

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

ELENICE PZIVITOVSKI BOJANOVSKI

**INOVAÇÕES EM TECNOLOGIAS DE UNIÃO PARA
ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

São José dos Campos
2024

ELENICE PZIVITOVSKI BOJANOVSKI

**INOVAÇÕES EM TECNOLOGIAS DE UNIÃO PARA
ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

Orientador Interno ou Orientador: EDMAR DE QUEIROZ FIGUEIREDO

São José dos Campos
2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

BOJANOVSKI, Elenice Pzivitovski
Título do Trabalho de Graduação. Inovações em Tecnologias de União para Estruturas Aeronáuticas
São José dos Campos, 2024.
36f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Graduação – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.
FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal, 2024.
Orientador Interno ou Principal: Professor Doutor Edmar de Queiroz Figueiredo

1. Tecnologias de União 2. Estruturas Aeronáuticas 3. Sustentabilidade I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. Divisão de Informação e Documentação. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BOJANOVSKI, Elenice Pzivitovski;. **Inovações em Tecnologias de União Para Estruturas Aeronáuticas**. 2024. 36f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME(S) DO(S) AUTOR(ES): Elenice Pzivitovski Bojanovski
TÍTULO DO TRABALHO: Inovações em Tecnologias de União para Estruturas Aeronáuticas
TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação/2024.

É concedida à FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal permissão para reproduzir cópias deste Trabalho e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

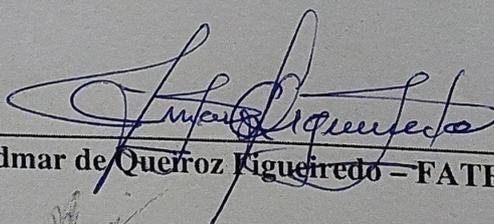


Elenice Pzivitovski Bojanovski
Rua Ipanema, 491 – Jardim Satélite
12.230-070, São José dos Campos - SP

ELENICE PZIVITOVSKI BOJANOVSKI

**INOVAÇÕES EM TECNOLOGIAS DE UNIÃO PARA
ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

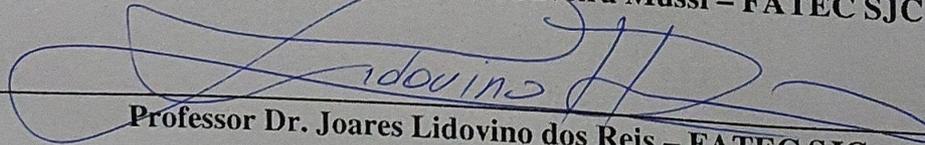
Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.



Professor Me. Edmar de Queiroz Figueiredo – FATEC/SJC



Professor Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi – FATEC SJC



Professor Dr. Joares Lidovino dos Reis – FATEC SJC

24 / 06 / 2024

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Força Maior que nos rege. Agradeço imensamente à minha Família, ao Renan, pai da minha Filha, pela força e compreensão e principalmente à minha Filha Catharina, que tão pequena, teve que compreender a ausência da Mãe em vários períodos em que estive presente na Fatec. E meu agradecimento especial ao nobre colega que tive a honra de conhecê-lo e ser colega de turma, e hoje é um amigo que levo para a vida, Sr. Roger do Prado, ao qual dedico a conclusão do curso, pois ele foi fundamental nos momentos em que pensei em desistir e tive seu total apoio para continuar. Meu muito Obrigado!

RESUMO

Este trabalho investiga as tecnologias de união utilizadas em estruturas aeronáuticas, destacando-se por seu impacto significativo na eficiência, segurança e sustentabilidade das aeronaves. O objetivo central é analisar os avanços recentes e avaliar as implicações dessas tecnologias no desenvolvimento aeronáutico. Adotando uma metodologia de revisão sistemática de literatura, este estudo realizou uma busca detalhada no Google Acadêmico, selecionando publicações dos últimos dez anos para garantir a relevância e a atualidade dos dados analisados. Os critérios de inclusão e exclusão focaram em artigos revisados por pares disponíveis em texto completo, abordando tanto os avanços em materiais como as inovações processuais em união de estruturas aeronáuticas. Os resultados indicam que o uso de materiais compósitos e a aplicação de manufatura aditiva estão entre as inovações mais promissoras, oferecendo reduções significativas no peso e melhorias na integridade estrutural das aeronaves. Contudo, desafios como a união de materiais dissimilares e a durabilidade das juntas ainda persistem, exigindo inovações contínuas. Conclui-se que, apesar dos progressos tecnológicos, há uma necessidade iminente de pesquisa adicional para superar as barreiras técnicas existentes e explorar plenamente o potencial das tecnologias de união na indústria aeronáutica. Este estudo contribui para o campo da engenharia aeronáutica ao delinear um caminho para futuras pesquisas e aplicações práticas que podem levar a aeronaves mais seguras, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Palavras-Chave: tecnologias de união; estruturas aeronáuticas; manufatura aditiva; materiais compósitos; eficiência aeronáutica; sustentabilidade.

ABSTRACT

This work investigates the joining technologies used in aeronautical structures, standing out for their significant impact on the efficiency, safety, and sustainability of aircraft. The central objective is to analyze recent advances and assess the implications of these technologies on aeronautical development. Adopting a systematic literature review methodology, this study conducted a detailed search on Google Scholar, selecting publications from the last five years to ensure the relevance and timeliness of the data analyzed. The inclusion and exclusion criteria focused on peer-reviewed articles available in full text, addressing both advances in materials and procedural innovations in the joining of aeronautical structures. The results indicate that the use of composite materials and the application of additive manufacturing are among the most promising innovations, offering significant reductions in weight and improvements in structural integrity of aircraft. However, challenges such as the joining of dissimilar materials and the durability of joints persist, requiring continuous innovation. It is concluded that, despite technological progress, there is an imminent need for additional research to overcome existing technical barriers and fully explore the potential of joining technologies in the aeronautical industry. This study contributes to the field of aeronautical engineering by outlining a path for future research and practical applications that can lead to safer, more efficient, and environmentally sustainable aircraft.

Keywords: joining technologies; aeronautical structures; additive manufacturing; composite materials; aeronautical efficiency; sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivo Geral	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1. Pesquisa Acadêmica	14
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	15
3.1. Metodologia	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1. Fundamentos das tecnologias de união em estruturas aeronáuticas	17
4.2. A Evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica	18
4.3 Regulamentação e Normas de União em Estruturas Aeronáuticas.....	19
4.4 Tipos de Juntas Aeronáuticas	21
4.5 Propriedades e aplicações das juntas adesivas.....	23
4.6 Estudos de caso: juntas adesivas e metálicas.....	25
4.7 Desafios e soluções na utilização de juntas adesivas.....	28
4.8 Comparação de juntas coladas e rebitadas.....	30
5. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Utilização dos adesivos estruturais no mercado	19
Figura 2 – Concentração de Tensão e de formação plástica.....	23
Figura 3 - <i>Doubler</i>	26
Figura 4 - Junção colada-rebitada.....	27
Figura 5 - Junções por “ <i>dado-joints</i> ”	27

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1 - Comparação entre juntas	32
--	----

1. INTRODUÇÃO

O setor aeronáutico, fundamental para a infraestrutura global e o desenvolvimento econômico, enfrenta constantes desafios em termos de eficiência operacional, segurança e sustentabilidade ambiental. Uma das áreas mais críticas nesta indústria é a tecnologia de união utilizada nas estruturas aeronáuticas, que desempenha um papel vital na performance e na integridade das aeronaves. As técnicas de união, como soldagem, adesivos e fixadores mecânicos, têm evoluído significativamente ao longo dos anos, acompanhando os avanços nos materiais e nas exigências de design e segurança. Este trabalho de graduação busca explorar essas tecnologias, destacando os desenvolvimentos recentes e seus impactos na indústria aeronáutica.

O interesse por este tema surge da crescente demanda por aeronaves mais leves, fortes e eficientes, capazes de reduzir o consumo de combustível e as emissões de carbono, ao mesmo tempo que mantêm ou aumentam os padrões de segurança. A união de materiais avançados, como compósitos e ligas metálicas leves, apresenta desafios específicos que exigem soluções inovadoras. O entendimento dessas técnicas e a proposta de novas soluções podem oferecer contribuições significativas para o campo da engenharia aeronáutica, tanto na prática quanto na academia.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um entendimento profundo sobre as tecnologias de união atuais e emergentes em estruturas aeronáuticas e avaliar seu impacto na eficiência e segurança das aeronaves. Especificamente, o estudo visa realizar uma investigação detalhada sobre os métodos e materiais utilizados atualmente, identificar as principais limitações dessas técnicas e propor melhorias inovadoras que atendam às necessidades futuras da indústria. Através desta pesquisa, espera-se contribuir para o avanço da tecnologia aeronáutica e para a formação de uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas no setor.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um entendimento aprofundado sobre as dinâmicas atuais e as tendências futuras da tecnologia de união em estruturas aeronáuticas, focando em como essas tecnologias podem impactar a eficiência e a segurança das aeronaves.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Realizar uma investigação sobre os atuais métodos e materiais empregados na união de estruturas aeronáuticas, identificando os benefícios e as limitações de cada técnica;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A integração de inovações em tecnologias de união para estruturas aeronáuticas é um campo vital para o avanço da indústria aeronáutica. O desenvolvimento de novas tecnologias, como o uso de materiais compósitos avançados e a implementação de processos de fabricação mais eficientes, têm transformado significativamente o modo como as aeronaves são construídas. Estas inovações não apenas melhoram a eficiência das aeronaves, mas também contribuem para a redução do peso e aumento da resistência estrutural, o que é essencial para o desempenho e a economia de combustível (CAMPOS *et al.*, 2022).

Além disso, a inserção do Brasil no segmento de aviões de caça através de projetos como o FX-2 destaca a importância da cooperação entre setores governamentais e privados na área de defesa. Esta colaboração é crucial para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que podem ser aplicadas na construção de aeronaves militares e comerciais, mostrando o papel essencial das políticas de inovação no suporte ao crescimento da indústria aeronáutica nacional (FERREIRA e NERIS, 2016).

Por outro lado, os modelos colaborativos têm se mostrado uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de tecnologia e inovação, especialmente em indústrias de menor porte. Tais modelos facilitam a integração de diferentes competências e recursos, acelerando o processo de inovação e permitindo que empresas menores possam competir em um mercado global altamente competitivo (CAMARGO, 2021).

O estudo de processos de fabrico avançados é outro ponto chave. Técnicas como a manufatura aditiva e o uso de materiais compósitos são revolucionárias, permitindo a criação de estruturas aeronáuticas mais leves e resistentes. Estas tecnologias não somente otimizam a produção, mas também proporcionam maior flexibilidade no design das aeronaves, o que pode levar a melhorias significativas em termos de performance e segurança (SILVA, 2019).

A utilização de compras públicas para promover inovação e offset na aeronáutica militar, como observado no caso C-390, demonstra como as políticas governamentais podem direcionar o desenvolvimento tecnológico e fortalecer a base industrial de defesa do país. Isso reflete uma estratégia deliberada para alavancar a inovação tecnológica através de parcerias público-privadas, destacando o papel do governo como um facilitador crucial no ecossistema de inovação (SOUSA *et al.*, 2023).

Enfim, a capacidade de inovação no setor aeronáutico brasileiro enfrenta tanto desafios quanto oportunidades. A necessidade de uma infraestrutura de pesquisa adequada e políticas de suporte bem estruturadas é fundamental para o avanço contínuo da indústria. Essa

estrutura permite que o Brasil não apenas acompanhe as tendências globais, mas também desempenhe um papel de liderança no mercado aeronáutico internacional (MIRANDA, 2016).

2.1.Pesquisa Acadêmica

A busca de artigos acadêmicos é uma parte fundamental do trabalho de pesquisa, e existem várias ferramentas e métodos disponíveis para facilitar esse processo. Aqui estão alguns dos principais métodos e ferramentas:

Google Acadêmico: Uma das ferramentas mais populares para buscar artigos acadêmicos. Ele indexa uma ampla gama de publicações, incluindo artigos de revistas, teses, livros e resumos.

Microsoft Academic: Similar ao Google Scholar, oferece uma vasta coleção de artigos e inclui recursos avançados de pesquisa.

ScienceDirect: Fornece acesso a artigos de periódicos e capítulos de livros nas áreas de ciência, tecnologia e medicina.

SpringerLink: Oferece acesso a milhões de documentos científicos, incluindo artigos de revistas, livros e trabalhos de conferências.

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1. Metodologia

A busca inicial foi realizada no Google Acadêmico, uma ferramenta amplamente reconhecida por sua capacidade de acessar uma vasta gama de fontes acadêmicas. A seleção de palavras-chave específicas relacionadas ao tema de interesse foi crucial para capturar a literatura mais relevante e atualizada. Exemplos de palavras-chave utilizadas incluem "união de materiais avançados", "tecnologias de união aeronáutica", "adesivos estruturais" e "modelagem numérica de juntas". A busca abrangeu tanto artigos em inglês quanto em português, ampliando o espectro de compreensão sem comprometer a profundidade acadêmica.

Os critérios de inclusão e exclusão são elementos cruciais nesta metodologia, pois definem a qualidade e a relevância das fontes a serem consideradas. Incluímos artigos publicados nos últimos dez anos para garantir a atualidade das informações, exceto por obras de grandes autores que são amplamente reconhecidas por suas contribuições fundamentais ao campo, independentemente da data de publicação. Artigos que não estavam disponíveis em texto completo ou que não passaram pelo processo de revisão por pares foram excluídos, assegurando assim a credibilidade dos dados. Além disso, foram priorizados artigos publicados em periódicos de alto fator de impacto e aqueles citados com frequência na literatura relevante.

Uma vez definidos os critérios de seleção, procedeu-se à análise dos resultados. Esta fase envolve a leitura crítica e sistemática dos artigos selecionados, identificando-se as principais tendências, lacunas e consensos na literatura existente. Cada artigo foi categorizado de acordo com temas e subtemas específicos, como tipos de adesivos, técnicas de modelagem numérica, desafios na união de materiais dissimilares, e soluções inovadoras. Esta categorização facilitou a síntese das informações e a comparação entre diferentes estudos, proporcionando uma visão holística e detalhada do tema.

Durante a revisão, utilizou-se um esquema de categorização estruturado, que incluiu:

- Identificação de Temas Centrais: Cada artigo foi revisado para identificar os temas centrais abordados e como eles se relacionam com a pergunta de pesquisa principal.
- Avaliação Crítica: A qualidade metodológica de cada estudo foi avaliada utilizando critérios padronizados, como validade interna e externa, rigor metodológico e relevância dos resultados.

A metodologia adotada garante uma abordagem sistemática e replicável, essencial para a construção de um trabalho acadêmico sólido e confiável. Ao seguir esses passos metodológicos, a revisão de literatura realizada não apenas responde a questões específicas do campo de estudo, mas também contribui significativamente para o avanço do conhecimento na área investigada. A análise detalhada e crítica das fontes permite identificar tendências emergentes, áreas que necessitam de maior investigação e possíveis aplicações práticas das descobertas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Fundamentos das tecnologias de união em estruturas aeronáuticas

Os fundamentos das tecnologias de união em estruturas aeronáuticas são essenciais para entender as complexidades e os desafios enfrentados pela indústria aeroespacial moderna. A união de diferentes materiais, especialmente metais e compósitos, requer técnicas sofisticadas que assegurem integridade e durabilidade estrutural. Métodos como soldagem, colagem e fixação mecânica são amplamente utilizados, cada um apresentando vantagens específicas dependendo do tipo de aplicação e das exigências de desempenho da aeronave. A escolha da técnica de união adequada é crucial para maximizar a eficácia estrutural e minimizar o peso, dois fatores que impactam diretamente a eficiência energética e o custo operacional das aeronaves (CAMPOS *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a inovação nas tecnologias de união tem avançado rapidamente, impulsionada pela necessidade de estruturas mais leves e resistentes. A introdução de adesivos de alta performance, por exemplo, tem permitido a união de materiais dissimilares de maneira eficaz, superando os desafios associados à soldagem tradicional, que pode comprometer a integridade estrutural devido ao calor excessivo. A colagem é particularmente vantajosa em aplicações onde a redução de peso é crítica, como em aeronaves que exigem alta eficiência de combustível (SILVA, 2019).

Além disso, a integração de sistemas de controle de qualidade e técnicas de diagnóstico avançadas é vital para assegurar a confiabilidade das uniões em estruturas aeronáuticas. A utilização de tecnologias como a ultrassonografia e a radiografia digital tem se tornado comum para detectar falhas ou defeitos em uniões, garantindo que estas atendam aos rigorosos padrões de segurança exigidos pela aviação. Esses métodos contribuem significativamente para a manutenção da integridade das aeronaves ao longo de seu ciclo de vida operacional (CAMARGO, 2021).

Finalmente, o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias de união é diretamente influenciado pelas políticas de inovação e pelos esforços colaborativos entre instituições de pesquisa e a indústria aeronáutica. A cooperação internacional e as parcerias entre empresas e universidades são fundamentais para o avanço de pesquisas e o desenvolvimento de soluções inovadoras que possam atender às crescentes demandas do setor. Este ambiente colaborativo é essencial para o progresso tecnológico e para a competitividade global da indústria aeronáutica brasileira (FERREIRA e NERIS, 2016).

4.2. A Evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica

A evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica marca um período de transformação significativa nos métodos de construção e design de aeronaves. Materiais como fibra de carbono, fibra de vidro e resinas avançadas têm revolucionado o setor, permitindo a produção de componentes que são ao mesmo tempo leves e extremamente resistentes. A substituição de metais pesados por esses materiais compósitos tem resultado em aeronaves com maior eficiência de combustível, melhor desempenho aerodinâmico e redução na emissão de gases poluentes, alinhando-se assim às crescentes exigências ambientais globais (CAMPOS *et al.*, 2022).

Os materiais compósitos não apenas oferecem vantagens em termos de peso, mas também apresentam propriedades mecânicas superiores, como maior resistência à fadiga e à corrosão em comparação com os metais tradicionalmente usados. Essa superioridade é crucial para aplicações aeronáuticas onde a durabilidade e a confiabilidade são prioritárias. Além disso, a capacidade de moldar compósitos em formas complexas oferece uma liberdade de design inédita, permitindo a otimização aerodinâmica de componentes e a integração de funcionalidades que seriam impraticáveis com metais (SILVA, 2019).

Adicionalmente, o desenvolvimento de técnicas de fabricação avançadas para compósitos, como a moldagem por transferência de resina e a laminação automatizada, tem aprimorado significativamente a eficiência da produção. Estes métodos não só reduzem o tempo de fabricação e o desperdício de material, mas também melhoram a consistência e a qualidade dos componentes fabricados. O investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento nessas áreas é essencial para superar os desafios de custo e de escala associados aos compósitos, que ainda representam barreiras à sua adoção mais ampla na indústria (CAMARGO, 2021).

A integração de materiais compósitos tem impulsionado uma revisão das normas regulatórias e dos procedimentos de teste na aviação. Garantir que esses novos materiais atendam aos rigorosos requisitos de segurança da aviação requer uma abordagem metódica e adaptada. As agências reguladoras e os fabricantes trabalham conjuntamente para desenvolver normas que abordem adequadamente os riscos específicos associados aos compósitos, assegurando que a inovação tecnológica avance de forma segura e eficiente (FERREIRA e NERIS, 2016).

4.3 Regulamentação e Normas de União em Estruturas Aeronáuticas

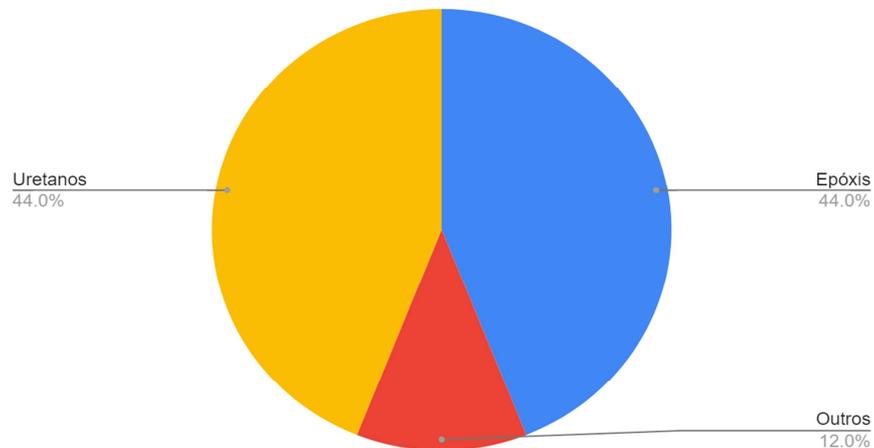
As estruturas aeronáuticas são desenvolvidas com materiais que garantem leveza e resistência, seguindo rigorosas normas regulamentadoras para assegurar a segurança e eficiência operacional. A Norma ISO 14582, por exemplo, especifica métodos para determinar a resistência à fadiga de juntas soldadas em materiais metálicos, o que é essencial para manter a integridade estrutural ao longo do tempo e sob condições de carga variáveis (BANEJA & DA SILVA, 2009).

A Norma ASTM D3478 estabelece requisitos específicos para adesivos utilizados em aplicações estruturais. Esses adesivos são fundamentais para a colagem de componentes aeronáuticos, proporcionando uma distribuição uniforme de tensões e permitindo a união de diferentes materiais, como metais e compósitos (CAMARGO, 2021). A aplicação correta desses adesivos, conforme as normas, é crucial para evitar falhas estruturais.

A SAE ARP 3723 fornece diretrizes detalhadas sobre a colagem estrutural em estruturas aeroespaciais, abordando desde a seleção de adesivos até a preparação de superfícies, aplicação, cura e inspeção. Esta prática recomendada é vital para garantir que as juntas adesivas sejam aplicadas de maneira consistente e segura, contribuindo para a durabilidade e desempenho das aeronaves (CAMPOS et al., 2022).

No contexto brasileiro, o fomento à inovação na indústria aeronáutica é crucial para manter a competitividade no mercado global. Iniciativas como a encomenda tecnológica e parcerias público-privadas têm sido essenciais para o desenvolvimento de novas tecnologias de união, como adesivos avançados e processos de manufatura aditiva, que podem reduzir custos e melhorar a eficiência produtiva (FERREIRA & NERIS, 2016).

Figura 1 - Utilização dos adesivos estruturais no mercado



Fonte: Adaptado de Broxterman, 2001.

Na Figura 1 é possível ver a utilização e relevância dos adesivos estruturais no mercado. Os desafios na aplicação de novas tecnologias de união incluem a necessidade de testes rigorosos para garantir a confiabilidade e a compatibilidade dos materiais. A colaboração entre universidades, centros de pesquisa e a indústria é fundamental para superar esses desafios e aproveitar as oportunidades de inovação. Estudos de caso em empresas de pequeno e médio porte no Brasil demonstram que a adoção de tecnologias avançadas de união pode levar a melhorias significativas na qualidade e desempenho dos produtos aeronáuticos (KOELLER e SQUEFF, 2018).

A regulamentação e as normas de união em estruturas aeronáuticas desempenham um papel crucial na garantia da segurança e eficiência das aeronaves. A ISO 14582, ASTM D3478 e SAE ARP 3723 são apenas algumas das normas que estabelecem diretrizes específicas para a aplicação de técnicas de união, sejam elas soldadas ou adesivas. Essas normas são desenvolvidas com base em extensa pesquisa e análise de falhas, garantindo que os materiais e métodos utilizados sejam adequados para as rigorosas demandas do ambiente aeronáutico (BANEJA & DA SILVA, 2009).

No Brasil, o incentivo à inovação na indústria aeronáutica é fundamental para acompanhar as demandas do mercado global. Programas de fomento à inovação, como os promovidos pela Base Industrial de Defesa têm sido essenciais para a implementação de novas tecnologias. Essas iniciativas não só impulsionam a competitividade das empresas nacionais, mas também asseguram que as forças armadas, como a Força Aérea Brasileira, mantenham capacidades operacionais avançadas e eficientes (COSTA, 2020).

A colaboração entre diferentes setores é vital para o sucesso na implementação de novas tecnologias de união. Universidades, centros de pesquisa e a indústria precisam trabalhar juntos para desenvolver soluções que sejam não apenas inovadoras, mas também práticas e economicamente viáveis. Essa cooperação pode resultar em avanços significativos na qualidade e desempenho das estruturas aeronáuticas, como demonstrado em vários estudos de caso envolvendo pequenas e médias empresas do setor (KOELLER & SQUEFF, 2018).

Para garantir que essas novas tecnologias sejam aplicadas de forma eficaz, é necessária uma abordagem integrada que inclua rigorosos testes de confiabilidade e compatibilidade dos materiais. Ensaios rigorosos são essenciais para identificar possíveis pontos de falha e para garantir que os materiais e métodos de união escolhidos sejam adequados para as condições de serviço previstas. Apenas com essa abordagem detalhada e colaborativa é possível garantir que as inovações em tecnologias de união não só atendam aos requisitos regulamentares, mas

também ofereçam desempenho superior e durabilidade nas operações aeronáuticas (FERREIRA e NERIS, 2016).

4.4 Tipos de Juntas Aeronáuticas

Na indústria aeroespacial, diversos tipos de fixações são utilizados para garantir a integridade estrutural das aeronaves. As fixações metálicas, como rebites, solda, clamps, parafusos e pinos, são amplamente empregadas devido à sua alta resistência e capacidade de suportar cargas significativas. Essas fixações são essenciais na montagem de estruturas externas, como frames, asas, empenagens, nervuras e longarinas (RAPIDDIRECT, 2024). A solda, em particular, é valorizada por sua capacidade de criar uma junção contínua e homogênea entre peças metálicas.

Juntas adesivas são outra tecnologia fundamental na indústria aeroespacial. Elas incluem colagem com velcros, tapes e resinas epoxídicas, que são amplamente utilizadas devido à sua capacidade de distribuir tensões uniformemente e unir diferentes materiais. As resinas epoxídicas, por exemplo, são preferidas para aplicações estruturais devido à sua alta resistência e durabilidade (MOURA, 2016). A colagem estrutural é crucial para a montagem de componentes que exigem alta precisão e integridade, como painéis de compósitos e estruturas internas de cabines.

As juntas adesivas oferecem várias vantagens em comparação com as fixações mecânicas tradicionais. Uma das principais vantagens é a capacidade de reduzir o peso total da aeronave, já que eliminam a necessidade de parafusos e rebites, que adicionam massa extra (BANEVA & DA SILVA, 2009). Além disso, as juntas adesivas proporcionam uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área de colagem, o que pode aumentar a vida útil dos componentes e reduzir o risco de falhas devido à fadiga.

No entanto, a aplicação de juntas adesivas também apresenta desafios. A preparação adequada das superfícies é crucial para garantir uma adesão forte e durável. Qualquer contaminação ou irregularidade pode comprometer a integridade da junção. Além disso, a inspeção e a garantia de qualidade das juntas adesivas podem ser mais complexas em comparação com fixações mecânicas, exigindo técnicas avançadas de ensaio não destrutivo (CAMARGO, 2021).

Outro fator importante na utilização de juntas adesivas é a seleção do adesivo adequado para a aplicação específica. Adesivos diferentes têm propriedades distintas de resistência, flexibilidade e durabilidade. A escolha do adesivo deve considerar fatores como o tipo de materiais a serem unidos, as condições ambientais e as cargas que a junção precisará

suportar (CAMPOS *et al.*, 2022). Adesivos epoxídicos, por exemplo, são frequentemente utilizados em aplicações onde são necessárias alta resistência e resistência a altas temperaturas.

A combinação de diferentes métodos de fixação também é uma estratégia valiosa na indústria aeroespacial. Por exemplo, a utilização de juntas híbridas, que combinam adesivos com fixações mecânicas, como rebites ou parafusos, pode proporcionar benefícios adicionais em termos de resistência e segurança. Essa abordagem permite que as propriedades de cada método sejam complementares, aumentando a robustez geral da junção. As juntas híbridas são particularmente úteis em áreas que exigem uma alta confiabilidade, como as fixações de estruturas principais e componentes críticos da aeronave (MOURA, 2016).

Além das vantagens mecânicas, as juntas adesivas e híbridas também oferecem benefícios em termos de eficiência de fabricação e montagem. A aplicação de adesivos pode ser automatizada, reduzindo o tempo de montagem e os custos associados. Isso é especialmente relevante na produção em larga escala, onde a eficiência do processo pode ter um impacto significativo nos custos totais. Além disso, a utilização de adesivos elimina a necessidade de perfurações adicionais nas peças, preservando a integridade dos materiais e reduzindo a possibilidade de introdução de pontos de falha (DA SILVA & CAMPILHO, 2015).

Outro aspecto importante na escolha e aplicação de juntas adesivas é a consideração das condições de operação da aeronave. Fatores como variações de temperatura, umidade, exposição a produtos químicos e cargas dinâmicas devem ser levados em conta ao selecionar o tipo de adesivo e ao projetar a junta. Testes rigorosos e simulações podem ajudar a prever o desempenho das juntas sob condições operacionais reais, garantindo que elas atendam aos requisitos de segurança e durabilidade (CAMPOS *et al.*, 2022).

A sustentabilidade também é um fator crescente de importância na indústria aeroespacial. A redução do peso total das aeronaves, alcançada pela utilização de juntas adesivas e materiais compósitos, contribui para a diminuição do consumo de combustível e das emissões de CO₂. Além disso, a durabilidade das juntas adesivas pode prolongar a vida útil das aeronaves, reduzindo a necessidade de manutenção e substituição de componentes, o que também tem um impacto positivo no meio ambiente (COSTA, 2020).

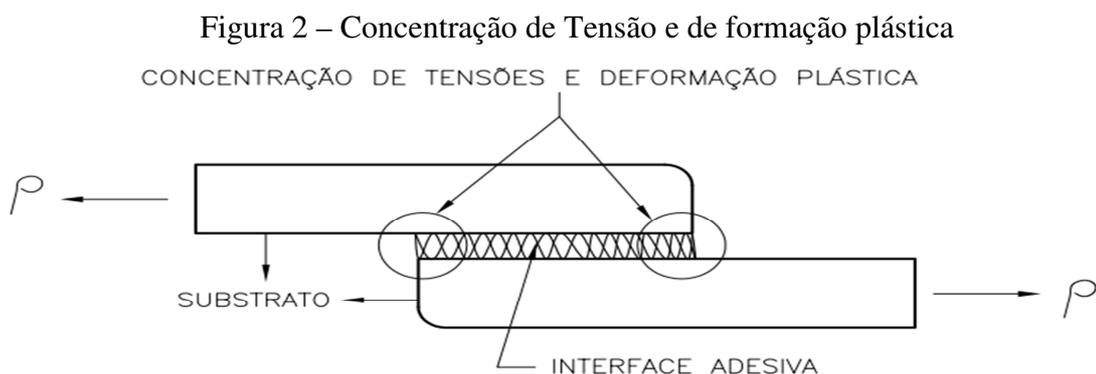
Finalmente, o treinamento e a qualificação da força de trabalho são essenciais para a aplicação eficaz de tecnologias de união avançadas. Operadores e engenheiros devem ser

treinados para entender as propriedades dos adesivos, os processos de preparação de superfícies e as técnicas de aplicação. Programas de certificação e treinamentos contínuos podem garantir que as melhores práticas sejam seguidas e que a qualidade das juntas adesivas seja mantida em todas as etapas do processo de fabricação e manutenção (CAMARGO, 2021).

4.5 Propriedades e aplicações das juntas adesivas

As juntas adesivas são essenciais na indústria aeroespacial devido à sua alta resistência e flexibilidade, que permitem a distribuição uniforme das tensões e evitam rompimentos por cisalhamento e esforços concentrados. A figura 2 ilustra como a concentração de tensões pode ser mitigada utilizando uma interface adesiva adequada, destacando a importância de uma boa distribuição de tensões para aumentar a durabilidade da junção (BANEJA & DA SILVA, 2009).

Adesivos com alta ductilidade são particularmente eficazes em reduzir cargas de cisalhamento, pois têm a capacidade de se deformar sob carga, dissipando melhor a energia dos esforços aplicados. Adesivos mais rígidos, por outro lado, podem falhar sob cargas elevadas devido à sua menor capacidade de deformação (DA SILVA & CAMPILHO, 2015). A escolha do tipo de adesivo depende, portanto, das especificações da aplicação e das características dos materiais a serem unidos.



A espessura do adesivo e a área de colagem são fatores críticos que influenciam a aderência e a resistência da junta. Adesivos mais espessos podem proporcionar uma maior capacidade de absorção de tensões, mas também podem introduzir pontos de fraqueza se a espessura não for controlada adequadamente (CAMARGO, 2021). Assim, a otimização da espessura do adesivo é essencial para garantir a integridade estrutural da junta adesiva.

As juntas adesivas são amplamente utilizadas em fixações estruturais e não estruturais em aeronaves. Em aplicações estruturais, como a colagem de painéis de compósitos e

estruturas metálicas, a capacidade de unir diferentes materiais sem introduzir concentração de tensões significativa é uma vantagem crucial. Adesivos epoxídicos são frequentemente escolhidos para essas aplicações devido à sua alta resistência e estabilidade térmica (CAMPOS et al., 2022).

A utilização de adesivos também permite a união de materiais compósitos, que são amplamente usados na indústria aeroespacial devido à sua alta relação resistência/peso. O grafeno, por exemplo, está sendo investigado como um reforço para materiais compósitos, oferecendo potencial para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas das juntas adesivas (COSTA, 2020). A incorporação de grafeno pode aumentar a resistência à fadiga e a durabilidade das junções, abrindo novas possibilidades para o design de aeronaves.

A inovação contínua nas tecnologias de união é vital para a competitividade da indústria aeroespacial. No Brasil, a promoção da inovação na base industrial de defesa, incluindo a Força Aérea Brasileira, destaca a importância de desenvolver novas tecnologias de união para melhorar a eficiência e a segurança das aeronaves (FERREIRA & NERIS, 2016). A colaboração entre instituições de pesquisa e a indústria é essencial para explorar novas soluções e aprimorar as técnicas existentes.

A implementação de adesivos na indústria aeroespacial não se limita apenas à união de materiais semelhantes, mas também facilita a integração de materiais diferentes, como metais com compósitos. Esta capacidade é particularmente importante no desenvolvimento de novas aeronaves que exigem combinações de materiais para otimizar o desempenho e reduzir o peso.

A tecnologia de adesivos também está sendo explorada para aplicações em reparos estruturais. Em vez de substituir componentes inteiros, os adesivos podem ser usados para reparar danos localizados, o que é mais econômico e menos demorado. Adesivos específicos, como os epoxídicos modificados, são formulados para curar rapidamente e fornecer resistência suficiente para restabelecer a integridade estrutural da peça danificada. Esta abordagem de reparo pode prolongar a vida útil dos componentes e reduzir os custos operacionais (DA SILVA & CAMPILHO, 2015).

A otimização da aplicação de adesivos também envolve o desenvolvimento de métodos de inspeção e controle de qualidade mais avançados. Técnicas de inspeção não destrutiva, como ultrassom, raios X e termografia, são fundamentais para verificar a integridade das juntas adesivas sem causar danos. Estas técnicas permitem a detecção de falhas internas, como bolhas de ar ou delaminações, que poderiam comprometer a resistência

da junta. A implementação de tais técnicas garante que as juntas adesivas atendam aos rigorosos padrões de segurança e desempenho exigidos na indústria aeroespacial (CAMPOS et al., 2022).

A pesquisa e desenvolvimento contínuos são essenciais para explorar novas fronteiras na aplicação de adesivos estruturais. A introdução de nanotecnologia, como o uso de nanocompósitos e nanoadesivos, está revolucionando a indústria. Esses materiais oferecem propriedades mecânicas superiores e podem melhorar significativamente a resistência ao impacto e a durabilidade das juntas adesivas. O uso de nanotubos de carbono e nanopartículas de sílica, por exemplo, tem mostrado potencial em aumentar a resistência e a flexibilidade dos adesivos, abrindo novas possibilidades para o design de estruturas aeronáuticas avançadas (COSTA, 2020).

4.6 Estudos de caso: juntas adesivas e metálicas

As tecnologias de união desempenham um papel crucial na integridade e eficiência das estruturas aeronáuticas. Tradicionalmente, métodos como a rebiteagem e a soldagem foram amplamente utilizados devido à sua alta resistência e confiabilidade. No entanto, com o avanço das tecnologias e a crescente demanda por aeronaves mais leves e eficientes, novas técnicas de união têm sido desenvolvidas e adotadas. Entre essas inovações, destacam-se os *doublers* colados, que substituem métodos tradicionais por técnicas que permitem uma integração mais completa das peças, otimizando a transferência de carga e minimizando as concentrações de tensões. Um *doubler* é um componente utilizado na engenharia estrutural, especialmente em aeronaves, para reforçar áreas específicas da estrutura. O *doubler* é essencialmente uma placa adicional que é fixada a uma parte da estrutura para aumentar sua resistência e rigidez.

A utilização de *doublers* colados oferece uma série de benefícios significativos, incluindo alta resistência à corrosão e fadiga, baixo custo de produção e capacidade de retardar a propagação de trincas. Essas vantagens resultam em um aumento significativo da vida útil das estruturas em fadiga e em potenciais reduções de peso, fatores cruciais para o desempenho das aeronaves. Essas características tornam os *doublers* colados uma alternativa inovadora e vantajosa em comparação com as técnicas de união tradicionais (MOURA, 2016).

Quando dimensionados corretamente, os *doublers* colados oferecem diversos benefícios: alta resistência à corrosão e fadiga, baixo custo de produção, capacidade de retardar a propagação de trincas, resultando em um aumento significativo da vida útil em

fadiga da estrutura e em potenciais reduções de peso, fatores cruciais para o desempenho das aeronaves (MOURA, 2016).

Figura 3 - *Doubler*



Fonte: Bas part sales, 2024.

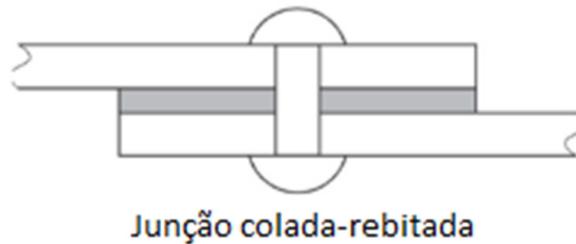
Os *doublers* colados representam uma inovação significativa nas técnicas de união para estruturas aeronáuticas. Essa técnica substitui métodos tradicionais, como rebites e soldas, permitindo uma integração mais completa das peças e otimizando a transferência de carga. A Figura 3 acima mostra um exemplo de *doubler*, que é utilizado para reforçar áreas sujeitas a elevados níveis de tensão.

Além dos benefícios mecânicos, os *doublers* colados proporcionam uma distribuição mais uniforme das tensões, minimizando as concentrações de tensão que podem levar a falhas estruturais. A utilização de adesivos de alta performance garante que as juntas mantenham sua integridade mesmo sob condições extremas de operação. A alta resistência à corrosão é especialmente importante em ambientes aeronáuticos, onde a exposição a elementos corrosivos é comum. Com um custo de produção mais baixo e a vantagem de prolongar a vida útil das aeronaves, os *doublers* colados emergem como uma solução eficaz e eficiente para a indústria aeroespacial, permitindo melhorias contínuas em segurança e performance (BAS PART SALES, 2024).

Uma possibilidade para aumentar a eficiência desta fixação é a combinação dos rebites com um adesivo. A utilização de mais do que um adesivo ao longo da sobreposição, ou a variação das propriedades do adesivo e/ou do aderente pode intensificar a junção. Neste tipo de junção podemos encontrar combinações entre diferentes tipos de fixação, como a utilização

de um adesivo com um inserto/parafuso, um método muito utilizado em fixações internas nas cabines de aeronaves, como em instalações que necessitam maior resistência, painéis de compósitos unidos a peças metálicas, como por exemplo, na Figura 4, esse tipo de junção compósito-metal necessita que o metal seja submetido a tratamentos químicos para evitar a corrosão galvânica.

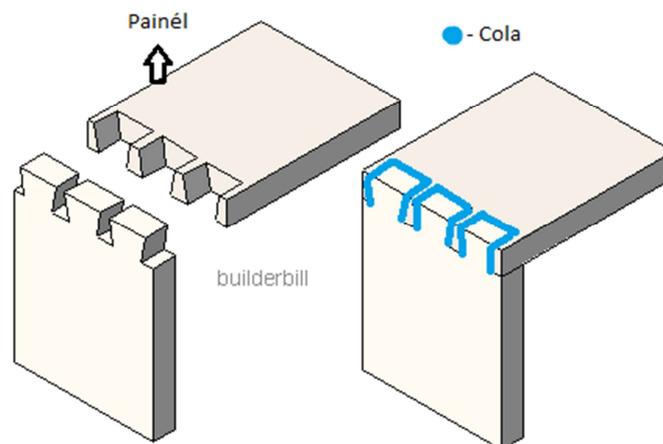
Figura 4 - Junção colada-rebitada



Fonte: Adaptado de Silva 2015.

Outro método de fixação muito utilizado em interiores de cabines de aeronaves são as junções por “*dado-joints*” (SCIENCEDIRECT, 2022). Esse tipo de junção ocorre quando é necessário unir dois painéis de compósitos, e os mesmos não podem ser unidos por rebiteagem ou parafusos, então para evitar a adição de elementos de fixação que podem aumentar o peso da aeronave, uma utilização muito comum são os “*dado-joints*”, que consistem basicamente em alterar a geometria do painel por meio de usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado), para obter uma junção por encaixe, e uma forma de fornecer ainda mais resistência a essa junção é a adição de colagem estrutural, como na Figura 5 exemplificada.

Figura 5 - Junções por “*dado-joints*”



Fonte: Adaptado de Builderbill, 2024.

A combinação de métodos de fixação, como o uso de adesivos juntamente com rebites ou parafusos, exemplifica o potencial de aumentar a eficiência das junções em estruturas

aeronáuticas. Esses métodos híbridos permitem que as vantagens de diferentes técnicas de união sejam combinadas, resultando em junções mais robustas e resistentes. A utilização de tratamentos químicos para evitar a corrosão galvânica nas junções compósito-metal é um exemplo de como essas combinações podem ser otimizadas. (SILVA, 2015)

4.7 Desafios e soluções na utilização de juntas adesivas

Apesar das inúmeras vantagens das juntas adesivas, como a capacidade de distribuir tensões uniformemente e unir materiais diferentes, há desafios significativos na sua aplicação em estruturas aeronáuticas. Um dos principais problemas é a presença de esforços residuais causados por diferenças nos coeficientes de dilatação térmica entre os materiais aderidos. Esses esforços podem resultar em tensões internas que comprometem a integridade da junta adesiva (BANEJA & DA SILVA, 2009).

Outro desafio é a dificuldade na desmontagem das juntas adesivas. Diferentemente das fixações mecânicas, que podem ser facilmente removidas, as juntas adesivas são projetadas para serem permanentes. Isso pode complicar processos de manutenção e reparo, onde a desmontagem é necessária. Portanto, estratégias para facilitar a remoção segura e eficiente das juntas adesivas são essenciais (DA SILVA & CAMPILHO, 2015).

A limitação a uniões simples é mais um problema enfrentado pelas juntas adesivas. Enquanto são extremamente eficazes em aplicações onde as forças são distribuídas uniformemente, elas podem falhar em configurações complexas ou onde há concentração de tensões. Isso requer um design cuidadoso e a escolha adequada do adesivo para garantir que a junta possa suportar as cargas aplicadas sem falhar (CAMPOS *et al.*, 2022).

A degradação ambiental é outra preocupação importante. Adesivos expostos a condições severas de serviço, como alta umidade, temperaturas extremas e exposição a produtos químicos, podem degradar ao longo do tempo, perdendo suas propriedades adesivas. Testes rigorosos de durabilidade e a seleção de adesivos resistentes a tais condições são cruciais para garantir a longevidade das juntas adesivas (COSTA, 2020).

Uma das soluções para mitigar esses desafios é a combinação de juntas coladas com rebitadas ou parafusadas. Essa abordagem híbrida permite que os benefícios de ambos os métodos sejam aproveitados, aumentando a resistência e a durabilidade da junção. Por exemplo, o uso de rebites em conjunto com adesivos pode ajudar a distribuir as cargas mais uniformemente e fornecer uma segurança adicional contra falhas (MOURA, 2016).

O aprimoramento das técnicas de fabricação e inspeção também é fundamental. Processos avançados de preparação de superfícies, como tratamentos químicos e mecânicos,

podem melhorar a aderência inicial do adesivo. Além disso, tecnologias de inspeção não destrutiva, como ultrassom e termografia, permitem a detecção precoce de falhas ou degradação nas juntas adesivas, facilitando a manutenção preventiva (CAMARGO, 2021).

A implementação de juntas adesivas em estruturas aeronáuticas exige uma compreensão detalhada das propriedades dos adesivos e das técnicas de aplicação. As especificações dos adesivos variam conforme o tipo de material a ser unido, as condições ambientais e as cargas que a junta precisará suportar. Adesivos epoxídicos, por exemplo, são frequentemente escolhidos para aplicações que requerem alta resistência e estabilidade térmica. A otimização da espessura do adesivo e a área de colagem são fatores críticos que influenciam a aderência e a resistência da junta, garantindo que ela possa suportar as tensões aplicadas ao longo do tempo (BANEJA & DA SILVA, 2009).

Para enfrentar os desafios de degradação ambiental, a seleção de adesivos resistentes à umidade, temperaturas extremas e exposição química é essencial. Ensaios rigorosos de durabilidade são necessários para avaliar o desempenho dos adesivos em condições de serviço severas. Além disso, a utilização de materiais inovadores, como nanocompósitos reforçados com grafeno, pode oferecer propriedades mecânicas superiores e melhorar a resistência ao impacto e à fadiga das juntas adesivas (COSTA, 2020).

A integração de métodos híbridos, combinando adesivos com fixações mecânicas, pode oferecer uma solução robusta para os desafios de união em estruturas complexas. Esse método permite que os benefícios de cada técnica sejam maximizados, proporcionando maior segurança e resistência à junção. O uso de rebites ou parafusos em conjunto com adesivos não só distribui melhor as cargas, mas também fornece uma segurança adicional em caso de falhas adesivas, aumentando a confiabilidade da estrutura (MOURA, 2016).

A colaboração interdisciplinar entre universidades, centros de pesquisa e a indústria é vital para o desenvolvimento e a aplicação bem-sucedida de novas tecnologias de adesão. Projetos colaborativos podem acelerar o progresso em pesquisas sobre novos materiais e técnicas de fabricação, resultando em soluções inovadoras que atendem às exigências rigorosas da indústria aeroespacial. A implementação de políticas governamentais que incentivem a pesquisa e desenvolvimento pode fortalecer essas parcerias e fomentar a inovação tecnológica no setor (FERREIRA & NERIS, 2016).

4.8 Comparação de juntas coladas e rebitadas

As juntas coladas oferecem várias vantagens em relação às rebitadas, especialmente na união de materiais diferentes. Este método permite a formação de estruturas leves e compactas, o que é essencial na indústria aeronáutica para melhorar a eficiência de combustível e desempenho das aeronaves. A capacidade de distribuir tensões uniformemente ao longo da junta é uma das principais vantagens das juntas adesivas, reduzindo a concentração de tensões que pode levar a falhas prematuras (BANEIA & DA SILVA, 2009).

Outro benefício significativo das juntas coladas é a maior resistência à corrosão. A ausência de perfurações necessárias para rebites ou parafusos elimina os pontos de entrada para a corrosão, prolongando a vida útil das estruturas. Adicionalmente, as juntas adesivas podem unir materiais que normalmente não seriam compatíveis com métodos de fixação tradicionais, como metais e compósitos, ampliando as possibilidades de design (DA SILVA & CAMPILHO, 2015).

No entanto, as juntas coladas também apresentam desvantagens que devem ser consideradas. Um dos principais desafios é a criação de esforços residuais devido a diferenças nos coeficientes de dilatação térmica entre os materiais aderidos. Esses esforços podem gerar tensões internas que comprometem a integridade da junção, exigindo um controle rigoroso dos processos de cura e aplicação (CAMPOS *et al.*, 2022).

A dificuldade na desmontagem das juntas adesivas é outra limitação significativa. Diferente das juntas rebitadas, que podem ser facilmente desmontadas para manutenção ou reparo, as juntas coladas são projetadas para serem permanentes. Isso pode complicar as operações de manutenção, especialmente em situações onde a remoção e substituição de componentes são frequentes (MOURA, 2016).

A degradação ambiental é uma preocupação importante para as juntas adesivas. A exposição a condições severas, como alta umidade, temperaturas extremas e produtos químicos, pode degradar as propriedades adesivas ao longo do tempo. Ensaios rigorosos e a seleção de adesivos resistentes a tais condições são essenciais para garantir a durabilidade das juntas (COSTA, 2020).

A inspeção de juntas adesivas também apresenta desafios. Técnicas avançadas de inspeção não destrutiva, como ultrassom e termografia, são necessárias para detectar falhas internas que não são visíveis externamente. Isso aumenta a complexidade e o custo do controle de qualidade em comparação com as juntas rebitadas, que podem ser inspecionadas visualmente de maneira mais simples (FERREIRA e NERIS, 2016).

Para mitigar algumas dessas desvantagens, a combinação de juntas coladas com fixações mecânicas, como rebites ou parafusos, pode ser uma solução eficaz. Essa abordagem híbrida permite aproveitar os benefícios de ambos os métodos, aumentando a resistência e a segurança da junção. Por exemplo, rebites podem ser usados para fornecer uma segurança adicional contra falhas adesivas, especialmente em ambientes de serviço severos (CAMARGO, 2021).

A inovação contínua nas tecnologias de materiais, como a introdução do grafeno, pode oferecer soluções adicionais para os desafios das juntas adesivas. O grafeno tem propriedades mecânicas e térmicas excepcionais que podem melhorar significativamente a resistência e a durabilidade das juntas adesivas. A pesquisa contínua sobre a incorporação de grafeno em adesivos estruturais promete avanços significativos na tecnologia de união para aplicações aeroespaciais (CAMPOS *et al.*, 2022).

A colaboração entre indústria, academia e centros de pesquisa é essencial para superar os desafios associados às juntas adesivas. Projetos colaborativos podem acelerar o desenvolvimento de novas tecnologias de adesão e técnicas de fabricação, promovendo a inovação na indústria aeronáutica. A implementação de políticas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento pode fortalecer essa cooperação e fomentar a inovação (MIRANDA, 2016).

Outro aspecto importante a considerar na comparação entre juntas coladas e rebitadas é o impacto ambiental e a sustentabilidade. A redução do peso das aeronaves proporcionada pelas juntas coladas contribui diretamente para a diminuição do consumo de combustível e das emissões de CO₂, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade da indústria aeroespacial. A fabricação de estruturas mais leves e eficientes não só melhora a performance das aeronaves, mas também reduz o impacto ambiental, tornando o uso de adesivos estruturais uma escolha vantajosa em termos de sustentabilidade (COSTA, 2020).

A evolução das técnicas de fabricação e aplicação de juntas adesivas também está sendo impulsionada por avanços na automação. A integração de robôs e sistemas automatizados na aplicação de adesivos garante maior precisão e consistência, reduzindo a possibilidade de erro humano e aumentando a qualidade das junções. Esse avanço tecnológico é crucial para atender às exigências rigorosas de segurança e desempenho da indústria aeronáutica, permitindo a produção em larga escala com alta eficiência (CAMARGO, 2021).

A formação contínua e capacitação dos profissionais envolvidos na aplicação de juntas adesivas são igualmente essenciais. A compreensão das propriedades dos adesivos, das técnicas de preparação de superfícies e dos métodos de inspeção avançada requer uma base sólida de conhecimento técnico. Programas de treinamento e certificação garantem que os

profissionais estejam atualizados com as melhores práticas e as tecnologias mais recentes, assegurando a aplicação correta e eficaz das juntas adesivas em projetos aeronáuticos (MARQUES, 2017).

Por fim, a pesquisa e desenvolvimento contínuos são fundamentais para aprimorar as tecnologias de união e superar os desafios associados às juntas adesivas. Investimentos em pesquisa podem levar ao desenvolvimento de novos materiais e adesivos com propriedades ainda mais avançadas, como maior resistência à temperatura e durabilidade sob condições ambientais extremas. (FERREIRA & NERIS, 2016).

Abaixo, na Tabela 1 é possível verificar um comparativo entre juntas coladas, juntas rebitadas e juntas soldadas.

Tabela 1 - Comparação entre juntas

	Junta Colada	Junta Rebitada	Junta Soldada
Exigência da preparação da superfície	Alta	Pequena	Pequena
União de materiais diferentes	Boa	Limitada	Ruim
Peso adicional na estrutura	Baixo	Alto	Moderado
Resistência à fadiga	Alta	Baixa	Moderada
Inspeção por ensaio não destrutivo	Muito limitado	Adequado	Adequado
Facilidade na desmontagem	Difícil	Fácil	Difícil
Custo de produção	Médio	Baixo	Baixo
Resistência à degradação pelo meio ambiente	Pobre	Pobre	Moderado
Tempo de produção	Baixo	Rápido	Moderado

Fonte: Moura, 2016.

5. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, exploramos as tecnologias de união utilizadas em estruturas aeronáuticas, investigando os desafios, as inovações e os impactos associados a essas técnicas no contexto da indústria aeronáutica moderna. A revisão de literatura realizada e a análise subsequente forneceram uma compreensão abrangente sobre como as técnicas de união evoluíram e como elas continuam a moldar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade das aeronaves.

Foi evidenciado que a adoção de materiais compósitos e a aplicação de métodos de manufatura aditiva estão entre as inovações mais promissoras, oferecendo vantagens significativas em termos de redução de peso e aumento da resistência estrutural. No entanto, essas tecnologias também apresentam desafios únicos, especialmente no que diz respeito à união de materiais dissimilares e à garantia de juntas duradouras e seguras.

Os objetivos específicos do estudo foram atendidos ao identificar as limitações das técnicas atuais. Através da investigação, concluiu-se que a colaboração entre os setores acadêmico e industrial é fundamental para o desenvolvimento de soluções inovadoras que possam superar essas barreiras. Além disso, a integração de sistemas avançados de monitoramento e teste nas fases de projeto e produção foi identificada como crucial para melhorar a confiabilidade das estruturas aeronáuticas.

A conclusão principal deste trabalho é que, embora progressos significativos tenham sido feitos na tecnologia de união para aeronaves, ainda há um vasto campo para pesquisa e desenvolvimento. O aumento da complexidade das estruturas aeronáuticas e a constante busca por aeronaves mais leves e econômicas continuam a impulsionar a necessidade de inovações tecnológicas nesta área. Portanto, os esforços futuros devem se concentrar no aprimoramento das técnicas de união, com um enfoque particular na viabilidade de implementação industrial e na conformidade com as crescentes demandas ambientais e regulatórias.

As juntas adesivas representam um avanço significativo na engenharia aeronáutica, oferecendo diversas vantagens em termos de desempenho, peso e custo. No entanto, desafios como a necessidade de controle rigoroso de qualidade e adaptação a condições ambientais adversas são importantes considerações para o uso eficaz dessas tecnologias na aviação moderna. Com o aprimoramento das técnicas de fabricação e inspeção, as juntas adesivas têm o potencial de revolucionar a construção de aeronaves no futuro.

A combinação entre uniões coladas com uniões rebitadas/parafusadas, podem intensificar a eficiência destas fixações nas instalações estruturais aeronáuticas, além de

oferecer uma proteção a mais contra corrosão galvânica entre fixações metálicas e compósitos de fibra de carbono. Uma recomendação para futuros estudos é a pesquisa aprofundada dos testes e ensaios que podem ser feitos a partir desta combinação de junções, e o aprimoramento das técnicas de fabricação e inspeção destas junções.

Este trabalho não apenas reforçou a importância das tecnologias de união na indústria aeronáutica, mas também destacou as oportunidades para inovação e melhoria. As propostas e conclusões aqui discutidas devem servir como base para futuras pesquisas, contribuindo assim para o avanço contínuo da engenharia aeronáutica e para o desenvolvimento de aeronaves mais seguras, eficientes e sustentáveis.

As juntas adesivas com grafeno representam uma evolução significativa no campo dos materiais de engenharia, especialmente para aplicações que exigem alta resistência, leveza e durabilidade. O grafeno, com suas propriedades excepcionais de resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica, e flexibilidade, melhora substancialmente o desempenho dos adesivos tradicionais. O uso de grafeno em adesivos ainda está em estágio de desenvolvimento e pesquisa, mas o potencial é vasto. À medida que a tecnologia avança, espera-se que os custos de produção do grafeno diminuam, tornando essas soluções adesivas mais acessíveis e amplamente utilizadas em diversas indústrias. Em resumo, as juntas adesivas com grafeno oferecem uma combinação única de força, durabilidade e funcionalidade, representando uma fronteira promissora na engenharia de materiais e na inovação tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANEA, Mariana D.; DA SILVA, Lucas FM. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 223, n. 1, p. 1-18, 2009.
- BAS PART SALES. Wing Doubler. 2024. Disponível em: <https://baspartsales.com/529004-7-cessna-wing-doubler-new-old-stock/>. Acesso em: 18/06
- BROXTERMAN, W. E. Structural adhesives: Trends and driving forces. Adhesive and Sealant Council's Convention & Exposition, New Orleans, LA (USA), Fall 2001.
- BUILDERBILL. Dovetail Joint. 2024. Disponível em: <http://www.builderbill-diy-help.com/dovetail-joint.html>. Acesso em: 18/06
- CAMARGO, Gerson Marcelo. Modelo colaborativo para desenvolvimento de tecnologia e inovação na indústria aeronáutica nacional de pequeno porte. 2021.
- CAMPOS, Luís Cláudio Barbosa et al. Uso de grafeno em aeronaves: perspectivas quanto à sua aplicação. 2022.
- COSTA, José Renato de Araujo. Fomento da inovação na Base Industrial de Defesa: uma necessidade para a manutenção das capacidades da Força Aérea Brasileira. 2020.
- DA SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G. Design of adhesively-bonded composite joints. In: **Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints**. Woodhead Publishing, 2015. p. 43-71.
- DA SILVA, L. F. M.; RODRIGUES, T. N. S. S.; FIGUEIREDO, M. A. V.; DE MOURA, M. F. S. F.; CHOUSAL, J. A. G. Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion*, v. 82, n. 11, p. 1091–1115, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00218460600948511>. Acesso em: 18/06
- DA SILVA, Lucas F. M.; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D. (Ed.). *Handbook of adhesion technology*. Springer Science & Business Media, 2011.
- FERREIRA, Marcos José Barbieri; NERIS, Celso. A inserção do Brasil no segmento de aviões de caça da indústria aeronáutica militar: o projeto FX-2. **IX Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos de Defesa**, 2016.
- KOELLER, Priscila; SQUEFF, Flávia de Holanda Schmidt. Como Atuam As estAtAis federAis nA polítiCA de CiênCiA, teCnologiA e inovAção brAsileirA?. **Boletim de Análise Político-Institucional**, 2018.
- MARQUES, Rosane Argou. O desenvolvimento da capacidade para inovação: as pequenas e médias empresas do setor aeronáutico brasileiro. 2017.
- MIRANDA, Zil. Sistema de inovação no setor aeronáutico: desafios e oportunidades para o Brasil. **Sistemas Setoriais de Inovação e Infraestrutura de Pesquisa No Brasil**, p. 169, 2016.

MORAES, Marcela Barbosa et al. Cultura de inovação em micro e pequenas empresas dos setores aeronáutico e de tecnologia da informação. **Exacta**, v. 15, n. 3, p. 441-456, 2017.

MOURA, Lucas Santana. Colagem de estruturas metálicas. 2016.

PONTIROLLI, Reginaldo. Encomenda tecnológica: possibilidade de aplicação em inovações de defesa na Força Aérea Brasileira. 2020.

RAPIDDIRECT. Fixações aeronáuticas. 2024. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/aerospace-fasteners/>. Acesso em: 18/06

SALERNO, Mario Sergio. Políticas de inovação no Brasil: Desafios de formulação, financiamento e implantação. **Inovação no Brasil: Avanços e desafios jurídicos e institucionais**, p. 79-96, 2017.

SCIENCEDIRECT. Utilização de Dado-joints. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000135>. Acesso em: 18/06

SILVA, João Pedro Ferreira. **Estudo de processo de fabrico avançado para estruturas aeronáuticas compósitas**. 2019. Tese de Doutorado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

SOUSA, Cairo Humberto da Cruz et al. **Compras públicas para inovação e offset na aeronáutica militar: o caso C-390**. 2023.