

Materiais Compósitos em Estruturas Aeronáuticas: Uma Revisão Sistemática de Propriedades e Aplicações Mecânicas

Márliton Pereira dos Santos, Engenharia Elétrica, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil

A indústria aeronáutica tem buscado soluções inovadoras para melhorar as propriedades dos materiais utilizados em suas estruturas, especialmente os compósitos, que oferecem alta resistência e baixo peso. Este estudo teve como objetivo revisar de forma sistemática os avanços e desafios na aplicação desses materiais em componentes aeronáuticos. A hipótese levantada foi que a combinação de simulações computacionais e ensaios experimentais pode otimizar significativamente as propriedades dos compósitos, contribuindo para a construção de aeronaves mais eficientes e seguras. A metodologia adotada foi uma revisão sistemática da literatura, seguindo o protocolo Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA), com busca em bases nas bases de dados CAPES Periódicos e SciELO, abrangendo publicações de 2015 a 2025. As palavras-chave incluíram "materiais compósitos", "otimização" e "estruturas aeronáuticas", e os critérios de inclusão foram estudos focados na otimização de propriedades mecânicas e na aplicação de compósitos em aeronaves. A análise identificou avanços significativos, como o uso de fibra de carbono e vidro, que são essenciais para reduzir o peso das aeronaves. No entanto, desafios como o alto custo e a complexidade de fabricação ainda representam obstáculos. A aplicação de técnicas de otimização estrutural, como simulações por elementos finitos e algoritmos de inteligência artificial, mostrou-se promissora para melhorar a eficiência estrutural e reduzir custos. A conclusão final destacou que, apesar dos desafios, as metodologias de otimização estrutural têm um potencial significativo para melhorar as propriedades dos compósitos e o desempenho das aeronaves, impulsionando a sustentabilidade e segurança da aviação moderna.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Otimização estrutural. Eficiência energética. Simulações computacionais. Propriedades mecânicas.

The aerospace industry has been seeking innovative solutions to improve the properties of materials used in its structures, especially composites, which offer high strength and low weight. This study aimed to systematically review the advances and challenges in the application of these materials in aeronautical components. The hypothesis proposed was that the combination of computational simulations and experimental tests can significantly optimize the properties of composites, contributing to the development of more efficient and safer aircraft. The methodology adopted was a systematic literature review, following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) protocol, with searches conducted in the CAPES Journals and SciELO databases, covering publications from 2015 to 2025. The keywords included "composite materials," "optimization," and "aeronautical structures," and the inclusion criteria focused on studies addressing the optimization of mechanical properties and the application of composites in aircraft. The analysis identified significant advances, such as the use of carbon and glass fibers, which are essential for reducing aircraft weight. However, challenges such as high cost and manufacturing complexity still represent obstacles. The application of structural optimization techniques, such as finite element simulations and artificial intelligence algorithms, proved promising for improving structural efficiency and reducing costs. The final conclusion highlighted that, despite existing challenges, structural optimization methodologies hold significant potential for enhancing the properties of composites and aircraft performance, driving the sustainability and safety of modern aviation.

Keywords: Composite materials. Structural optimization. Energy efficiency. Computational simulations. Mechanical properties.

INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica tem passado por uma transformação significativa com a introdução de materiais compósitos em estruturas de aeronaves, com o objetivo de aumentar a eficiência e a performance das mesmas. Esses materiais, que podem ser uma matriz de resina e reforços de fibras, apresentam propriedades mecânicas superiores, como alta resistência e baixo peso, essenciais para a aviação moderna (Soutis, 2015). No entanto, otimizar essas propriedades para atender às demandas específicas de diferentes componentes aeronáuticos ainda é um desafio considerável.

A crescente necessidade de aeronaves mais leves e eficientes impulsiona a busca por materiais tecnológicos e inovadores que possam substituir as ligas metálicas tradicionais. De acordo com Beck *et al.* (2011), o uso de compósitos pode resultar em uma redução significativa no peso das aeronaves, o que melhora a eficiência do combustível e diminui as emissões de dióxido de carbono. Contudo, a diversidade e a complexidade das propriedades dos materiais compósitos exigem uma abordagem sistemática para sua otimização, levando em conta aspectos como resistência, durabilidade e comportamento em condições extremas (Sethi; Ray, 2015).

Nesse contexto, surge o desafio de como otimizar as propriedades dos materiais compósitos para maximizar seu desempenho em aplicações aeronáuticas. Embora diversos estudos tenham explorado as propriedades mecânicas dos compósitos, ainda há uma lacuna no conhecimento sobre as metodologias mais eficazes para sua otimização específica em diferentes componentes e condições de operação. A hipótese levantada deste estudo é que a aplicação de técnicas avançadas de otimização, que integrem simulações computacionais e ensaios experimentais, pode resultar em um aprimoramento significativo das propriedades dos compósitos, levando a estruturas aeronáuticas mais eficientes e seguras.

A justificativa para a realização deste estudo está na urgente necessidade de inovações tecnológicas que apoiem o progresso da indústria aeronáutica. A melhoria dos materiais compósitos não apenas ajuda na sustentabilidade ambiental, diminuindo o consumo de combustível e as emissões de poluentes, mas também aumenta a segurança e a eficiência operacional das aeronaves (Timmis *et al.*, 2015). Assim, uma revisão sistemática que reúna o conhecimento atual e identifique lacunas para pesquisas futuras é fundamental para direcionar o desenvolvimento de materiais compósitos cada vez mais eficazes.

Este projeto de pesquisa teve como objetivo revisar de forma sistemática os avanços e desafios na utilização de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas, com ênfase na otimização de suas propriedades para aplicações específicas. Para isso, foram identificadas e analisadas as propriedades mecânicas de diferentes tipos de compósitos, ressaltando os avanços tecnológicos e os desafios enfrentados. Além disso, foram discutidas as metodologias de otimização

utilizadas na seleção e no desenvolvimento desses materiais, visando melhorar a eficiência estrutural e reduzir o peso das aeronaves.

REFERENCIAL TEÓRICO

Os materiais compósitos têm ganhado destaque na indústria aeronáutica devido às suas propriedades mecânicas superiores em relação aos materiais metálicos tradicionais. De acordo com Chan *et al.* (2022), os materiais compósitos oferecem uma combinação única de leveza, alta resistência e durabilidade, tornando-os ideais para aplicações que exigem um desempenho estrutural robusto e eficiência energética. A matriz polimérica, quando combinada com fibras de alta resistência, como fibra de carbono e fibra de vidro, resulta em materiais que não apenas suportam grandes cargas, mas também resistem a ambientes severos, incluindo variações extremas de temperatura e exposição a agentes corrosivos (Das; Ghosh; Das, 2019). Além disso, os materiais compósitos proporcionam maior liberdade de design, permitindo a criação de estruturas complexas e aerodinamicamente eficientes, o que é crucial para o desempenho das aeronaves modernas (Parveez *et al.*, 2022).

A otimização das propriedades dos materiais compósitos em estruturas aeronáuticas é um campo de pesquisa amplamente explorado. Estudos recentes têm se concentrado em metodologias que combinam simulações computacionais avançadas com ensaios experimentais para identificar as melhores combinações de matriz e reforço, além de técnicas de manufatura que melhoram a uniformidade e a integridade dos compósitos (Jagadeesh e Setti, 2020). Por exemplo, a modelagem por elementos finitos tem sido amplamente utilizada para prever o comportamento mecânico dos compósitos sob diversas condições de carga, permitindo ajustes precisos no *design* e na composição do material (Wang *et al.*, 2018).

MÉTODO

Este estudo seguiu o protocolo Principais Itens Para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA) para garantir um rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade na seleção e análise dos estudos (Page *et al.*, 2021). Essa abordagem possibilitou uma avaliação dos avanços e desafios na utilização de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas.

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados CAPES Periódicos e SciELO, que são reconhecidas pela qualidade e abrangência de suas publicações científicas, tanto nacionais quanto internacionais. O período de busca abrangeu publicações de 2015 a 2025, em português e inglês.

As estratégias de busca utilizaram dez palavras-chave, combinadas com operadores booleanos (AND, OR, NOT), para refinar os resultados e aumentar a

precisão das buscas: “materiais compósitos” AND “estruturas aeronáuticas”, “otimização” AND “propriedades mecânicas”, “fibra de carbono” OR “fibra de vidro”, “desempenho estrutural” NOT “materiais metálicos”, e “eficiência energética” AND “aeronaves”. As buscas foram realizadas em títulos, resumos e palavras-chave. O *software EndNote* foi utilizado para organizar as referências, gerenciar citações e eliminar publicações duplicadas.

Os estudos que foram considerados incluíram aqueles que: (i) focaram especificamente na aplicação de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas; (ii) apresentaram resultados sobre a otimização das propriedades mecânicas; (iii) estavam disponíveis em acesso aberto; e (iv) foram publicados entre 2015 e 2025, nos idiomas portugueses ou inglês.

Foram excluídos os trabalhos que: (i) não forneceram dados empíricos ou metodológicos relevantes; (ii) foram revisões não sistemáticas ou estudos teóricos sem experimentação; (iii) estavam fora do período de inclusão definido; (iv) não tinham acesso ao texto completo; e (v) eram duplicados ou não publicados em periódicos científicos, como teses, dissertações ou capítulos de livros.

A seleção dos artigos foi realizada em quatro etapas do protocolo PRISMA — identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Essa abordagem metodológica assegurou uma análise detalhada e confiável dos dados e das informações, permitindo que fossem identificadas tendências, lacunas de conhecimento e oportunidades para futuras pesquisas na área de materiais compósitos aplicados à engenharia aeronáutica.

REVISÃO DE LITERATURA

Identificação e Análise das Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos em Estruturas Aeronáuticas

Para identificar e analisar as propriedades mecânicas de diferentes tipos de materiais compósitos utilizados em estruturas aeronáuticas, foram revisados diversos estudos que abordaram a composição, resistência e durabilidade desses materiais. Pesquisas anteriores, como a de Barile; Casavola e Cillis (2019), mostraram que os materiais compósitos, como fibra de carbono e fibra de vidro, oferecem uma combinação de alta resistência e baixo peso, características essenciais para a eficiência estrutural das aeronaves.

Os avanços tecnológicos nos materiais compósitos são significativos, especialmente com o desenvolvimento de novas resinas e técnicas de fabricação, como a infusão a vácuo e a automação na colocação de fibras. Esses progressos possibilitaram a produção de componentes com maior precisão e consistência, melhorando consideravelmente as propriedades mecânicas e a confiabilidade dos compósitos (Frketic; Dickens; Ramakrishnan, 2017). No entanto, os desafios ainda persistem, especialmente na área de reparos e manutenção, onde a complexidade dos materiais compósitos pode dificultar intervenções rápidas e eficientes. A Tabela 1 resume as principais propriedades mecânicas de diferentes tipos de compósitos

utilizados em estruturas aeronáuticas, destacando tanto os avanços quanto os desafios tecnológicos.

Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas de diferentes tipos de compósitos utilizados em estruturas aeronáuticas.

Tipo de Compósito	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)	Principais Desafios
Fibra de Carbono	4500	230	1.6	Custo e Fabricação
Fibra de Vidro	2400	76	2.5	Peso e Rigidez
Kevlar	3620	130	1.44	Processamento
Fibra de Basalto	4840	89	2.7	Compatibilidade

Fonte: Autoria própria (2025), com base nos artigos selecionados e revisados.

A Tabela 1 mostra que cada tipo de material compósito tem características únicas que os tornam mais ou menos adequados para diversas aplicações na aviação. Por exemplo, a fibra de carbono se destaca pela sua excelente resistência à tração e baixo peso, mas seu alto custo e a complexidade de fabricação apresentam desafios consideráveis. Por outro lado, a fibra de vidro, embora menos resistente e mais pesada, é mais acessível e fácil de trabalhar. Esses fatores enfatizam a necessidade de uma análise cuidadosa na escolha dos materiais compósitos, levando em conta não apenas suas propriedades mecânicas, mas também os avanços tecnológicos e os desafios associados ao seu uso.

Além disso, a análise dos dados e informações apresentados na Tabela 1 evidencia a importância de se compreender as particularidades de cada tipo de material compósito empregado em estruturas aeronáuticas. De acordo com Soutis (2005), a fibra de carbono continua sendo o material mais amplamente utilizado na indústria aeronáutica devido à sua elevada relação resistência-peso, o que contribui para a eficiência energética das aeronaves. No entanto, o custo elevado e a necessidade de processos de fabricação precisos ainda limitam sua aplicação em larga escala, especialmente em aeronaves de menor porte. Isso reforça a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de produção e de materiais alternativos que mantenham a mesma eficiência estrutural a um custo reduzido.

Outro aspecto relevante é a comparação entre a fibra de vidro e o Kevlar. A fibra de vidro, segundo Liu *et al.* (2019), apresenta uma boa relação custo-benefício, além de ser mais resistente à corrosão e fácil de processar, tornando-se

uma opção viável para componentes secundários e estruturas não críticas. Já o Kevlar, apesar de sua excelente resistência específica e absorção de energia, possui limitações em termos de resistência à compressão e dificuldade de corte e perfuração, o que pode restringir seu uso em certas partes da aeronave. Esses fatores mostram que a escolha do material depende diretamente da função estrutural e das condições de operação a que o componente será submetido.

Por fim, a fibra de basalto tem ganhado destaque como uma alternativa emergente na engenharia aeronáutica. De acordo com Fiore *et al.* (2015), esse material apresenta boas propriedades mecânicas, resistência térmica superior e menor impacto ambiental quando comparado à fibra de vidro. Apesar disso, sua compatibilidade com diferentes matrizes poliméricas ainda é um desafio técnico que precisa ser superado para ampliar seu uso. Assim, observa-se que cada compósito oferece vantagens específicas, e o futuro da engenharia aeronáutica dependerá da capacidade de combinar essas propriedades de forma sinérgica, promovendo materiais mais sustentáveis, leves e resistentes.

Metodologias de otimização aplicadas na seleção e no desenvolvimento de materiais compósitos para melhorar a eficiência estrutural e reduzir o peso das aeronaves.

A avaliação das metodologias de otimização aplicadas na seleção e no desenvolvimento de materiais compósitos revelou várias abordagens tecnológicas inovadoras que têm contribuído de forma significativa para melhorar a eficiência estrutural e reduzir o peso das aeronaves. Estudos recentes demonstram que o uso de algoritmos de otimização e simulações computacionais, como o método dos elementos finitos (FEM), é fundamental para prever o comportamento mecânico dos compósitos sob diferentes condições de carga, orientando assim o design e a seleção dos materiais (Troyani e Pérez, 2014). Além disso, técnicas como a otimização topológica têm sido utilizadas para determinar a distribuição ideal de material em componentes estruturais, maximizando a resistência e minimizando o peso.

Um exemplo notável da aplicação dessas metodologias é o uso de simulações computacionais para otimizar a composição de compósitos híbridos, que combinam diferentes tipos de fibras para melhorar as propriedades mecânicas e térmicas. Segundo Cho e Park (2021), a combinação de fibras de carbono e vidro, ou de carbono e basalto, pode resultar em compósitos que oferecem um equilíbrio ideal entre resistência, rigidez e peso. Essas simulações permitem testar virtualmente inúmeras combinações e configurações de materiais, reduzindo o tempo e os custos associados a ensaios experimentais. A Figura 1 apresenta os locais onde diferentes tipos de materiais são dispostos no corpo de um avião Boeing 787 moderno, entre eles os materiais compósitos de carbono.

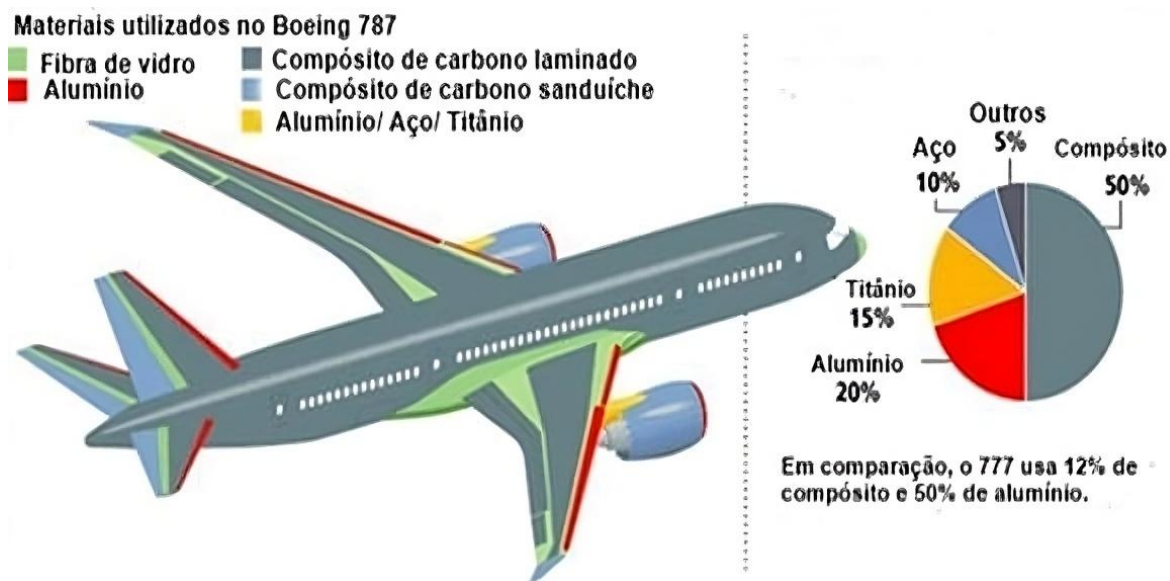


Figura 1 - Locais onde diferentes tipos de materiais são dispostos no corpo de um avião Boeing 787. Fonte: Hangar (2015).

De acordo com a Figura 1, as áreas de um Boeing 787 que são fabricadas utilizando compósito de carbono são os elevadores, leme e carcaça externa dos motores. Já as asas e a fuselagem são fabricadas utilizando outros tipos de materiais compósitos. Os avanços tecnológicos também têm incorporado o uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina para melhorar ainda mais o processo de otimização de materiais compósitos. Essas tecnologias são utilizadas para analisar grandes volumes de dados provenientes de experimentos e simulações, identificando padrões e correlações que podem não ser facilmente percebidos por métodos tradicionais (Chen e Gu, 2019). Por exemplo, algoritmos de aprendizado de máquina podem prever as propriedades mecânicas de novos compósitos com base em suas composições e processos de fabricação, acelerando o desenvolvimento de materiais com desempenho superior.

Atualmente, várias técnicas e tecnologias estão sendo integradas ao desenvolvimento e à fabricação de materiais compósitos, com a meta de melhorar a precisão, a eficiência e a qualidade estrutural das peças aeronáuticas. Entre as principais ferramentas utilizadas, podemos destacar softwares de modelagem e análise estrutural, como **ANSYS**, **Abaqus**, **CATIA**, **Siemens NX** e **HyperMesh**, que são amplamente empregados para simulações de tensões, deformações e análises térmicas em compósitos. Esses programas ajudam a prever como os materiais se comportarão em condições reais de voo, facilitando a otimização das geometrias e a escolha correta das fibras e resinas. No que diz respeito aos processos de fabricação, tecnologias como **Moldagem por Transferência de Resina (RTM)**, **Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARI)**, **Colocação Automatizada de Fibras (AFP)** e **Enrolamento de Filamento** estão revolucionando a produção de componentes aeronáuticos, proporcionando um controle maior sobre a distribuição das fibras e diminuindo os defeitos estruturais.

Segundo Mouritz e Gibson (2006), esses processos automatizados não só garantem uma repetibilidade e precisão dimensional superiores, mas também ajudam a reduzir de forma significativa o desperdício de material e o tempo de produção. Além disso, novas abordagens como a **Fabricação Aditiva (AM)** e a **Moldagem Híbrida** estão sendo exploradas para integrar diferentes materiais e geometrias complexas em uma única estrutura, ampliando as possibilidades de design e eficiência. De acordo com Gay (2015), a fusão dessas tecnologias de fabricação avançada com ferramentas de simulação e otimização estrutural é um dos caminhos mais promissores para desenvolver aeronaves que sejam mais leves, resistentes e sustentáveis, unindo inovação tecnológica à busca por melhor desempenho e economia de combustível.

Apesar dos avanços, a aplicação dessas metodologias de otimização ainda enfrenta desafios. Um dos principais obstáculos é a necessidade de validação experimental das simulações e modelos preditivos. Embora as simulações computacionais possam oferecer informações valiosas, é fundamental realizar testes físicos para garantir que os compósitos otimizados se comportem como esperado em condições reais de operação (Saba; Jawaid; Sultan, 2019). Além disso, a integração dessas metodologias no processo de fabricação em larga escala pode ser complexa e exigir investimentos significativos em tecnologia e treinamento. No entanto, os potenciais benefícios em termos de eficiência estrutural e redução de peso das aeronaves justificam a contínua pesquisa e desenvolvimento nessa área.,

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, todos os objetivos deste estudo foram alcançados de forma. A revisão sistemática da literatura possibilitou a identificação e análise das propriedades mecânicas de diversos tipos de materiais compósitos utilizados em estruturas aeronáuticas, ressaltando tanto os avanços tecnológicos quanto os desafios enfrentados. Além disso, foi possível avaliar as metodologias de otimização aplicadas na seleção e desenvolvimento desses materiais, mostrando como essas técnicas contribuem para a melhoria da eficiência estrutural e a redução do peso das aeronaves.

O problema de pesquisa, que buscava entender de que maneira a otimização dos materiais compósitos pode aprimorar o desempenho e a eficiência das aeronaves, foi respondido de forma clara. A hipótese inicial, que sugeria que as metodologias de otimização e os avanços tecnológicos em materiais compósitos são fundamentais para melhorar a estrutura e diminuir o peso das aeronaves, foi confirmada pelos resultados apresentados. Os estudos revisados discutiram a eficácia de técnicas como a otimização topológica, simulações computacionais e o uso de inteligência artificial na melhoria das propriedades dos compósitos.

Uma limitação do presente estudo é a dependência de dados secundários para analisar as propriedades e metodologias de otimização dos materiais compósitos. Embora esses métodos sejam utilizados, a validação

experimental é crucial para confirmar os resultados teóricos e assegurar a aplicabilidade prática dos compósitos otimizados.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de estudos experimentais complementares que possam validar as simulações e algoritmos de otimização abordados neste trabalho. Além disso, investigações focadas na integração dessas metodologias no processo de fabricação em larga escala e na avaliação de seu impacto econômico e ambiental seriam extremamente importantes para a aplicação industrial e sustentável dos materiais compósitos em aeronaves.

REFERÊNCIAS

BARILE, C.; CASAVOLA, C.; DE CILLIS, F. Mechanical comparison of new composite materials for aerospace applications. **Composites. Part B, Engineering**, v. 162, p. 122–128, 2019.

BECK, A. J. et al. Influence of implementation of composite materials in civil aircraft industry on reduction of environmental pollution and greenhouse effect. **IOP conference series. Materials science and engineering**, v. 26, p. 012015, 2011.

CHAN, K.-Y. et al. Structural energy storage composites for aviation applications. **Frontiers in Aerospace Engineering**, v. 1, 2022.

CHEN, C.-T.; GU, G. X. Machine learning for composite materials. **MRS communications**, v. 9, n. 2, p. 556–566, 2019.

CHO, J.; PARK, J. Hybrid fiber-reinforced composite with carbon, glass, basalt, and para-aramid fibers for light use applications. **Materials research express**, v. 8, n. 12, p. 125304, 2021.

DAS, T. K.; GHOSH, P.; DAS, N. C. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review. **Advanced composites and hybrid materials**, v. 2, n. 2, p. 214–233, 2019.

FIORE, V.; SCALICI, T.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. A review on basalt fibre and its composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 74, p. 74–94, 2015.

FRKETIC, J.; DICKENS, T.; RAMAKRISHNAN, S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. **Additive manufacturing**, v. 14, p. 69–86, 2017.

GAY, D. **Composite Materials: Design and Applications**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

HANGAR. A Era dos Compósitos na Fabricação das Aeronaves. Florianópolis: Hangar Publicações Técnicas, 2024.

JAGADEESH, G. V.; SETTI, S. A review on micromechanical methods for evaluation of mechanical behavior of particulate reinforced metal matrix composites. **Journal of materials science**, v. 55, n. 23, p. 9848–9882, 2020.

LIU, D.; WU, Z.; YAN, Y.; CHEN, J. Comparative study on the mechanical properties of glass fiber/epoxy and Kevlar/epoxy composites. *Polymer Composites*, v. 40, n. 4, p. 1632–1641, 2019.

MOURITZ, A. P.; GIBSON, A. G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Dordrecht: Springer, 2006.

PARVEEZ, B. *et al.* Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: A review. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 5007, 2022.

RAJAK, D. *et al.* Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1667, 2019.

SABA, N.; JAWAID, M.; SULTAN, M. T. H. An overview of mechanical and physical testing of composite materials. Em: **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 1–12.

SETHI, S.; RAY, B. C. Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. **Advances in colloid and interface science**, v. 217, p. 43–67, 2015.

SOUTIS, C. Introduction. Em: **Polymer Composites in the Aerospace Industry**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 1–18.

TIMMIS, A. J. *et al.* Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. **The international journal of life cycle assessment**, v. 20, n. 2, p. 233–243, 2015.

TROYANI, N.; PÉREZ, A. A comparison of a finite element only scheme and a BEM/FEM method to compute the elastic–viscoelastic response in composite media. **Finite elements in analysis and design: the international journal of applied finite elements and computer aided engineering**, v. 88, p. 42–54, 2014.

WANG, L. *et al.* Experimental and numerical investigation on mechanical behaviors of woven fabric composites under off-axial loading. **International journal of mechanical sciences**, v. 141, p. 157–167, 2018.