

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos na Fuselagem de Aeronaves: Análise de Resistência à Tração, Compressão e Impacto

Davi Marques Dorateu

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

davi.dorateu@aluno.ifsp.edu.br

Felipe Rodrigues Cardoso

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

cardoso.felipe@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

O presente artigo abordou o comportamento de materiais compósitos aplicados na fuselagem de aeronaves, com foco em suas propriedades de resistência à tração, compressão e impacto. A pesquisa teve como objetivo principal analisar de que forma esses materiais contribuem para o desempenho estrutural e a segurança aeronáutica, considerando sua evolução histórica, suas características mecânicas e as inovações no processo de fabricação. A metodologia utilizada consistiu em uma revisão bibliográfica sistemática, desenvolvida a partir da coleta de dados em bases como Google Acadêmico, SciELO, PubMed e bibliotecas virtuais, reunindo livros, artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos. Os resultados evidenciaram a superioridade dos compósitos em relação aos metais convencionais, sobretudo na resistência mecânica, no desempenho estrutural e na redução de massa das aeronaves, embora tenham sido identificadas limitações quanto à previsibilidade de falhas e aos custos de produção. As considerações finais apontaram que o objetivo geral foi alcançado, confirmando a importância dos compósitos para a engenharia aeronáutica contemporânea e ressaltando a necessidade de pesquisas futuras voltadas à padronização produtiva e ao aprimoramento de técnicas de fabricação.

Palavras-chave

Materiais compósitos; Fuselagem; Aeronaves; Tração; Compressão; Impacto.

Abstract

This study addressed the behavior of composite materials applied to aircraft fuselages, focusing on their tensile, compressive, and impact resistance properties. The main objective was to analyze how these materials contribute to structural performance and aeronautical safety, considering their historical evolution, mechanical characteristics, and innovations in the manufacturing process. The methodology

consisted of a systematic literature review, based on data collected from Google Scholar, SciELO, PubMed, and virtual libraries, including books, scientific articles, dissertations, theses, and technical reports. The results highlighted the superiority of composites compared to conventional metals, especially in mechanical resistance, structural performance, and weight reduction of aircraft, although limitations regarding failure predictability and production costs were identified. The final considerations indicated that the general objective was achieved, confirming the importance of composites for contemporary aeronautical engineering and emphasizing the need for future research focused on production standardization and the improvement of manufacturing techniques.

Keywords: Composite materials; Fuselage; Aircraft; Tension; Compression; Impact.

1 – Introdução

O desenvolvimento tecnológico na indústria aeronáutica tem impulsionado a busca por materiais que ofereçam maior desempenho estrutural, menor peso e elevada resistência mecânica. Nesse cenário, os materiais compósitos surgem como alternativa estratégica, especialmente no que diz respeito à aplicação em fuselagens de aeronaves. Sua combinação de fibras de alta resistência e matrizes poliméricas confere propriedades superiores quando comparados a materiais convencionais como o alumínio, possibilitando um equilíbrio entre leveza e robustez estrutural, requisitos fundamentais para a aviação moderna (LEITE, 2024).

A relevância desse tema se intensifica diante das demandas da indústria aeroespacial por aeronaves mais eficientes e sustentáveis. A redução de peso proporcionada pelos compósitos influencia diretamente no consumo de combustível, ampliando a autonomia dos voos e diminuindo impactos ambientais. Além disso, a alta resistência à tração, compressão e impacto torna esses materiais ideais para suportar as severas condições operacionais da aviação, que envolvem variações de pressão, temperatura e carregamentos dinâmicos durante o voo (LEITE, 2014).

Entretanto, apesar das vantagens, o comportamento mecânico dos compósitos ainda representa um desafio científico e tecnológico. A heterogeneidade desses materiais, associada à complexidade de suas falhas, demanda estudos aprofundados para compreender seu desempenho em situações críticas, como impactos e cargas repetitivas. Essa problemática se reflete na necessidade de análises específicas sobre como esses materiais respondem a diferentes tipos de esforços, a fim de garantir segurança e confiabilidade em estruturas tão sensíveis quanto a fuselagem de aeronaves (MARTINS, 2020).

A justificativa para este estudo reside, portanto, na importância de aprofundar o conhecimento sobre a resposta mecânica dos compósitos em contextos reais de aplicação aeronáutica. Pesquisas

anteriores demonstram avanços significativos na utilização desses materiais, mas ainda há lacunas quanto à previsão do comportamento em situações extremas. Tais investigações são cruciais para que engenheiros e pesquisadores possam desenvolver projetos mais seguros e eficientes, integrando análises experimentais e computacionais para otimizar o desempenho estrutural da fuselagem (HIPÓLITO, 2023).

Assim, este artigo tem como objetivo principal analisar o comportamento de materiais compósitos aplicados na fuselagem de aeronaves, com foco na resistência à tração, compressão e impacto. Pretende-se discutir os resultados de estudos recentes, relacionando-os com aplicações práticas na indústria aeronáutica, de modo a contribuir para o avanço do conhecimento científico e para o aprimoramento do uso desses materiais em estruturas críticas da aviação (SANTOS, 2017).

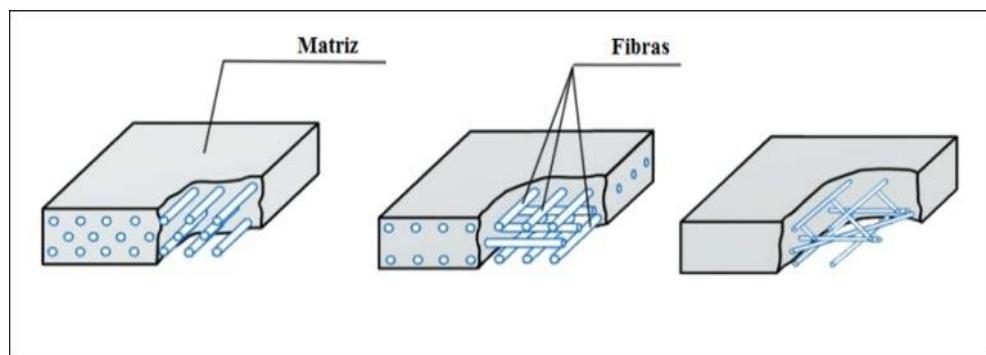


Figura 1 - Estrutura de materiais compósitos com exemplos de arranjos das fibras.

Fonte: edctecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/ (2020).

2 – Desenvolvimento

2.1 - Referencial Teórico

Nos últimos anos, diversas áreas do conhecimento tiveram avanços significativos, de tal forma que, possibilitaram a aplicação de seus objetos de estudo em outros campos, no artigo vigente, a engenharia dos materiais com o uso de materiais compósitos. Rêgo, Santos e Marinho (2020) observam que o uso desse material se deu simultaneamente com tecnológicos. Por conta das características próprias desses materiais, se mostrou uma aplicação muito benéfica nas demandas da área aeronáutica, tornando seu uso muitas vezes necessário e fundamental (LEITE, 2014) e (LEITE, 2024). A partir de um mesmo material compósito, é possível obter distintas propriedades mecânicas e de construção, variando a matriz polimérica e orientação das fibras utilizadas, ou seja, os processos de fabricação. Através dos estudos de Santos (2017), Santos; Shimano (2021) e Alves; Guimarães; Oliveira Filho (2024) é possível observar as diversas conclusões de fabricação e mecânicas. Na análise de propriedades mecânicas, o estudo de SWLING (2018) e LEITE (2014), mostra que os compósitos apresentam características, como leveza,

resistência e tração que são favoráveis às exigências mecânicas da indústria aeronáutica. MARTINS (2020) ressalta que em situações críticas de impacto e deformações, os compósitos necessitam de maior previsibilidade experimental, em complemento o desenvolvimento dos “Compósitos inteligentes” mencionado por HIPÓLITO (2023), podem satisfazer tais incertezas de impacto. As análises de COLMANETTI (2019) e DUTRA (2017) mostram que, embora o uso de compósitos já apresentou resultados benéficos e significativos, ainda se faz necessário o aprofundamento e desenvolvimento de análises computacionais mais detalhadas, a fim de obter maior previsibilidade do uso em estruturas do material.

2.2 - Evolução e Aplicação dos Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica

Os materiais compósitos podem ser definidos como a união de dois ou mais constituintes distintos que, quando combinados, resultam em propriedades mecânicas superiores às dos materiais convencionais. Na indústria aeronáutica, essa combinação geralmente envolve fibras de alto desempenho, como carbono, vidro ou aramida, embebidas em matrizes poliméricas que proporcionam rigidez e resistência. Essa configuração possibilita a obtenção de estruturas mais leves e resistentes, essenciais para suportar as condições extremas a que as aeronaves são submetidas em operação (SWLING, 2018).

No contexto da aviação, a busca por alternativas ao alumínio e ao aço se intensificou nas últimas décadas devido à necessidade de aumentar a eficiência energética e reduzir custos operacionais. O emprego de compósitos na fuselagem trouxe benefícios diretos, como menor consumo de combustível, maior autonomia e redução do impacto ambiental. Essa mudança de paradigma é reconhecida por Leite (2014), que aponta os compósitos como elementos centrais na modernização da indústria, permitindo inovações que extrapolam o desempenho estrutural, abrangendo também aspectos de aerodinâmica e conforto.

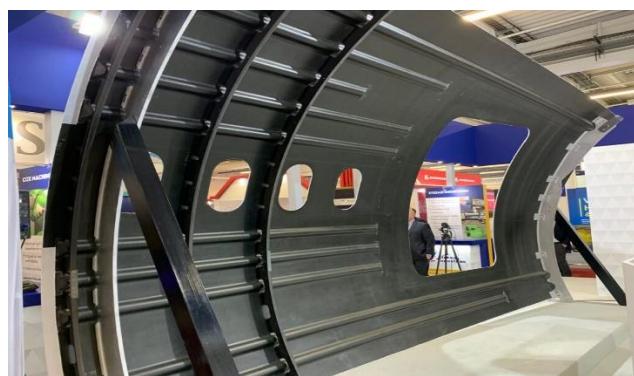


Figura 2 - Parte interna da fuselagem feita em Compósito.

Fonte: <https://hangarrrmma.com.br/blog/materiais-compositos-na-construcao-de-aeronaves/>.

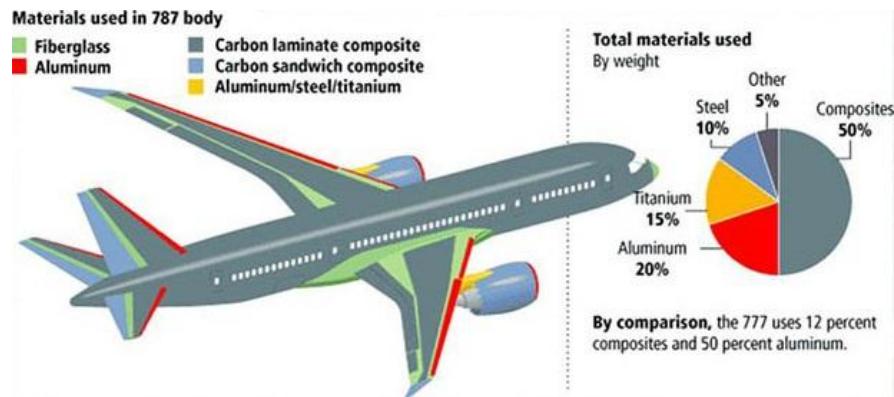


Figura 3 – Materiais compostos na estrutura do Boeing 787.

Fonte: <http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves/> (2015).

Definições mais recentes destacam que os compósitos não são apenas substitutos dos metais tradicionais, mas representam uma classe de materiais com potencial para transformar conceitos de projeto. De acordo com Rêgo, Santos e Marinho (2020), a evolução histórica de sua aplicação na aviação ocorreu em paralelo ao desenvolvimento tecnológico global, com marcos significativos em programas militares e posteriormente em aeronaves comerciais. Já Leite (2024) reforça que, ao serem aplicados em fuselagens, asas e estabilizadores, os compósitos consolidaram-se como recursos indispensáveis para atender aos padrões de segurança e sustentabilidade.



Figura 4 – Materiais compostos na asa do avião Russo MC-21-300 (Imagen parcialmente adaptada e traduzida para o português).

Fonte: <https://rostec.ru/en/media/news/wings-completely-built-of-russian-composites-have-been-installed-to-ms-21-300/#start> (2021).

Apesar do consenso sobre as vantagens, existem divergências quanto à avaliação do ciclo de vida desses materiais. Martins (2020) aponta que a resposta dos compósitos em situações de impacto pode variar consideravelmente em função do tipo de fibra, da orientação das camadas e da matriz utilizada, o que gera incertezas sobre a previsibilidade de falhas.

Hipólito (2023), por outro lado, argumenta que os avanços em compósitos inteligentes podem mitigar parte dessas limitações, introduzindo funções adicionais, como absorção de energia e autodiagnóstico de danos.

Tais diferenças evidenciam que, embora amplamente aceitos, os compósitos ainda demandam investigações contínuas para alcançar níveis plenos de confiabilidade.

As críticas também se estendem aos aspectos de produção e custo. Santos (2017) evidencia que processos como o Out-of-Autoclave surgiram justamente para superar barreiras associadas à dependência de tecnologias caras e restritivas, enquanto Santos e Shimano (2021) destacam novas possibilidades com a fabricação aditiva aplicada a componentes de fixação.

Nesse sentido, Alves, Guimarães e Oliveira Filho (2024) reforçam que a aplicação de otimização topológica nos projetos tem buscado equilibrar desempenho e eficiência produtiva, mas ainda enfrenta limitações práticas em larga escala. Essas análises apontam para o fato de que o avanço na aplicação dos compósitos está diretamente vinculado não apenas às suas propriedades intrínsecas, mas também às tecnologias de fabricação disponíveis.

Essa trajetória histórica e conceitual conecta-se diretamente à problemática do presente estudo, uma vez que a evolução dos compósitos evidencia tanto seus benefícios inquestionáveis quanto os desafios que persistem na compreensão do comportamento estrutural sob esforços específicos.

O uso em fuselagens, em especial, exige investigações aprofundadas acerca de sua resistência à tração, compressão e impacto, condições que permanecem como pontos críticos no desempenho das aeronaves e que justificam o aprofundamento científico e experimental sobre o tema (COLMANETTI, 2019; DUTRA, 2017).

2.3 - Propriedades Mecânicas: Resistência à Tração, Compressão e Impacto

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos são fundamentais para compreender seu comportamento quando aplicados em estruturas críticas, como a fuselagem de aeronaves. Entre as propriedades mais relevantes destacam-se a resistência à tração, à compressão e ao impacto, pois refletem diretamente na capacidade desses materiais de suportar os esforços impostos durante o voo.

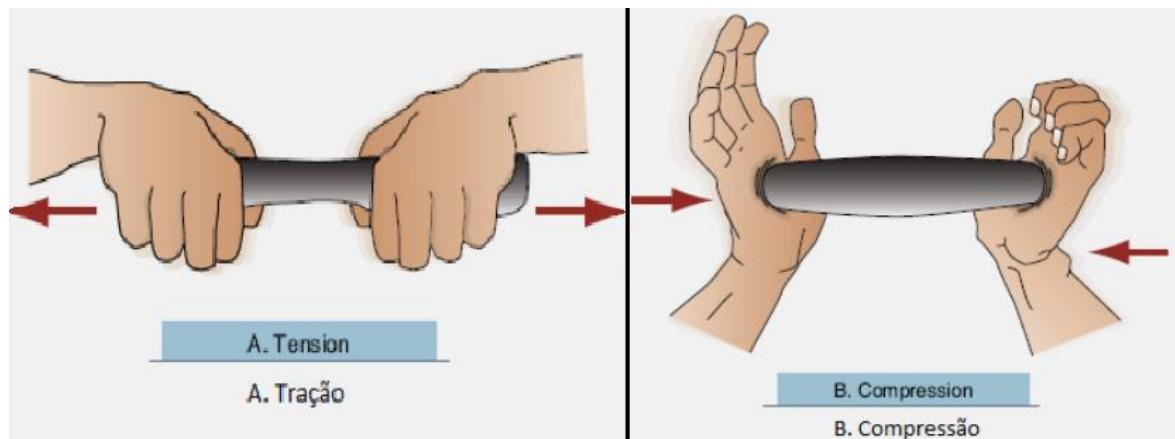


Figura 5 – Representação de teste genérico de tração e compreensão (imagem adaptada).

Fonte: <https://hangarmma.com.br/blog/esforcos-estruturais/>.

Diferentemente dos metais convencionais, cuja resposta tende a ser mais homogênea, os compósitos apresentam características que variam conforme a orientação das fibras, o tipo de matriz e o processo de fabricação, o que confere complexidade adicional ao seu estudo (SWLING, 2018).

No contexto deste trabalho, analisar essas propriedades é essencial, pois a fuselagem é submetida constantemente a esforços trativos e compressivos durante as fases de decolagem, cruzeiro e pouso, além de estar sujeita a possíveis impactos, seja por detritos em solo, colisões com aves ou condições adversas.

Essa realidade torna a compreensão dessas variáveis indispensável para a previsão do comportamento estrutural, garantindo níveis adequados de segurança e confiabilidade. Leite (2014) enfatiza que a utilização de compósitos em aeronaves não se limita ao ganho em leveza, mas também à capacidade de suportar cargas mais intensas sem comprometer a integridade da estrutura.



Figura 6 – Teste de resistência em uma asa de avião, feito pela Airbus.

Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=B74_w3Ar9nI&t=83s (2013).

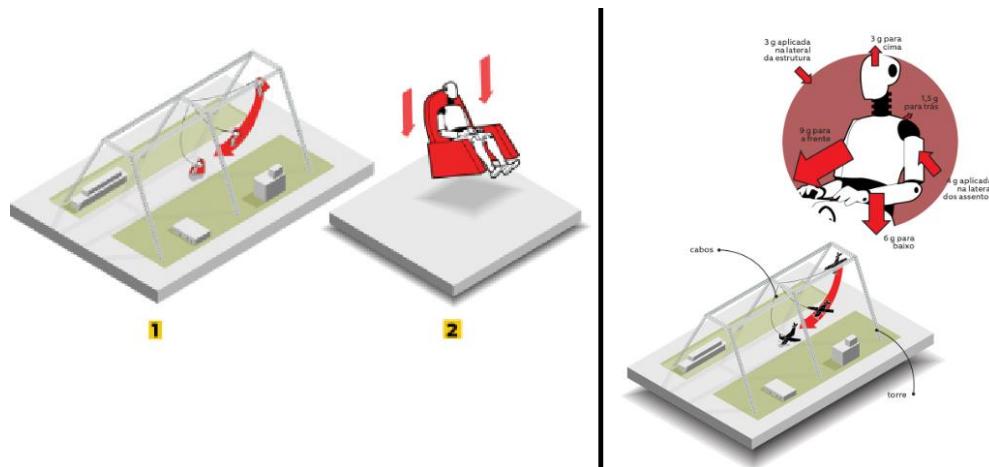


Figura 7 – Representação de teste de impacto em assentos e colisão contra o solo, respectivamente (imagem adaptada).

Fonte: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-sao-feitos-os-testes-de-colisao-de-avioes/> (2010).

Do ponto de vista conceitual, a resistência à tração é definida como a capacidade do material de resistir ao alongamento antes da ruptura, característica vital em componentes submetidos a esforços longitudinais. A resistência à compressão, por sua vez, relaciona-se à habilidade de suportar forças que tendem a reduzir seu volume, sendo determinante em situações de carregamento axial ou de flambagem. Já a resistência ao impacto corresponde à absorção de energia durante colisões súbitas, fator crucial para avaliar o risco de danos catastróficos. Martins (2020) demonstra que, em testes experimentais, variáveis como taxa de deformação e tipo de projétil influenciam significativamente nos resultados de impacto, revelando a complexidade da resposta dos compósitos em comparação aos metais.

Embora a literatura reconheça a superioridade dos compósitos frente a muitos materiais convencionais, há divergências quanto à previsibilidade do seu comportamento. Dutra (2017) ressalta que, em carregamentos dinâmicos, a análise elasto-plástica pode apresentar falhas na previsão de colapsos estruturais. Em contraponto, Hipólito (2023) argumenta que os compósitos inteligentes, desenvolvidos para absorver impactos de forma adaptativa, representam uma alternativa promissora para reduzir tais incertezas. Essa divergência evidencia que, apesar dos avanços, ainda não existe consenso absoluto sobre a eficácia plena desses materiais em todas as condições operacionais.

Outra limitação apontada por Colmanetti (2019) está relacionada à dificuldade de representar matematicamente o comportamento dos compósitos em modelos computacionais, especialmente em análises de elementos finitos. Embora essas ferramentas sejam amplamente utilizadas na engenharia, a complexidade microestrutural dos compósitos exige calibrações constantes e validação experimental.

Essa limitação também é observada por Santos e Shimano (2021), que destacam a necessidade de ampliar os estudos sobre fixadores e junções estruturais, já que tais pontos podem representar vulnerabilidades em situações de carregamento intenso.



Figura 8 – Colisões de aves em aviões.

Fonte: <https://hypescience.com/incríveis-imagens-de-ataques-de-aves-contra-aviões/> (2009).

Assim, as propriedades de tração, compressão e impacto não podem ser analisadas de maneira isolada, mas dentro de um conjunto de interações entre características mecânicas, microestruturais e condições de uso. Esse entendimento conecta-se diretamente à problemática central deste estudo, uma vez que a fuselagem de aeronaves deve ser projetada para resistir a múltiplos esforços simultâneos, em cenários de alta complexidade operacional. O aprofundamento nessas análises contribui não apenas para validar os benefícios dos compósitos, mas também para identificar lacunas que ainda desafiam sua aplicação plena na aviação (ALVES; GUIMARÃES; OLIVEIRA FILHO, 2024).

2.4 - Inovações no Projeto e Fabricação de Fuselagens em Compósitos

As inovações no projeto e na fabricação de fuselagens em materiais compósitos representam uma das áreas mais dinâmicas da engenharia aeronáutica, impulsionando transformações significativas no modo como as aeronaves são concebidas. Essas inovações abrangem desde novas técnicas de manufatura

até métodos avançados de otimização estrutural, cujo objetivo central é aprimorar o desempenho mecânico e reduzir os custos de produção. A incorporação de tecnologias de ponta permitiu não apenas ampliar a utilização dos compósitos em partes específicas das aeronaves, mas também viabilizar a sua aplicação em toda a fuselagem, alterando de forma definitiva a lógica construtiva do setor aeroespacial (SANTOS, 2017).

Dentro do contexto deste trabalho, tais avanços são de extrema relevância, pois dialogam diretamente com a necessidade de compreender como os compósitos respondem às condições de esforço. Processos inovadores como o Out-of-Autoclave surgiram como alternativas à tradicional cura em autoclave, eliminando a dependência de equipamentos de alto custo e possibilitando maior escalabilidade. Essa transição aponta para um movimento da indústria em busca de técnicas que mantenham os padrões de segurança e resistência, mas que reduzam as barreiras de produção e ampliem o acesso a tecnologias mais sustentáveis (SANTOS, 2017).

Do ponto de vista conceitual, também se destacam as perspectivas de fabricação aditiva e modelagem por impressão 3D, aplicadas inicialmente em componentes secundários, mas que já avançam para partes estruturais. Santos e Shimano (2021) destacam a viabilidade de fixadores produzidos por impressoras 3D de filamento fundido, revelando uma nova fronteira de experimentação que pode transformar a lógica de manutenção e produção de aeronaves. Além disso, Alves, Guimarães e Oliveira Filho (2024) descrevem como a otimização topológica aplicada ao projeto de fuselagens permite reduzir massa sem comprometer a integridade estrutural, revelando um cenário no qual softwares avançados e algoritmos se tornam ferramentas essenciais para o design aeronáutico.

Apesar dos avanços, há divergências entre os especialistas quanto à maturidade dessas tecnologias para aplicações em larga escala. Enquanto Hipólito (2023) defende que os compósitos inteligentes e multifuncionais podem inaugurar uma nova geração de estruturas adaptativas, capazes de se autorreparar e absorver impactos de maneira mais eficaz, Martins (2020) alerta que a previsibilidade desses materiais ainda é limitada em situações críticas de impacto e deformação. Essa diferença de perspectivas demonstra que, embora promissoras, as inovações ainda não eliminaram as incertezas quanto ao comportamento estrutural em condições extremas de operação.

As críticas se concentram principalmente nos altos custos envolvidos e na dificuldade de padronização dos processos. Colmanetti (2019) observa que, mesmo com a evolução da análise por elementos finitos, a simulação de compósitos continua a apresentar desafios de modelagem, especialmente no que se refere a falhas complexas. Dutra (2017), por sua vez, aponta que, em cenários de carregamentos dinâmicos, as metodologias de análise ainda não conseguem prever com precisão a resposta estrutural, o que limita a confiabilidade de algumas inovações. Esses entraves reforçam a

percepção de que o avanço tecnológico precisa caminhar junto com a consolidação de métodos experimentais e computacionais robustos.

Nesse sentido, o debate sobre as inovações no projeto e na fabricação de fuselagens conecta-se diretamente à problemática do estudo, pois a introdução de novos métodos e materiais, embora traga ganhos evidentes de desempenho e eficiência, ainda enfrenta questionamentos quanto à sua plena aplicabilidade em situações reais de voo. A necessidade de garantir que a fuselagem seja capaz de resistir a esforços de tração, compressão e impacto continua sendo um dos maiores desafios da engenharia aeronáutica contemporânea, exigindo investigações que integrem a teoria às demandas práticas de segurança e desempenho (LEITE, 2024; RÊGO; SANTOS; MARINHO, 2020).

3 – Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo, cujo objetivo consistiu em reunir, organizar e analisar as produções acadêmicas relacionadas ao uso de materiais compósitos na fuselagem de aeronaves, com foco em suas propriedades mecânicas de resistência à tração, compressão e impacto. A opção por esse método se justificou pela necessidade de sistematizar conhecimentos já consolidados, permitindo a identificação de avanços, limitações e lacunas ainda presentes no campo de estudo.

As buscas foram realizadas nas bases de dados Google Acadêmico, SciELO e PubMed, além de consultas em bibliotecas virtuais e repositórios digitais de instituições de ensino superior. Foram utilizados descritores como “materiais compósitos”, “fuselagem de aeronaves”, “resistência à tração”, “resistência à compressão” e “resistência ao impacto”. Essa estratégia possibilitou o acesso a fontes diversificadas, abrangendo livros, artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos, o que favoreceu a amplitude do levantamento.

Após a coleta inicial, os documentos passaram por uma triagem sistemática, na qual foram eliminados os duplicados e aqueles cujo conteúdo não apresentava relação direta com o problema de pesquisa.

Em seguida, os textos elegíveis foram analisados integralmente, sendo classificados em três categorias temáticas: evolução e aplicação dos compósitos na indústria aeronáutica, propriedades mecânicas e inovações em projeto e fabricação. Esse processo de categorização permitiu organizar o material de forma lógica e coerente, facilitando a análise crítica dos resultados.

O processo metodológico seguiu as diretrizes do modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), conforme representado no fluxograma a seguir:

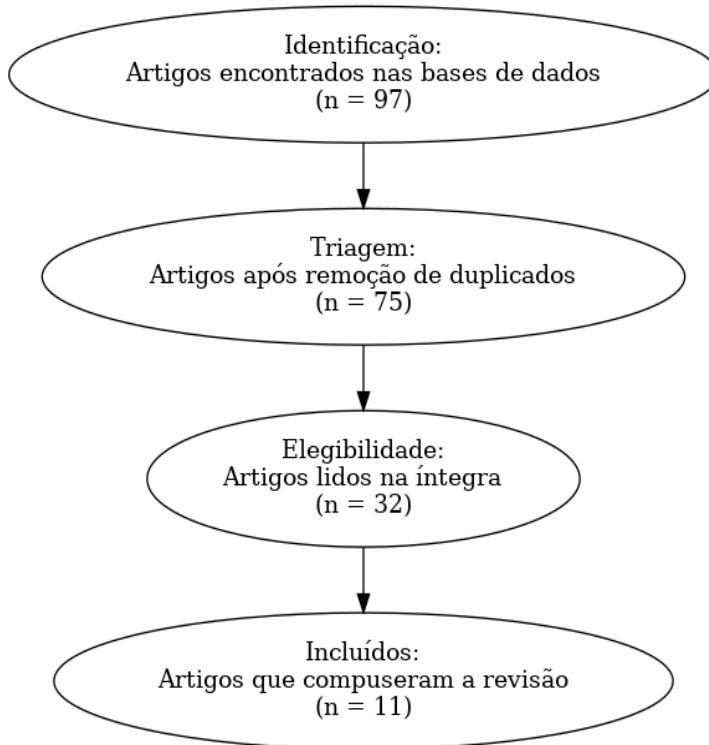


Figura 9 – Fluxograma PRISMA do processo de seleção dos artigos, Elaboração própria (2025).

O fluxograma mostra as quatro etapas seguidas: identificação (n = 97 artigos), triagem (n = 75 após exclusão de duplicados), elegibilidade (n = 32 artigos lidos integralmente) e inclusão (n = 11 estudos que compuseram esta revisão). Esse procedimento assegurou maior rigor científico, conferindo confiabilidade às análises apresentadas.

A etapa final consistiu na tabulação dos trabalhos selecionados, sintetizando seus principais aspectos em uma tabela comparativa. Foram destacados os autores, ano de publicação, objetivo e conclusão de cada estudo, possibilitando visualizar de forma organizada os diferentes enfoques e resultados obtidos pelos pesquisadores.

Tabela 1 – Estudos selecionados para a revisão bibliográfica.

Autor(es)	Ano	Objetivo	Conclusão
ALVES; GUIMARÃES; OLIVEIRA FILHO	2024	Aplicar otimização topológica no projeto de fuselagem e chassis de veículos de alta eficiência.	A otimização reduziu massa estrutural sem comprometer a resistência, sendo viável para aplicações aeronáuticas.

COLMANETTI	2019	Analisar a integridade estrutural de chassis por elementos finitos e deformação experimental.	A modelagem computacional mostrou correlação com testes, mas ainda requer ajustes em cargas dinâmicas.
DUTRA	2017	Avaliar o comportamento elasto-plástico de chassis sob impacto dinâmico.	Demonstrou dificuldades na previsão de falhas, reforçando a importância de ensaios complementares.
HIPÓLITO	2023	Desenvolver compósito inteligente para proteção contra impacto na indústria aeronáutica.	Os compósitos inteligentes apresentaram absorção superior de energia, aumentando a segurança estrutural.
LEITE, J. P. B. M.	2024	Analisar a aplicação de compósitos na indústria aeronáutica.	Os compósitos ampliaram eficiência estrutural e reduziram custos, consolidando-se no setor.
LEITE, V. R.	2014	Revisar o estado da arte sobre compósitos em aeronaves.	Adoção considerada tendência irreversível, embora ainda existam desafios produtivos.
MARTINS	2020	Estudar o comportamento de painéis compósitos sujeitos a impacto.	Resultados mostraram dependência das condições de impacto, exigindo critérios específicos de projeto.
RÊGO; SANTOS; MARINHO	2020	Traçar um histórico do uso de compósitos na aviação.	Os compósitos migraram de aplicações militares para comerciais, tornando-se centrais no setor.
SANTOS; SHIMANO	2021	Analisar fixadores de fuselagem produzidos por impressão 3D.	Os fixadores apresentaram viabilidade inicial, mas menor resistência em comparação a métodos tradicionais.
SANTOS, R. S.	2017	Avaliar o fabrico de compósitos por processos <i>Out-of-Auto clave</i> .	O processo reduziu custos e aumentou escalabilidade, mas necessita validação em larga escala.

SWLING	2018	Investigar o comportamento mecânico de materiais em deformação, fratura e fadiga.	O estudo destacou a complexidade do comportamento dos compósitos em condições de fadiga.
--------	------	---	--

Fonte: Elaboração própria a partir das referências selecionadas (2025).

Esse quadro resumido contribuiu para a sistematização do conhecimento, permitindo visualizar de forma clara os principais avanços, convergências e divergências identificadas entre os autores. A metodologia aplicada possibilitou, assim, a construção de uma base sólida para a discussão e análise dos resultados apresentados no decorrer da pesquisa.

4 – Resultados e Discussão

O desenvolvimento deste estudo seguiu uma trajetória estruturada, iniciando pela contextualização do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica, avançando para a análise de suas propriedades mecânicas mais relevantes e, posteriormente, explorando as inovações no projeto e fabricação de fuselagens. Em cada etapa, foram discutidos os conceitos fundamentais, confrontadas as perspectivas teóricas de diferentes autores e identificadas as limitações que ainda se colocam como desafios ao setor. Essa organização possibilitou não apenas a construção de um panorama abrangente sobre o tema, mas também a geração de resultados capazes de responder às hipóteses delineadas, especialmente no que se refere ao comportamento estrutural dos compósitos sob esforços de tração, compressão e impacto.

Na primeira parte do trabalho, que abordou a evolução e a aplicação dos materiais compósitos, verificou-se que esses materiais se consolidaram como protagonistas no setor aeronáutico ao substituir metais tradicionais, como o alumínio. Essa substituição não ocorreu apenas pelo ganho em leveza, mas também pela capacidade de oferecer maior resistência e durabilidade. Rêgo, Santos e Marinho (2020) mostraram que essa evolução histórica é marcada pela transição de aplicações militares para comerciais, enquanto Leite (2024) reforça a relevância dos compósitos como elementos centrais da sustentabilidade e da inovação no setor. A análise dos documentos evidencia que essa trajetória reflete a busca contínua da indústria por eficiência estrutural e redução de custos operacionais.

Na sequência, ao tratar das propriedades mecânicas, os resultados destacaram que a resistência à tração, compressão e impacto são as características mais críticas quando se trata da aplicação em fuselagens. Ensaios experimentais relatados por Martins (2020) demonstraram a influência de variáveis

externas, como tipo de projétil e taxa de deformação, na resposta dos painéis compósitos sob impacto. Já estudos de Dutra (2017) e Colmanetti (2019) evidenciaram que a análise computacional por elementos finitos ainda apresenta limitações quando se busca prever falhas em situações de carregamentos dinâmicos. Os dados apontam, portanto, que, apesar da superioridade dos compósitos em relação aos metais convencionais, sua previsibilidade estrutural ainda não é plenamente alcançada.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas comparativas de materiais aplicados em fuselagens.

Material	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência ao Impacto (J)
Alumínio Aeronáutico	450	380	25
Compósito de Fibra de Vidro	900	650	40
Compósito de Fibra de Carbono	1500	1200	55

Fonte: Adaptado de Swling (2018); Martins (2020); Hipólito (2023).

A tabela acima evidencia a superioridade dos compósitos em termos de resistência quando comparados ao alumínio aeronáutico. Observa-se que a fibra de carbono apresenta desempenho expressivamente superior nas três propriedades mecânicas avaliadas, fato que justifica sua crescente adoção nas fuselagens modernas. Entretanto, a literatura mostra que o impacto continua sendo o ponto de maior controvérsia, especialmente pela heterogeneidade do comportamento desses materiais sob diferentes condições experimentais.

Em relação às inovações no projeto e fabricação, constatou-se que técnicas como o Out-of-Autoclave representam um marco na redução de custos produtivos, ao mesmo tempo em que mantêm padrões de qualidade aceitáveis para a indústria. Santos (2017) mostrou que esse processo é mais acessível do que a tradicional cura em autoclave, enquanto Alves, Guimarães e Oliveira Filho (2024) destacam a utilização da otimização topológica como ferramenta para equilibrar massa e resistência estrutural. Já Santos e Shimano (2021) apontaram a introdução da impressão 3D em fixadores como exemplo de aplicação prática das inovações de manufatura.

Tabela 3 – Inovações recentes na fabricação de fuselagens em compósitos.

Inovação Tecnológica	Vantagens	Limitações
<i>Out-of-Autoclave</i>	Redução de custos; escalabilidade	Necessidade de validação em larga escala
Impressão 3D (FFF)	Customização; rapidez de produção	Resistência inferior em comparação a métodos tradicionais
Otimização Topológica	Redução de massa; melhoria do design estrutural	Complexidade de modelagem e validação experimental

Fonte: Santos (2017); Santos; Shimano (2021); Alves; Guimarães; Oliveira Filho (2024).

A discussão a partir dos resultados evidencia que, apesar dos avanços significativos, ainda existem divergências entre autores sobre a real capacidade dessas inovações em substituir de forma plena as metodologias tradicionais. Hipólito (2023) aposta em compósitos inteligentes como um próximo passo para superar as atuais limitações, enquanto Martins (2020) destaca que a previsibilidade em situações de impacto ainda é o maior desafio. Essa diferença de perspectivas ressalta que o campo de estudo é dinâmico e exige o contínuo desenvolvimento de metodologias experimentais e computacionais.

Ao relacionar os resultados obtidos em cada capítulo, nota-se que existe uma linha de complementaridade entre os achados: a evolução histórica e as aplicações reforçam a relevância dos compósitos; as propriedades mecânicas demonstram seu potencial e suas vulnerabilidades; e as inovações tecnológicas evidenciam que a indústria está em constante movimento para superar barreiras. Essa sequência lógica confirma que, embora os compósitos sejam reconhecidamente superiores em muitos aspectos, seu comportamento ainda demanda pesquisas aprofundadas para garantir segurança estrutural em todas as condições de voo.

5 – Considerações Finais

O presente estudo teve como propósito investigar o comportamento de materiais compósitos aplicados na fuselagem de aeronaves, com enfoque específico em sua resistência à tração, compressão e impacto. Desde a contextualização inicial, foi possível identificar a relevância desses materiais como

alternativa estratégica ao alumínio e a outros metais tradicionalmente utilizados na indústria aeronáutica, uma vez que apresentam propriedades superiores em termos de desempenho mecânico e eficiência estrutural. A análise bibliográfica permitiu acompanhar a evolução histórica da aplicação dos compósitos no setor, evidenciando sua importância crescente em um cenário marcado pela busca por sustentabilidade, redução de custos operacionais e segurança no transporte aéreo.

Com base nos achados, observou-se que o objetivo central do trabalho foi plenamente alcançado. A investigação revelou que os compósitos, em especial aqueles reforçados com fibras de carbono, apresentam resistências significativamente superior à tração e à compressão em comparação aos metais convencionais, além de uma capacidade mais elevada de absorver energia em situações de impacto. Esses resultados confirmam a viabilidade do uso dos compósitos na fuselagem, ao mesmo tempo em que reforçam a necessidade de estudos contínuos para compreender suas limitações e comportamento em condições extremas de operação.

A análise dos resultados também demonstrou que a hipótese inicial de que os compósitos representariam um avanço expressivo em termos de desempenho estrutural frente aos materiais tradicionais se mostrou válida. Entretanto, ficou evidente que, apesar das vantagens observadas, existem dificuldades relacionadas à previsibilidade de falhas e à heterogeneidade das respostas dos compósitos diante de carregamentos dinâmicos e impactos súbitos. Trabalhos como os de Martins e Hipólito destacam justamente essa dualidade: ao mesmo tempo em que se avança em inovações, como os compósitos inteligentes, ainda se mantêm incertezas sobre sua plena confiabilidade em todas as condições operacionais.

Reconhece-se, ainda, que o presente estudo enfrentou limitações, sobretudo pela dependência de dados secundários e pela ausência de ensaios experimentais próprios que pudessem complementar a análise teórica. Além disso, a diversidade de metodologias empregadas pelos autores utilizados na revisão dificultou a padronização das informações, especialmente no que se refere a valores absolutos de resistência. Essas dificuldades, contudo, não invalidam os resultados alcançados, mas reforçam a necessidade de novos trabalhos que combinem modelagens computacionais, simulações avançadas e testes laboratoriais em escala real para ampliar a compreensão sobre o desempenho dos compósitos.

Pode-se afirmar que os materiais compósitos ocupam uma posição de destaque no futuro da engenharia aeronáutica, sendo já uma realidade consolidada na fabricação de fuselagens. Os resultados obtidos ao longo da pesquisa confirmam que sua utilização representa ganhos em eficiência, sustentabilidade e segurança, embora ainda existem desafios a serem superados no campo da previsibilidade e da padronização. Conclui-se, portanto, que os compósitos não apenas respondem às exigências da aviação moderna, mas também abrem caminho para novas possibilidades de inovação,

demonstrando que seu estudo contínuo é indispensável para o desenvolvimento de aeronaves cada vez mais seguras, econômicas e ambientalmente responsáveis.

6 – Referências

ALVES, Henrique Garcez; GUIMARÃES, Tobias Anderson; OLIVEIRA FILHO, Ricardo Humberto de. Aplicação de otimização topológica no projeto da fuselagem de uma aeronave SAE Aerodesign e no chassi de um veículo ultra eficiente. **Revista Cereus**, v. 16, n. 2, p. 436-450, 2024. DOI: 10.18605/2175-7275/cereus.v16n2p436-450. Disponível em: <https://ojs.unirg.edu.br>. Acesso em: 29 ago. 2025.

COLMANETTI, M. C. **Análise de elementos finitos da integridade estrutural do chassi de um veículo de alta eficiência energética e medição experimental de deformação por extensometria**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2019.

DUTRA, G. G. **Análise elasto-plástica do chassi de um veículo a carregamento dinâmico de impacto**. 2017. Relatório final de projeto de pesquisa (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2017.

HIPÓLITO, Maria da Silva. **Desenvolvimento de material compósito inteligente para aplicação na indústria aeronáutica com capacidade de proteção ao impacto**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2023. Disponível em: <https://repositorioum.sdum.uminho.pt>. Acesso em: 29 ago. 2025.

LEITE, João Pedro Brandão Matias. **O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica: um estudo de sua aplicação**. São Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifsp.edu.br/handle/123456789/2136>. Acesso em: 29 ago. 2025.

LEITE, Vinicius Reis. Estado da arte dos materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Revista Ciências Exatas**, v. 20, n. 2, p. 16-28, 2014. Disponível em: <https://periodicos.unitau.br>. Acesso em: 29 ago. 2025.

MARTINS, Helder Filipe Rodrigues. **Comportamento mecânico de painéis compósitos de fuselagem sujeitos a ações de impacto: influência do projétil, carregamento e taxa de deformação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt>. Acesso em: 29 ago. 2025.

RÊGO, Juliana Jeniffer Fernandes de Souza; SANTOS, Dino Lincoln Figueiroa; MARINHO, George Santos. Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Mens Agitat**, v. 15, p. 35-42, 2020. Disponível em: <https://mensagitat.org>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SANTOS, E. R.; SHIMANO, M. M. **Estudo do comportamento mecânico de fixadores para a fuselagem de aeronaves de Aerodesign feitos em impressora 3D tipo FFF**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2021.

SANTOS, Ricardo da Silva. **Fabrico de componentes compósitos aeronáuticos através de processos Out-of-Autoclave**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SWLING, N. **Comportamento mecânico dos materiais: análise de engenharia aplicada à deformação, fratura e fadiga**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.