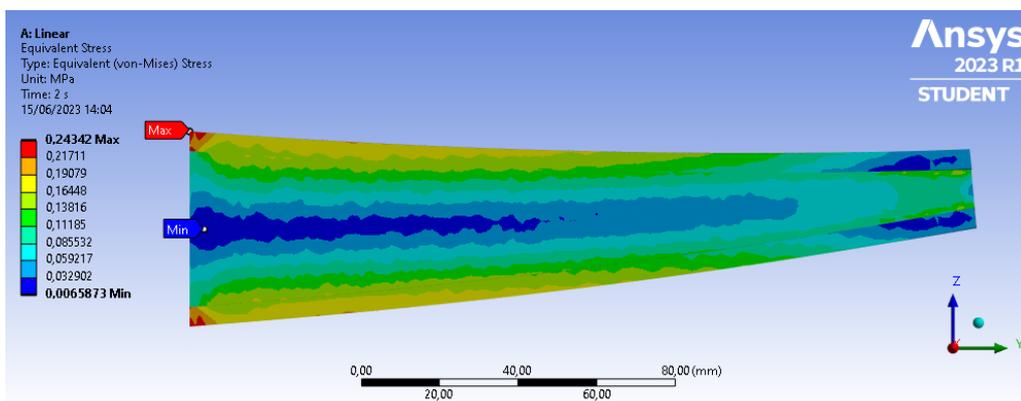


Figura 40 – Tensão equivalente de von Mises da análise linear.

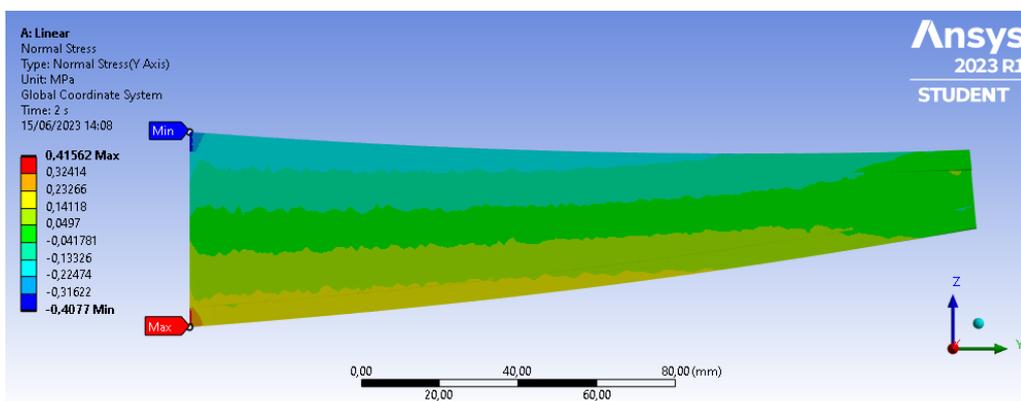


Figura 41 – Tensão normal da análise linear.

Mesmo com as ferramentas adotadas na metodologia para mitigar o efeito da singularidade na extremidade do engaste, é possível observá-lo na tensão normal obtida. Quando um modelo é idealizado com um engaste, essa região pode gerar concentração de tensões devido à falta de liberdade de movimento nessa área específica. Por esse motivo, a tensão normal máxima e mínima foi analisada na metade da geometria para validar o modelo de acordo com o resultado encontrado no cálculo analítico disposto a seguir:

Tabela 13 – Resultado do cálculo analítico

I_{xx}	M_x	σ_{max}
$1,06110^{-7}m^4$	1,1 Nm	0,181 MPa

Comparando esses resultados com o valor obtido pelo cálculo analítico é possível inferir que houve uma diferença de 0,552%. Portanto, o resultado da simulação pode ser considerado válido, pois a baixa diferença indica uma boa concordância entre os métodos utilizados, sugerindo que a solução numérica é confiável e precisa o suficiente para representar adequadamente o problema em questão.

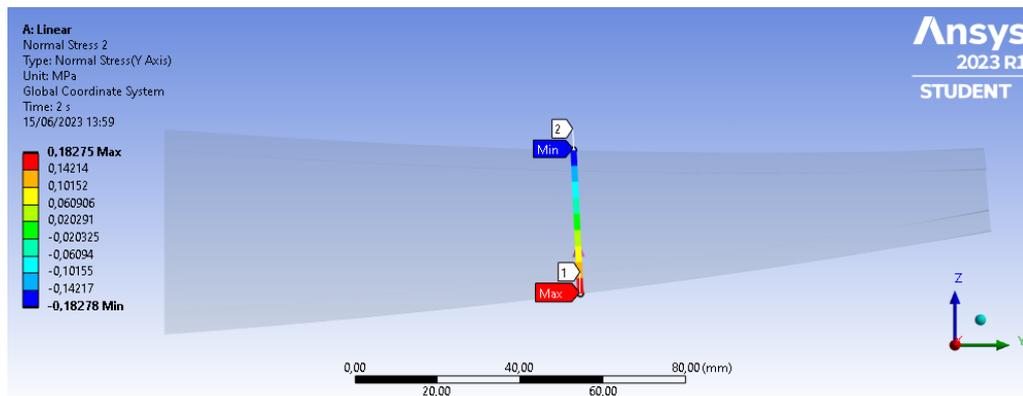


Figura 42 – Tensão normal analisada na metade da geometria.

Os resultados obtidos para as análises com material não lineares são dispostos a seguir. Percebe-se que houve um aumento na tensão do engaste da estrutura em relação aos resultados obtidos para a análise linear considerando o ABS puro. A Tabela 15 apresenta a diferença percentual entre as análises.

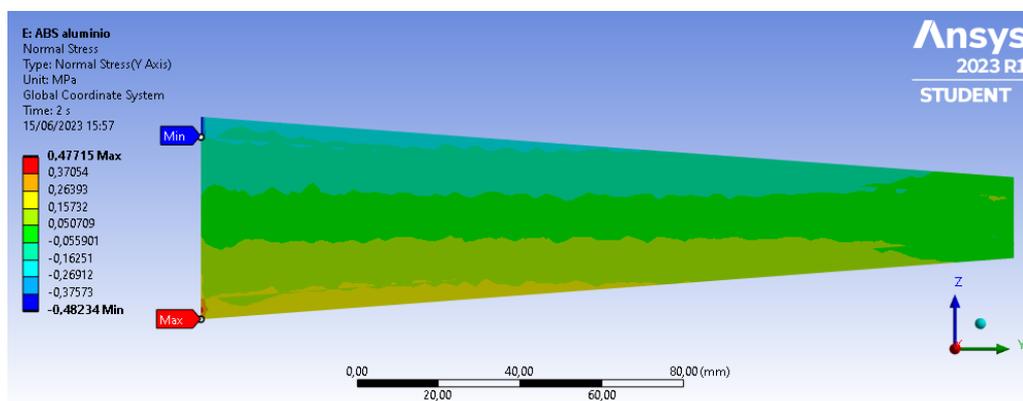


Figura 43 – Tensão normal para o ABS-alumínio.

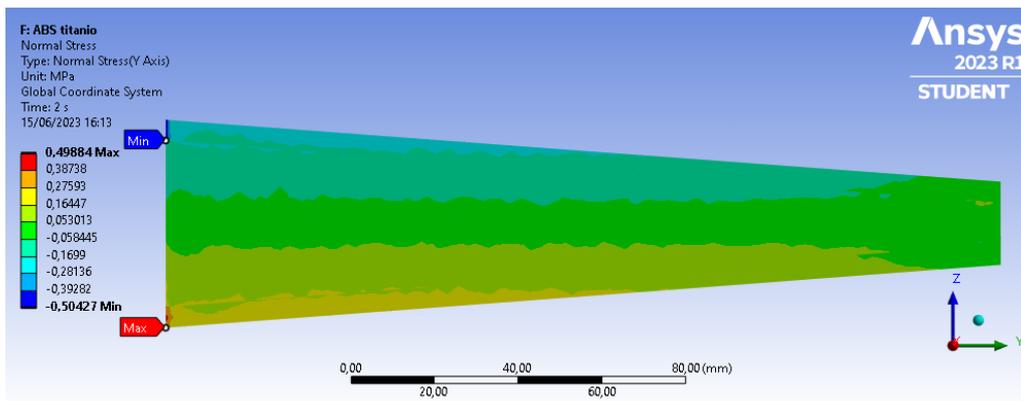


Figura 44 – Tensão normal para o ABS-titânio.

Em geral, a tensão é uniformemente distribuída e os pontos críticos identificados, onde a tensão normal é máxima, estão no engaste.

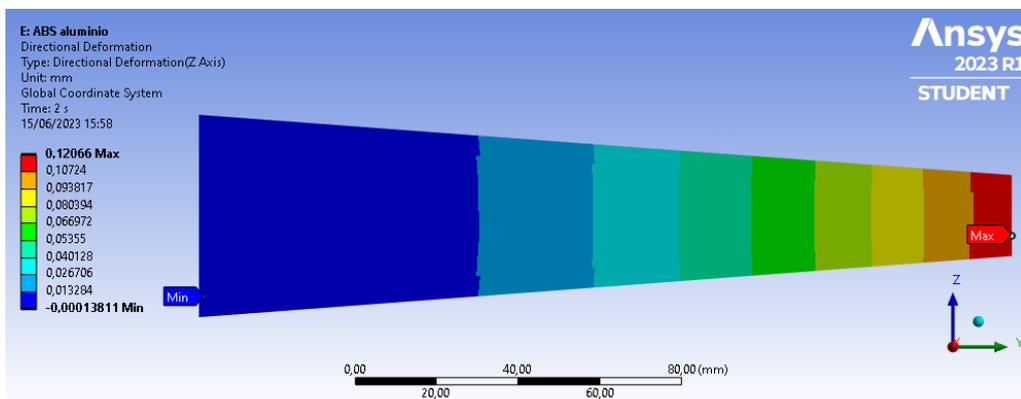


Figura 45 – Deslocamento para o ABS-alumínio.

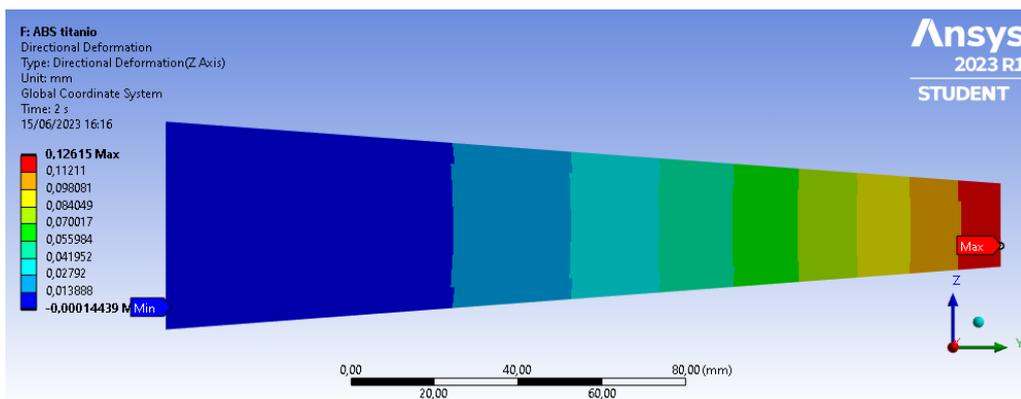


Figura 46 – Deslocamento para o ABS-titânio.

A deformação máxima registrada nos gráficos, em torno de 0,12mm, indica o quanto a viga se deforma sob a ação da carga aplicada. Essa informação é crucial para avaliar o desalinhamento e inclinação da força do motor, que pode influir na controlabilidade do drone.

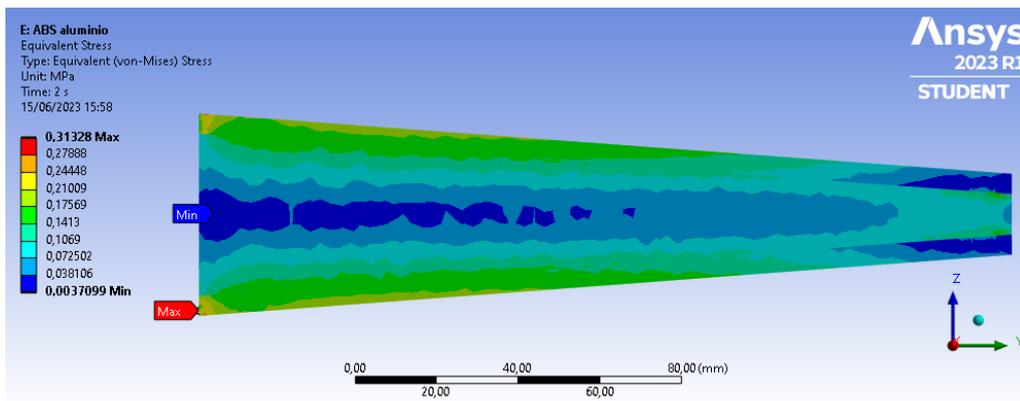


Figura 47 – Tensão equivalente de von Mises para o ABS-alumínio.

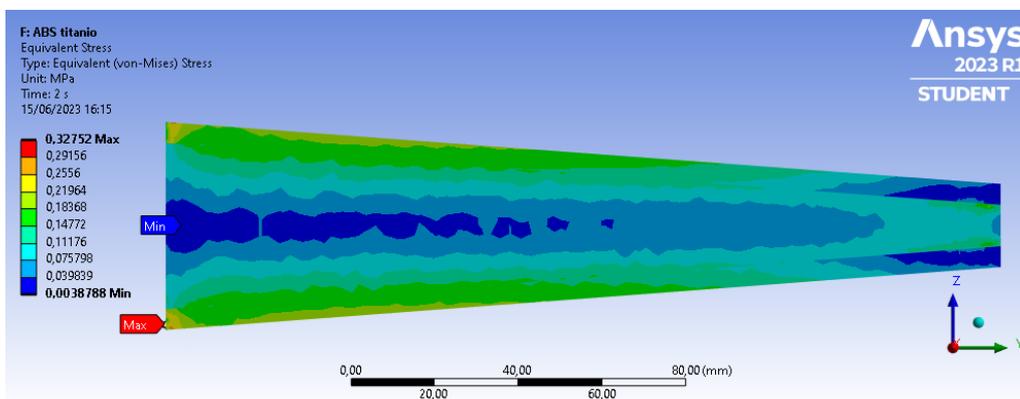


Figura 48 – Tensão equivalente de von Mises para o ABS-titânio.

Os gráficos de tensão de von Mises nos informa a tensão máxima alcançada, indicando o ponto crítico de falha ou deformação permanente. Além disso, permite observar a distribuição de tensão ao longo do material, identificando regiões com concentração de tensões e possíveis pontos de falha. Nos gráficos acima a homogeneidade da distribuição de tensão indica equilíbrio estrutural.

4.7 Análise de otimização

Para a análise no Ansys Discovery, a malha utilizada possui elementos triangulares de 2,73mm, conforme pode ser visualizada na Figura 55. Para o modelo inicial, o deslocamento máximo foi de 0,123mm, a tensão equivalente de von Mises máxima foi de 0,259 MPa e a tensão normal máxima foi de 0,328 MPa, conforme as Figuras 49, 50 e 51:

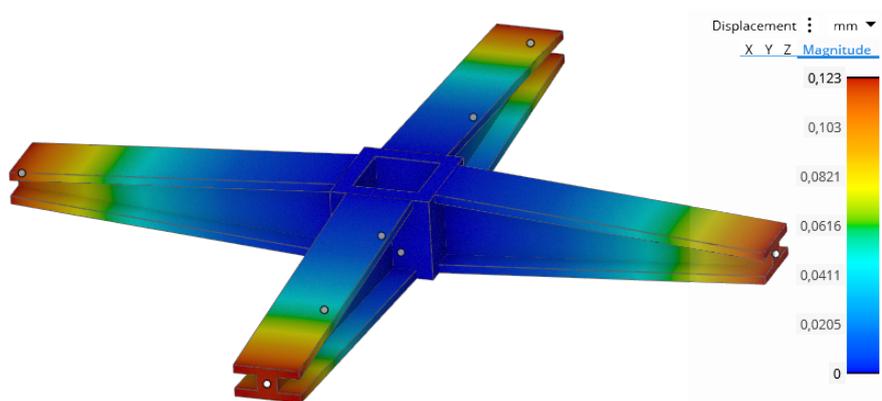


Figura 49 – Análise do deslocamento da geometria pré-otimização.

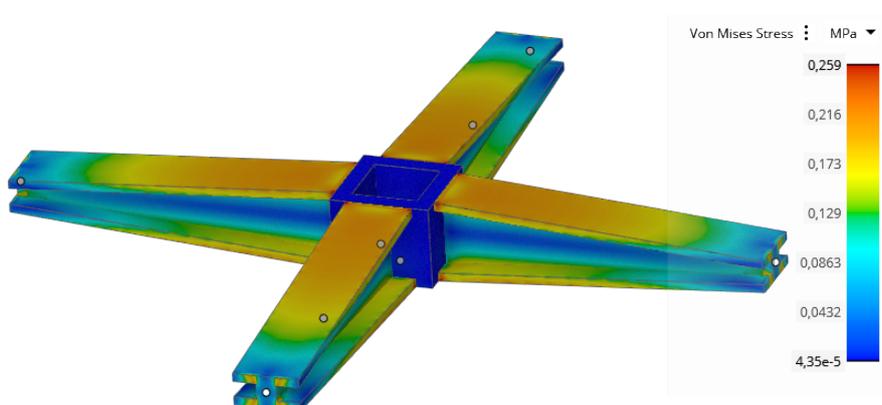


Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises da geometria pré-otimização.

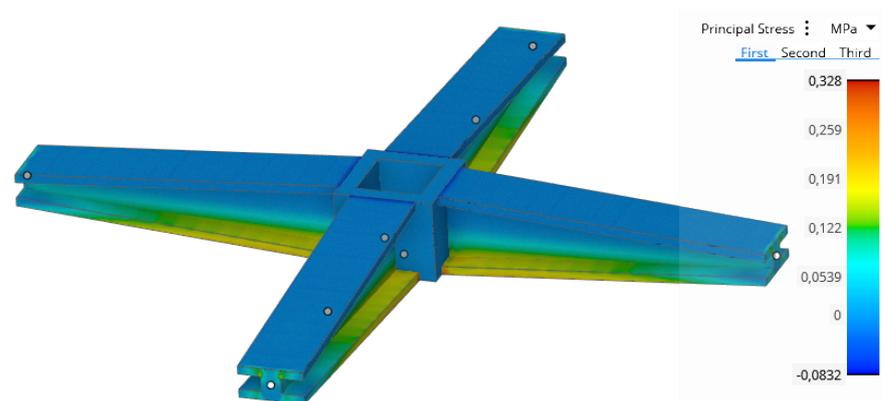


Figura 51 – Tensão normal principal da geometria pré-otimização.

A seguir é apresentado o modelo otimizado revalidado por simulação estrutural. Neste caso, o deslocamento máximo aumentou para 0,198mm, o máximo estado das tensões de von Mises para 0,445 MPa e a tensão normal em x para 0,457 MPa, conforme as Figuras 52, 53 e 54:

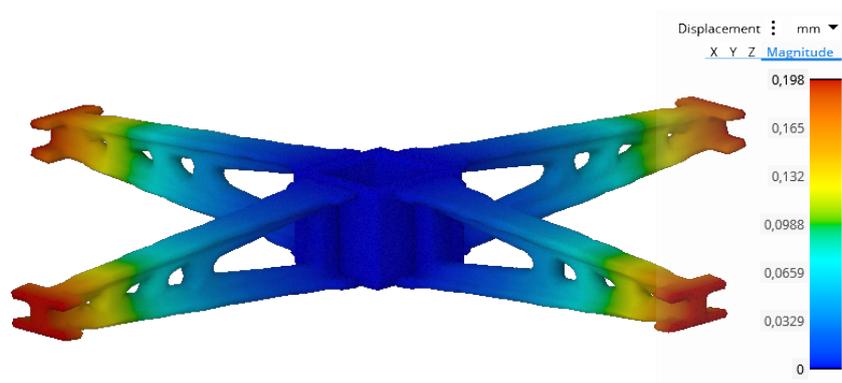


Figura 52 – Análise do deslocamento da geometria otimizada.

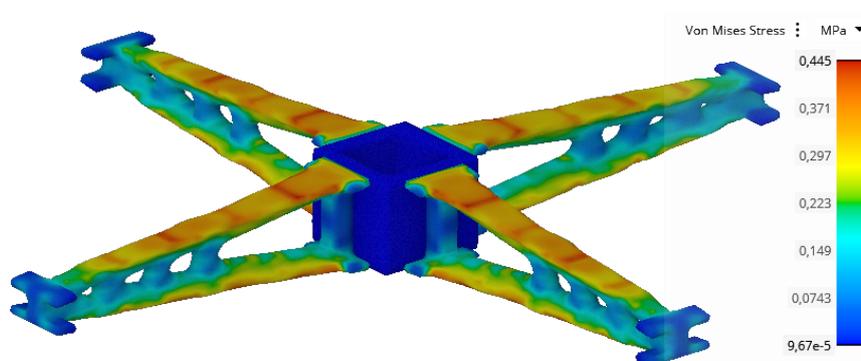


Figura 53 – Tensão equivalente de von Mises para a geometria otimizada.

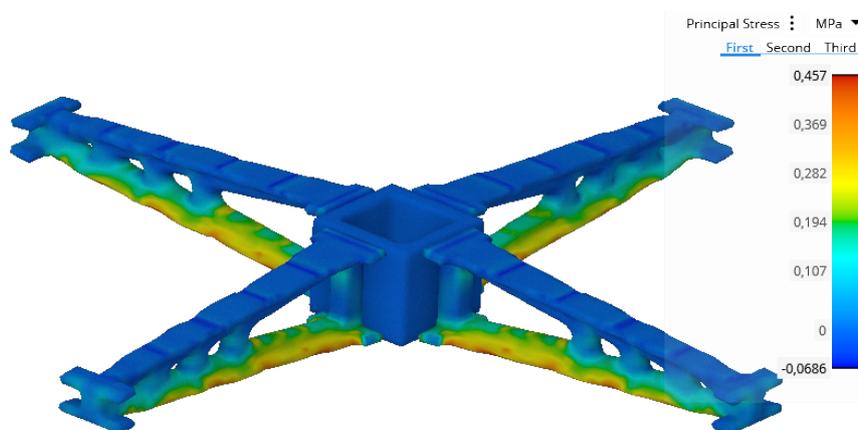


Figura 54 – Tensão normal principal para a geometria otimizada.

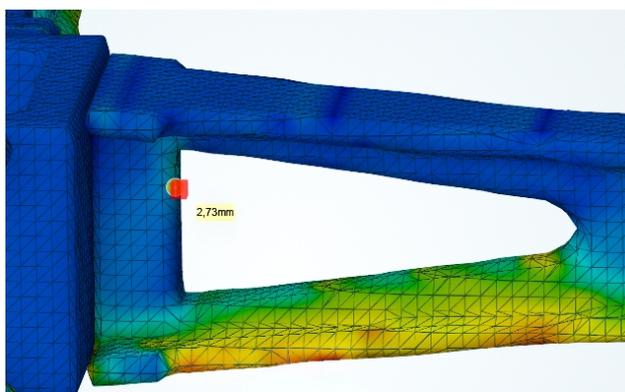


Figura 55 – Detalhe de visualização da malha.

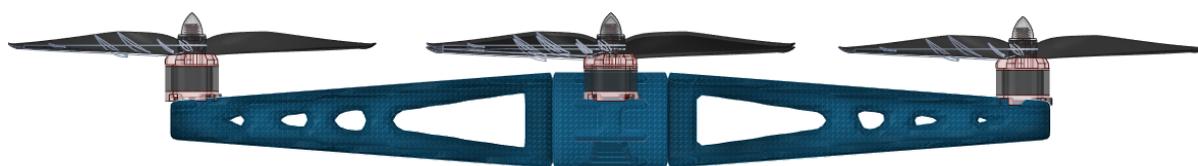


Figura 56 – Estrutura otimizada.



Figura 57 – Estrutura otimizada.

A Tabela 14 compara as duas análises e apresenta o fator de segurança (FS) de cada:

Tabela 14 – Comparação entre a estrutura pré e pós otimização.

Análise	Volume	M_{total}	FS
Pré otimização	$0,0008m^3$	0,820 kg	106
Pós otimização	$0,0004m^3$	0,458 kg	62,2

A Tabela 15 apresenta a diferença percentual de cada análise quando comparadas à análise linear do ABS puro no Workbench:

Tabela 15 – *Diferença percentual das análises em relação ao ABS linear no Workbench.*

	ABS-Alumínio	ABS-Titânio	Discovery pré otimização	Discovery pós otimização
von Mises	28.65%	34.47%	6,37%	83,04%
Tensão normal	3.55%	2.70%	-21,1%	10,04%
Deformação	15.07%	25.14%	-1,37%	58,41%

A análise numérica desempenhou um papel crucial ao oferecer uma visão mais aprofundada sobre as propriedades do ABS em relação à sua aplicação em estruturas de drones. Os resultados dessa análise mostraram que o ABS, mesmo sem a adição dos aditivos em questão, pode ser um material adequado para o uso em tais estruturas.

Em suma, percebeu-se que a análise de otimização topológica de peças de drones pode oferecer uma abordagem inovadora para projetar geometrias mais eficientes e complexas. Por meio dessa técnica, é possível explorar diferentes configurações estruturais e distribuições de material, visando alcançar a máxima eficiência em termos de peso, rigidez e resistência. A otimização topológica pode permitir identificar áreas de alto estresse ou desempenho crítico e concentrar material nessas regiões, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de material nas áreas de menor solicitação. Essa abordagem possivelmente resulta em peças de drones mais leves, porém robustas e capazes de suportar as demandas operacionais.

Além disso, a impressão 3D pode desempenhar um papel fundamental na fabricação dessas peças otimizadas. Com a impressão 3D, é possível materializar geometrias complexas com alta precisão e liberdade de projeto, permitindo a criação de estruturas personalizadas e adaptadas às necessidades específicas da indústria aeroespacial. Ademais, o uso do ABS em drones pode oferecer vantagens significativas, como resistência mecânica, estabilidade dimensional, facilidade de processamento, pós-processamento versátil, disponibilidade e custo. Essas características sugerem que o ABS é uma escolha adequada para a fabricação de peças duráveis, confiáveis e de alta qualidade para drones.

5 Conclusões

No contexto desta pesquisa, foram realizadas análises comparativas entre diferentes composições de ABS, incluindo ABS puro, ABS aditivado com pó de alumínio e ABS aditivado com pó de titânio. O objetivo era investigar se a adição desses aditivos poderia melhorar as propriedades do ABS, resultando em um material mais adequado para o uso em estruturas de drones. Os filamentos aditivados demonstraram ter respostas mecânicas superiores em relação ao filamento de ABS fabricado pelo processo de extrusão utilizado. No entanto, em relação ao ABS comercial, apenas o ABS-alumínio aditivado com 5% apresentou alguma vantagem. Essa diferença pode ter ocorrido devido a erros associados ao processo de mistura utilizado e ao processo de impressão 3D dos corpos de prova. Durante a impressão, foram observadas irregularidades nas camadas impressas e formação de bolhas em alguns corpos de prova.

No entanto, os filamentos produzidos mostraram uma resposta térmica comparável aos resultados encontrados na literatura. Além disso, o diâmetro dos filamentos apresentou qualidade aceitável para utilização em impressoras 3D, em torno de 1,75 mm. Apesar dessas observações, a análise morfológica precisa ser aprofundada. Também foi observado que a preparação de amostras mostrou limitações, sendo que as melhores imagens foram obtidas por meio da investigação de amostras não embutidas. A presença de resina na malha do material moldado pode ter criado "falsos positivos" na análise morfológica. Além disso, a presença de aglutinação de material associada ao uso de um filamento com aditivo, juntamente com a influência do aditivo nas propriedades tixotrópicas e térmicas, possivelmente pode estar associada a necessidade de ajustes e otimização do processo de fabricação. Por outro lado, a boa uniformidade na impressão das camadas do filamento de ABS-titânio com 5% de aditivo, em comparação com o filamento de alumínio, sugere um desempenho superior desse material.

Apesar do esforço despendido na etapa de fabricação, os resultados obtidos na análise das propriedades mecânicas e térmicas do ABS aditivado podem revelar uma ausência de diferenças significativas em relação ao ABS puro. As melhorias esperadas, tanto em termos de resistência mecânica quanto de características térmicas, mostraram-se pouco expressivas. Embora a pesquisa não tenha confirmado as expectativas de melhoria com a adição de pó de alumínio ou pó de titânio ao ABS, o estudo proporcionou um entendimento valioso sobre as características do ABS e sua adequação para as demandas das estruturas de drones. Esses achados podem direcionar futuras investigações e aplicações, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de drones com materiais eficientes. A simulação estrutural realizada sugere que o ABS puro possui adequada resistência mecânica e boa relação entre resistência e peso, tornando-se um possível material para a construção de estruturas leves, porém robustas o suficiente.

5.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se explorar as limitações do equipamento empregado em maior detalhe. Ademais, um aspecto relevante para aprimorar as propriedades mecânicas durante os testes de tração reside na orientação de impressão dos corpos de prova. Sugere-se que, em

tentativas futuras de impressão, a orientação 0-90° seja adotada visando obter uma resposta mais favorável às solicitações de esforço. Adicionalmente, para uma análise mais aprofundada, é recomendável realizar cálculos médios de condutividade térmica, examinar a influência da velocidade de impressão e da temperatura do bico de extrusão, bem como considerar o impacto da morfologia das partículas nas propriedades tixotrópicas do material. Essas abordagens complementares podem permitir uma compreensão mais completa e refinada do desempenho do material estudado.

Referências

- 3DLAB. *3D Lab*. 2023. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 38.
- ANSYS, I. *Ansys meshing user's guide*. vol, v. 15317, p. 724–746, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- ASTM:D638-03. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA. Citado 3 vezes nas páginas 7, 9 e 38.
- ATES, B. et al. Chemistry, structures, and advanced applications of nanocomposites from bio-renewable resources. *Chemical Reviews*, ACS Publications, v. 120, n. 17, p. 9304–9362, 2020. Citado na página 24.
- AZEVEDO, Á. F. Método dos elementos finitos. *Faculdade de Engenharia da universidade do Porto*, v. 1, n. 7, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- BARTOLOMEI, S. S. *Estudo de nanocompósitos formados por PLA e nanopartículas de celulose*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado na página 20.
- BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W. *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. [S.l.]: Princeton university press, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- BELEGUNDU, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2019. Citado na página 33.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2003. Citado na página 33.
- BILLMEYER, F. W. *Ciencia de los polímeros*. [S.l.]: Reverté, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 7, 17 e 18.
- BUENO, Y. P. R. et al. Análise mecânica da costela e da caixa torácica humana: implementação pelo método de elementos finitos (mef). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2021. Citado na página 28.
- CARRILLO, L. et al. Quad-rotor control vision-based hovering and navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, IEEE, n. 1, January 2011. Citado na página 41.
- CHEN, F. et al. Actuator fault estimation and reconfiguration control for the quad-rotor helicopter. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 1, p. 33, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 26.
- COLEMAN, J. N.; KHAN. Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes. *Advanced materials*, Wiley Online Library, v. 18, n. 6, p. 689–706, 2006. Citado na página 22.
- DJI. *Site Oficial da DJI*. <<https://www.dji.com/br>>. Acessado em 02 de maio de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 27.

EDGAR, J.; TINT, S. Additive manufacturing technologies: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *Johnson Matthey Technology Review*, Johnson Matthey, v. 59, n. 3, p. 193–198, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

FEDERATION, B. P. A history of plastics. *British Plastics Federation*. Disponível em, 2015. Citado na página 19.

FERNANDES, T. F. et al. Avaliação das propriedades mecânicas e dimensionais de diferentes polímeros processados pelo método fdm. Blumenau, SC, 2022. Citado na página 25.

FERRY, J. D. *Viscoelastic properties of polymers*. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 1980. Citado na página 20.

FILMAQ3D. *Extrusora, resfriadora e tracionadora*. 2023. Disponível em: <<https://filmaq3d.com/produto/resfriadora-e-tracionadora-ftr1/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 34.

GALE, M. Compounding with single-screw extruders. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, Wiley Online Library, v. 16, n. 4, p. 251–262, 1997. Citado na página 24.

GOH, G. D. et al. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (uavs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology*, Elsevier, v. 63, p. 140–151, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

GORNI, A. A. A evolução dos materiais poliméricos ao longo do tempo. *Revista plástico industrial*, 2003. Citado na página 17.

HARRIS, M. et al. Acrylonitrile butadiene styrene and polypropylene blend with enhanced thermal and mechanical properties for fused filament fabrication. *Materials*, MDPI, v. 12, n. 24, p. 4167, 2019. Citado na página 21.

HU, X. et al. A novel polymeric intumescent flame retardant: synthesis, thermal degradation mechanism and application in abs copolymer. *Polymer degradation and stability*, Elsevier, v. 97, n. 9, p. 1772–1778, 2012. Citado na página 21.

INÁCIO, D. et al. A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*, v. 7, n. 3, p. 653–667, 2020. Citado na página 24.

IONASHIRO, M. Princípios básicos da termogravimetria e análise térmica diferencial. Araraquara, SP, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

JR, S. V. C. Ciência dos polímeros. *Artiliber editora, São Paulo*, v. 24, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

JUNIOR, M. S. et al. Construção de equipamento para obtenção de filamentos para impressão 3d: um estudo com copolímero abs e microcompósitos com fibras de celulose. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2021. Citado na página 47.

KASSIMALI, A. *Análise estrutural*. [S.l.]: Cengage Learning, 2016. Citado na página 28.

- KSHETRI, T. et al. Recent advances in mxene-based nanocomposites for electrochemical energy storage applications. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 117, p. 100733, 2021. Citado na página 35.
- LAWES, G. et al. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: A text for biologists, materials scientists, and geologists*. [S.l.]: Springer, 1992. Citado na página 23.
- LECO. *instrumentos LECO*. 2023. Disponível em: <<https://pt.leco.com/product/olympus-dsx-series>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 23 e 40.
- LEE, H.-H. *Finite element simulations with ANSYS Workbench 21*. [S.l.]: SDC publications, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 28, 30, 31 e 32.
- LEE, J. H. et al. Recent advances in the use of additives for polyolefins. *Polymer Reviews*, Taylor & Francis, v. 56, n. 3, p. 361–391, 2016. Citado na página 18.
- LEISHMAN, J. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Citado na página 26.
- LEWIŃSKI, T. et al. Topology optimization in structural mechanics. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Polska Akademia Nauk, n. 1, 2013. Citado na página 32.
- LI, X. et al. The effect of compatibilizer on the thermal stability of acrylonitrile-butadiene-styrene/polycarbonate blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Springer, v. 138, n. 2, p. 1041–1052, 2019. Citado na página 21.
- MARCHINI, L. G. *Estudo da incorporação de nanopartículas de prata na matriz polimérica de termoplástico elastomérico poliéster (TPE-E) por diferentes técnicas de processamento visando ação bactericida*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018. Citado na página 26.
- MARTINS, S. d. O. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas de polímeros de impressão 3d e de plásticos de engenharia utilizados em indústrias. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018. Citado na página 25.
- MAZZALI, G. B. Potencialidades da manufatura aditiva. Universidade Federal de São Carlos, 2022. Citado na página 14.
- MELO, J. M. T. M. 3d printer nozzle: effects of die dimension, geometry, and material on the quality of fff printed parts in pla. 2022. Citado na página 47.
- MIRANDA, S. D. F. *Produção de filamentos compósitos de poliestireno-grafite exfoliada*. Tese (Doutorado), 2018. Citado na página 24.
- MIWA, V. H. S. Análise numérica e experimental da vida em fadiga do polímero acrilonitrila butadieno estireno impresso em 3d. 2022. Citado na página 28.
- NUNES, B. L. Desenvolvimento de filamento compósito para impressão 3d. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 9, 19 e 23.
- OLIVEIRA, F. Q. Preparo e caracterizações de novas blendas biodegradáveis renováveis para uso em filamentos para futura impressão 3d e uso em sensores. 2019. Citado na página 23.

- PEREIRA, F. C. Caracterização do comportamento em fadiga do plástico abs produzido por extrusão e manufatura aditiva. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- POPESCU, D. et al. Fdm process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 69, p. 157–166, 2018. Citado na página 25.
- PROCESSING, P. 2015. Disponível em: <POLYMERPROCESSING.COM>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 25.
- QUIROGA, M. S.; VARGAS, F. J. T. Análise e síntese de controladores: Simulação e construção de um quadricoptero. In: *Congresso Brasileiro de Automatica-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Citado na página 18.
- RABELLO, M.; PAOLI, M.-A. D. Aditivção de termoplásticos. *São Paulo: Artliber*, 2013. Citado na página 18.
- RAYEGANI, F. et al. Additive manufacturing of drones: An overview. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 14, n. 1, p. 46–63, 2019. Citado na página 25.
- REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 10, p. e4–e10, 2000. Citado na página 14.
- RUÃO, H. M. P. *Seleção de Polímeros Termoplásticos para Matrizes Híbridas Metaloplásticas usadas em Processos de Quinagem de Componentes Aeronáuticos*. Dissertação (Mestrado) — Atlântica-Instituto Universitário, 2022. Citado na página 17.
- RUBINSTEIN, M.; COLBY, R. H. *Polymer physics*. [S.l.]: Oxford University Press, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- SANFELICE, R. et al. Nanotecnologia aplicada a polímeros. São Paulo: Blucher, 2022., 2022. Citado 3 vezes nas páginas 17, 24 e 35.
- SANTOS, M. F. D.; XAVIER, L. L. Apoio técnico em microscopia eletrônica de varredura e microscopia confocal no labcemm. *XX SIC-PUCRS, 2019, Brasil.*, 2019. Citado na página 23.
- SCOTT, C. E. *Single Screw Extrusion*. 2015. Disponível em: <<https://polymerprocessing.com/operations/sscrew/index.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.
- SEIFI, H. et al. A review on current trends in thermal analysis and hyphenated techniques in the investigation of physical, mechanical and chemical properties of nanomaterials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Elsevier, v. 149, p. 104840, 2020. Citado na página 21.
- SHAHMORADI, J. et al. A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. *Drones*, MDPI, v. 4, n. 3, p. 34, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 27.
- TRINDADE, M. G. Desenvolvimento de um drone de baixo custo. Universidade Federal de Santa Maria, 2016. Citado na página 26.
- VALINO, A. D. et al. Advances in 3d printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, Elsevier, v. 98, p. 101162, 2019. Citado na página 26.

VASCONCELOS, P. E. A.; MELLO, C. de M. Responsabilidade penal e novas tecnologias: Desafio do direito no século xxi sobre o uso de drones ou vant's. *Revista Juscontemporânea do TRF2*, v. 1, n. 1, p. 65–79, 2019. Citado na página 26.

VAZ, L. E. Método dos elementos finitos em análise de estruturas. *Rio de*, 2011. Citado na página 29.

VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. Citado na página 25.

WERKEN, N. van de et al. Design considerations and modeling of fiber reinforced 3d printed parts. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 160, p. 684–692, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 14, 18, 19 e 27.

Apêndices

APÊNDICE A – Desenho técnico do braço

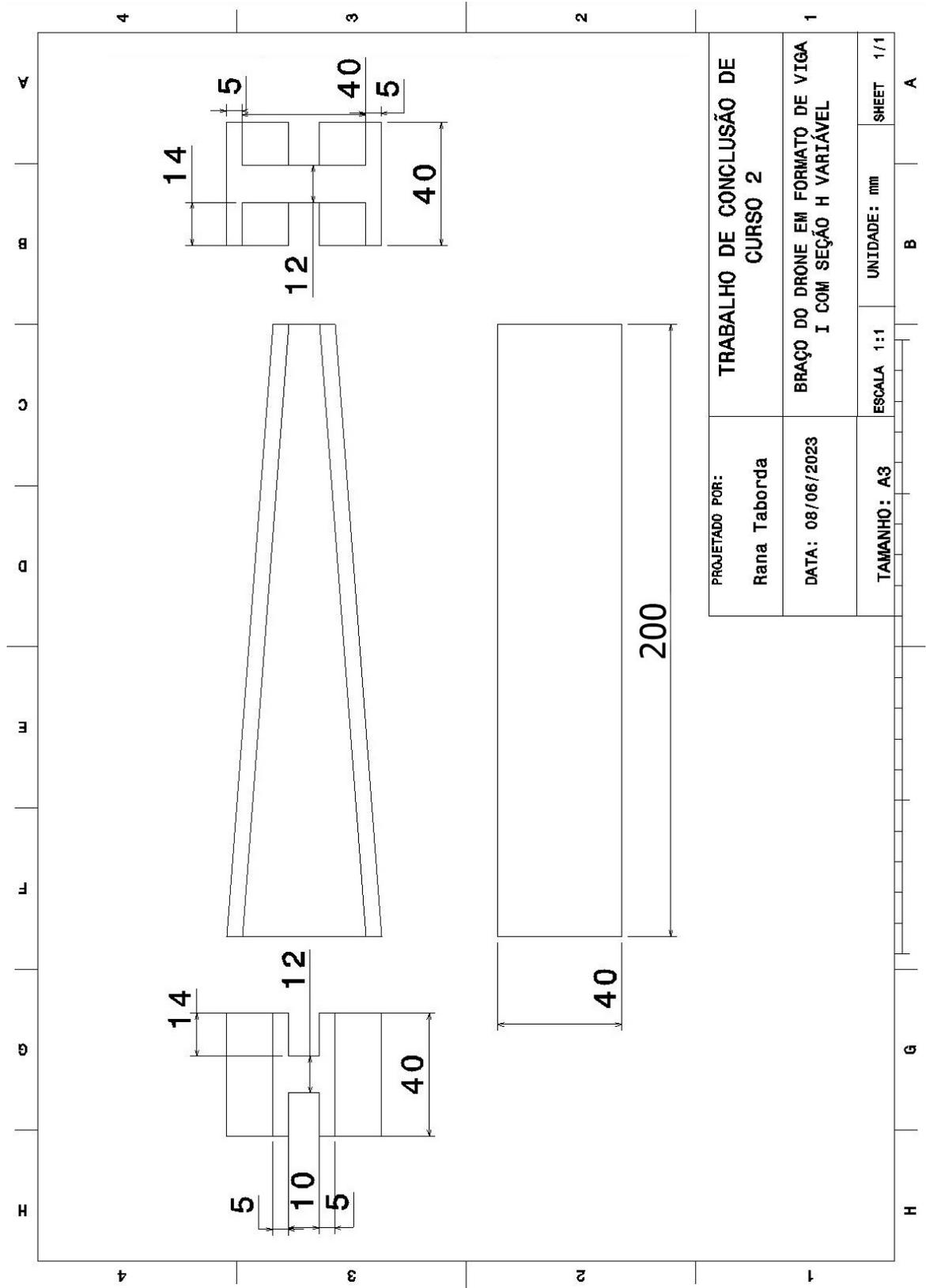


Figura 58 – Desenho técnico do braço do drone com formato de viga em I com seção H variável.

APÊNDICE B – Desenho técnico do drone

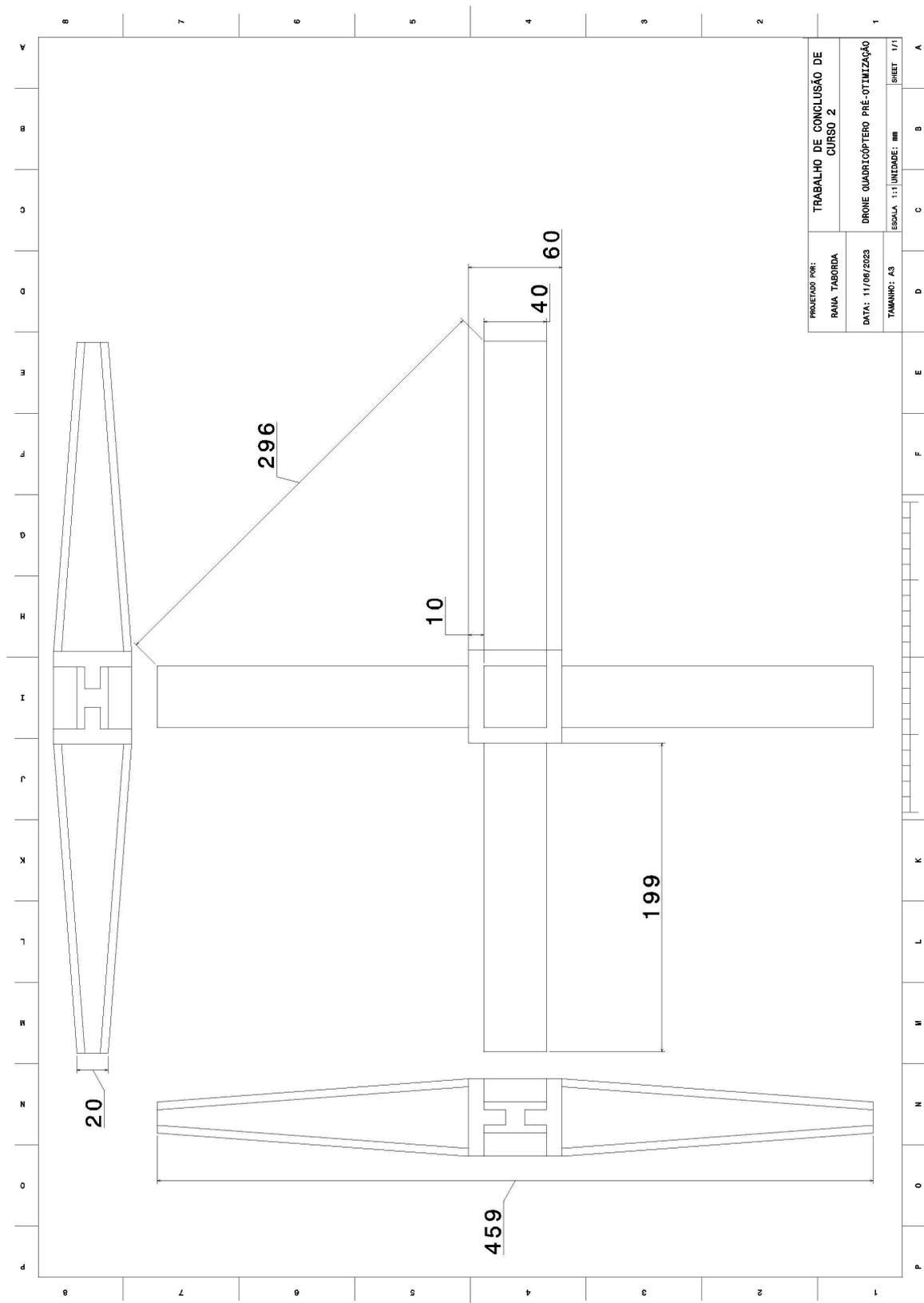


Figura 59 – Desenho técnico do drone.