



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

**CRISTIANE DA COSTA SOUZA**

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DOS SUPORTES METÁLICOS DO  
CABEAMENTO DE UMA AERONAVE POR COMPONENTES  
TERMOPLÁSTICOS**

Guaratinguetá  
2024

**Cristiane da Costa Souza**

**Análise da Substituição dos Suportes Metálicos do Cabeamento de uma Aeronave por Componentes Termoplásticos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Coorientador: Prof. Me. Fernando Henrique Mayworm de Araujo.

Guaratinguetá  
2024

S729a Souza, Cristiane da Costa  
Análise da substituição dos suportes metálicos do cabeamento de uma aeronave por componentes termoplásticos / Cristiane da Costa Souza - Guaratinguetá, 2024.  
64 f : il.  
Bibliografia: f. 58-64  
Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Coorientador: Prof. Me. Fernando Henrique Mayworm de Araujo.


1. Indústria aeroespacial. 2. Termoplásticos. 3. Poliamidas.  
I. Título.

CDU 621.311


**CRISTIANE DA COSTA SOUZA**

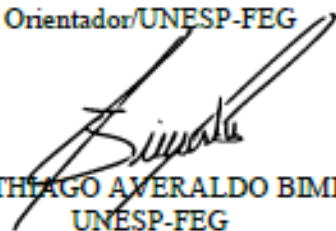
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADA EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

  
Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. THIAGO AVERALDO BIMESTRE  
UNESP-FEG

  
Prof.ª Dr.ª THAIS SANTOS CASTRO  
UNESP-FEG

Janeiro 2024

**CRISTIANE DA COSTA SOUZA**

**NASCIMENTO** 28/12/1992 – São José dos Campos / SP

**FILIAÇÃO** Clebson Carlos de Souza  
Aparecida Cristina da Costa Souza

**2018/2023** Engenharia Mecânica -UNESP

Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus irmãos e ao meu professor Fernando pelo carinho e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus, por sempre me dar forças nos momentos mais difíceis para concluir esse curso e este trabalho.

Aos meus pais Aparecida Cristina e Clebson, pelo amor condicional e apoio durante esses anos, eu não teria finalizado essa grande conquista sem ter o amor e apoio deles. Pelo exemplo de amor e dedicação, fundamental e inspirador para todas as minhas conquistas. Pelos incentivos diários, pela compreensão e apoio incondicional ao longo de todo o curso.

Aos meus irmãos Jéssica e Pedro, pelo apoio e carinho constante.

Ao meu Orientador Celso Tuna, pela orientação e direcionamento para a formulação desta dissertação.

Ao meu Coorientador Fernando Henrique Mayworm de Araujo, o qual eu dedico esse trabalho, pela coorientação, motivação, conhecimento, disponibilidade, entusiasmo e ajuda no decorrer de toda a formulação desta dissertação. Infelizmente o nosso querido professor Fernando nos deixou há poucos dias e não há palavras para descrever o meu carinho e admiração por ele, em nome da Faculdade e de todos os meus colegas de sala.

Aos meus amigos e demais familiares pela torcida, motivação e paciência contante, trocas de experiências e por todos os momentos vivenciados, no decorrer desses 6 anos de Engenharia Mecânica Noturno.

“Diante de seus olhos, dentro do seu  
coração”;

Jéssica Cristina da Costa Souza

## RESUMO

A busca contínua por materiais que combinem leveza e resistência constitui um dos desafios centrais na indústria aeroespacial. A substituição de componentes metálicos por alternativas termoplásticas representa uma estratégia promissora, com o potencial de diminuir significativamente o consumo de combustível e os custos de produção, sem comprometer a segurança operacional das aeronaves. O estudo teve como objetivo avaliar a validação de um *bracket* em poliamida, considerando design, desempenho mecânico, e adequação operacional em comparação com a versão metálica e com a versão em que teve falha no primeiro ensaio dinâmico realizado. Utilizou-se modelagem por CAD e análise computacional estática e dinâmica para avaliar a geometria e o comportamento mecânico do *bracket*, com foco nas modificações para aumentar a rigidez e reduzir falhas. Testes práticos e simulações de condições operacionais complementaram a análise. O modelo final de suporte de Nylon desenvolvido apresentou melhorias significativas em relação ao inicialmente prototipado e também em relação a peça original (metálica). A rigidez aumentou, como evidenciado pela redução de 31,36% no deslocamento no eixo Z. Além disso, houve uma economia de peso, com o "Nylon New" pesando 3,2 gramas por unidade contra 4,13 gramas do suporte metálico, traduzindo-se em uma redução de 930 gramas considerando a quantidade de 1000 suportes por aeronave. A substituição do suporte metálico pelo "Nylon New" mostrou-se não apenas viável, mas vantajosa. O "Nylon New" oferece uma melhoria na performance mecânica, com aumento significativo na rigidez e redução no custo e no peso, contribuindo para a eficiência operacional da aeronave e proporcionando um corte substancial nos custos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aeronáutica; Pesquisa e desenvolvimento; Suporte de cabos; Injeção de termoplásticos; Poliamida.

## ABSTRACT

The continuous search for materials that combine lightness and resistance constitutes one of the central challenges in the aerospace industry. Replacing metallic components with thermoplastic alternatives represents a promising strategy, with the potential to significantly reduce fuel consumption and production costs, without compromising aircraft operational safety. The study aimed to evaluate the validation of a polyamide bracket, considering design, mechanical performance, and operational suitability in comparison with the metallic version and the version that failed in the first dynamic test performed. CAD modeling and static and dynamic computational analysis were used to evaluate the geometry and mechanical behavior of the bracket, focusing on modifications to increase rigidity and reduce failures. Practical tests and simulations of operating conditions complemented the analysis. The "New Nylon Support" presented significant improvements over the "Nylon old" and the metal support. Rigidity has increased, as evidenced by the 31.36% reduction in displacement in the Z axis. Additionally, there has been a weight saving, with the "Nylon New" weighing 3.2 grams per unit versus 4.13 grams for the metal bracket, translating into a reduction of 930 grams considering the quantity of 1000 supports per aircraft. Replacing the metal support with "Nylon New" proved to be not only viable, but also advantageous. "Nylon New" offers an improvement in mechanical performance, with a significant increase in rigidity and a reduction in cost and weight, contributing to the aircraft's operational efficiency and providing a substantial cost cut.

**KEYWORDS:** Aeronautics; Research and development; Cable support; Thermoplastic injection; Polyamide.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes Principais de um Avião. ....	18
Figura 2 – Estrutura <i>Nylon</i> 6-6. ....	27
Figura 3 – Esquemática de um ensaio de tração. ....	35
Figura 4 – Aspectos do teste de dureza Brinell. ....	36
Figura 5 – Corpo De Prova Para Ensaio De Tração Segundo A Norma Astm D63. ....	39
Figura 6 - Análise dos esforços na estrutura do módulo de suporte de painel fotovoltaico em região crítica. ....	42
Figura 7 – Componente analisado neste estudo.....	44
Figura 8 - Componente fabricado em metal. ....	46
Figura 9 – Modelo inicial do bracket em <i>Nylon</i> , denominado 'Versão 00'.....	46
Figura 10 - Nova geometria em roxo – “ <i>Nylon</i> New”, refletindo as melhorias baseadas em relação a Versão 0 “ <i>Nylon</i> Old”. ....	47
Figura 11 – Resultados da análise de Von Mises para versão “ <i>Nylon</i> Old” e versão “ <i>Nylon</i> New” com carga de 1n.....	48
Figura 12 - Comparação de deslocamento em suportes de cabeamento em <i>Nylon</i> : Versão 00 Vs. Versão 01. ....	49
Figura 13 - Comparativo de análise modal: frequências naturais de suportes de cabeamento Em <i>Nylon</i> Versões 00 (Geometria 1) E Versão 01 (Geometria 2). ....	50
Figura 14 – Resultados da análise estática comparativa para as três versões do bracket analisado. ....	52
Figura 15 – Análise do peso para as três versões dos componentes.....	53
Figura 16 – Análise do deslocamento para as três versões do componente. ....	54
Figura 17 – Análise de custo para os modelos metálicos e <i>Nylon</i> New. ....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Ligas de alumínio e suas características. ....	22
Tabela 2 - Frequências Naturais De Suportes De Cabeamento. ....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMMA	Polimetilmetacrilato
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PLA	Ácido Polilático
PC	Policarbonatos
PE	Polietileno
UHMWPE	Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular
PPO	Polifenileno Óxido
PEEK	Polietileno Éter Cetona
PA	Poliamida (utilizada como equivalente a " <i>Nylon</i> " no texto)
MIL-STD-810	Military Standard 810 (Norma Militar 810)
NATO STANAGs	Standardization Agreements (Acordos de Padronização) da OTAN
AS/EN9100	Aerospace Standards/EN9100 (Padrões Aeroespaciais/EN9100)
ASTM D638	American Society for Testing and Materials, Método de Ensaio D638
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics (Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica)
RTCA/DO-160G	Documento RTCA/DO-160G
CATIA	Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application (Aplicação Interativa Tridimensional Assistida por Computador)
CAD	Computer-Aided Design (Projeto Assistido por Computador)
PLM	Product Lifecycle Management (Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto)

## LISTA DE SÍMBOLOS

B	comprimento
c	calor específico
<i>Ec</i>	número de Eckert
h	espaço
H	espessura de material sinterizado
k	relação entre os coeficientes de condutividade térmica
p	parâmetro adimensional de pressão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>17</b>
2.1	FUNDAMENTOS GERAIS DE AERONAVES	17
2.2	MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO AERONÁUTICA	20
<b>2.2.1</b>	<b>Materiais Metálicos</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Materiais Termoplásticos</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Nylon</b>	<b>26</b>
2.2.3.1	Característica Químicas do Nylon	26
2.2.3.2	Propriedades Mecânicas do Nylon	28
2.2.3.3	Aplicações do Nylon Em Aeronave	30
2.4	VALIDAÇÃO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS	33
<b>2.4.1</b>	<b>Ensaio Para Validação de Componentes em Aeronaves</b>	<b>33</b>
2.4.1.1	Teste de Resistência e Umidade	33
2.4.1.2	Ensaio de Tração e Dureza	34
2.4.1.3	Teste de Vibração	37
2.4.2	Normas Regulamentadoras para Ensaio de Componentes Aeronáuticos	38
2.4.2.1	ASTM D638	38
2.4.2.2	RTCA e RTCA/DO – 160G	40
2.4.2.3	Catia e Requisito de Projeto	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A aviação é um setor em constante evolução, buscando constantemente aprimorar a eficiência, desempenho e sustentabilidade das aeronaves. Nesse contexto, a substituição de materiais tradicionais, como os metálicos, por novas alternativas, como os termoplásticos, tem ganhado destaque como uma abordagem inovadora, econômica e promissora (PANTELAKIS; TSERPES, 2020).

A substituição dos suportes metálicos do cabeamento por componentes termoplásticos representa uma das áreas de pesquisa e desenvolvimento na indústria aeronáutica. Os suportes de cabeamento têm a função crucial de garantir a fixação e o posicionamento adequado dos cabos elétricos que interligam os diversos sistemas e componentes da aeronave. A mudança para componentes termoplásticos nessa aplicação específica pode oferecer vantagens significativas em relação aos materiais metálicos convencionais.

Uma das principais vantagens dos componentes termoplásticos é a redução de custo e de peso. Sendo o segundo um fator crítico em projetos aeronáuticos, pois afeta diretamente a eficiência do consumo de combustível e o desempenho geral da aeronave. A utilização de materiais termoplásticos mais leves pode contribuir para a diminuição do consumo de combustível e, conseqüentemente, para a redução das emissões de gases poluentes, tornando as aeronaves mais amigáveis ao meio ambiente (NEVEU *et al.*, 2022).

Os materiais termoplásticos oferecem excelente resistência à corrosão, o que pode aumentar significativamente a vida útil dos suportes de cabeamento. A corrosão é uma das preocupações constantes em componentes metálicos expostos a ambientes agressivos, como as condições climáticas durante os voos. Ao optar pelos termoplásticos, a manutenção e substituição de peças corroídas podem ser reduzidas, contribuindo para a redução dos custos operacionais das aeronaves (SOFI *et al.*, 2023).

A versatilidade dos termoplásticos também permite maior liberdade no design e fabricação dos suportes de cabeamento. Esses materiais podem ser moldados em diferentes geometrias e formatos complexos, o que possibilita a personalização e otimização dos componentes para atender aos requisitos específicos de cada aeronave. Essa flexibilidade de design pode levar a uma melhor distribuição do cabeamento e melhorias na organização dos sistemas elétricos dentro da aeronave, resultando em ganhos de eficiência e facilidade de manutenção (SCHUHLER *et al.*, 2018).

A substituição dos componentes metálicos pelos de termoplástico visa obter benefícios significativos em termos de eficiência operacional. Entretanto, para que essa substituição seja viável e bem-sucedida, é imperativo que os novos suportes sejam estruturalmente e geometricamente equivalentes aos atuais, de forma a não afetar o posicionamento, o funcionamento adequado do cabeamento na aeronave e principalmente a troca do suporte metálico pelos de *Nylon* dos aviões em operação. Isso significa que os novos componentes devem ser cuidadosamente projetados e testados para garantir sua confiabilidade e segurança operacional.

Nesse contexto, este estudo teve com o objetivo como objetivo realizar a análise do processo de validação da substituição de um componente aeronáutico (bracket) metálico, mais precisamente o suporte de cabeamento, por um similar em material termoplástico. Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos a serem alcançados: Projetar o componente em material termoplástico, simular computacionalmente o desempenho mecânico do item; o estudo das características e parâmetros necessários para funcionamento adequado do componente em resina termoplástica e a realização de ensaios que simulem as condições operacionais sobre os suportes.

Este estudo inicia com uma introdução que situa o leitor no campo da aeronáutica, destacando a importância de inovar na seleção de materiais para componentes aeronáuticos e definindo o foco na substituição de suportes metálicos por alternativas termoplásticas. A importância dessa substituição é esclarecida em termos de potenciais benefícios, como redução de peso e custos, bem como a manutenção da segurança operacional.

O desenvolvimento do trabalho aprofunda nos fundamentos das aeronaves, examinando os materiais utilizados em sua construção. Uma atenção especial é dada ao *Nylon*, explorando desde suas características químicas e propriedades mecânicas até suas aplicações específicas na indústria aeroespacial. Procedimentos para a validação de componentes são cuidadosamente revisados, contemplando uma série de ensaios específicos e as normativas que regem tais processos.

Na metodologia, o estudo detalha as técnicas e ferramentas empregadas, como a modelagem CAD e as simulações computacionais, explicando como foram coletados e analisados os dados. O segmento sobre os resultados e discussões apresenta as descobertas obtidas, comparando o desempenho dos diferentes materiais e destacando as melhorias proporcionadas pela nova versão do suporte em *Nylon*.

A conclusão sintetiza as descobertas, enfatizando a viabilidade e as vantagens da nova abordagem em termos de desempenho mecânico e eficiência de custos. O estudo encerra com

um olhar para o futuro, sugerindo caminhos para pesquisas adicionais e aplicação prática dos resultados obtidos. Ao longo do texto, uma rigorosa documentação das fontes garante a integridade acadêmica e permite aos leitores e pesquisadores acessar as referências para estudos adicionais ou análises aprofundadas.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 FUNDAMENTOS GERAIS DE AERONAVES

Aeronaves são veículos projetados para voar, independentemente do seu modo de voo. Algumas são mais leves que o ar, conhecidas como aeróstatos, e contêm um gás (hidrogênio, hélio, ar quente) que fornece sustentação. Entre elas, temos os balões, grandes aeronaves não motorizadas que dependem da sustentação para permanecer no ar, e os dirigíveis, dirigíveis motorizados equipados com lemes para manobras em todas as direções (SANTOS, 2022).

Por outro lado, é importante destacar a existência de aeronaves mais pesadas que o ar, conhecidas como aerodinos. Essas máquinas obtêm sustentação através de uma complexa interação dinâmica com o ar. Este grupo diversificado engloba uma ampla gama de tipos de aeronaves, cada uma com finalidades específicas que vão desde atividades de lazer, como é o caso das asas deltas, até aplicações comerciais e de transporte, exemplificadas pelos aviões (ANDERSON JR, 2015)

Os planadores, por sua vez, são uma categoria peculiar. São aeronaves não motorizadas que geralmente são rebocadas até uma determinada altitude por outra aeronave ou lançadas de locais elevados, como colinas ou guinchos. Os pilotos de planadores dependem de suas habilidades e da detecção de correntes de ar ascendentes, conhecidas como térmicas, para manter a aeronave no ar, uma vez que a velocidade vertical de ascensão é superior à taxa de descida. Esta categoria destaca a perícia dos pilotos na exploração das condições atmosféricas para sustentar o voo (SANTOS, 2022).

Os ultraleves, classificados como aeronaves leves com um limite máximo de peso estabelecido, desempenham um papel significativo na aviação recreativa e esportiva. Essas aeronaves geralmente apresentam uma estrutura tubular que garante leveza e flexibilidade, além de asas revestidas com tecido ou materiais compostos que otimizam o desempenho aerodinâmico. Além disso, podem ser equipadas com duas ou três rodas, oferecendo flexibilidade de pouso em diversos terrenos. Sua popularidade está associada aos voos recreativos de baixa altitude, proporcionando uma experiência única aos entusiastas da aviação (RODRIGUES, 2013).

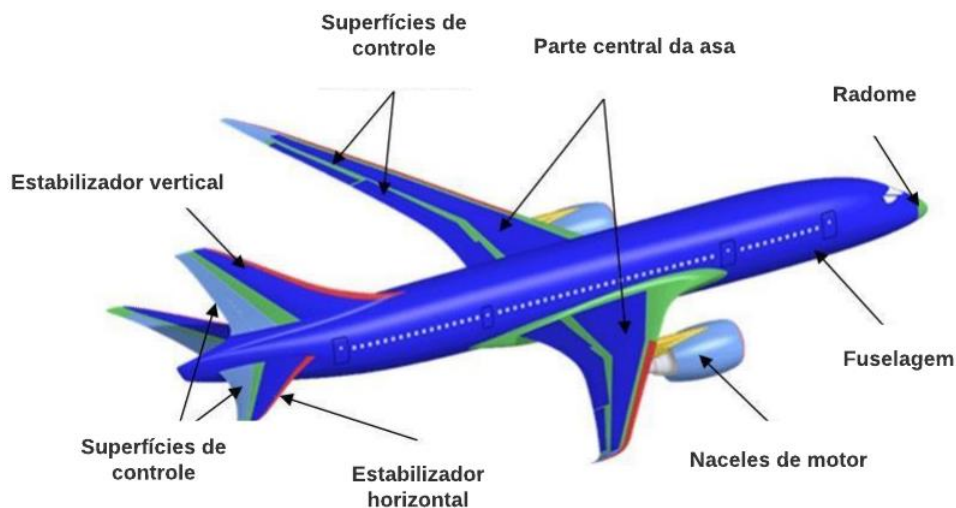
As asas deltas, por sua vez, representam um nicho especializado dentro da aviação. São aeronaves compostas por asas tubulares suspensas nas quais o piloto assume o controle absoluto da aeronave por meio de movimentos corporais precisos. Reconhecidas por sua agilidade e capacidade de manobra, as asas deltas são frequentemente empregadas em voos

de lazer e competições aéreas, proporcionando aos pilotos uma sensação única de liberdade nos céus (SOLER, 2014).

No caso dos parapentes, está-se diante de aeronaves singulares e versáteis. Possuindo asas infláveis que se enchem de vento durante o voo, essas aeronaves suspendem o piloto confortavelmente em uma cadeira especialmente projetada. O controle do parapente é efetuado por meio de cabos que permitem ao piloto dobrar as pontas das asas, possibilitando manobras precisas e emocionantes. Vale ressaltar que os parapentes podem ser motorizados, ampliando sua capacidade de voo para distâncias maiores e tornando-os adequados para aventuras de longa duração e exploração aérea (ANDERSON JR, 2015).

Os aviões, onde se concentra o estudo desenvolvido neste trabalho, são exemplares notáveis desse grupo. São aeronaves de asa fixa que contam com a potência de múltiplos motores para fornecer a propulsão necessária para o voo. Essas aeronaves desempenham um papel fundamental em várias esferas, sendo amplamente utilizados no transporte de passageiros e carga, além de servirem em aplicações militares e recreativas, proporcionando um meio versátil de deslocamento aéreo (SOLER, 2014). Um modelo de avião pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Partes principais de um avião.



Fonte: Adaptado de Pasupuleti *et al.* (2017).

Essa ampla variedade de tipos de aeronaves atende a uma diversidade de propósitos e proporciona uma vasta gama de experiências de voo, que vão desde emocionantes voos de alta velocidade em aeronaves como aviões até voos mais serenos e altamente manobráveis em planadores, ultraleves, asas deltas e parapentes. Cada uma dessas categorias de aeronaves

oferece aos pilotos e entusiastas da aviação a oportunidade de explorar o céu de maneiras únicas, adaptando-se às preferências individuais e às aventuras desejadas. Para uma compreensão abrangente do mundo da aviação, é fundamental aprofundar nossa análise nas aeronaves de asas rotativas, uma categoria que se destaca por seu método singular de sustentação e propulsão (ANDERSON JR, 2015)

Os autogiros são aeronaves que utilizam um princípio de voo único. Eles obtêm sustentação principalmente por meio de uma grande hélice localizada acima da cabine do piloto. O diferencial dos autogiros é que essa hélice gira livremente, impulsionada pelo fluxo de ar que ocorre durante o voo. No entanto, ao contrário dos helicópteros, os autogiros não têm um motor que movimentava diretamente a hélice. Em vez disso, o movimento rotativo da hélice é passivo, e a propulsão é fornecida por um motor tradicional, como em um avião. Os autogiros são conhecidos por sua estabilidade e capacidade de voar a baixas velocidades, tornando-os ideais para tarefas como observação aérea e monitoramento (SANTOS, 2022).

Os helicópteros são aeronaves versáteis e amplamente utilizadas em uma variedade de aplicações, incluindo transporte de passageiros, resgate, serviços médicos de emergência e missões militares. A característica distintiva dos helicópteros é o grande rotor principal (ou rotor principal) acima da cabine, que consiste em várias pás. Essas pás giram em um plano vertical e geram sustentação e propulsão, permitindo que o helicóptero permaneça estacionário no ar, levante e desça verticalmente, e execute manobras complexas. O rotor principal é acionado por um motor a bordo e pode ser controlado para direcionar o helicóptero em qualquer direção (RODRIGUES, 2013).

Já os tilt rotores são uma inovação na aviação que combina características de helicópteros e aeronaves de asa fixa, oferecendo versatilidade incomparável. Essas aeronaves possuem dois rotores principais (pró-rotores) montados nas extremidades das asas. No modo de voo vertical, esses rotores atuam como os de um helicóptero, permitindo decolagem e pouso verticais, bem como manobras em espaços reduzidos. À medida que a aeronave ganha altitude, os rotores inclinam-se para a frente, permitindo que a aeronave acelere e voe horizontalmente, semelhante a um avião. Essa transição suave entre os modos de voo vertical e horizontal torna os tilt rotores ideais para aplicações que exigem rápida mobilidade e flexibilidade, como transporte executivo e missões de busca e salvamento (ANDERSON JR, 2015).

Esses três tipos de aeronaves de asas rotativas ilustram a diversidade e as capacidades únicas oferecidas por essa categoria de aeronaves, cada uma adaptada a diferentes cenários e necessidades operacionais.

## 2.2 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO AERONÁUTICA

Na indústria aeronáutica, a escolha dos materiais desempenha um papel fundamental na construção de aeronaves, uma vez que a aviação é um campo que exige precisão, desempenho e confiabilidade. A aeronáutica moderna depende fortemente da utilização de materiais avançados para garantir a segurança, eficiência e desempenho das aeronaves em uma ampla variedade de aplicações. Neste contexto, aborda-se nestes tópicos os principais tipos de materiais que são utilizados no setor aeronáutico (GRECO,2017; Maciel, 2017).

### 2.2.1 Materiais metálicos

No contexto da aviação, os materiais metálicos desempenham um papel de destaque devido à sua notável combinação de resistência, durabilidade e confiabilidade. Esses atributos tornam esses materiais indispensáveis para as estruturas e componentes críticos das aeronaves (SOUZA *et al.*, 2017). A exploração do uso de materiais metálicos na aeronáutica, com ênfase em suas características, propriedades e aplicações específicas, é o foco deste contexto. Desde as ligas de alumínio até o titânio e os aços especiais, esses materiais desempenham um papel fundamental na manufatura das aeronaves modernas, garantindo que atendam aos rigorosos padrões de desempenho e segurança inerentes à aviação (SANTOS, 2015).

Um primeiro material em destaque neste contexto são as ligas de titânio, amplamente reconhecidas por suas propriedades específicas notáveis. Essas ligas se destacam pela sua excelente relação entre resistência à fadiga e resistência à tração, bem como por possuírem um limite de fadiga elevado. Algumas dessas ligas mantêm uma notável capacidade de resistir a temperaturas extremamente elevadas, atingindo valores de até 400-500°C (Gloria *et al.*, 2019).

Ainda de acordo com Glória *et al.* (2019), é importante destacar que essas ligas manifestam uma resistência satisfatória à corrosão e à fadiga por corrosão. Entretanto, é necessário observar que tais características podem ser comprometidas sob a influência de condições de elevada temperatura e ambientes salinos desafiadores. Em particular, em aplicações envolvendo motores de aeronaves empregadas em porta-aviões, esses desafios adquirem um caráter ainda mais acentuado. É relevante salientar que essas ligas ostentam uma densidade relativamente elevada, o que acarreta possíveis penalizações de peso substanciais quando adotadas em larga escala (PRASAD; WANHILL, 2017).

Outro a se considerar é que os custos associados a essas ligas são consideravelmente mais elevados quando comparados aos custos relacionados ao alumínio e ao aço, atingindo um nível aproximadamente sete vezes superior. Em virtude disso, em razão de suas propriedades excepcionais, tais como a boa resistência à fadiga e resistência à tração em condições de elevada temperatura, é comum a utilização de ligas de titânio em componentes críticos de motores a jato, como por exemplo nas pás da turbina (KAUSAR, 2022).

Um segundo tipo de metal amplamente empregado na indústria aeronáutica é o aço. As ligas de aço, que resultam da combinação de ferro (Fe) e carbono (C) em diferentes proporções, desempenharam um papel central como materiais primários e secundários em elementos estruturais de aeronaves durante as décadas de 1930. Naquela época, os aços eram reconhecidos por sua excepcional resistência mecânica e disponibilidade, tornando-os uma escolha natural para a construção de aeronaves. Exemplos dessas aplicações incluem suportes de pivô do trem de pouso, acessórios de raiz da asa e fixadores (BOUVET, 2017).

No entanto, ao longo do avanço da tecnologia de manufatura, ocorreu uma transição gradual na indústria aeroespacial, na qual o aço foi progressivamente substituído por ligas de alumínio. A notável densidade específica do aço impôs limitações ao seu uso generalizado na construção de aeronaves, especialmente à medida que as aeronaves modernas buscavam otimizar o peso e a eficiência. No entanto, é importante destacar que, mesmo com a diminuição de sua predominância como material estrutural principal, o aço ainda mantém um papel relevante em aplicações específicas dentro da aviação (PANTELAKIS; TSERPES, 2020).

Essas aplicações específicas incluem a fabricação de componentes menores que exigem características específicas, como alta resistência à tração, rigidez e capacidade de resistência a danos. Entre esses componentes, destacam-se os suportes de pivô do trem de pouso, acessórios de raiz da asa e fixadores. Esses elementos desempenham funções cruciais na estrutura e operação das aeronaves, sendo necessários para garantir a segurança e o desempenho durante o voo (BOUVET, 2017).

Portanto, embora o uso do aço como material estrutural principal tenha diminuído na indústria aeroespacial, sua aplicação em componentes específicos persiste devido às suas propriedades mecânicas vantajosas. A evolução contínua dos materiais e das tecnologias de fabricação continua a moldar o cenário da engenharia aeronáutica, resultando em escolhas cuidadosas de materiais para atender às demandas específicas de cada aplicação dentro desse setor altamente especializado (PRASAD; WANHILL, 2017).

Por último, o terceiro tipo de material metálico empregado, que figura entre os mais significativos na aviação, refere-se às ligas de alumínio. Quando se aborda o alumínio em sua forma pura, a primeira percepção que surge é a de que suas aplicações estruturais são limitadas devido à sua resistência relativamente modesta e alta maleabilidade. Contudo, ao ser combinado com outros metais, suas propriedades mecânicas experimentam melhorias substanciais, ao mesmo tempo em que se mantém seu reduzido peso específico, um atributo crucial na indústria aeronáutica (BOUVET, 2017).

Os elementos metálicos frequentemente adicionados às ligas de alumínio incluem cobre, magnésio, manganês, silício, zinco e lítio. Após a Segunda Guerra Mundial, as ligas de alumínio ganharam destaque, substituindo o aço como os principais componentes estruturais primários e secundários em aeronaves. Quatro categorias de ligas de alumínio têm sido amplamente empregadas na indústria aeronáutica por muitos anos e desempenham um papel fundamental: a série 2000 (Al-Cu), a série 5000 (Al-Mg), a série 6000 (Al-Mg-Si) e a série 7000 (Al-Zn-Mg). As ligas de alumínio-lítio (Al-Li, série 8000) foram as últimas a serem adotadas em larga escala na indústria aeroespacial (GLORIA *et al.*, 2019).

No estudo das ligas de alumínio, uma variedade de composições e usos podem ser explorados. Essas ligas são classificadas em séries, cada uma caracterizada por um elemento de liga principal que confere propriedades únicas ao material. A Tabela 1 resume de maneira concisa as principais características de diferentes séries de ligas de alumínio, incluindo seus usos comuns, resistência à tração e temperabilidade.

Tabela 1 – Ligas de alumínio e suas características.

Liga de Alumínio	Elemento de Liga Principal	Usos Comuns	Resistência à Tração (MPa)	Temperabilidade
1000 Series (ex: 1100)	Praticamente puro	Condutores, revestimento	70 - 140	Não tratável termicamente
2000 Series (ex: 2024)	Cobre	Estruturas aeroespaciais, automotivas	325 - 470	Tratável termicamente
3000 Series (ex: 3003)	Manganês	Panelas, recipientes, radiadores	120 - 275	Não tratável termicamente
4000 Series (ex: 4043)	Silício	Soldagem, fundição	186 - 241	Tratável termicamente
5000 Series (ex: 5052)	Magnésio	Estruturas marinhas, tanques	170 - 345	Não tratável termicamente
6000 Series (ex: 6061)	Magnésio e Silício	Estruturas, peças automotivas	240 - 310	Tratável termicamente
7000 Series (ex: 7075)	Zinco	Estruturas aeroespaciais, equipamentos esportivos	450 - 570	Tratável termicamente

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

As ligas pertencentes a cada um destes grupos encontraram ampla aplicação em componentes de aeronaves, incluindo fuselagens, revestimentos e outros elementos sujeitos a tensões significativas, devido ao seu notável baixo peso específico. A seleção da liga adequada tem sido influenciada por diversos fatores, tais como resistência, ductilidade, viabilidade de processamento (por exemplo, extrusão e forjamento), resistência à corrosão, adequação a tratamentos protetores (por exemplo, anodização), resistência à fadiga, ausência de susceptibilidade a trincas devido a tensões internas e resistência à propagação rápida de trincas sob carga (GLORIA *et al.*, 2019).

Contudo, segundo Bouvet (2017), à medida que se aprimora uma propriedade específica das ligas de alumínio, é possível que outras propriedades desejáveis sejam comprometidas. Dado que os mecanismos e processos de ligação envolvem uma complexidade considerável, especialmente relacionada a processos microestruturais e químicos, encontrar o equilíbrio ótimo entre essas propriedades representa um desafio substancial no âmbito da engenharia. Nos últimos dez anos, observou-se uma tendência de substituição sistemática das ligas de alumínio por materiais compósitos reforçados com fibras, inicialmente aplicados em estruturas secundárias e, mais recentemente, também em estruturas primárias, como evidenciado nos casos dos modelos A350 e B787 Dreamliner.

### 2.2.2 Materiais termoplásticos

Um termoplástico, também conhecido como plástico termoamolecível, é categorizado como um material polimérico plástico que adquire propriedades maleáveis ou moldáveis quando submetido a temperaturas elevadas, retornando ao estado sólido quando resfriado. A característica predominante da maioria dos termoplásticos é o seu alto peso molecular. As cadeias poliméricas desses materiais estão interligadas por forças intermoleculares, que tendem a enfraquecer de maneira significativa com o incremento da temperatura, transitando para um estado líquido viscoso. Neste estado particular, os termoplásticos podem ser reformulados, sendo comumente empregados na fabricação de componentes variados através de diversas técnicas de processamento de polímeros, incluindo, mas não se limitando a, moldagem por injeção, moldagem por compressão, calandragem e extrusão (GROTTO *et al.*, 2023).

Esta classe de polímeros se distingue substancialmente dos polímeros termofixos (ou "termoestáveis"), os quais, durante o processo de cura, estabelecem ligações químicas irreversíveis. Diferentemente dos termoplásticos, os termofixos não apresentam fusão

quando expostos a altas temperaturas; ao contrário, tendem a se decompor e, uma vez resfriados, não retomam sua forma original (PANTELAKIS; TSERPES, 2020).

No contexto do gráfico de tensão-deformação de um material termoplástico, é evidente que, acima de sua temperatura de transição vítrea e abaixo do seu ponto de fusão, as propriedades físicas do termoplástico alteram-se drasticamente, sem que haja uma mudança de fase associada. Há termoplásticos que não alcançam um estado cristalino completo abaixo da temperatura de transição vítrea, mantendo características amorfas parciais ou totais (TOTLA *et al.*, 2020).

Os plásticos amorfos e semi-amorfos são preferencialmente utilizados quando se busca alta clareza óptica, dado que a luz é intensamente dispersa por cristalitos cujas dimensões superam o comprimento de onda da luz incidente. Devido à ausência de uma estrutura cristalina, os plásticos amorfos e semi-amorfos são menos resistentes a ataques químicos e à fissuração induzida por tensões ambientais (VIEILLE *et al.*, 2013).

A fragilidade é uma propriedade que pode ser atenuada mediante a incorporação de plastificantes, os quais promovem a mobilidade dos segmentos de cadeia amorfa, resultando na redução efetiva da temperatura de transição vítrea. Adicionalmente, a estrutura do polímero pode ser modificada através de processos de copolimerização ou pela adição de cadeias laterais não reativas aos monômeros antes da polimerização, contribuindo também para a redução da temperatura de transição vítrea (BARILE *et al.*, 2020).

Ainda seguindo com Barile *et al.* (2020), antes da implementação dessas técnicas, era comum que componentes automotivos fabricados a partir de plásticos apresentassem rachaduras quando expostos a temperaturas baixas. Os termoplásticos, constituídos por moléculas de cadeia longa lineares ou ligeiramente ramificadas, são capazes de amolecer repetidamente ao serem aquecidos e de endurecer ao serem resfriados, demonstrando um ciclo de comportamento térmico reversível que é fundamental para diversas aplicações industriais e comerciais.

A indústria contemporânea de acrílicos se bifurca em dois mercados financeiramente robustos: um é o mercado de ácidos poliacrílicos (PAA) e seus derivados ésteres (PAc), e o outro é o mercado de poli(metacrilato de metila) (PMMA). O PMMA, também reconhecido por marcas comerciais como Lucite, Perspex e Plexiglas, atua como um substituto resiliente para o vidro em diversas aplicações, incluindo aquários, botões, viseiras de capacetes de motocicleta, janelas de aeronaves, portas de visualização de submersíveis e lentes de luzes externas de veículos. Sua utilização se estende à confecção de sinais, letras e logotipos. No campo médico, é empregado como cimento ósseo e na substituição de lentes oculares. A tinta

acrílica, por sua vez, é composta por partículas de PMMA dispersas em água (PANTELAKIS; TSERPES, 2020).

Durante várias décadas, o PMMA tem sido o éster metacrílico mais produzido globalmente. Entre os principais atores no mercado de PMMA estão Mitsubishi Rayon (Japão), Arkema SA (França), LG MMA (Coreia do Sul), Chi Mei Corp. (Taiwan), Sumimoto Chemical Company Ltd (Japão), Evonik Industries (Alemanha), BASF (Alemanha), Dow Chemical Company (EUA), AkzoNobel (Holanda), Quinn Plastics (Reino Unido) e Cytec Industries (EUA). No que diz respeito ao mercado de PAA e PAc, os fabricantes chave são Nippon Shokubai Company Ltd. (Japão), Arkema SA (França) e Dow Chemical Company (EUA) (PANTELAKIS; TSERPES, 2020).

Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é um terpolímero formulado a partir de estireno e acrilonitrila na presença de polibutadieno. Este material leve destaca-se pela sua resistência ao impacto e robustez mecânica, apresentando riscos mínimos à saúde humana sob manuseio normal. O ABS encontra aplicação em uma variedade de produtos de consumo, como brinquedos, aparelhos domésticos e telefones.

Ácido polilático (polilactida) ou PLA é um polímero termoplástico alifático compostável derivado de recursos renováveis, como amido de milho (nos Estados Unidos), polpa de beterraba (na Europa), raízes de tapioca, chips ou amido (principalmente na Ásia), ou cana-de-açúcar. O PLA é o material mais comumente utilizado para impressão 3D com técnicas de modelagem por deposição fundida (FDM) (KHAN *et al.*, 2023).

Os Policarbonatos (PC) são termoplásticos conhecidos por marcas registradas como Lexan, Makrolon, Makroclear, e arcoPlus. São materiais facilmente trabalhados, moldados e termoformados para uma miríade de aplicações, incluindo componentes eletrônicos, materiais de construção, dispositivos de armazenamento de dados, peças automotivas e aeronáuticas, soquetes de verificação em próteses e vidros de segurança. Os policarbonatos não possuem um código de identificação de resina único e podem conter o monômero precursor bisfenol A (BPA). A exposição à luz UV resulta em amarelecimento, sendo a degradação especialmente visível em faróis que perderam ou não possuíam revestimento protetor adequado (ZHANG; XU, 2019).

Polietileno (polyethene, polythene, PE) é uma família de materiais semelhantes categorizados de acordo com sua densidade e estrutura molecular. É obtido pela polimerização por adição de etileno e pode ser de baixa ou alta densidade, dependendo do processo utilizado na sua fabricação. É resistente à umidade e à maioria dos produtos químicos, sendo flexível à temperatura ambiente (e baixa temperatura) e pode ser selado a

quente. Devido ao seu baixo custo, é produzido em grandes quantidades para atender à demanda. Por exemplo, o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) é resistente e resistente a produtos químicos, sendo utilizado na fabricação de peças de máquinas móveis, rolamentos, engrenagens, articulações artificiais e alguns coletes à prova de balas (LI; WOODROUGH; DEO, 2023).

Polifenileno óxido (PPO) ou polissulfona é uma classe de termoplásticos especialmente projetados com alta estabilidade térmica, oxidativa e hidrolítica, e boa resistência a ácidos minerais aquosos, álcalis, soluções salinas, óleos e graxas.

Por fim, apresenta-se o Polietileno éter cetona (PEEK) é um polímero termoplástico orgânico incolor da família poliariletercetona (PAEK), usado em aplicações de engenharia. Foi originalmente introduzido pela Victrex PLC, depois pela ICI (Imperial Chemical Industries) no início dos anos 1980. Possui propriedades atrativas como boa resistência à abrasão, baixa inflamabilidade e emissão de fumaça e gases tóxicos (HAMDAN *et al.*, 2022).

### 2.2.3 Nylon

O *Nylon* constitui uma família diversificada de polímeros sintéticos, caracterizados por esqueletos de amida que, comumente, interligam grupos alifáticos ou semi-aromáticos. Esta estrutura molecular confere ao *Nylon* propriedades distintas que são amplamente exploradas em várias aplicações industriais e comerciais (SHAKIBA *et al.*, 2021).

Em termos de aparência física, os nylons são, predominantemente, brancos ou incolores, apresentando uma textura macia ao toque. Alguns tipos de *Nylon* possuem uma textura sedosa, proporcionando uma estética e sensação tátil agradáveis. Esta variedade de texturas torna o *Nylon* um material versátil para uma ampla gama de aplicações, desde tecidos até componentes industriais (KRISHNA; PATEL, 2020).

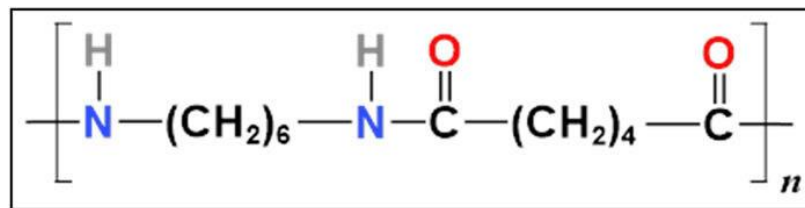
#### 2.2.3.1 Características químicas do Nylon

Os nylons são categorizados como polímeros termoplásticos, o que implica que podem ser processados por fusão, transformando-se em fibras, filmes e uma diversidade de formas estruturais. Esta característica termoplástica é crucial para a manipulação e moldagem do *Nylon*, permitindo a fabricação de componentes com geometrias complexas e especificidades dimensionais precisas (SHAMSURI; DAIK, 2020).

As propriedades intrínsecas dos nylons podem ser modificadas e ampliadas mediante a incorporação de uma vasta gama de aditivos. A mistura de aditivos pode alterar características como a resistência ao impacto, a estabilidade térmica, a coloração, entre outros atributos, expandindo assim o espectro de aplicações possíveis para os nylons (XIAOXIANG *et al.*, 2020).

Dentre as diversas variantes de *Nylon*, uma família notável é designada como *Nylon-XY*, cuja síntese se dá a partir de ácidos dicarboxílicos e diaminas com comprimentos de cadeia carbônica X e Y, respectivamente. Um exemplar proeminente desta família é o *Nylon-6,6*. Alternativamente, existe uma outra família, nomeada como *Nylon-Z*, que é derivada de ácidos aminocarboxílicos com comprimento de cadeia carbônica Z, sendo o *Nylon-[6]* um exemplo representativo desta família (CALIGNANO *et al.*, 2020).

Figura 2 – Estrutura *Nylon 6-6*.



Fonte: Xiaoxiang *et al.* (2020).

Os polímeros de *Nylon* encontram aplicações comerciais significativas em uma miríade de setores. No domínio têxtil e de fibras, são utilizados em vestuário, revestimento de pisos e reforço de borracha. Em termos de formas moldadas, o *Nylon* é empregado na fabricação de componentes automotivos e equipamentos elétricos. Adicionalmente, os nylons são utilizados na produção de filmes, predominantemente destinados à embalagem de alimentos, devido às suas propriedades de barreira e resistência mecânica. Esta vasta gama de aplicações atesta a importância e a versatilidade dos polímeros de *Nylon* no cenário industrial e comercial contemporâneo.

Na terminologia habitual, o prefixo "PA" (poliamida) e a denominação "*Nylon*" são empregados de forma intercambiável, possuindo equivalência semântica. A nomenclatura atribuída aos polímeros de *Nylon* foi estabelecida durante a síntese das primeiras nylons alifáticas simples, e emprega números para elucidar a quantidade de átomos de carbono em cada unidade monomérica, incluindo o(s) carbono(s) presente(s) no(s) ácido(s) carboxílico(s). A introdução subsequente de monômeros cíclicos e aromáticos demandou a utilização de letras ou agrupamentos de letras.

### 2.2.3.2 Propriedades mecânicas do *Nylon*

Originado da pesquisa inovadora da DuPont na década de 1930, o *Nylon* foi um dos primeiros polímeros termoplásticos a ser produzido em massa, revolucionando diversos setores. A estrutura molecular do *Nylon*, formada pela polimerização de ácidos dicarboxílicos e diaminas, é a base de suas propriedades excepcionais. Esta estrutura permite fortes ligações de hidrogênio entre as cadeias, conferindo ao *Nylon* alta estabilidade térmica e resistência mecânica. Um dos aspectos mais notáveis do *Nylon* é sua alta resistência à tração, que varia de acordo com o tipo específico de *Nylon* e seu processamento. Além disso, o material exibe um bom alongamento até a ruptura, evidenciando sua capacidade de absorver energia antes de falhar (Terekhina *et al.*, 2019; Calignano *et al.*, 2020).

A dureza do *Nylon*, medida pela escala Shore D, revela uma resistência ao desgaste e à abrasão bastante adequada para muitas aplicações. Sua resistência ao impacto é também um atributo chave, fazendo do *Nylon* uma escolha ideal em situações que exigem durabilidade sob condições de choque ou impacto (SALEEM *et al.*, 2020).

O *Nylon*, graças à sua dureza, oferece uma resistência excepcional ao desgaste. Esta característica é particularmente valiosa em componentes mecânicos sujeitos a fricção contínua ou em ambientes onde partículas abrasivas possam estar presentes. Por exemplo, engrenagens, buchas e roldanas feitas de *Nylon* têm uma longevidade impressionante, mesmo em condições desafiadoras. Além disso, a resistência à abrasão do *Nylon* o torna ideal para aplicações como revestimentos de cabos e tecidos técnicos, onde a resistência ao desgaste prolonga significativamente a vida útil do produto (OBAYA VALDIVIA; REVILLA VAZQUEZ, 2021).

A resistência ao impacto do *Nylon* complementa sua dureza. Ao contrário de muitos plásticos rígidos, o *Nylon* é capaz de absorver e dissipar a energia de impactos sem sofrer fraturas catastróficas. Esta propriedade é crucial em aplicações que demandam resistência a choques ou impactos repetidos, como em componentes automotivos, equipamentos esportivos e peças de máquinas. A capacidade do *Nylon* de absorver impactos sem comprometer sua integridade estrutural o torna uma escolha preferencial em muitas aplicações de engenharia (SHAKIBA *et al.*, 2021).

Em ambientes de baixa temperatura, o *Nylon* mantém grande parte de suas propriedades, embora possa se tornar mais frágil. Essa fragilidade ocorre devido à diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas, impactando sua capacidade de deformação plástica. Outro aspecto importante é a natureza higroscópica do *Nylon*, pois a absorção de umidade do

ambiente pode alterar significativamente suas propriedades mecânicas, geralmente aumentando a ductilidade e diminuindo a resistência à tração e a rigidez (KRISHNA *et al.*, 2021).

Sob cargas cíclicas ou sustentadas, o *Nylon* pode sofrer fadiga, caracterizada pela formação gradual de trincas e eventual falha. A deformação sob carga constante também é uma preocupação, pois o material pode sofrer fluência sob tensões prolongadas. A estabilidade térmica do *Nylon* é outro fator crítico, já que suas propriedades mecânicas podem degradar-se em altas temperaturas. Da mesma forma, sua estabilidade dimensional pode ser afetada pelo aquecimento, especialmente em ambientes úmidos (OGHLY, 2023).

Nesse contexto, A aplicação do *Nylon* na indústria aeronáutica oferece um exemplo elucidativo da importância de entender e gerenciar suas propriedades mecânicas, especialmente em relação à fadiga, fluência e estabilidade térmica. A aeronáutica é um campo que impõe rigorosas demandas em termos de desempenho dos materiais, devido às condições extremas de operação, como variações de temperatura, umidade e pressão, além das cargas cíclicas intensas associadas ao voo (GEORGE *et al.*, 2020).

Em aeronaves, muitos componentes estão sujeitos a cargas cíclicas repetidas, como aquelas decorrentes da pressurização e despressurização da cabine, turbulência e ciclos de pouso e decolagem. O *Nylon*, apesar de sua resistência e durabilidade, pode ser vulnerável a fadiga sob estas condições. A formação gradual de trincas pode ocorrer em componentes de *Nylon* que são submetidos a estas tensões repetitivas, levando potencialmente a falhas. Portanto, a seleção e o design de peças de *Nylon* em aeronáutica exigem uma análise cuidadosa das cargas esperadas e da resistência à fadiga do material (SHAMSURI; DAIK, 2020).

Outra consideração importante no uso de *Nylon* na aeronáutica é sua tendência à fluência, ou deformação gradual, sob cargas sustentadas. Em ambientes de alta altitude, componentes estruturais feitos de *Nylon* podem estar sob tensão constante. A fluência pode levar a alterações dimensionais indesejadas, afetando potencialmente o desempenho e a segurança da aeronave. O monitoramento e a previsão da fluência são, portanto, cruciais na concepção de componentes de *Nylon* para uso aeronáutico (XIAOXIANG *et al.*, 2020).

A estabilidade térmica do *Nylon* é de extrema importância em aplicações aeronáuticas. As variações de temperatura, desde as extremamente baixas encontradas em altas altitudes até as altas temperaturas geradas por atrito e sistemas de motor, podem impactar negativamente as propriedades do *Nylon*. Uma degradação nas propriedades mecânicas

devido à instabilidade térmica pode comprometer a funcionalidade e segurança dos componentes aeronáuticos (SHAKIBA *et al.*, 2021).

A estabilidade dimensional do *Nylon* também é um fator crucial, principalmente considerando a exposição do material a diferentes condições de umidade. Em aeronaves, isso é especialmente relevante, pois mudanças na umidade podem ocorrer rapidamente e em extremos, potencialmente afetando componentes de *Nylon* (SHAKIBA *et al.*, 2021).

A incorporação de aditivos como fibras de vidro ou carbono pode alterar drasticamente as propriedades mecânicas do *Nylon*. Estes compostos normalmente aumentam a rigidez e a resistência térmica, enquanto mantêm ou melhoram a resistência à tração e ao impacto. As propriedades mecânicas do *Nylon* fazem dele um material altamente versátil e valioso para uma variedade de aplicações. Sua resistência, ductilidade, resistência ao impacto e a capacidade de ser modificado com aditivos o tornam um candidato ideal em muitos contextos industriais e de consumo. Compreender suas características e limitações é essencial para otimizar seu uso e expandir suas aplicações (SHAMSURI; DAIK, 2020).

Por fim, é possível notar que, embora o *Nylon* ofereça muitos benefícios em termos de resistência, leveza e versatilidade, seu uso na indústria aeronáutica exige uma avaliação criteriosa e minuciosa. Isso envolve considerar sua resistência à fadiga, tendência à fluência, estabilidade térmica e comportamento em diferentes condições de umidade. O design e a escolha do material precisam ser cuidadosamente ajustados às exigências específicas das aplicações aeronáuticas para garantir desempenho e segurança ótimos.

### 2.2.3.3 Aplicações do *Nylon* em aeronave

O *Nylon*, com suas notáveis propriedades mecânicas, desempenha um papel significativo na indústria aeronáutica, encontrando aplicações variadas que vão desde componentes estruturais leves até peças essenciais para a segurança e funcionalidade das aeronaves. Este polímero sintético é altamente valorizado por sua combinação de resistência, leveza e adaptabilidade, tornando-se uma escolha ideal para uma gama de componentes dentro deste setor exigente (WAXMAN; GUVEN, 2020).

Em termos de componentes estruturais, o *Nylon* é frequentemente utilizado em suportes de carga leves e compartimentos de armazenamento dentro da aeronave. Sua capacidade de resistir à fadiga e de suportar cargas cíclicas sem deformação significativa o torna adequado para essas aplicações. Além disso, a resistência ao impacto do *Nylon* assegura

a durabilidade desses componentes em situações de choques e vibrações comuns durante o voo (CHOUDHARI; KAKHANDKI, 2021).

No que diz respeito a conectores e componentes de montagem, os conectores de *Nylon* são essenciais nos sistemas elétricos das aeronaves, devido à sua capacidade de isolamento elétrico e resistência a altas temperaturas. O material também é usado em sistemas de tubulação e combustível, graças à sua resistência química e capacidade de suportar variações de pressão e temperatura (ZHU *et al.*, 2021).

A resistência do *Nylon* a altas temperaturas contribui significativamente para sua adequação em ambientes aeronáuticos. As temperaturas dentro de uma aeronave podem variar drasticamente, especialmente em áreas próximas aos motores ou sistemas de escape, onde o calor intenso é comum. O *Nylon* consegue manter suas propriedades elétricas e mecânicas mesmo nessas condições extremas, garantindo a integridade dos sistemas elétricos (PRABHAKARAN *et al.*, 2021).

Em relação aos sistemas de tubulação e combustível, o *Nylon* oferece vantagens significativas devido à sua resistência química. Os sistemas de combustível, em particular, demandam materiais que possam resistir à corrosão causada por combustíveis e aditivos químicos. O *Nylon* não só resiste à degradação química, mas também mantém sua resistência estrutural mesmo quando exposto a esses materiais corrosivos. Essa resistência é crucial para prevenir vazamentos e falhas que poderiam levar a situações de risco (LUMSDEN *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante do *Nylon* em sistemas de tubulação e combustível é a sua capacidade de suportar variações de pressão e temperatura. Durante o voo, esses sistemas estão sujeitos a uma ampla gama de pressões e temperaturas, desde as extremamente baixas encontradas em altitudes elevadas até as mais elevadas durante a operação do motor. O *Nylon* consegue manter sua integridade estrutural nessas condições variadas, o que é essencial para a segurança e eficiência da aeronave (CHOUDHARI; KAKHANDKI, 2021).

A leveza do *Nylon* é uma de suas propriedades mais valiosas na aviação. Em um setor onde cada grama economizado pode contribuir para uma maior eficiência de combustível e melhor desempenho, o uso de *Nylon* em suportes e fixadores oferece uma vantagem significativa sobre metais tradicionais. Reduzir o peso total da aeronave sem comprometer a resistência e segurança é um objetivo constante na engenharia aeronáutica, e o *Nylon* ajuda a alcançar esse equilíbrio (LUMSDEN *et al.*, 2022).

A resistência à corrosão do *Nylon* é outro atributo crítico. Em um ambiente como o da aviação, onde os componentes estão sujeitos a uma variedade de condições adversas,

incluindo umidade, variações de temperatura e exposição a produtos químicos, a capacidade de resistir à corrosão prolonga significativamente a vida útil dos componentes. Metais tradicionais podem enferrujar ou corroer sob tais condições, enquanto o *Nylon* mantém sua integridade estrutural, garantindo que os suportes e fixadores permaneçam funcionais ao longo do tempo (PRABHAKARAN *et al.*, 2021).

A capacidade do *Nylon* de manter a força sob uma ampla gama de temperaturas operacionais é crucial. As aeronaves operam em uma variedade de ambientes, desde o calor intenso de climas tropicais até o frio extremo em altitudes elevadas. Materiais usados na construção e manutenção de aeronaves devem, portanto, ser capazes de suportar essas variações sem perder resistência ou se tornar quebradiços. O *Nylon* cumpre esse requisito, permanecendo robusto e resiliente em diferentes condições climáticas e de voo (LUMSDEN *et al.*, 2022).

Essas propriedades do *Nylon* não apenas aumentam a confiabilidade e segurança das aeronaves, mas também reduzem a necessidade de manutenção frequente. Com suportes e fixadores menos suscetíveis a danos ou desgaste, as aeronaves podem operar por períodos mais longos sem a necessidade de reparos ou substituições, o que é um fator essencial para a eficiência operacional no setor de aviação. Dentro do interior das aeronaves, o *Nylon* é usado em assentos, compartimentos de bagagem e elementos decorativos. Sua capacidade de ser moldado e tingido em várias cores o torna ideal para aplicações que combinam estética e funcionalidade, enquanto sua resistência ao desgaste garante a durabilidade desses componentes sob uso frequente (PRASAD; WANHILL, 2017).

Elementos críticos de segurança, como cintos de segurança e componentes de sistemas de emergência, muitas vezes contêm *Nylon* em sua composição. Aqui, a resistência ao impacto e a durabilidade do *Nylon* são essenciais para garantir o funcionamento adequado desses itens em situações críticas (PRASAD; WANHILL, 2017).

Como compreensão deste tópicos, nota-se que é crucial que, ao empregar *Nylon* na aviação, se considere cuidadosamente as especificidades da aplicação. Fatores como resistência à fadiga, comportamento sob cargas prolongadas e estabilidade em diferentes ambientes são de suma importância. O design e a escolha de material devem estar estritamente alinhados com as demandas únicas do ambiente aeronáutico para assegurar a segurança, o desempenho e a conformidade regulatória. Com essa abordagem criteriosa, o *Nylon* mantém seu status como um material essencial na inovação e eficiência da aviação moderna.

## 2.4 VALIDAÇÃO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS

A validação de componentes em aeronaves é um processo meticuloso e essencial que assegura a segurança, a eficiência e a confiabilidade das aeronaves. Dentro deste processo, vários ensaios são realizados para testar a adequação dos componentes sob diferentes condições e circunstâncias. Estes testes são projetados para simular as diversas situações e ambientes que uma aeronave pode encontrar durante sua operação. Através destes ensaios, engenheiros podem determinar a durabilidade, resistência e desempenho geral dos componentes, assegurando que atendam aos rigorosos padrões de segurança e qualidade exigidos na indústria aeronáutica (TISCHLER, 2018).

### 2.4.1 Ensaios para validação de componentes em aeronaves

Estes ensaios abrangem uma variedade de testes físicos, químicos e ambientais. Eles incluem, mas não estão limitados a testes de resistência à tração, resistência ao impacto, estabilidade térmica, resistência à corrosão, e análise de comportamento sob cargas cíclicas. Além disso, verifica-se a compatibilidade dos componentes com outros materiais, sua reação a fluidos como combustíveis e óleos, e sua capacidade de resistir a condições ambientais extremas, como variações bruscas de temperatura e umidade. Através desses testes, é possível identificar pontos de falha potenciais e realizar ajustes necessários antes da integração final dos componentes na aeronave (BAKER; GUNNION; WANG, 2015).

#### 2.4.1.1 Teste de resistência e umidade

O teste de resistência e umidade é particularmente crucial na validação de componentes de aeronaves, tendo em vista que a resistência a ambientes úmidos e a capacidade de manter a integridade estrutural sob essas condições são fundamentais para a segurança aérea. Este teste envolve expor os componentes a níveis variados de umidade e temperaturas, simulando tanto condições climáticas extremas quanto as mudanças ambientais que ocorrem em diferentes altitudes e regiões geográficas (BUHR *et al.*, 2015).

Durante o teste de resistência à umidade, os componentes são submetidos a um ambiente controlado onde a umidade relativa e a temperatura são cuidadosamente ajustadas para replicar as condições mais desafiadoras que a aeronave pode encontrar. Este processo pode incluir a exposição a neblina salina para testar a resistência à corrosão em ambientes

úmidos e salgados, um fator crítico para aeronaves que operam em áreas costeiras ou sobre oceanos (LIM, 2018).

A capacidade dos materiais de manterem suas propriedades mecânicas, como resistência à tração, flexibilidade e dureza, sob essas condições úmidas é rigorosamente avaliada. Testes de absorção de umidade são realizados para determinar a taxa na qual os materiais absorvem água e como essa absorção afeta suas propriedades físicas e estruturais. Materiais que absorvem muita umidade podem se tornar mais pesados ou mudar de forma, impactando seu desempenho e segurança (LIM, 2018).

Este teste também examina a durabilidade a longo prazo dos componentes em condições de alta umidade. Isso inclui a avaliação de como a exposição prolongada à umidade pode causar degradação ou enfraquecimento dos materiais ao longo do tempo. Aspectos como resistência ao mofo, fungos e outros agentes biológicos também são considerados, especialmente em componentes orgânicos ou híbridos (BUHR *et al.*, 2016).

O teste de resistência e umidade é fundamental para assegurar que os componentes da aeronave possam suportar as condições ambientais extremas, mantendo sua integridade e funcionalidade. Este teste não só valida a capacidade de um componente de resistir a condições desafiadoras, mas também contribui para a prevenção de falhas inesperadas, garantindo assim a segurança e a confiabilidade das operações aéreas (LIM, 2018).

#### 2.4.1.2 Ensaio de tração e Dureza

O teste de tração é uma ferramenta fundamental na engenharia de materiais, utilizado para determinar a força necessária para esticar um material até seu ponto de ruptura. Este teste é crucial, pois fornece dados essenciais sobre características como resistência à tração, alongamento e a capacidade de um material se deformar antes de quebrar. O processo inicia-se com a preparação cuidadosa da amostra, que é geralmente moldada em um cilindro ou barra retangular. A uniformidade na preparação é vital para assegurar a consistência e a comparabilidade dos resultados (DIAS *et al.*, 2018).

Após a preparação, a amostra é fixada em um equipamento de teste de tração. Este equipamento é projetado especificamente para aplicar uma força de tração crescente no material. A aplicação da força é feita de maneira controlada e progressiva, permitindo uma avaliação precisa do comportamento do material sob tensão. Durante o teste, a máquina registra não apenas a quantidade de força aplicada, mas também a extensão ou o alongamento

que a amostra sofre (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). A Figura 3, mostra a configuração geral de um equipamento de ensaio de tração.

Figura 3 – Esquemática de um ensaio de tração.



Fonte: Biopdi (2017).

O foco principal da análise de dados do teste de tração é identificar o ponto de ruptura do material, ou seja, a força máxima que a amostra pode suportar antes de falhar. Outros pontos de dados importantes incluem o limite de elasticidade, que é a força máxima que o material pode sofrer sem ter uma deformação permanente, e o alongamento percentual, que indica o quanto o material pode se estender antes de quebrar. Estes dados são cruciais para entender a capacidade de um material resistir a forças e tensões, especialmente em aplicações críticas como na fabricação de componentes para a indústria aeronáutica, onde a segurança e a confiabilidade são de extrema importância (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

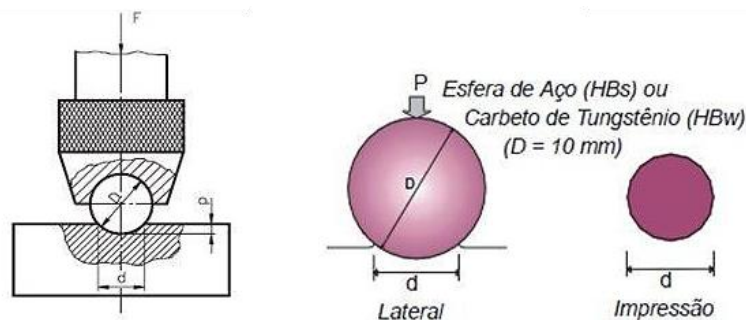
Já em relação ao teste de dureza, O teste de dureza é uma análise essencial na ciência dos materiais, que visa avaliar a capacidade de um material resistir à deformação sob a aplicação de uma carga concentrada. Este teste é crucial para compreender como diferentes materiais respondem a estresses e pressões, especialmente em contextos de engenharia de alta precisão, como na indústria aeronáutica. Existem vários métodos para medir a dureza, incluindo os conhecidos testes Rockwell, Vickers e Brinell, cada um com características próprias e adequados para diferentes tipos de materiais e aplicações (SILVA; SILVA, 2018).

O teste Rockwell, por exemplo, é frequentemente utilizado devido à sua rapidez e simplicidade. Ele envolve a utilização de um penetrador — tipicamente uma esfera de aço ou um cone de diamante — que é pressionado contra a superfície do material com uma força específica. Antes da aplicação da força principal, uma carga preliminar é imposta para

estabelecer um ponto de referência. Após a remoção da carga, a profundidade da impressão deixada no material é medida, sendo esta medida um indicativo direto da dureza (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Por outro lado, os testes de dureza Vickers e Brinell diferem principalmente na forma da impressão deixada e no método de medição. O teste Vickers utiliza uma pirâmide de diamante como penetrador e é adequado para materiais de todas as durezas, incluindo metais extremamente duros. Já o teste Brinell, exposto na Figura 4, usa uma esfera de aço de diâmetro conhecido, sendo mais adequado para materiais mais macios, como metais não ferrosos. Em ambos os casos, mede-se o diâmetro da impressão deixada no material, e a dureza é calculada com base nesse diâmetro e na carga aplicada (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Figura 4 – Aspectos do teste de dureza Brinell.



Fonte: Garcia; Spim; Santos (2012).

A seleção apropriada do método de teste de dureza é fundamental para garantir a precisão dos resultados. Antes da realização do teste, a amostra do material deve ser devidamente preparada, garantindo que as superfícies sejam limpas e lisas. Esta preparação é crucial para assegurar a confiabilidade dos resultados, pois imperfeições na superfície podem afetar significativamente as medições (BAYER, 2013).

Greco e Maciel (2017) apontam que na indústria aeronáutica, a compreensão da dureza dos materiais é vital para garantir a segurança e a eficiência das aeronaves. Materiais utilizados na construção de componentes críticos devem apresentar uma dureza adequada para suportar as condições extremas encontradas durante o voo, incluindo variações de temperatura, pressão e cargas mecânicas. Portanto, os testes de dureza fornecem informações valiosas para engenheiros e designers, permitindo a escolha de materiais que não apenas atendam aos requisitos de desempenho, mas também garantam a longevidade e a segurança das aeronaves.

### 2.4.1.3 Teste de vibração

O teste de vibração é uma técnica experimental crucial na engenharia, desempenhando um papel essencial em setores como aeroespacial, automotivo, eletrônico e construção civil. Esta técnica avalia como materiais, componentes, sistemas e estruturas reagem a diferentes frequências e intensidades de vibração. Estes testes garantem que os produtos e estruturas sejam capazes de suportar as vibrações durante sua vida útil (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Vibração, definida como um movimento oscilatório de um corpo em torno de um ponto de referência, é simulada em testes para replicar as condições que um produto enfrenta em operação. Estes testes são fundamentais para identificar modos de falha, avaliar durabilidade e validar teorias e modelos de engenharia (PEIXIN *et al.*, 2021).

Os testes são realizados com plataformas de vibração ou mesas vibratórias, capazes de simular uma vasta gama de vibrações. Dependendo do ambiente operacional do produto, métodos como vibração sinusoidal, aleatória, e choque ou pulso são escolhidos. Na indústria aeroespacial, esses testes asseguram a integridade estrutural e funcionamento adequado de componentes de aeronaves. No setor automobilístico, avaliam a resistência de componentes à vibração veicular. E na eletrônica, garantem a resistência e durabilidade de dispositivos sob vibrações cotidianas (OLEJNIK *et al.*, 2019).

O procedimento inicia com a fixação do objeto na plataforma de vibração e a anexação de sensores para monitoramento. Durante o teste, a plataforma simula as vibrações específicas, variando de movimentos suaves a vibrações intensas. Os dados coletados são analisados para avaliar a performance e identificar falhas estruturais ou funcionais, incluindo a análise da frequência de ressonância (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Esses testes são vitais no design de produtos para antecipar e resolver problemas de vibração antes da produção em larga escala, prolongando a vida útil do produto e aumentando segurança e confiabilidade. Os desafios incluem replicar as condições do mundo real com precisão, mas avanços em software de simulação e equipamentos de teste estão melhorando essa precisão (OLEJNIK *et al.*, 2019).

Entre as organizações responsáveis por essas normas estão a DIN (Deutsches Institut für Normung), ISO (International Organization for Standardization), BS (British Standards), MIL (Military Standards), IEC (International Electrotechnical Commission) e ASTM (American Society for Testing and Materials). Cada uma dessas organizações desenvolve

normas que abrangem aspectos variados dos testes de vibração, como intensidade, frequência, duração, e as condições sob as quais os testes devem ser conduzidos (DAVOODI *et al.*, 2022).

Por exemplo, a norma MIL-STD-810, desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, especifica métodos de teste para avaliar a resistência de equipamentos militares a diversas condições ambientais, incluindo a vibração. As NATO STANAGs (Standardization Agreements) são normas acordadas pelos membros da OTAN para garantir interoperabilidade e funcionalidade de equipamentos militares, o que inclui testes de vibração rigorosos. Já a AS/EN9100 é uma série de normas relacionadas ao sistema de gestão de qualidade na indústria aeroespacial, que também aborda a necessidade de realizar testes de vibração em componentes aeronáuticos (WAGNER *et al.*, 2018).

O cumprimento dessas normas é essencial, pois garante que os produtos sejam capazes de resistir às condições adversas que enfrentarão em seu ambiente operacional. Especialmente no contexto aeroespacial e de defesa, onde a falha de um componente pode ter consequências catastróficas, o atendimento a estas normas é fundamental para assegurar a segurança e a eficácia dos produtos (OLEJNIK *et al.*, 2019).

#### 2.4.2 Normas regulamentadoras para ensaio de componentes aeronáuticos

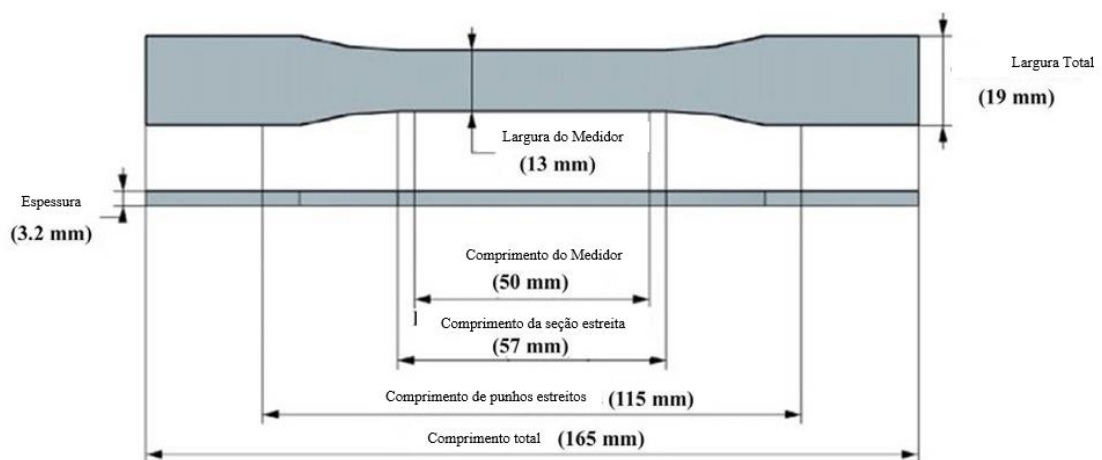
No contexto aeronáutico, a garantia da segurança e desempenho dos componentes é essencial. Para isso, diversos ensaios são realizados seguindo normas regulamentadoras rigorosas. Estas normas estabelecem métodos padronizados de teste, garantindo que os componentes aeronáuticos atendam aos requisitos operacionais e de segurança exigidos. Uma dessas normas regulamentadoras chave é a ASTM D638, voltada para testes de tração em materiais poliméricos, uma categoria na qual muitos componentes aeronáuticos se enquadram.

##### 2.4.2.1 ASTM D638

A ASTM D638, estabelecida pela American Society for Testing and Materials, representa um protocolo padrão para a realização de testes de tração em plásticos. Essa norma é de suma importância para avaliar como materiais poliméricos se comportam sob tensão, uma condição frequentemente encontrada em componentes aeronáuticos durante o voo (ANAND KUMAR; SHIVRAJ NARAYAN, 2019).

No detalhamento do teste, a preparação da amostra é uma etapa fundamental. A norma prescreve formas e dimensões específicas para as amostras, que geralmente adotam um formato semelhante a um "osso de cachorro", como mostra a Figura 5. Este *design* facilita a aplicação uniforme da tensão e ajuda a identificar com precisão o ponto de falha do material. Para a realização do teste, é necessário o uso de uma máquina de tração especializada, que aplica uma força de tração de maneira controlada e mensura a resposta do material. A norma também define a velocidade de aplicação da força e outros parâmetros relevantes.

Figura 5 – Corpo de prova para ensaio de tração segundo a norma ASTM D63.



Fonte: Hibbert *et al.* (2019).

Durante o teste, a força é aplicada de forma gradual até que a amostra se rompa. Este processo permite registrar a força máxima suportada e o grau de alongamento da amostra. A análise dos dados coletados fornece informações críticas, como o módulo de elasticidade, o limite de escoamento, a resistência máxima à tração e o alongamento na ruptura. Esses dados são essenciais para determinar se um material é apropriado para ser utilizado em componentes aeronáuticos específicos (KUMAR *et al.*, 2018).

No setor aeronáutico, compreender essas propriedades mecânicas é vital. Os materiais empregados em aeronaves devem ser capazes de resistir a cargas variáveis, impactos e vibrações, mantendo a integridade estrutural. A norma ASTM D638 oferece uma metodologia padronizada para avaliar a adequação de materiais poliméricos para essas aplicações desafiadoras. Logo, ASTM D638 desempenha um papel crucial no conjunto de procedimentos para testar materiais aeronáuticos. Esta norma permite que engenheiros e cientistas avaliem meticulosamente os plásticos para uso em aeronaves, assegurando que

apenas materiais altamente resistentes e confiáveis sejam empregados nesse segmento crítico, onde a segurança é prioritária (KUMAR *et al.*, 2018).

#### 2.4.2.2 RTCA e RTCA/DO – 160G

No contexto da indústria aeronáutica e de testes de componentes, a RTCA, Inc. (anteriormente conhecida como Radio Technical Commission for Aeronautics) é uma organização privada sem fins lucrativos que desenvolve padrões de comunicação e navegação para a aviação civil. A RTCA funciona como uma espécie de fórum onde governo e indústria cooperam para desenvolver normas técnicas para a aviação (BOROVIĆ *et al.*, 2019).

Ainda seguindo com Borović *et al.* (2019), um dos documentos mais conhecidos e utilizados desenvolvidos pela RTCA é a RTCA/DO-160G, a versão mais recente do padrão "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment" (Condições Ambientais e Procedimentos de Teste para Equipamentos Aeronáuticos). Este documento fornece padrões para testar a durabilidade e a eficácia dos equipamentos eletrônicos a bordo de aeronaves em uma variedade de condições ambientais.

A RTCA/DO-160G descreve uma série de testes destinados a garantir que os equipamentos eletrônicos possam suportar as severas condições operacionais encontradas durante o voo, como variações de temperatura, umidade, pressão atmosférica, vibrações, choques mecânicos e interferências eletromagnéticas. Esses testes são divididos em categorias, cada uma tratando de um tipo específico de condição ambiental (KIM; PARK; LEE, 2021).

Por exemplo, a seção sobre temperatura e umidade define os procedimentos para testar o equipamento sob temperaturas extremamente altas ou baixas e sob várias condições de umidade. Da mesma forma, há seções que abordam como testar equipamentos sob fortes vibrações, choques, exposição a fluidos como combustíveis e óleos, e até mesmo em condições de ráfia ou campo magnético intenso. Essa norma é amplamente adotada pela indústria aeronáutica e é frequentemente referenciada por organizações reguladoras como a Federal Aviation Administration (FAA) dos Estados Unidos e a Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA). O cumprimento desses padrões é fundamental para garantir a certificação de equipamentos aeronáuticos e para assegurar que eles sejam seguros e confiáveis em todas as condições de operação (BOROVIĆ *et al.*, 2019).

A RTCA/DO-160G, portanto, representa um marco fundamental no desenvolvimento e na validação de tecnologias aeronáuticas, desempenhando um papel crucial na promoção da segurança e eficácia dos sistemas de aviação modernos (KIM; PARK; LEE, 2021).

#### 2.4.2.3 Catia e requisito de projeto

CATIA (*Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application*) é um dos softwares de CAD (Computer-Aided Design) mais avançados e amplamente utilizados no mundo, especialmente notável no setor aeronáutico. Desenvolvido pela Dassault Systèmes, o CATIA não é apenas uma ferramenta para desenho e modelagem; ele representa uma solução abrangente que engloba desde o design conceitual até a engenharia detalhada, simulação e gestão do ciclo de vida do produto (PLM - *Product Lifecycle Management*) (OLIVEIRA, 2018).

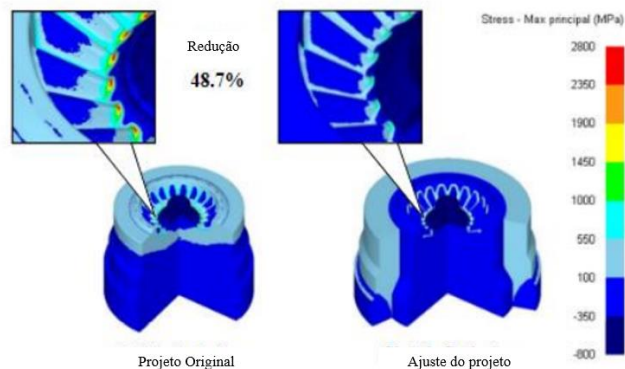
O CATIA desempenha um papel crucial no setor aeronáutico, oferecendo ferramentas fundamentais para a concepção e o detalhamento de componentes e estruturas complexas de aeronaves. Esse software avançado facilita a criação de modelos 3D detalhados, abrangendo desde a estrutura geral até elementos específicos como asas, trens de pouso, sistemas de cabine e componentes de motor. Uma de suas grandes vantagens é a capacidade de integrar diversos sistemas e componentes num único modelo 3D, essencial para o projeto de aeronaves onde a interação entre sistemas elétricos, hidráulicos, de combustível e de controle é fundamental. Além disso, o CATIA é amplamente utilizado no layout de cabines, permitindo otimizar o espaço e melhorar a experiência dos passageiros (HAO; LIU; LIU, 2020).

No campo das simulações, o CATIA oferece ferramentas poderosas para análises estruturais e aerodinâmicas, essenciais para validar a segurança e o desempenho de aeronaves sob diferentes condições de voo. Ele também permite realizar testes virtuais abrangentes, prevendo a reação da aeronave a variadas situações como cargas de vento e forças exercidas durante decolagens, pousos e manobras. Isso minimiza a necessidade de protótipos físicos dispendiosos e testes demorados, agilizando o desenvolvimento (SONG; CHENG, 2018).

No que tange à análise estrutural no CATIA, esta ferramenta desempenha um papel crucial no desenvolvimento de aeronaves, permitindo uma avaliação detalhada e precisa da integridade estrutural de componentes e estruturas inteiras. Através dela, os engenheiros podem simular e analisar o comportamento dos materiais sob várias condições de carga e

estresse, identificando potenciais pontos de falha, zonas de alta tensão e deformações inesperadas (LI *et al.*, 2018). A Figura 6 exemplifica uma análise estrutura usando o CATIA.

Figura 6 - Análise dos esforços na estrutura do módulo de suporte de painel fotovoltaico em região crítica.



Fonte: Gonçalves (2021).

Essa capacidade analítica é essencial para assegurar que a estrutura da aeronave seja suficientemente robusta e resiliente, mantendo-se dentro dos limites de segurança operacional. A análise estrutural no CATIA permite a modelagem de cenários diversos, desde situações cotidianas de voo até eventos extremos, como cargas de impacto ou condições meteorológicas adversas. Essa versatilidade garante que a aeronave será capaz de suportar não só as forças rotineiras, mas também os desafios extraordinários que podem surgir ao longo de sua vida útil (GONÇALVES, 2021).

Outro ponto é que a análise estrutural no CATIA ajuda a otimizar o design, buscando soluções que equilibrem resistência, peso e eficiência de custo. Isso é crucial na indústria aeroespacial, onde a eficiência do peso é um fator determinante tanto para o desempenho quanto para a economia de combustível. Portanto, o uso dessa ferramenta não só melhora a confiabilidade e segurança das aeronaves, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade e viabilidade econômica dos projetos aeronáuticos (GONÇALVES, 2021).

Na gestão de dados e colaboração de projeto, o CATIA também é fundamental. Sua plataforma integrada facilita o trabalho conjunto de diferentes disciplinas, assegurando que todos os aspectos do projeto estejam em conformidade com os requisitos regulatórios e de desempenho. O software é igualmente essencial para garantir que os projetos de aeronaves atendam às normas e regulamentos internacionais, documentando e rastreando todos os

aspectos do design para cumprir com os padrões de segurança e desempenho da indústria aeroespacial (LI *et al.*, 2018).

Em suma, o CATIA é uma ferramenta indispensável na engenharia aeronáutica, proporcionando uma abordagem integrada desde o design inicial até a simulação, análise e gestão de projetos. Sua habilidade para lidar com complexidades de projetos e sua integração com outras ferramentas de simulação e análise o tornam um ativo valioso para a inovação, eficiência e sucesso na indústria aeroespacial.

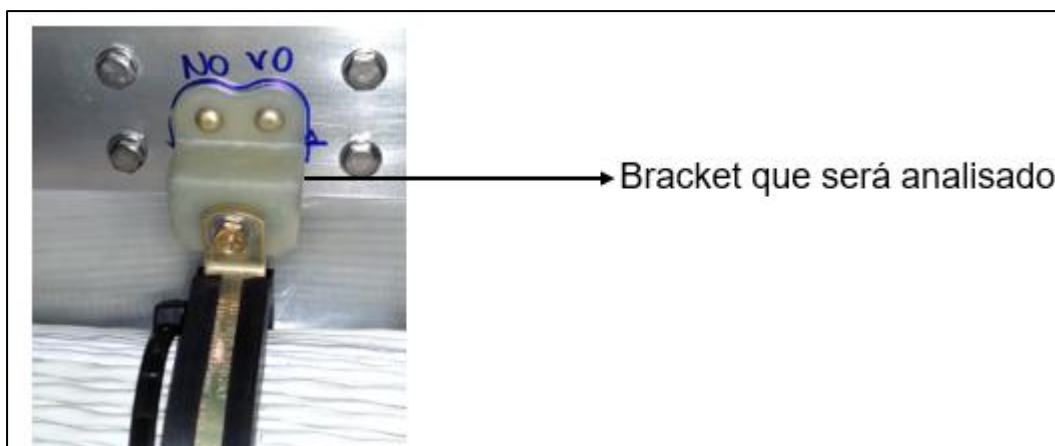
### 3 METODOLOGIA

O escopo deste estudo consiste em realizar uma análise computacional estática e dinâmica para avaliar e validar os resultados obtidos após a modificação da geometria inicial do suporte de cabeamento, denominado bracket, esse modelo inicial feito também em poliamida não foi aprovado no primeiro ensaio dinâmico para a troca do metálico por este, sendo assim foi necessário um reprojeto desse suporte de *nylon*, que é o foco deste trabalho.

A necessidade de um reexame e subsequente modificação do design original do bracket surgiu em decorrência das falhas observadas durante os testes de bancada realizados. Estas falhas indicavam a presença de possíveis fragilidades ou inadequações na geometria inicial, que poderiam comprometer sua eficácia e segurança em um ambiente operacional.

Apresentada na Figura 7, nota-se uma representação visual da montagem do bracket projetado em *Nylon* em sua versão inicial. É claramente observável que este componente está firmemente fixado a uma superfície de natureza metálica. Dada a importância de manter a consistência na montagem, torna-se vital assegurar que qualquer suporte termoplástico que venha a ser projetado no futuro consiga se adaptar e ser montado exatamente nessa mesma configuração estrutural.

Figura 7 – Componente analisado neste estudo.



Fonte: Autora (2024).

Foram elaboradas duas versões distintas do bracket para análise. A primeira representa o design original do componente visando substituir o item metálico. Já a segunda é uma adaptação da primeira, incorporando modificações direcionadas para otimizar sua performance, conforme evidenciado na área destacada da figura.

Com base na geometria original e na nova geometria proposta, um modelo tridimensional foi desenvolvido utilizando software CAD (Computer-Aided Design). O modelo foi desenvolvido considerando as propriedades e características específicas dos materiais termoplásticos, como o *Nylon*. Após o desenvolvimento dos modelos tridimensionais, realizou-se uma simulação computacional do desempenho mecânico do bracket. Esta simulação buscará identificar tensões, deformações e possíveis pontos de falha do componente.

A metodologia proposta visou uma inspeção rigorosa e abrangente de peças, tendo usado como base os testes apresentados para garantir a qualidade, segurança e funcionalidade adequadas das peças avaliadas. No estudo preliminar, familiarizou-se com as especificações das peças e revisaram-se os parâmetros de inspeção e as métricas de avaliação. Nas etapas de teste para as geometrias Z e L, realizou-se uma pesquisa de ressonância para determinar as frequências naturais da peça, identificando possíveis falhas devido a vibrações.

A curva de vibração utilizada foi analisada para avaliar a resposta da peça sob diferentes níveis e durações de vibração, e o choque operacional foi simulado para avaliar a resistência e integridade da peça.

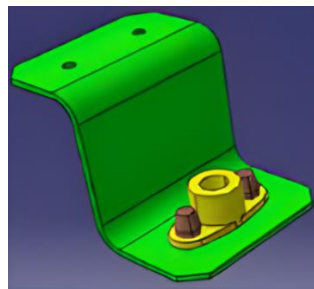
As peças foram divididas em grupos e categorias para inspeção, e para cada amostra, verificou-se a região de inspeção, os resultados para cada etapa de teste, e observações pertinentes sobre danos ou falhas, além de outros testes específicos, como choque e segurança de colisão. As observações de cada etapa do teste foram revistas, focando-se em anomalias ou falhas notáveis. Notas foram tomadas de peças que quebraram ou mostraram degradação. A razão de aprovação/reprovação foi avaliada com base nos critérios de teste. Com base nos resultados, propuseram-se modificações ou melhorias no design ou no material da peça, se necessário, e sugeriram-se alterações nos procedimentos de teste, caso fossem identificadas lacunas ou áreas de melhoria.

Por fim, ensaios práticos serão feitos com os suportes de cabeamento produzidos em material termoplástico. Estes ensaios simularão as condições operacionais das aeronaves, incluindo variações de temperatura, cargas aplicadas e vibrações. O desempenho do bracket termoplástico será comparado ao desempenho do bracket metálico original para validar a substituição.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O escopo deste estudo abrange a análise dinâmica computacional de um bracket de cabeamento, com o objetivo de avaliar as implicações das alterações de design realizadas sobre sua geometria original. A Figura 8, que segue abaixo, exibe a geometria do bracket metálico atualmente em uso, servindo como ponto de partida para o desenvolvimento e comparação com o novo design em *Nylon*.

Figura 8 - Componente fabricado em metal.

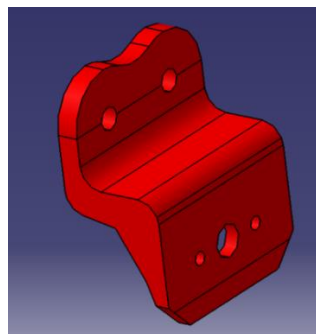


Fonte: Autora (2024).

Por meio da Figura 8, pode-se notar a configuração física do componente que, após a reavaliação, poderá ser otimizado para melhor desempenho. Tais análises permitem assegurar que o bracket em *Nylon* não apenas se encaixe na montagem existente, mas também supere as expectativas de durabilidade e segurança nas condições operacionais reais.

Neste segmento do estudo, apresenta-se um avanço significativo no projeto com a introdução do modelo inicial fabricado em *Nylon*, ilustrado na Figura 9. Este protótipo, referido como 'Versão 00', serve como o ponto de partida para o processo de reengenharia.

Figura 9 – Modelo inicial do bracket em *Nylon*, denominado 'Versão 00'



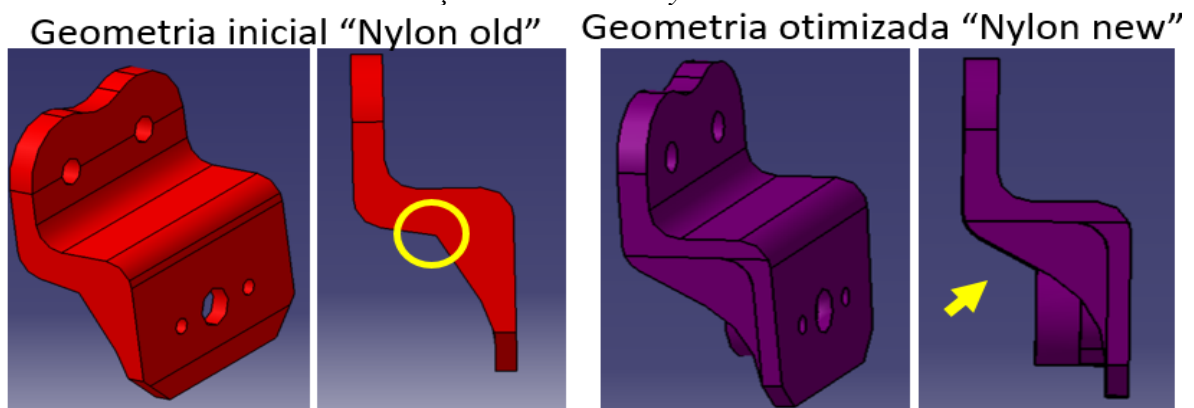
Fonte: Autora (2024).

A Versão “*Nylon old*” do bracket em foi criada com o objetivo de replicar as funcionalidades do modelo metálico enquanto explora as vantagens de um material termoplástico, como a redução de peso e a resistência à corrosão. A transição para o *Nylon* também busca endereçar questões identificadas nas avaliações de desempenho, onde o modelo metálico mostrou limitações.

No entanto, a análise dos resultados revelou que o desempenho da Versão *Nylon old* do componente não atende aos requisitos necessários para sua aplicação em aeronaves. Portanto, uma nova geometria foi cuidadosamente projetada para resolver essas limitações. Para uma compreensão mais clara e um exame detalhado, apresentaremos a evolução do suporte para a 'Versão *Nylon new*'. Os dados obtidos serão exibidos em conjunto com os da versão anterior, proporcionando uma comparação direta que permitirá uma avaliação mais intuitiva e uma interpretação mais estratégica dos resultados.

Com base nos resultados adquiridos por meio dos testes de análise mecânica, identificou-se a oportunidade de aprimorar o projeto do componente. A Figura 10 captura a essência dessa melhoria, mostrando uma versão revisada do bracket, onde ajustes específicos na geometria foram implementados com o objetivo de otimizar o desempenho mecânico. As alterações são o resultado de um processo de avaliação criteriosa, destinado a maximizar a eficiência e confiabilidade do componente em suas aplicações práticas.

Figura 10 - Nova geometria em roxo – “*Nylon new*”, refletindo as melhorias baseadas em relação a Versão 0 “*Nylon old*”.



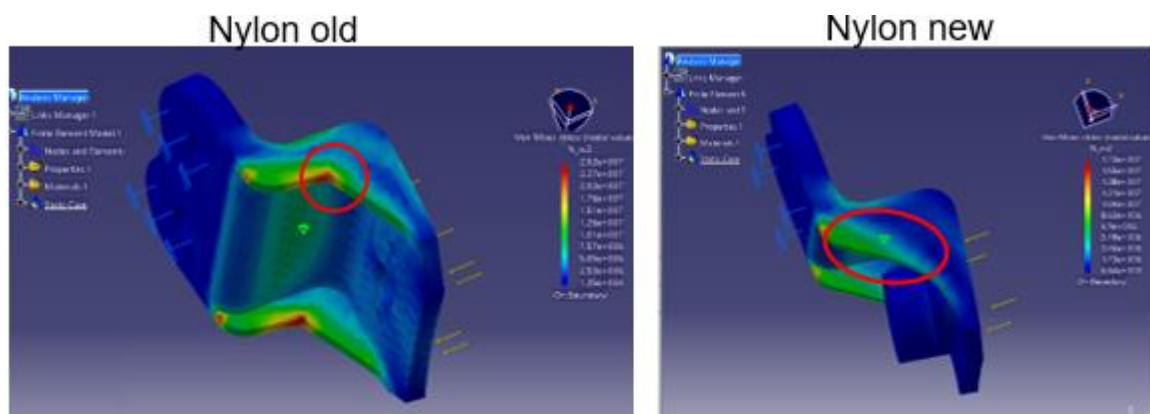
Fonte: Autora (2024).

A nova geometria apresentada busca não só aumentar a resistência e durabilidade do bracket mas também otimizar a distribuição de carga e a eficiência do material. Este avanço representa um passo significativo para alcançar os padrões de desempenho desejados, assegurando que o componente possa resistir às exigências de operações críticas.

A “Nylon new” do suporte de cabeamento, apresentada na primeira imagem na cor roxa, constitui uma evolução do design “Nylon old”. Esta iteração foi meticulosamente recalibrada com o objetivo de superar as limitações identificadas na versão anterior. Com um foco especial na otimização da distribuição de tensões e na melhoria da resistência mecânica, a geometria da 'Versão 01' incorpora ajustes críticos para aprimorar a funcionalidade e a segurança. Cada aspecto do novo design foi submetido aos mesmos testes para garantir a confiabilidade dos resultados.

Sendo assim, a primeira análise apresentada- refere-se à análise estática. A Figura 11 mostra os resultados obtidos na Análise de Von Mises, que é um critério de falha utilizado para prever o início do escoamento plástico em materiais dúcteis, foi aplicada sob uma carga de 1 Newton na direção Y para ambas as versões.

Figura 11 – Resultados da Análise de Von Mises para Versão “Nylon old” e Versão “Nylon new” com carga de 1N.



Fonte: Autora (2024).

Para a *Nylon old*, observa-se que o fator de segurança (F.S.) é de 5,47, indicado pela distribuição de tensões na escala de cores, com áreas de maior preocupação circundadas em vermelho. Um fator de segurança mais alto indica que o componente pode suportar cargas substancialmente maiores do que a máxima esperada em uso normal antes de falhar.

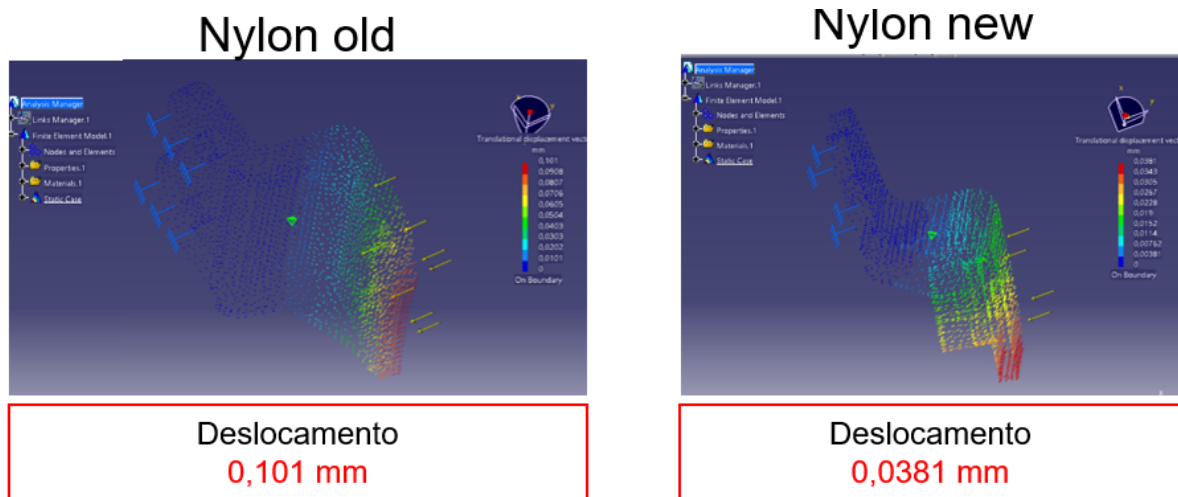
Já para a *Nylon New*, há uma melhoria significativa com um fator de segurança elevado para 16,20, o que representa uma melhoria de 300% em relação à versão anterior. Isso é evidenciado pela mudança na distribuição de tensões, com as áreas críticas agora sendo menores e mais localizadas, como circundado em azul na imagem.

Este aumento notável no fator de segurança sugere que a Versão “Nylon new” do suporte de cabeamento em *Nylon* é substancialmente mais robusta e capaz de suportar cargas

maiores sem sofrer deformações plásticas. Portanto, a nova versão apresenta-se como uma opção mais viável para uso em condições operacionais de aeronaves, onde a segurança e a integridade estrutural são de extrema importância. A análise demonstra o sucesso das modificações de design na melhoria da capacidade de carga do suporte e na sua potencial aplicabilidade em ambientes mais exigentes.

Em seguida, verificou-se o quanto de deslocamento houve com a carga de 1N aplicada. O resultados são observados na Figura 12

Figura 12 - Comparação de Deslocamento em Suportes de Cabeamento em *Nylon*: Versão 00 vs. Versão 01.



Fonte: Autora (2024).

Para a *Nylon* Versão “*Nylon old*”, o deslocamento máximo observado é de 0,101 mm. Este valor indica a magnitude da deflexão sofrida pelo componente quando submetido a uma carga específica. O gráfico de vetores de deslocamento mostra uma distribuição mais ampla de deslocamentos, o que sugere uma flexibilidade maior e, conseqüentemente, uma rigidez menor.

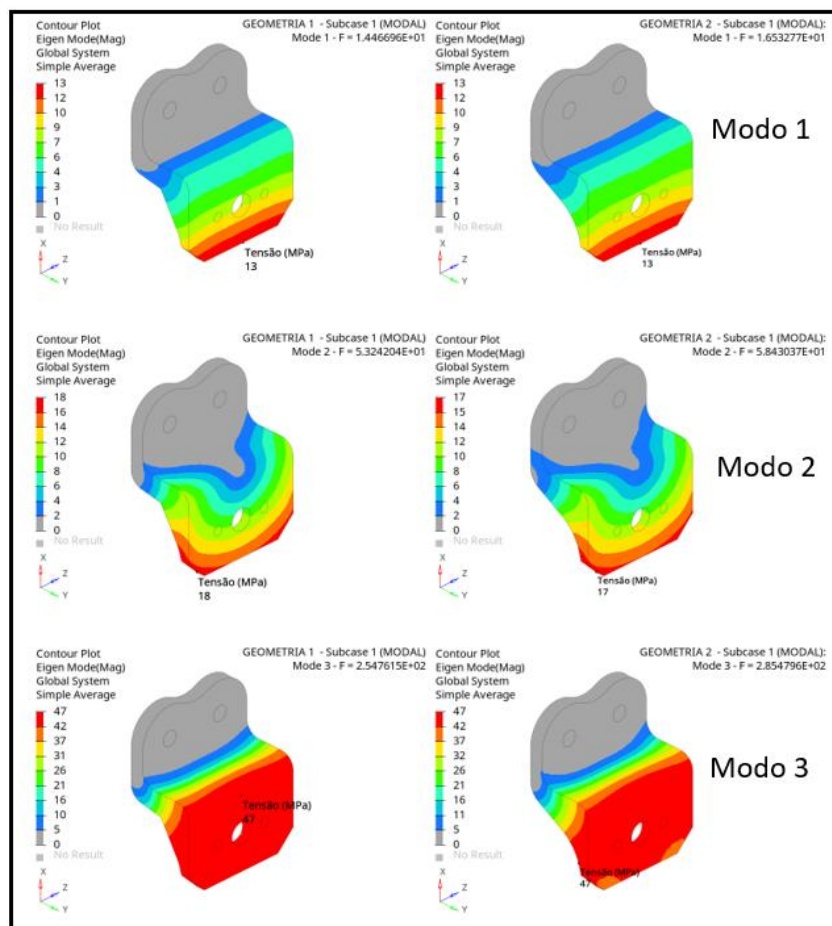
Em contrapartida, a *Nylon* Versão “*Nylon new*” mostra um deslocamento significativamente reduzido de 0,0381 mm, o que representa uma diminuição considerável em relação à versão anterior. A distribuição de deslocamentos é mais concentrada, indicando que o componente possui uma rigidez maior e é menos propenso a deformações sob carga.

A redução do deslocamento na Versão “*Nylon new*” é um indicativo de que as modificações no design contribuíram para um aumento da rigidez estrutural do componente. Este é um fator positivo em aplicações aeronáuticas, onde deslocamentos excessivos podem

comprometer a funcionalidade do suporte e a integridade do sistema de cabeamento. Portanto, os dados sugerem que a Versão otimizada é uma melhoria significativa em termos de desempenho estrutural, oferecendo maior confiabilidade e segurança para uso em condições operacionais rigorosas.

O próximo passo foi uma análise modal da geometria. Os resultados ilustrados na Figura 13 comparam as respostas de frequência das duas versões do suporte de cabeamento em *Nylon* submetidas a uma análise modal, que é usada para determinar as frequências naturais de vibração do componente.

Figura 13 - Comparativo de Análise Modal: Frequências Naturais de Suportes de Cabeamento em *Nylon* Versões 00 (Geometria 1) e Versão 01 (Geometria 2).



Fonte: Autora (2024).

Nas imagens expostas na Figura 13, as cores representam a magnitude dos modos de vibração próprios do componente, com o vermelho indicando áreas de maior amplitude de vibração. A figura mostra a distribuição das tensões para cada modo de vibração, com diferentes cores representando os níveis de tensão. A intensidade da cor indica a magnitude

da tensão em megapascal (MPa), e as áreas com a coloração mais quente (vermelha) são onde as maiores tensões ocorrem durante a vibração. Os resultados são sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Frequências Naturais de Suportes de Cabeamento.

Modo	Frequência (Hz)	
	Geometria 1	Geometria 2
1	14,4	16,5
2	53,2	58,4
3	254,7	285,4

Fonte: Autora (2024)




Os resultados mostrados na Tabela 2 revelam que a *Nylon* Versão “*Nylon old*” tem uma frequência natural mais baixa para o primeiro modo (14,4 Hz) em comparação com a o modelo “*Nylon new*” (16,5 Hz), indicando que a Versão 01 é ligeiramente mais rígida e menos suscetível a vibrar em frequências mais baixas.

Vale ressaltar que as frequências naturais são importantes para prever como um componente vibrará em resposta a estímulos externos e para garantir que essas frequências não coincidam com as frequências de excitação das fontes de vibração no ambiente operacional, o que poderia levar à ressonância e falha potencial do componente.

Esse padrão se mantém para os modos subsequentes, com a Versão “*Nylon new*” apresentando frequências naturais mais altas para os modos 2 e 3 também. Isso pode ser interpretado como uma melhoria na rigidez e na estabilidade estrutural do componente, o que é benéfico para a integridade estrutural do suporte quando sujeito a forças dinâmicas em serviço.

Avançando com os resultados, outro ponto é uma análise estática comparativa entre as três versões do componente (metálico, *Nylon old* e *Nylon new*), de modo a verificar as melhorias obtidas alterando a geométrica do componente. A Figura 14 oferece uma análise comparativa meticulosa que avalia o desempenho estático entre três iterações distintas do suporte. Esta análise possibilita discernir as melhorias incrementais alcançadas através da evolução do design do componente ao comparar as tensões geradas e os fatores de segurança entre as versões, a figura ilustra a evolução do componente e destaca o sucesso das estratégias de otimização adotadas.

Figura 14 – Resultados da análise estática comparativa para as três versões do bracket analisado.

Suporte		Análise Estática						Resultados: Nylon old -> Nylon new	
		Resultados carga unitária – 1N direção Z (N/m <sup>2</sup> )	Resultados carga unitária – 1N direção X (N/m <sup>2</sup> )	Resultados carga unitária – 1N direção Y (N/m <sup>2</sup> )	Fator de Segurança Tensão Escoamento 1.379 × 10 <sup>8</sup> N_m2 material utilizado				
		Z	X	Y	Z	X	Y		
Suporte Metálico		1,81E+06	8,90E+05	1,87E+06	76,19	154,94	73,74	<b>18,99</b>	<b>Eixo Z em %</b>
Suporte Nylon old		5,64E+05	2,32E+05	5,34E+05	244,50	594,40	258,24	<b>7,91</b>	<b>Eixo X em %</b>
Suporte Nylon New		4,74E+05	2,15E+05	4,81E+05	290,93	641,40	286,69	<b>11,02</b>	<b>Eixo Y em %</b>

Fonte: Autora (2024).

Os resultados estão dispostos em relação às cargas unitárias aplicadas nas direções X, Y e Z e são expressos em termos de tensão (N/m<sup>2</sup>), assim como os fatores de segurança para tensão de escoamento do material utilizado. Analisando os dados, observa-se o seguinte:

**Suporte Metálico:** Apresenta os maiores valores de tensão em todas as direções quando submetido a uma carga unitária de 1N, indicando que o material metálico é substancialmente mais rígido que as versões em *Nylon*. O fator de segurança na direção X é o mais alto, sugerindo que o suporte metálico é particularmente resistente a cargas aplicadas nessa direção.



**Suporte *Nylon* old:** Quando comparado ao suporte metálico, mostra valores de tensão significativamente mais baixos em todas as direções, o que indica menor rigidez. O fator de segurança é mais elevado, o que pode ser atribuído à menor rigidez do material, que permite mais deformação antes de atingir a tensão de escoamento.

**Suporte *Nylon* New:** Exibe uma redução na tensão em comparação com o "*Nylon* old" para as direções Z e X, mas um ligeiro aumento na direção Y. Isso sugere que as alterações no design ou no material da nova versão melhoraram a distribuição de tensões quando submetidas a cargas nas direções Z e X, mas podem ter introduzido uma concentração de tensão na direção Y. No entanto, o aumento no fator de segurança em todas as direções indica um desempenho geral melhorado, sugerindo que o "*Nylon* New" pode suportar uma carga maior antes de atingir a tensão de escoamento.

A coluna de resultados percentuais à direita compara diretamente o "Nylon old" com o "Nylon New", mostrando as mudanças percentuais nas tensões. Notamos um aumento de 11,02% na direção Y, enquanto que há uma diminuição de 18,99% e 7,91% nas direções Z e X, respectivamente. Isso indica que a nova versão do suporte é mais eficaz em resistir a cargas nas direções Z e X, mas um pouco menos eficaz na direção Y. Isso pode ser uma consequência de uma redistribuição de material ou uma alteração na geometria do suporte que afeta diferentemente a rigidez nas várias direções.

Outros aspectos que permite inferir a possibilidade do uso deste componente é seu peso, uma vez que esta variável é um fator crítico na indústria aeroespacial, onde a eficiência do combustível e o desempenho geral da aeronave estão diretamente relacionados à carga total. A Figura 15 ilustra uma comparação detalhada dos pesos dos suportes aeronáuticos, destacando não apenas a importância da leveza dos componentes mas também como cada design contribui para o peso total de uma aeronave.

Figura 15 – Análise do peso para as três versões dos componentes.

Suporte		Peso em gramas /Suporte	Suportes /AC	Peso / 1000 AC	Resultados
Suporte Metálico		4,13	Considerando 1000 suportes por AERONAVES (AC)	4130	Redução de 930 gramas/AC; Redução de 22,5% do peso dos suportes, redução maior que 20% , porém dados confidenciais
Suporte Nylon old		3,08		3080	
Suporte Nylon New		3,2		3200	

Fonte: Autora (2024).

Embora a "Nylon New" tenha um ligeiro aumento de peso em comparação com a "Nylon old" (de 3,08 gramas para 3,2 gramas por suporte), é essencial considerar os ganhos mecânicos que acompanham essa mudança.





Primeiramente, mesmo com o aumento do peso, a versão "Nylon New" ainda oferece uma redução significativa de peso em comparação com a versão metálica - uma economia de 930 gramas por aeronave (AC), assumindo o uso de 1000 suportes. Esta redução de peso

contribui para a eficiência de combustível e, por conseguinte, para a redução dos custos operacionais e do impacto ambiental.

Do ponto de vista mecânico, o ligeiro aumento de peso na "Nylon New" pode ser resultado de um design que prioriza a integridade estrutural e a robustez. Aumentos na rigidez e no fator de segurança, como mostrado nas análises anteriores, sugerem que o design melhorado pode lidar melhor com as cargas operacionais, potencialmente aumentando a vida útil do componente e reduzindo a necessidade de manutenção. Em contextos aeronáuticos, onde a segurança e a confiabilidade são críticas, esses ganhos mecânicos podem justificar um pequeno aumento no peso.

Portanto, embora a versão "Nylon New" seja marginalmente mais pesada que a "Nylon old", os benefícios de desempenho mecânico podem superar esse pequeno comprometimento no peso, tornando-a uma escolha preferível para aplicações aeronáuticas onde a durabilidade e a segurança são prioritárias. O comparativo dos deslocamentos também pode ser analisado para as três versões. Essa análise pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Análise do deslocamento para as três versões do componente.

Análise Deslocamento						
Suporte		Resultados carga unitária – 1N direção Z (mm)	Resultados carga unitária – 1N direção X (mm)	Resultados carga unitária – 1N direção Y (mm)	Dados: Nylon old -> Nylon New	
		Z	X	Y		
Suporte Metálico		0,0403	0,0063	0,0298	38,96	Eixo Z em %
Suporte Nylon old		0,00214	0,000593	0,00155	13,82	Eixo X em %
Suporte Nylon New		0,00154	0,000521	0,00118	31,36	Eixo Y em %

Fonte: Autora (2024).




A análise dos deslocamentos em três direções ortogonais sob uma força de 1N revela a rigidez diferenciada entre os suportes. O suporte metálico demonstra o menor deslocamento, confirmando sua alta rigidez, embora o seu peso consideravelmente maior possa comprometer a eficiência do combustível.

Em contraste, o suporte "Nylon old" exibe maior deslocamento, apontando para menor rigidez. Já o "Nylon New" mostra uma rigidez aprimorada, com destaque para uma redução

de 31,36% no deslocamento no eixo Z, indicando maior capacidade de suportar cargas verticais. No entanto, o aumento de deslocamento no eixo Y requer atenção para garantir a integridade operacional. Essa otimização na rigidez, especialmente no eixo Z, sugere que o "Nylon New" pode oferecer uma longevidade maior e menores necessidades de manutenção, o que pode justificar o ligeiro acréscimo de peso.

Considerando os resultados apresentados, justifica-se a substituição do modelo metálico pelo modelo otimizado em Nylon, identificado como "Nylon New", com base em análises mecânicas detalhadas. Entretanto, é necessário também avaliar a viabilidade econômica dessa substituição. Um estudo comparativo dos custos associados aos componentes metálicos e ao "Nylon New" está detalhado na Figura 17.

Figura 17 – Análise de custo para os modelos metálicos e Nylon new.

Análise Custo					
Suporte		Peso em gramas /Suporte	Suportes /AC	Peso / 1000 AC	Resultados
Suporte Metálico		USD20	Considerando 1000 suportes por AERONAVES (AC)	20000	Redução de USD10000/AC; Redução de 50% do peso dos suportes, a redução na verdade é de mais de 50%, porém são dados confidenciais
Suporte Nylon old		N/A		NA	
Suporte Nylon New		USD10		10000	

Fonte: Autora (2024).

Para uma análise comparativa de valor, foi adotado valores aos suportes proporcionais somente na porcentagem de redução real. O suporte metálico custa USD 20 por unidade, o que totaliza USD 20.000 para mil unidades por aeronave (AC). Por outro lado, o suporte "Nylon New" tem um custo unitário de USD 10, resultando em uma economia de 50% por suporte e um custo total de USD 10.000 para a mesma quantidade de unidades por aeronave.

Além da redução direta nos custos, a substituição para a versão em *Nylon* contribui para a diminuição do peso da aeronave, o que pode levar a economias operacionais significativas, especialmente em termos de consumo de combustível e eficiência de voo. Embora a tabela não forneça dados específicos sobre o "Suporte *Nylon* old", a comparação direta entre o suporte metálico e o "*Nylon* New" indica que, além dos benefícios mecânicos discutidos anteriormente, a opção em *Nylon* oferece uma vantagem econômica substancial sem comprometer a performance.

## 5 CONCLUSÃO

A conclusão deste estudo ressalta que a transição do suporte metálico para o "*Nylon New*" não apenas resulta em economia de custos, mas também oferece ganhos consideráveis em performance mecânica. O "*Nylon New*" demonstrou um aumento de rigidez, particularmente no eixo Z, que é crítico para suportar as cargas verticais durante o voo. Além disso, mesmo com um leve aumento de peso em comparação com a versão anterior em *Nylon*, a versão nova mostra uma resistência a deslocamentos que se aproxima da versão metálica, traduzindo-se em um componente mais resistente a cargas operacionais e possivelmente a uma vida útil estendida.

Os custos de fabricação para o "*Nylon New*" são significativamente menores em comparação com o suporte metálico, com uma redução de custo unitário de 50%. Isso representa uma economia direta significativa para a produção em massa, sem mencionar as reduções subsequentes nos custos operacionais devido ao menor peso do suporte, que impacta diretamente na eficiência do combustível e, por extensão, no desempenho ambiental da aeronave.

Portanto, o "*Nylon New*" se destaca como uma opção superior, equilibrando custo e desempenho mecânico. Isso faz dele uma escolha estratégica para fabricantes e operadoras de aeronaves que buscam otimização de recursos sem comprometer a segurança e a integridade estrutural. Recomenda-se que a adoção deste componente seja acompanhada de monitoramento contínuo para validar seu desempenho ao longo do tempo e garantir a conformidade com os padrões aeronáuticos rigorosos.

## REFERÊNCIAS

KUMAR, S. A.; NARAYAN, Y S. Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 type IV standard. *In: INNOVATIVE DESIGN, ANALYSIS AND DEVELOPMENT PRACTICES IN AEROSPACE AND AUTOMOTIVE ENGINEERING*, 2019, Singapura. **Anais [...]**. Singapura: 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6_9). Acesso em: 06 jan. 2024.

ANDERSON JR, J. D. **Fundamentos de engenharia aeronáutica**. São Paulo: AMGH Editora, 2015.

BAKER, A.; GUNNION, A. J.; WANG, J. On the certification of bonded repairs to primary composite aircraft components. **The Journal of Adhesion**, Londres, v. 91, n. 1-2, p. 4-38, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.883315>. Acesso em: 14 nov. 2023.

BARILE, M. *et al.* Thermoplastic composites for aerospace applications. **Revolutionizing aircraft materials and processes**, p. 87-114, 2020. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35346-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35346-9_4). Acesso em: 10 nov. 2023.

BAYER, P. S. **Ensaio dos Materiais**. Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/56878713/Apostila\\_de\\_Ensaio\\_dos\\_Materiais.pdf](https://www.academia.edu/download/56878713/Apostila_de_Ensaio_dos_Materiais.pdf). Acesso em: 12 out. 2024.

BIOPDI. **Ensaio de tração**. 2017. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 23 de. 2023.

BOROVIĆ, U. *et al.* Design methodology for three-phase buck-type and boost-type rectifiers to comply with the DO-160G current distortion test. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Taiwan, v. 35, n. 1, p. 33-47, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2923404>. Acesso em: 02 fev. 2024.

BOUVET, C. **Mechanics of aeronautical composite materials**. Londres: John Wiley & Sons, 2017.

BUHR, T. L. *et al.* Hot, humid air decontamination of a C-130 aircraft contaminated with spores of two acrySTALLIFEROUS *Bacillus thuringiensis* strains, surrogates for *Bacillus anthracis*. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 120, n. 4, p. 1074-1084, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jam.13055>. Acesso em: 06 jan. 2024.

CALIGNANO, F. *et al.* Investigation of the mechanical properties of a carbon fibre-reinforced Nylon filament for 3D printing. **Machines**, Basel, v. 8, n. 3, p. 52, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines8030052>. Acesso em: 12 jan. 2024.

CHOUDHARI, D. S.; KAKHANDKI, V. J. Comprehensive study and analysis of mechanical properties of chopped carbon fibre reinforced Nylon 66 composite materials. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MATERIALS PROCESSING & MANUFACTURING APPLICATIONS*, 2020, Jaipur. **Anais [...]**, v. 44,

p. 4596-4601, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.828>. Acesso em: 10 fev. 2024.

DAVOODI, E. *et al.* Evaluation of the vibration transmitted to pilot's body parts to determine the contribution of different design parameters in deficiency of available seats. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Paris, v. 16, n. 1, p. 339-357, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00829-2>. Acesso em: 10 jan. 2024.

CASTRO, A. M.; GRISON, V.; GASPARIN, A. L. Desenvolvimento de um processo de laminação de material compósito com fibra de carbono e matriz de resina epóxi da asa de uma aeronave. **Brazilian Applied Science Review**, São Paulo, v. 4, n. 6, p. 3772-3791, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv4n6-038>. Acesso em: 10 jan. 2024.

DIAS, L. V. *et al.* Efeitos da temperatura de revenimento na dureza e resistência do aço AISI 5160. *In: CONGRESSO ANUAL DA ABM*, 73., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: 2018. p. 2125-2136. Disponível em: <https://encurtador.com.br/GSMwh>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaaios dos materiais**. São Paulo: Editora LTC, 2012.

GEORGE, A. *et al.* A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, Greeley, [s.l.], v. 154, p. 329-338, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>. Acesso em: 14 jan. 2024.

GLORIA, A. *et al.* Alloys for aeronautic applications: State of the art and perspectives. **Metals**, Basel, v. 9, n. 6, p. 662, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9060662>. Acesso em: 17 jan. 2024.

GONÇALVES, R. J. P. **Validação de projetos usando análise por elementos finitos do Catia V5**. Orientador: Paulo Moita. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2021. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/36253>. Acesso em: 10 fev. 2024.

GRECO, M.; MACIEL, D. **Resistência dos materiais: uma abordagem sintética**, São Paulo, Elsevier Brasil, 2017.

GROTTO, F. *et al.* Experimental behaviour of aeronautical notched carbon fibre reinforced thermoplastic panels under combined tension-shear-pressure loadings. **Engineering Failure Analysis**, São Paulo, v. 146, p. 107075, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107075>. Acesso em: 10 jan. 2024.

HAMDAN, H. *et al.* Layering effect on mechanical, thermal & physical properties carbon fibre reinforced polyphenylene sulfide. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, [s.l.], v. 98, n. 2, p. 128-145, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.37934/arfm.98.2.128145>. Acesso em: 09 dez. 2023.

HAO, B.; LIU, F.; LIU, M. Variant design of typical aircraft parts based on CATIA technology. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS*,

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MECHANICAL AUTOMATION (IoTAIMA), 2020, Hangzhou. **Anais** [...]. 2020. p. 012064. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1605/1/012064/meta>. Acesso em: 14 dez. 2023.

HIBBERT, K. *et al.* The effects of build parameters and strain rate on the mechanical properties of FDM 3D-Printed acrylonitrile Butadiene Styrene. **Open Journal of Organic Polymer Materials**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 1-27, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ojopm.2019.91001>. Acesso em: 05 jan. 2023.

KAUSAR, A. Aeronautical composites and materials. **Polymeric Nanocomposites with Carbonaceous Nanofillers for Aerospace Applications**; Amsterdam, Editora: The Netherlands, p. 1, 2022. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=NGNjEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=KAUSAR,+A.+Aeronautical+composites+and+materials.+Polymeric+Nanocomposites+with+Carbonaceous+Nanofillers+for+Aerospace+Applications%3B+Amsterdam,+Editora:+The+Netherlands,+p.+1,+2022.&ots=bMvPSUbaBU&sig=SDvB0xbOmv2uIb0UBntfVyFYH8U>. Acesso em: 12 out. 2024.

KHAN, A. *et al.* A review of recent developments in kenaf fiber/polylactic acid composites research. **International Journal of Biological Macromolecules**, Colorado, p. 127119, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127119>. Acesso em: 10 dez. 2023.

KIM, S. Y.; PARK, J. S.; LEE, W. S. Development and verification of indirect lightning-induced transient protection circuit for avionics system. **The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)**, [s.l.] p. 670-675, 2021. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=10544887&AN=151849619&h=8cl8bEIWg690KsIQMfcl8t%2FWZ8TIWQEIdOXK9x120cWtvnIBNt6RDLmX5jwiBdBxo%2BskOvY9IJSNL5a0%2FDwHpA%3D%3D&crl=c>. Acesso em: 09 jan. 2024.

KRISHNA, S.; PATEL, C. M. Computational and experimental study of mechanical properties of Nylon 6 nanocomposites reinforced with nanomilled cellulose. **Mechanics of Materials**, Gainesville, v. 143, p. 103318, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103318>. Acesso em: 07 dez. 2023.

KUMAR, G. R. *et al.* Experimental testing and numerical simulation on natural composite for aerospace applications. *In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*, 2018, Bikaner. **Anais** [...]. AIP Publishing, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5032892>. Acesso em: 18 jan. 2024.

LI, F.; WOODROUGH, M.; DEO, C. Computational modeling of radiation effects in carbon fiber-reinforced polyethylene composites. *In: AMERICAN SOCIETY FOR COMPOSITES-THIRTY-EIGHTH TECHNICAL CONFERENCE*, 2023, Massachusetts. **Anais** [...]. Disponível em: <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/asc38/article/view/36594>. Acesso em: 17 jan. 2024.

LI, G. J. *et al.* Development and application of CATIA-based interference simulation system for tube bending. *In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2018, Nanjing. **Anais** [...]. IOP Publishing, 2018. p. 062048. Disponível

em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/392/6/062048/meta>. Acesso em: 20 dez. 2023.

LIM, M. J. A. **Effect of humidity and temperature on friction performance of carbon-carbon aircraft brake materials**. 2018. Dissertation (Master's in Engineering) – Southern Illinois University at Carbondale, Illinois. Disponível em: <https://search.proquest.com/openview/923cb96d90a106061efbb08784d1d856/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. Acesso em: 12 out. 2024.

LUMSDEN, G. *et al.* Mechanical characterisation of additively processed filled Nylon powder composites under cryogenic conditions. *In: INTERNATIONAL CRYOGENIC ENGINEERING CONFERENCE AND INTERNATIONAL CRYOGENIC MATERIALS CONFERENCE, 2022, Singapore. Anais [...]*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 1081-1088. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-6128-3\\_140](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-6128-3_140). Acesso em: 10 jan. 2024.

NEVEU, F. *et al.* Manufacturing and impact behaviour of aeronautic overmolded grid-stiffened thermoplastic carbon plates. **Composite Structures**, Bologna, v. 284, p. 115228, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115228>. Acesso em: 07 dez. 2023.

VALDIVIA, A. E. O; VAZQUEZ, R. J. R. Proposal learning strategy interfacial polymerization of nylon 6, 10. **Online Submission**, [s.l.], v. 13, n. 12, p. 19823-19827, 2021. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED618444>. Acesso em: 10 jan. 2023.

OGHLY, J. S. Z. Physico-chemical properties of polymer composites. **American Journal of Applied Science and Technology**, [s.l.], v. 3, n. 10, p. 25-33, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume03Issue10-06>. Acesso em: 15 dez. 2023.

OLEJNIK, A. *et al.* Technology of ground vibration testing and its application in light aircraft prototyping. *In: MATEC WEB OF CONFERENCES, 2019, Atenas. Anais [...]*. 2019. p. 01005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201930401005>. Acesso em: 19 jan. 2023.

OLIVEIRA, L. G. F. S. **Influência das ferramentas de CAD em um projeto aeronáutico**. 2018. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26592>. Acesso em: 06 fev. 2024.

PANTELAKIS, S.; TSERPES, K. (Ed.). **Revolutionizing aircraft materials and processes**. New York, Editora: Springer, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-35346-9.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

PASUPULETI, D. *et al.* **Cranfield aerospace composite repair**. Cranfield, Editora: Cranfield University, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Hamed-Yazdani-Nezhad/publication/317167462\\_Cranfield\\_Aerospace\\_Composite\\_Repair\\_-\\_Group\\_Project\\_Thesis/links/592ff1f10f7e9beee761b88d/Cranfield-Aerospace-Composite-Repair-Group-Project-Thesis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hamed-Yazdani-Nezhad/publication/317167462_Cranfield_Aerospace_Composite_Repair_-_Group_Project_Thesis/links/592ff1f10f7e9beee761b88d/Cranfield-Aerospace-Composite-Repair-Group-Project-Thesis.pdf). Acesso em: 05 jan. 2023.

PEIXIN, G. A. O. *et al.* Vibration analysis and control technologies of hydraulic pipeline system in aircraft: A review. **Chinese Journal of Aeronautics**, [s.l.], v. 34, n. 4, p. 83-114, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120303265>. Acesso em: 10 out. 2024.

PRABHAKARAN, J. *et al.* Experimental analysis of mechanical behaviour of carbon fiber and e-glass fiber stitched with nylon 66 reinforced with polyester Resin. **Research and Reviews: Journal of Mechanics and Machines**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 1-6, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.5281/zenodo.5070077>. Acesso em: 12 jan. 2024.

PRASAD, N. E.; WANHILL, R. J. H. (Ed.). **Aerospace materials and material technologies**. Singapore: Springer, 2017.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica**. Salto, Cengage learning, 2013. Disponível em: <https://www.abul.org.br/biblioteca/128.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

SALEEM, M. A. *et al.* Sustainable dyeing of Nylon with disperse dyes in Decamethylcyclopentasiloxane waterless dyeing system. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 276, p. 123258, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123258>. Acesso em: 09 jan. 2024.

SANTOS, D. P. S. **Tendências e avanços científicos nas engenharias: aeronáutica, aeroespacial, eletrônica e de telecomunicações**. São Paulo, Amplla Editora, 2022. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=JGmFEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=SANTOS,+D.+P.+S.+Tend%C3%A2ncias+e+avan%C3%A7os+cient%C3%ADficos+nas+engenharias:+aeron%C3%A1utica,+aeroespacial,+eletr%C3%B4nica+e+de+telecomunica%C3%A7%C3%B5es.+S%C3%A3o+Paulo,+Amplla+Editora,+2022.&ots=ICGp5iX00a&sig=anfV07wk5wMAkrmJPxwEPQ07A>. Acesso em: 10 out. 2024.

SANTOS, G. A. **Tecnologia dos materiais metálicos: propriedades, estruturas e processos de obtenção**. Rio de Janeiro: Saraiva Educação SA, 2015. Disponível em: [https://books.google.com/books/about/Tecnologia\\_dos\\_Materiais\\_Met%C3%A1licos.html?id=PYuwDwAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Tecnologia_dos_Materiais_Met%C3%A1licos.html?id=PYuwDwAAQBAJ). Acesso em: 10 out. 2024

SCHUHLER, E. *et al.* Behaviour of aeronautical polymer composite to flame: A comparative study of thermoset-and thermoplastic-based laminate. **Polymer Degradation and Stability**, [s.l.], v. 152, p. 105-115, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.004>. Acesso em: 02 dez. 2023.

SHAKIBA, M. *et al.* Nylon—a material introduction and overview for biomedical applications. **Polymers for advanced technologies**, Houston, v. 32, n. 9, p. 3368-3383, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pat.5372>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SHAMSURI, A. A.; DAIK, R. Mechanical and thermal properties of Nylon-6/LNR/MMT nanocomposites prepared through emulsion dispersion technique. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 73, n. 1, p. 1-12, 2020.

Disponível em:

[https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid\\_mechanics\\_thermal\\_sciences/article/view/6467](https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/6467). Acesso em: 10 out. 2024.

SILVA, D. L. G. A; SILVA, L. S. Análise das propriedades mecânicas do aço sae/aisi 8620 quando submetidos aos tratamentos térmicos de cementação e têmpera. **Exatas & Engenharias**, Campos dos Goytacazes, v. 8, n. 22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.25242/885X82220181502>. Acesso em: 02 fev. 2024.

SOFI, T. *et al.* An efficient procedure for bonding piezoelectric transducers to thermoplastic composite structures for SHM application and its durability in aeronautical environmental conditions. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 10, p. 4784, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23104784>. Acesso em: 07 fev. 2024.

SOLER, M. **Fundamentals of aerospace engineering: an introductory course to aeronautical engineering**. Madri: Manuel Soler, 2014. Disponível em: <http://repo.poltekbangsby.ac.id/686/>. Acesso em: 14 out. 2024.

SONG, Y.; CHENG, S. Establishment of Inspection Information Model Based on Secondary Development with CATIA. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2018, Bali. **Anais [...]**. Bali, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9888227/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

SOUZA, A. F. *et al.* Proteção contra corrosão da liga de alumínio 2024–T3 por filme de polipirrol eletrodepositado em ácido p-tolueno sulfônico. **Rev. Bras. Apl. Vac**, Sorocaba, v. 36, n. 1, p. 34-38, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.17563/rbav.v36i1.1059>. Acesso em: 19 dez. 2023.

TEREKHINA, S. *et al.* Effects of the infill density on the mechanical properties of Nylon specimens made by filament fused fabrication. **Technologies**, Basel, [s.l.], v. 7, n. 3, p. 57, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/technologies7030057>. Acesso em: 25 nov. 2023.

TISCHLER, M. B. System identification methods for aircraft flight control development and validation. **Advances in aircraft flight control**. [s.l.]: Routledge, 2018. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315136820-2/system-identification-methods-aircraft-flight-control-development-validation-mark-tischler>. Acesso em: 17 out. 2024.

TOTLA, H. S. *et al.* Resistance welding analysis of thermoplastic composite structures in aeronautical applications. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [s.l.], v.1, p. 1-13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01151-1>. Acesso em: 17 dez. 2023.

VIEILLE, B. *et al.* About the influence of stamping on thermoplastic-based composites for aeronautical applications. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 45, n. 1, p. 821-834, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.047>. Acesso em: 10 dez. 2023.

WADY, P. *et al.* Effect of ionising radiation on the mechanical and structural properties of 3D printed plastics. **Additive Manufacturing**, Nova Iorque, v. 31, p. 100907, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100907>. Acesso em: 10 dez. 2023.

WAGNER, T. *et al.* Experimental and numerical assessment of aerospace grade composites based on high-velocity impact experiments. **Composite Structures**, Amsterdã, v. 204, p. 142-152, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.019>. Acesso em: 10 fev. 2024.

WAXMAN, R.; GUVEN, I. Implementation of a neo-hookean material model in state-based peridynamics to represent Nylon bead behavior during high-speed impact. *In: AIAA SCITECH 2020 FORUM*, 2020, Orlando. **Anais [...]**. Orlando, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2020-0725>. Acesso em: 10 nov. 2023.

XIAOXIANG, Z. *et al.* Preparation and properties of Nylon 6, 6 grafted graphene composites. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, [s.l.], v. 20, n. 3, p. 1977-1982, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.173476>. Acesso em: 13 dez. 2023.

ZHANG, W.; XU, Y. **Mechanical properties of polycarbonate**: experiment and modeling for aeronautical and aerospace applications. Londres: Elsevier, 2019. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=AuGqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=ZHANG,+W.%3BXU,+Y.+Mechanical+properties+of+polycarbonate:+experiment+and+modeling+for+aeronautical+and+aerospace+applications.+Londres:+Elsevier,+2019.&ots=d8fY1jd5jy&sig=6v5HCLSVFCarmv26eqpuWR4RoIU>. Acesso em: 17 out. 2024.

ZHU, H. *et al.* Nickel-coated nylon sandwich film for combination of lightning strike protection and electromagnetic interference shielding of CFRP composite. **Composites Science and Technology**, Amsterdã, v. 207, p. 108675, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108675>. Acesso em: 12 dez. 2023.