



Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica

Juliana Jeniffer Fernandes de Souza Rêgo, Dino Lincoln Figueiroa Santos, George Santos Marinho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário. Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP 59078.970

Resumo

Apresentam-se algumas etapas do desenvolvimento da aplicação de materiais compósitos à indústria aeronáutica, considerando-se desde os primórdios da aviação experimental até seu emprego na aviação comercial moderna. Dada à quantidade de metal que ainda é utilizado em aeronaves, focou-se o presente trabalho nas possibilidades que o uso dos compósitos representa na busca por segurança, eficiência e economia no setor aeronáutico.

Palavras-chave: Tecnologia de materiais; Compósitos; Indústria aeronáutica.

Abstract

An introductory study concerning the application of composite materials to the aeronautical industry is presented, considering from the beginning of experimental aviation to its use in modern commercial aviation. Given the amount of metal that is still used in aircrafts, this work focused on the possibilities of the use of composites in the search for safety, efficiency and economy in the aeronautic.

Keywords: Materials Technology; Composites; Aeronautical industry.

1. INTRODUÇÃO

O homem faz uso de materiais compósitos desde a pré-história, quando desenvolveu utensílios, ferramentas e armas necessários à sobrevivência. Nos primórdios da construção civil, misturava-se capim seco à argila para produzir tijolos mais resistentes. Na metalurgia, a combinação do cobre ao estanho resultou no bronze (uma liga resistente à compressão), e a combinação do cobre ao zinco permitiu produzir latão (utilizado em armas). No final do século XIX, ficou evidente que alguns ramos de atividade dependiam fortemen-

te de novos materiais para se desenvolver, especialmente a aviação.

Na medida em que os motores para propulsão aeronáutica se tornavam mais potentes e eficientes, as solicitações às estruturas das aeronaves aumentavam. Então, chegou-se a um impasse: a velocidade de voo estava limitada mais pela estrutura do que pela potência do motor. Foi fácil identificar que se tratava de um problema atinente à ciência dos materiais. Para resolvê-lo, teriam de ser investidos recursos vultosos na busca por soluções técnica e economicamente viáveis. Além disso, era imprescindível que as novas aeronaves du-

rassem o suficiente para que os investimentos tivessem retorno.

A durabilidade das aeronaves constitui parâmetro estratégico em qualquer companhia de aviação. Atualmente, os aviões são aposentados não por idade, mas por tempo de serviço, deixando de ser usados quando a manutenção não mais compensa os custos. Durante uma vida útil média que pode chegar a 30 anos, uma aeronave comercial moderna voa em torno de 60.000 horas, percorrendo 160.000 km e realizando mais de 20.000 operações de pouso-decolagem [5]. Há casos documentados de aeronaves que ultrapassaram o dobro desse tempo em operação, como o *Douglas DC-3* (fabricado desde 1935, que está em museu e continua em uso comercial), ou o bombardeiro *Boeing B-52* (usado pelas forças armadas norte-americanas desde 1954 até os dias atuais). Porém, como dito anteriormente, essas exceções implicam em aumento progressivo dos custos com manutenção. Expandir o ciclo de vida das aeronaves, portanto, resulta em economia.

A demanda industrial por materiais com elevada resistência mecânica, flexibilidade, leveza, baixo custo e durabilidade foi o vetor do desenvolvimento dos compósitos. O primeiro setor a fazer uso aeronáutico dos compósitos desenvolvidos pela engenharia de materiais foi a aviação militar, onde foram empregados em compartimentos subsidiários (carenagens, pequenas portas e superfícies de controle). Quando a tecnologia maturou, as aplicações estenderam-se às asas, fuselagem e estabilizadores. Os bons resultados obtidos na área militar permitiram estender o uso dos compósitos às aeronaves comerciais, com consequências imediatas: redução do consumo de combustível, aumento da capacidade de carga e ampliação da vida útil. Evidentemente, a aviação não foi o único campo a se beneficiar dessas vantagens.

A adoção de materiais compósitos na estrutura de aeronaves constituiu, na verdade, uma revolução na engenharia de materiais. A combinação de partes que diferem entre si, tanto na forma quanto na composição, resulta em um material com melhores propriedades. No projeto de materiais compósitos, cientistas e engenheiros podem mesclar propriedades melhores do que aquelas encontradas nas ligas metálicas, nas cerâmicas e nos materiais poliméricos [4].

No presente trabalho serão abordados aspectos históricos da evolução do uso de compósitos em aeronaves. A situação do Brasil nesse setor será brevemente discutida, onde serão apontadas algumas perspectivas.

2. EVOLUÇÃO DOS COMPÓSITOS NA AVIAÇÃO

Na fase embrionária da aviação (ver figuras 1 a 3), os veículos aeronáuticos foram construídos com o que a natureza melhor proporcionava em termos de combinação entre leveza e resistência mecânica – ou seja, fibras de origem vegetal (e. g., papel, vime e bambu) e animal (e. g., seda).



Fig. 1 – Balão em papel (1783) [18]

Em 1898, durante a construção do balão *Brasil*, Santos Dumont substituiu a seda chinesa, mais resistente, pela seda japonesa – que, embora cerca de 30 % menos resistente, era bem mais leve [8]. Desse modo, conseguiu construir o menor balão de sua época, com 113 m³, pesando apenas 35,5 kg e que podia ser transportado no porta-malas de um automóvel [20]. Assim, em 04 de julho de 1898, ele realizou com sucesso seu primeiro voo solo (Fig. 2).



Fig. 2 – Balão em seda (1901) [19]

Compósitos naturais ainda foram usados no desenvolvimento do moto-planador (irmãos Wright, em 1903) e do avião (Santos Dumont, em 1906). Durante a I Guerra Mundial (1914 – 1918), devido ao surgimento de motores mais potentes e, portanto, capazes de proporcionar mais velocidade, foi necessário aumentar a resistência das estruturas, razão pela qual os metais passaram a ser incorporados às aeronaves. Desse modo, no período pós-guerra, aço e ligas de alumínio constituíram a base necessária à consolidação da aviação como meio de transporte.

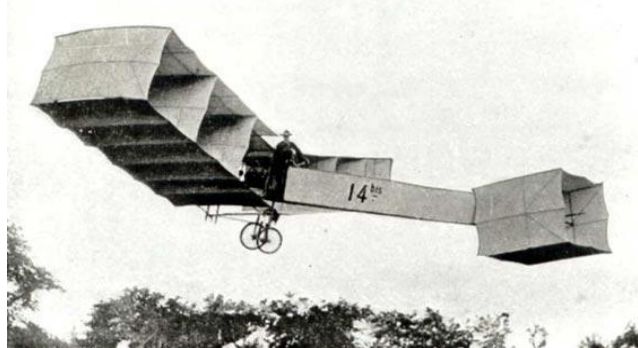


Fig. 3 – Avião em seda, bambu e vime (1906)^[19]

Os metais dominaram o cenário aeronáutico até o início da II Guerra Mundial (1939 – 1945), quando, novamente, foi necessário combinar leveza e resistência para atender aos esforços resultantes proporcionados pelos novos motores, especialmente os motores à reação [2].

A partir da década de 1950, foram introduzidos alguns compósitos com fibras de boro e de carbono. Isso permitiu atender ao crescimento logarítmico da aviação civil, que demandava aeronaves cada vez maiores e com maior capacidade de transporte de carga e passageiros. Porém, as demandas que revolucionariam a ciência dos materiais no século XX seriam aquelas decorrentes de problemas em uma nova área – a engenharia espacial [1].

Enquanto em 1947 a aviação superava a barreira do som em aeronaves voando a mais de 340 m/s, os projetistas de veículos espaciais tinham de lidar com situações em que a velocidade passava de 8.000 m/s.

Para viabilizar o projeto de exploração da Lua, na década de 1960, foi necessário desenvolver ligas cerâmicas capazes de suportar temperaturas próximas a 4.000 °C, comuns aos veículos tripulados que reentravam na atmosfera terrestre voando a 11.000 m/s.

A aviação civil foi justamente o setor que mais se beneficiou das inovações decorrentes da exploração espacial. O sucesso na substituição de diversos componentes aeronáuticos sedimentou o caminho para que, na década de 1970, os compósitos fossem combinados a matrizes metálicas, resultando em novos materiais, como, por exemplo, as ligas de boro – alumínio.

Em 1973, a empresa norte-americana DuPont desenvolveu o *kevlar*, uma fibra à base de aramida que logo encontrou aplicação em vários setores da engenharia [6].

Aos poucos, os compósitos começaram a integrar partes secundárias de aeronaves militares, como nos caças norte-americanos *F-14* (da Marinha americana) e *F-15* (da Força Aérea americana). A porcentagem foi aumentando, passando de 2 % no *F-15* para 19 % no *F-18* e 24 % no *F-22* [7]. O caça *AV-8B Harrier II* (desenvolvido pelo consórcio McDonnell – Douglas) foi construído com 40 % de seu peso em compósito (epóxi-carbono).

A partir do início da década de 1980, caças desenvolvidos na Europa começaram a incorporar compósitos em suas estruturas. O francês *Rafael* (da Dassault) tem 26 % e os suecos *Gripen* (da Saab) e *Mako* (da Airbus) possuem, respectivamente, 20 % e 25 % [12].

Paralelamente aos avanços na aviação militar, os compósitos para uso na aviação civil observaram desenvolvimento exponencial na década de 1980.

Entre 1983 e 1985, as aeronaves *A300* e *A310*, da Airbus, foram produzidas mediante substituição de 2000 peças metálicas por 100 peças de compósitos [12].

No século XXI, a ciência dos materiais permitiu que a indústria aeronáutica ultrapassasse a marca dos 50 % de compósitos incorporados em aeronaves – *Airbus A350* e o *Boeing 787* (Fig. 4). Ressalte-se que, de acordo com ambas empresas, apesar do progresso atingido, ainda há um longo caminho de muito investimento em pesquisa pela frente.

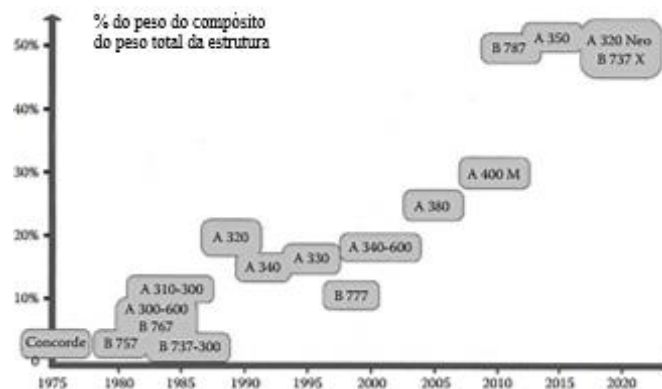


Fig. 4 – Evolução do percentual de compósitos incorporados em aeronaves civis. Adaptado: (Gay, 2014).

3. COMPÓSITOS APLICADOS À INDÚSTRIA

Há cerca de 25 anos, entre 80 % e 90 % das estruturas das aeronaves eram constituídas de ligas de alumínio, titânio e aço (Fig. 5). Com o avanço da potência e, conseqüentemente, do aumento da velocidade, novos limites foram impostos ao voo. Em alguns casos, os limites não podiam ser superados a partir de aeronaves construídas com aquelas ligas. Isso alavancou o desenvolvimento de novos materiais, permitindo que a indústria aeronáutica substituísse componentes metálicos por compósitos capazes de combinar, entre

outras propriedades: rigidez, resistência ao calor, elevada resistência mecânica, baixa densidade e durabilidade [13].

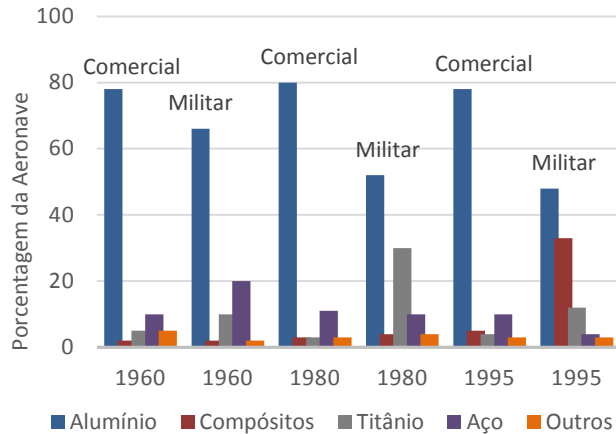


Fig. 5 – Domínio do Alumínio em Aeronaves.
Adaptado: (Campbell, 2006).

Os compósitos são formados por dois ou mais elementos com características distintas, denominados matriz e reforço. A matriz serve como apoio para sustentar o reforço, que pode ser de material fibroso ou particulado. Além disso, ela deve: garantir que o reforço permaneça na posição certa, proteger o compósito contra corrosão, distribuir cargas sobre o reforço e aumentar a resistência ao cisalhamento. Portanto, a escolha da matriz depende da aplicação que será dada ao compósito [5].

Existem três tipos de matrizes: polimérica – PMC (polymer matrix composites), metálica – MMC (metal matrix composites) e cerâmica – CMC (ceramic matrix composites).

As matrizes poliméricas possuem muitas aplicações na indústria aeronáutica, mas estão limitadas aos casos em que as temperaturas são relativamente baixas.

As matrizes metálicas resistem a altas temperaturas e têm boa capacidade de transferência de calor, fato que ajuda na dissipação de energia em aeronaves. Contudo, devido ao processo de fabricação complexo, têm custo de produção elevado.

A matriz cerâmica é apropriada para uso em ambientes hostis, com alta temperatura e sujeitos a ataques químicos. Entretanto, são frágeis, o que é uma desvantagem em algumas aplicações aeroespaciais. Assim como as matrizes metálicas, a fabricação das matrizes cerâmicas é um processo muito lento e caro [15].

Os compósitos com reforço particulado contêm uma matriz e partículas de algum material mais duro e rígido. Sob efeito de uma carga externa, dificultam a propagação das discordâncias através da matriz, restringindo a deformação plástica e melhorando as resistências à tração e à dureza.

Compósitos reforçados com fibras são semelhantes aos que possuem material particulado, exceto que o reforço se dá

por meio de material filamentososo – a fibra. A matriz possui alta resistência enquanto a fibra é rígida e forte, resultando em um material com alta resistência e módulos específicos excepcionalmente elevados [4].

Uma propriedade que diferencia os compósitos de fibras dos particulados é a anisotropia – ou seja, a variação das propriedades em função da orientação geométrica dos constituintes. Compósitos reforçados com partículas possuem as mesmas propriedades físicas independentes da direção e, portanto, são denominados isotrópicos.

Por sua vez, os compósitos reforçados com fibras são anisotrópicos, i. e., suas propriedades variam de acordo com a direção de aplicação da tensão ou carga. O tamanho e a concentração das fibras influenciam diretamente no desempenho do compósito, onde as fibras de comprimento contínuo e distribuição uniforme proporcionam comparativamente melhores propriedades gerais [4].

A fibra de vidro está entre os materiais compósitos mais utilizados da atualidade, consequência da boa relação que proporciona entre baixo custo e propriedades mecânicas adequadas à diversas aplicações. Tem baixa densidade, elevada resistência a corrosão e é fácil de manusear. Sua relação peso / resistência permite que concorra técnica e economicamente com o alumínio [15].

A fibra de carbono, uma das maiores inovações da engenharia de materiais para uso aeronáutico, é mais resistente e tem módulo de elasticidade superior ao da fibra de vidro, tornando-a mais requisitada para aplicação às estruturas que exigem mais rigidez. Apresenta baixa densidade, baixo coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica relativamente alta – resultando dessa última, contudo, a maior capacidade para causar corrosão galvânica em contato direto com alumínio. Além disso, é significativamente mais cara [15].

O *Kevlar* (ou fibra de aramida) é um compósito com amplo uso na indústria aeronáutica. Graças à elevada resistência ao cisalhamento, é capaz de suportar altos impactos e absorver grande quantidade de energia durante os processos de fratura. Porém, esse aspecto compromete a trabalhabilidade. É mais barato que as fibras de carbono para uso aeroespacial, e mais caro que as fibras de vidro. Apresenta alta resistência à tração, mas nem tanto à compressão. Por ser um polietileno, sua aplicação é marcadamente limitada pela temperatura [17].

Por ser mau condutor de calor e ter peso superior ao epóxi – carbono, o compósito epóxi com fibra de vidro ou kevlar tem aplicação limitada às carenagens de portas de carga, portas de trem de pouso, karmans, radomes e abas de borda. Recentemente, fibras de vidro e kevlar foram substituídos por carbono, que tem melhores propriedades mecânicas [10].

O compósito de epóxi – carbono é o mais utilizado na indústria aeronáutica por ter as mesmas características do epóxi – vidro e do epóxi – kevlar. Contudo, está limitado aos casos onde a temperatura não exceda 120 °C. Sua resistência ao impacto é inferior ao epóxi – vidro, é mais difícil de produzir e, tem baixa resistência mecânica, sendo mais propenso a defeitos de fabricação e mais suscetível aos raios. É usado nas nervuras das asas, ponta de asa, estabilizadores verticais

e horizontais, fuselagem, caixa de asas central, ailerons, spoilers, abas, armadilhas, suportes, pisos e antepara de pressão [10].

Entre as partes de aeronaves onde os compósitos são mais usados, destacam-se: asas, estabilizadores vertical e horizontal, feixe de quilha e seções de fuselagem. Além disso, também são aplicados em elementos de controle de voo, em carenagens e no interior da aeronave – como portas, pisos e painéis de revestimento da cabine [10].

Considera-se o Airbus A380 um marco da tecnologia dos compósitos da aviação moderna. Nele, pela primeira vez se usou o CFRP (carbon fiber reinforced plastic, ou compósito reforçado com fibras de carbono) às nervuras das asas. Além das asas, depois, o CFRP foi aplicado às vigas do piso e ao anteparo traseiro. O Airbus A350 – XWB faz uso de CFRP nas seguintes partes: fuselagem, caixilhos, caixilhos de janela, cliques e portas. O Boeing 787 Dreamliner é constituído de 23 toneladas de fibra de carbono, distribuídas na fuselagem, asas, cauda, portas e interior, conforme mostrado na Fig. 6 [11].

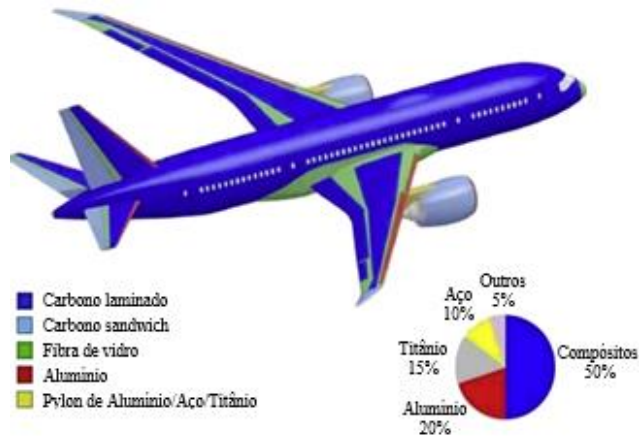


Fig. 6 – O uso de compósitos no Boeing 787.
Adaptado: (Brown, 2014)

O caso específico do Boeing 787 Dreamliner, onde a quantidade de compósito de carbono utilizado certamente impressiona qualquer engenheiro, pode levar à uma noção deturpada sobre o processo de substituição de constituintes de aeronaves.

Ao contrário do que eventualmente se possa imaginar, a substituição de uma liga metálica por um compósito aeronáutico não é uma decisão pura e simples de tirar um elemento e colocar outro mais leve.

O processo de concepção de qualquer aeronave moderna envolve três etapas distintas, a saber:

- 1) design conceitual,
- 2) design preliminar e

3) design detalhado.

Durante o design conceitual, os materiais compósitos não constituem as preocupações mais relevantes dos projetistas, representando apenas uma variável secundária. Nessa etapa, questões básicas são levantadas a respeito do arranjo da configuração, do tamanho, do peso, da capacidade de transporte, do desempenho e da segurança da aeronave.

Na fase de design preliminar, são relevantes os dados obtidos em testes previamente realizados sobre aspectos como: aerodinâmica, propulsão, resistência estrutural, estabilidade e controle.

Somente durante o design detalhado, quando, de fato, são desenvolvidas as peças para fabricação e testes, considerações sobre características dos compósitos ganham relevância e determinam estratégias para tomada de decisão. Nessa fase, os engenheiros tendem de aumentar a quantidade de compósitos na estrutura da aeronave com base nos resultados dos estudos e testes previamente realizados [22].

Estudos, simulações, experimentos e análises (principalmente de erros) constituem o cotidiano da equipe de P&D da indústria aeronáutica.

Laboratórios modernos e softwares complexos têm permitido significativos avanços na incorporação de compósitos às aeronaves, garantindo segurança, força e leveza, além de economia e eficiência. Entretanto, como se sabe, dentro desse setor extremamente competitivo, há outros aspectos que determinam as tendências de mercado.

4. ASPECTOS DA UTILIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

A aviação comercial é responsável pela emissão de aproximadamente 2,5 % de todos os gases de efeito estufa na atmosfera terrestre.

Prevê-se que até a metade do século XXI esse valor poderá aumentar em até 300 % [21]. Associe-se a esse fator negativo o fato de que a demanda crescente por combustível de aviação (querosene e gasolina) resultou no aumento progressivo dos preços (Fig. 7).

O estudo sobre os materiais compósitos na aeronáutica é estratégico para que se chegue às *Green Aircrafts*, como são denominadas as “aeronaves verdes” – aquelas com as quais se pretende reduzir o impacto ambiental causados pelos aparelhos atualmente em operação.

Engenheiros têm buscado meios para reduzir o consumo de combustível das aeronaves, melhorando a eficiência dos motores e desenvolvendo componentes eletrônicos que permitem usar menos sistemas hidráulicos e pneumáticos no controle do voo. Essas metas podem ser mais facilmente alcançadas mediante a redução do peso das aeronaves. Como visto, decorre daí o interesse em substituir materiais metálicos.

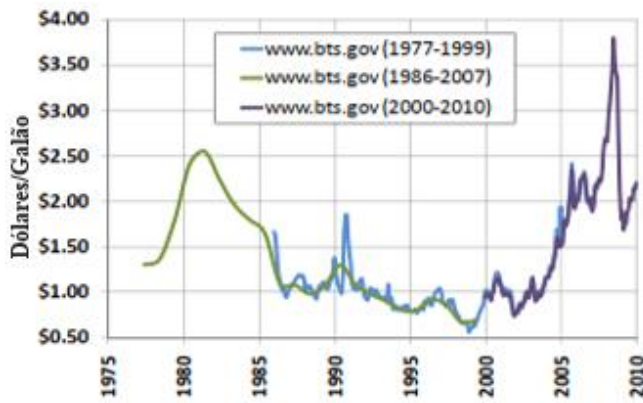


Fig. 7 – O crescimento e volatilidade do preço do combustível. Adaptado: (Bradley & Droney, 2011).

A substituição de partes metálicas das aeronaves por materiais compósitos, conforme citado, resulta, entre outras consequências, em uma significativa redução de peso, podendo chegar a diminuir até mais de 30 % do peso de um avião, reduzindo significativamente o consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de gases [3].

Entre as desvantagens associadas aos compósitos, destacam-se: elevados investimentos em P&D, tempo para desenvolvimento, altíssimo custo de produção e modificação dos procedimentos de manutenção. Em muitos casos, vários anos de trabalho são requeridos para desenvolvimento de um novo material, ao final dos quais o resultado pode ser incompleto, atendendo apenas a parte das necessidades da aeronáutica. Vários aspectos contribuem para agravar o risco de insucesso.

O compósito de epóxi (matriz polimérica) com fibra de vidro ou kevlar (fibra de aramida), após consumir muito tempo e recursos para seu desenvolvimento, resultou em um material com elevada resistência mecânica, alta deformação elástica e elevada resistência à fadiga. Contudo, ficou limitado às situações onde a temperatura fica abaixo de 80 °C [10].

A resistência de um compósito é afetada pela proporção de fibra em relação à matriz, pelo teor de umidade, tempo de secagem e exposição ao calor e à radiação ultravioleta

O processo de manutenção das partes constituídas de compósitos é penoso. A execução dos reparos requer programas computacionais caros, que garantam à restauração conformidade com as especificações do projeto original [22].

5. COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA DO BRASIL

Contemporaneamente, o uso de compósitos tem aumentado em dois setores: construção civil e transportes. Muitos fabricantes de aviões, helicópteros e VANTs (veículo aéreo não tripulado) estão adotando compósitos em seus projetos, seja para integrar componentes externos ou internos. Há também o setor aeroespacial, onde fabricantes têm substituído partes de metal dos veículos por compósitos [9].

O Brasil é um dos líderes globais no uso de materiais de alto desempenho. Muitas empresas do ramo aeronáutico estão usando compósitos em seus produtos.

A empresa AeroÁlcool lançou os modelos *Volato 200* e *Volato 400*, fabricados de compósitos.

A Novaer possui uma equipe técnica com vasta experiência em tecnologia de compósitos, concorrendo com o modelo A-29 Super Tucano e o mais recente B-250, aeronave de ataque leve construída em fibra de carbono.

A Helibras usa compósitos em capôs, carenagens do cone de cauda e em estruturas intermediárias do modelo *EC72*.

A Inbra Aerospace iniciou uma parceria com a sueca Saab e começa a produzir componentes em compósitos para aeronaves supersônicas [16].

Por atuar em um ramo intrinsecamente voltado ao mercado internacional, portanto, em contínua modernização, a indústria aeronáutica nacional, a exemplo das estrangeiras, está empenhada na substituição de partes metálicas de aeronaves por materiais compósitos.

Desenvolver aeronaves constituídas de materiais compósitos modernos, com alto valor tecnológico agregado, não é meramente a realização do desejo de acompanhar uma tendência. Muito pelo contrário, é uma estratégia vital para sobrevivência da indústria nacional. Deve-se evitar esforços para desenvolver projetos que permitam colocar no mercado aparelhos rápidos, eficientes, econômicos, versáteis e seguros, com grande capacidade de transporte, além de identificados às questões de ordem ambiental. Trata-se de uma necessidade, quando não de uma obrigação.

6. PERSPECTIVAS

Obviamente, além das fibras aqui consideradas, existem outras que podem ser aproveitadas para desenvolvimento de compósitos destinados a suprir demandas presentes e futuras da indústria aeronáutica.

A fibra de boro apresenta elevada resistência à compressão. Todavia, seu custo elevado limita a possibilidade de uso em curto prazo, carecendo de mais pesquisas e, portanto, de mais investimentos.

Em médio prazo, as fibras de carbeto de silício, polietileno e óxido de alumínio podem configurar um nicho promissor para criação de novos compósitos destinados à substituição de partes metálicas de aeronaves.

Há parcerias estabelecidas entre indústrias do setor aeroespacial e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Contudo, os exemplos são escassos.

Alguns dos trabalhos de P&D desenvolvidos nas instituições dedicadas aos compósitos estão focados na melhoria das propriedades dos materiais, no estudo de interface fibra – matriz, no tratamento de superfícies de reforço e na substituição de componentes de aeronaves [14].

Em longo prazo (ou, talvez, médio), não se deve descartar a possibilidade de aproveitamento das fibras vegetais para fins aeronáuticos [10].

Graças à diversidade de sua vegetação, o Brasil dispõe de ampla variedade de fibras vegetais, faltando apenas identificar as mais promissoras para produção de compósitos, alguns deles, talvez, destinados à indústria aeroespacial.

O país possui recursos humanos com elevada qualificação para desenvolvimento de projetos de P&D sobre o aproveitamento de fibras vegetais para produção de compósitos aeronáuticos.

Há uma quantidade razoável de instituições (e. g., universidades e institutos federais) dedicadas ao estudo das fibras vegetais, destacando-se entre elas o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IEA), do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) do Comando da Aeronáutica.

Conclui-se que, desde que se promova a concomitância entre interesse e recursos financeiros, especialmente aqueles provenientes do setor privado, há grandes chances de que o Brasil conquiste avanços no desenvolvimento de compósitos para uso aeronáutico e, inclusive, espacial.

AGRADECIMENTO

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA), da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

REFERÊNCIAS

- [1] Balasubramanian, M., 2014, “Composite Materials and Processing”, Ed. CRC Press Taylor and Francis Group, New York, USA, 622p.
- [2] Barros, H.L., 2006, “Santos-Dumont e a Invenção do Avião”, Brazilian Physical Research Center, Rio de Janeiro, 20 p.
- [3] Bradley, M.K., Dronney, C.K., 2011, “Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report”, by NASA Langley Research Center and The Boeing Company.
- [4] Callister, W.D., Rethwisch, D.G.. 2012. “Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução” 41 Edition, Rio de Janeiro, Brazil, 740 p.
- [5] Campbell, F.C., 2006, “Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials”, Ed. Elsevier Ltd. First Edition, Oxford, UK, 617 p.
- [6] Daniel, M.I., Ishai, O., 2006, “Engineering Mechanics of Composite Materials”, Ed. Oxford University Press, Second Edition, New York, USA, 463 p.
- [7] Deo, R.B., Starnes, J.H.Jr., Holzwarth, R.C., 2001, “Low-Cost Composite Materials and Structures for Aircraft Applications” published in RTO-MP-069(II), Loen, Noruega.
- [8] Dias, A.B., 2007, “Santos Dumont: O Inovador”, Ed. Vieira e Lent, Rio de Janeiro, Brazil, 160 p.
- [9] Ferreira, J.C., 2017, “Um Breve Histórico da Aviação Comercial Brasileira”, Proceedings of the 12th Brazilian Congress of Economic History, Niterói, Brazil, 27 p.
- [10] Gay, D., 2015, “Composite Materials Design and Applications”, Ed. CRC Press Taylor and Francis Group, Third Edition, New York, USA, 624p.
- [11] Kesarwani, S., 2017, “Polymer Composites in Aviation Sector”, Published by International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 6, Issue 06, pp. 518-525.
- [12] Quilter, A., 2001, “Composites in Aerospace Applications”, HIS White Paper.
- [13] Rana, S., Fanguero, R., 2016, “Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering”, Ed. Elsevier Ltd. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 70, 480 p.
- [14] Rezende, M.C., Botelho, E.C., 2000, “O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial”, Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 10, nº2. pp. 4-10.
- [15] Shackelford, J.F., 2008, “Ciência dos Materiais”, Pearson Prentice Hall, Sixth Edition, São Paulo, Brazil, 575 p.
- [16] Ubiratan, E., Agmont, G., 2015, “Os Desafios da Indústria Nacional”, Published by Aero Magazine, vol 249. Brazil.
- [17] Zanatta R. Materiais Compósitos na Aviação. Aviação 2012. Disponível em: <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>>. Acesso em: 28, abril 2020
- [18] Mais Leve que o ar – II. Sonhar Voar 2006. Disponível em: <<http://sonharvoar.blogspot.com/2006/04/5-mais-leve-que-o-ar-ii.html>>. Acesso em: 28, abril 2020.
- [19] Balão-Brasil. Museu Virtual Santos Dumont. Disponível em: <<http://www.museuvirtuaisantosdumont.com.br/balao-42>>. Acesso em: 3, abril 2020.
- [20] Balão Brasil. Cabangu. Disponível em: <http://www.cabangu.com.br/pai_da_aviacao/2-balao/3-brasil.html>. Acesso em: 28, abril 2020.
- [21] A fumaça ruim que ameaça a aviação e envergonha os passageiros. El País, 2019. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2019/06/21/ciencia/1561139209_974079.html>. Acesso em: 28, abril 2020.

[22] Raymer, D.P., 2012, "Aircraft Design: A Conceptual Approach", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 5th edition. pp 3-10, 361-368.

[23] Brown, G., 2014, "The Use of Composite in Aircraft Construction". Disponível em: <<https://vandaair.com/2014/04/14/the-use-of-composites-in-aircraft-construction/>>. Acesso em: 02, maio 2020.