



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

DENIS RODRIGUES DA ROCHA

**ESTRUTURAS DE AERONAVES: ANÁLISE DO AUMENTO DA
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**

Palhoça

2020

DENIS RODRIGUES DA ROCHA

**ESTRUTURAS DE AERONAVES: ANÁLISE DO AUMENTO DA
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Ciências Aeronáuticas, da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Angelo Damigo Tavares, MSc

Palhoça

2020

DENIS RODRIGUES DA ROCHA

**ESTRUTURAS DE AERONAVES: ANÁLISE DO AUMENTO DA
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**

Esta monografia foi julgada adequada à obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas e aprovada em sua forma final pelo Curso de Ciências Aeronáuticas, da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 23 de novembro de 2020

Orientador: Prof. Angelo Damigo Tavares, MSc

Prof. Antônio Carlos Vieira de Campos, Esp

Dedico este trabalho a minha família, que
sempre impulsionaram e apoiaram meus
estudos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade e a meus pais por sempre me apoiarem. Em especial ao Sr. Luiz Carlos e Sr. Miguel Arcanjo, ambos especialistas em estruturas aeronáuticas e que, a mim, são base e exemplo profissional. Sou grato também por todo o apoio prestado pela equipe da Unisul, nesses anos de estudos.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo geral compreender de que forma a evolução aeronáutica contribuiu para o aumento de materiais compósitos em estruturas de aeronaves. Quanto aos fins, caracterizou-se como exploratória, com procedimento bibliográfico e abordagem qualitativa. Observou-se que, desde os primórdios da aviação, os inventores de aeronaves focaram na escolha dos materiais que seriam usados na construção de seus aviões, com o propósito de melhorar resistência e desempenho estrutural e isso se evidenciou pelo aumento gradual da utilização de compósitos estruturais em diferentes áreas das aeronaves. Analisou-se as características de construção e desempenho dos materiais compósitos e as principais fabricantes quanto ao uso desses materiais inovadores. Notaram-se, no decorrer do estudo, as vantagens do aumento desses materiais tecnológicos em fuselagens e que aviação está em constante mudança em diversos cenários, principalmente na parte de fabricação de aviões. Verificou-se, ainda, que a maioria das aeronaves já utilizavam materiais inovadores desde a segunda guerra mundial, uma vez que o uso de tais materiais ganhou impulso por serem resistentes, leves e garantirem boa eficiência aerodinâmica. Adicionalmente, percebeu-se que fatores como economia, segurança operacional e medidas de redução de degradação do meio ambiente contribuíram para o atual aumento de compósitos em estruturas de aeronaves.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Estruturas de aeronaves. Eficiência aerodinâmica. Economia. Segurança operacional.

ABSTRACT

This research aimed to understand how aeronautical evolution contributed to the increase of composite materials in aircraft structures. As for the purposes, it was characterized as exploratory, with bibliographic procedure and qualitative approach. It was observed that, since the beginning of aviation, aircraft inventors focused on the choice of materials that would be used in the construction of their aircraft, with the purpose of improving strength and structural performance and this was evidenced by the gradual increase in the use of structural composites in different areas of the aircraft. The construction characteristics and performance of composite materials and the main manufacturers were analyzed for the use of these innovative materials. During the study, the advantages of increasing these technological materials in fuselages were noted and that aviation is constantly changing in several scenarios, especially in the aircraft manufacturing part. It was also found that most aircraft already used innovative materials since the Second World War, since the use of such materials gained momentum because they are resistant, light and ensure good aerodynamic efficiency. Additionally, it was noticed that factors such as economy, operational safety and measures to reduce environmental degradation contributed to the current increase in composites in aircraft structures.

Keywords: Composites materials. Aircraft structures. Aerodynamic efficiency. Economy. Operational safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação de materiais compósitos	16
Figura 2 - Compósitos laminados.....	20
Figura 3 – Seção da pá do rotor de helicóptero	22
Figura 4 – Painéis de <i>Honeycomb</i>	25
Figura 5 - <i>Understanding Honeycomb Panels</i>	26
Figura 6 - A350 XWB <i>Composite structures</i>	28
Figura 7 - A380 <i>materials overview</i>	29
Figura 8 - Boeing 787 <i>composite parts</i>	32
Figura 9 - S-75 ACAP	36

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Graus Celsius
FWD	<i>Forward</i>
FT	<i>Feet</i>
°F	Graus <i>Fahrenheit</i>

LISTA DE SIGLAS

CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
MMC	<i>Metal matrix composites</i>
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PAN	Poliacrilonitrila
PEI	<i>Polyetherimide</i>
PMC	<i>Polymer matrix composites</i>
PMI	<i>Polymethacrylimide</i>
PVC	Policloreto de vinila
XWB	<i>Extra wide body</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 METODOLOGIA.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.2 COMPÓSITOS UTILIZADOS NA AVIAÇÃO.....	16
2.2.1 Fibra de Vidro	16
2.2.2 Fibra de Carbono	17
2.2.3 Fibra de Aramida.....	18
2.2.4 Laminados.....	19
2.2.5 Padrão <i>Sandwich</i>	20
2.3 APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POR FABRICANTES DE AERONAVES	26
2.3.1 Empresa Airbus	27
2.3.2 Empresa Boeing.....	31
2.3.3 Empresa Embraer	33
2.3.4 Empresa COMAC	34
2.3.5 Empresa Lockheed Martin	35
2.4 FATORES CONTRIBUINTES PARA O AUMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM ESTRUTURAS DE AERONAVE	36
2.4.1 Desempenho Estrutural	37
2.4.2 Fator Econômico.....	37
2.4.3 Fator Ambiental.....	38
2.5 PRINCIPAIS VANTAGENS PARA O SETOR DA AVIAÇÃO.....	39
3 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O sonho de ganhar os céus foi o que deu asas aos homens, e hoje, por meio da engenharia, pode-se cruzar de um ponto a outro do planeta, e até fora dele, com segurança e eficiência. Desde os primórdios da aviação, inventores de aeronaves como Alberto Santos Dumont e os irmãos Orville e Wilbur Wright tiveram que selecionar os materiais para construção de suas aeronaves, seguindo alguns critérios para seleção. Segundo Mouritz, (2012 p. 37, tradução nossa) “o principal critério utilizado na seleção de materiais para a primeira geração de aeronaves (1903-1930) foi a máxima força para o peso mínimo”. Dados os critérios e escolhido a matéria prima para a construção das primeiras aeronaves, obteve-se o melhor material da época, a madeira. Com o passar do tempo e eventual aumento no tamanho dos aviões, viu-se necessário o uso de matérias estruturalmente melhores e mais leves.

A exigência de alta força-peso permaneceu central para a escolha do material, como tinha com aeronaves anteriores, mas outros critérios, como alta rigidez e durabilidade também se tornou importante. Rigidez mais alta permitiu projetos mais elegantes e mais compactos, e, portanto, melhor desempenho. Esses novos critérios não só exigiram novos materiais, mas também o desenvolvimento de novos métodos de produção para transformar esses materiais em componentes de aeronaves (MOURITZ, 2012, p. 38, tradução nossa).

Surgia, então, a era dos metais – aço, alumínio, seguido pelo magnésio e titânio. O aço é extremamente resistente, porém muito pesado para aplicações em partes estruturais de aviões. Com isso, o alumínio tem sido utilizado em estruturas aeronáuticas desde 1920, devido ao aumento das cargas de pressão nas fuselagens, tamanho das novas aeronaves e principalmente a sua leveza. A indústria de metais testou diversos materiais com a possibilidade de combinar com o alumínio afim de melhorar suas propriedades mecânicas e conseguiu-se um resultado eficiente, combinando uma porcentagem de cobre e outros elementos à liga. O Duralumínio¹ foi o responsável pela utilização do alumínio na aviação a partir de 1920 (MOURITZ, 2012, p. 49).

O magnésio é mais leve que o alumínio cerca de 40%, porém, as suas propriedades - como a resistência a corrosão muito baixa - limitam seu uso em estruturas maiores na aviação. Esse material foi usado em construção de aeronaves pelos alemães e japoneses durante a primeira e segunda guerra mundial, respectivamente, como uma alternativa devido ao suprimento limitado de alumínio. Com o aumento da velocidade de

¹ Duralumínio é uma liga de alumínio com 4,4% de cobre, 1,5% de magnésio 0,6% de manganês que é reforçado pelo tratamento térmico

aeronaves militares, viu-se necessário a utilização de materiais capazes de resistir a altas temperaturas e pressões elevadas, o qual levou os engenheiros a projetarem aviões com partes estruturais feitas a base de titânio, que é mais resistente que o alumínio e magnésio. Porém uma desvantagem desse material é o seu preço elevado, fator limitador do seu uso às partes rígidas das aeronaves comerciais como o trem de pouso e peças dos motores (MOURITZ, 2012, p. 52).

Com o aumento da tecnologia e o desenvolvimento industrial alcançado após a segunda guerra mundial, surgiram os materiais compósitos que “são leves, rígidos, fortes, resistentes à fadiga e resistentes à corrosão” (MOURITZ, 2012, p. 60, tradução nossa). Isso propiciou uma grande vantagem sobre os materiais metálicos na aviação, devido ao seu baixo peso e a possibilidade de produzir peças em variadas formas. Atualmente, os materiais compósitos são estudados e utilizados por grandes fabricantes de aviões e helicópteros, bem como no setor aeroespacial.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

De que forma a evolução aeronáutica contribuiu para o aumento de materiais compósitos em estruturas de aeronaves?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Compreender de que forma a evolução aeronáutica contribuiu para o aumento de materiais compósitos em estruturas de aeronaves.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar os aspectos históricos e conceituais referentes à utilização de materiais compósitos em estruturas de aeronaves;
- b) Conhecer os materiais empregados na construção aeronáutica e o grau de emprego de materiais compósitos em aeronaves;
- c) Identificar os principais fabricantes de materiais compósitos e as vantagens da aplicação dessa tecnologia no meio aeronáutico; e
- d) Entender os benefícios do uso de materiais compósitos para o setor aeronáutico e para o incremento da segurança operacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

O mundo da aviação está em constante crescimento e muitas tecnologias estão surgindo. Em meio à era digital, que por sinal está bastante avançada, a questão da estrutura de aeronaves acaba ficando fora de foco do viés estudantil.

Atualmente, as grandes fabricantes de aeronaves têm investido em estrutura, com ênfase em materiais de alta tecnologia. O aumento desse material, tema principal desta pesquisa, chegou a um patamar onde se tem aeronaves construídas numa totalidade de materiais compósitos.

Nesse sentido, é de suma importância uma pesquisa bibliográfica detalhando tais aspectos, com a finalidade de relatar ao leitor o atual cenário da aviação em relação à composição estrutural das aeronaves, o histórico de evolução e alguns pontos relevantes nas escolhas dos tipos de materiais compósitos, os problemas envolvidos e as principais vantagens acerca do emprego de novos materiais. Em suma, esta pesquisa poderá ser de incentivo para futuros profissionais da aviação brasileira, visto que, atualmente, a área de profissionais que trabalham em estruturas de aeronaves no país tem sofrido um declínio considerável na quantidade de pessoas. No setor de manutenção de aeronaves, a maioria dos novos profissionais optam por atuar em motores e aviônicos, devido ao grande avanço tecnológico, porém, observa-se que, com o passar do tempo, possivelmente ocorrerá falta de mão de obra especializada na área estrutural.

A motivação principal pessoal para um trabalho voltado à área de estruturas de aeronaves é a agregação de conhecimentos. Em face à atividade profissional desempenhada por este autor no âmbito da manutenção de aeronaves por quatro anos, estudando no campo técnico, e há pouco mais de um ano atuando na prática em manutenção aeronáutica, pôde-se constatar que o segmento de estruturas e reparos estruturais é o de menor interesse entre os novos formandos na carreira da aviação.

1.4 METODOLOGIA

A presente pesquisa se caracterizou como exploratória, com procedimento de pesquisa bibliográfico, por meio de livros como “*Introduction to Aerospace Materials*”, de Adrianz P. Mouritz; “Ciências e Engenharia de Materiais”, de Callister e Rethwisch. Quanto aos meios, empregaram-se como materiais bibliográficos além desses livros:

- a) Notícias relacionadas aos fabricantes de aeronaves tais como Airbus, Boeing, Embraer, Lockheed Martin, Bell, COMAC, entre outras;
- b) *Sites da internet* com assuntos voltados às estruturas de aeronaves e novas tecnologias de materiais em uso nesse segmento;
- c) Revistas de tecnologia aeronáutica, entre outros materiais, que serviram de base técnica.

No que tange à abordagem, a presente pesquisa se caracterizou como qualitativa, pois demonstrou uma análise de dados voltadas ao atual cenário da aviação no tocante aos materiais utilizados em estruturas de aeronaves.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O surgimento de tecnologia permitiu à indústria desenvolver materiais com menor peso e maior desempenho estrutural se comparado com as antigas ligas metálicas. Dessa forma, desencadeou-se a utilização de materiais conhecidos como compósitos em diversos segmentos de fabricação e, principalmente, na área de construção de aeronaves.

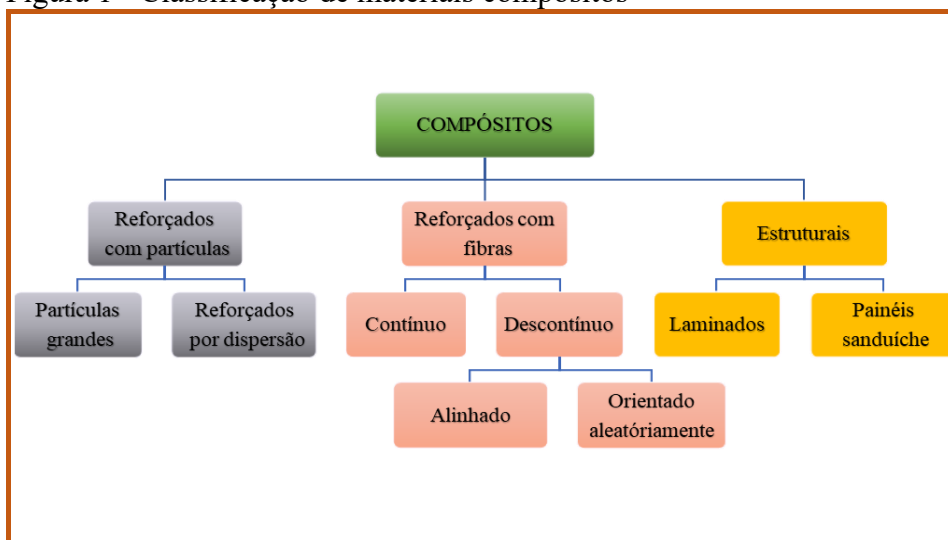
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

“Materiais compósitos” é a expressão que representa uma junção de pelo menos dois materiais com a intenção de se obter um terceiro produto, com melhores características, a fim de suprir uma necessidade específica. Tais materiais são gerados a partir de ligação química entre uma matriz - material responsável por envolver o reforço, prover proteção e distribuir esforços uniformemente - e um reforço.

A matriz é o material no qual as fibras são “mergulhadas”. Elas podem ser subdivididas em 3 grandes grupos. O primeiro e mais comum é o grupo das matrizes poliméricas, popularmente conhecidas como “resinas” e que podem ser termoendurentes (em inglês: “*themosetting*”) ou termoplásticas. O segundo grupo é o das matrizes metálicas que podem envolver virtualmente qualquer metal. Por fim, temos as matrizes cerâmicas. Cada grupo tem propriedades típicas distintas que apresentam vantagens e desvantagens (ZANATTA, 2012, p. 7).

Os reforços na união compósita têm a função de estabelecer uma alta resistência aos esforços mecânicos e são constituídos de materiais fibrosos, particulados ou estruturais. Os materiais fibrosos podem ser feitos de diversos tipos, porém os mais utilizados são as fibras de vidros, carbono e aramida (ZANATTA, 2012). Os reforços particulados são na sua maioria partículas grandes, assim como o concreto. Já os estruturais são divididos em laminados e sanduíches, como ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Classificação de materiais compósitos



Fonte: O autor, adaptado de Callister (2012)

Dentre esses materiais, os reforçados por fibras e estruturais foram escolhidos para utilização na construção de aeronaves e são utilizados por grandes fabricantes do setor aeronáutico atualmente.

2.2 COMPÓSITOS UTILIZADOS NA AVIAÇÃO

Na área da aviação, tanto civil como militar, empregam-se diversos tipos de materiais compósitos dependendo do tipo de aeronave e das condições as quais se expõem. Essa tecnologia é empregada desde pequenas carenagens, em aviões e helicópteros, até partes estruturais importantes, como longarinas e nervuras, e em revestimento de grandes aeronaves modernas.

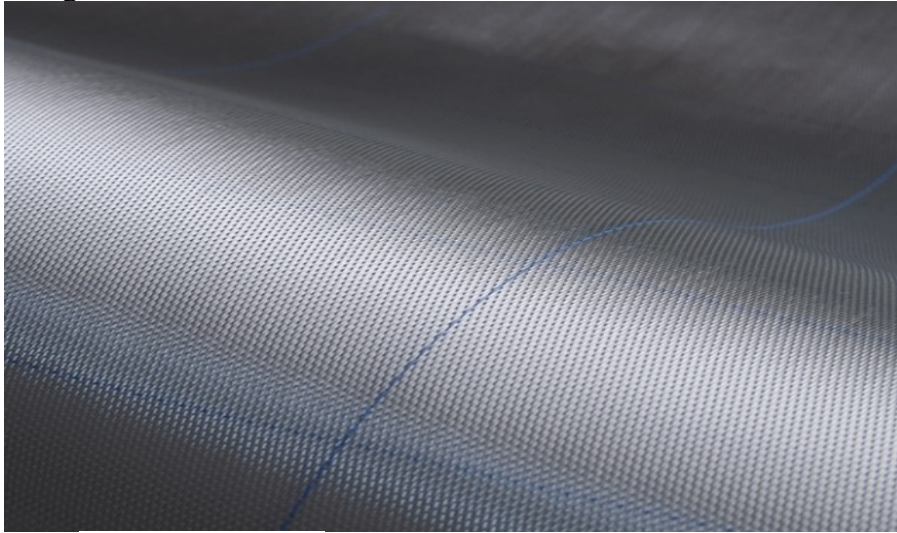
Dentre os materiais compósitos mais utilizados atualmente, há de se destacar os reforços fibrosos como fibra de carbono, fibra de vidro e fibra de aramida, reforços estruturais laminados e sanduíches que, juntos com as matrizes PMC (*polymer matrix composites*) e MMC (*metal matrix composites*), combinam diferentes tipos de materiais para a indústria aeronáutica.

2.2.1 Fibra de Vidro

A fibra de vidro é um dos materiais mais antigos empregados em compósitos, e mais conhecidos no meio aeronáutico. Feita à base de sílica (SiO_2), é normalmente empregada com uma matriz PMC para gerar uma rigidez necessária à aplicação. Esse tipo de fibra tem

várias limitações que as tornam impróprias para utilização em zonas primárias de aeronaves, onde se requer uma grande força por ser tratar de membro estrutural. Outro fator limitante é a faixa de temperatura operacional, limitada a uma zona de trabalho de até 200° C (400° F) (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Fotografia 1 - Tecido de fibra de Vidro



Fonte: BARRACUDA (2019)

Tal material é empregado em superfícies secundárias - carenagens e revestimentos não estruturais - externas e internas de aviões e helicópteros.

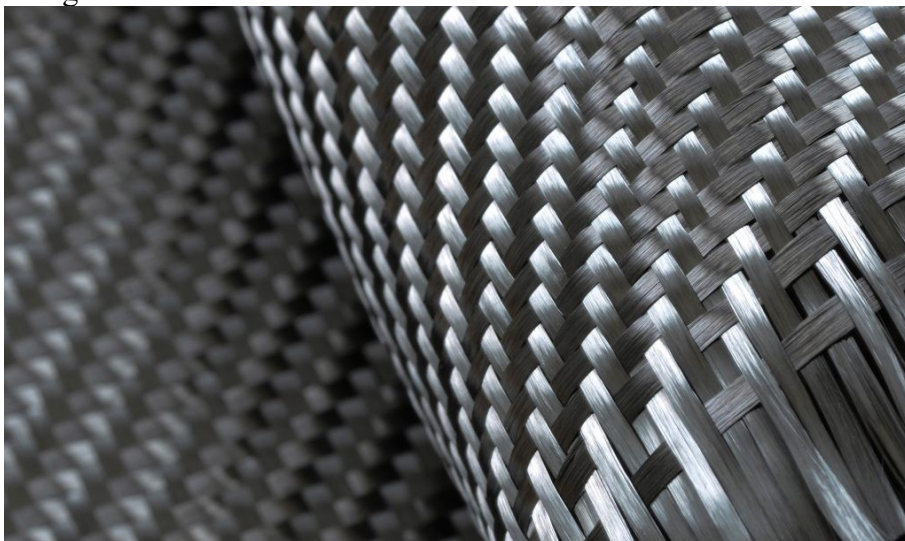
2.2.2 Fibra de Carbono

A fibra de carbono é um dos materiais tecnológicos mais inovadores em compósitos. Sua resistência às elevadas temperaturas e alta propriedade mecânica a torna ideal para uso em estruturas primárias e secundárias de aeronaves.

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras precursoras e ricas em carbono, o poliacrilonitrila (PAN). Estas fibras exibem os maiores índices de rigidez entre todas as fibras disponíveis comercialmente, além de resistências muito altas no que se refere à tração, compressão, corrosão e fadiga. Porém, a sua resistência ao impacto é mais baixa que a proporcionada pelas fibras de vidro ou aramida (DIPROFIBER, 2020, *online*).

Em que pese a diversificada utilização em matrizes, esse tipo de fibra tem preço muito elevado, o que dificulta a aquisição em relação aos demais tipos de materiais.

Fotografia 2 - Tecido de fibra de Carbono



Fonte: VRZONE (2017)

A fibra de carbono vem sendo usada com maior frequência nos projetos das maiores fabricantes de aeronaves, com um incremento de polímero reforçado com fibra de carbono em estruturas principais. De acordo com a Airbus, (2020, *online*, tradução nossa), o “plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP) – é o material composto que economiza peso que a empresa tem cada vez mais incorporado em suas aeronaves”.

2.2.3 Fibra de Aramida

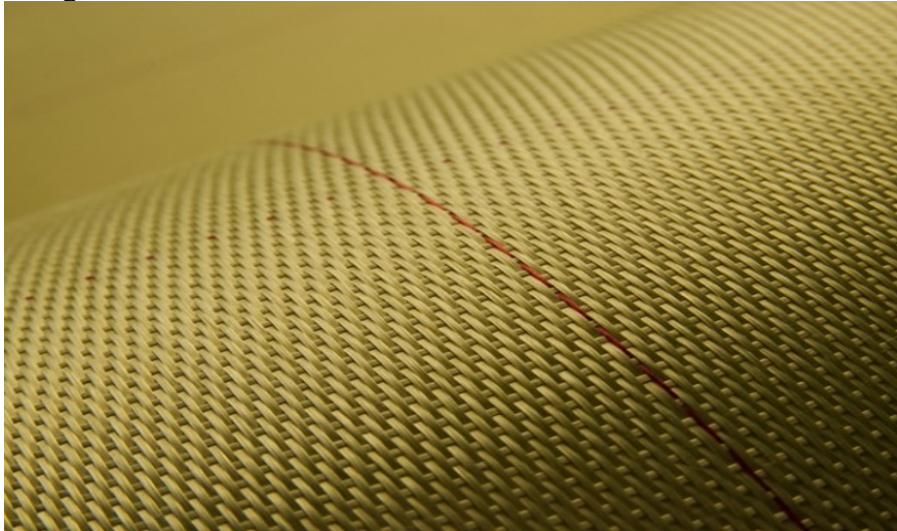
A fibra de Aramida, conhecida como *KEVLAR*® é um material formado à base de nylon aromático, com grandes propriedades mecânicas e térmicas, capaz de suportar temperaturas em torno de 480 °C.

Versátil e resistente, a fibra *Kevlar* é mais do que apenas uma série de fios. As fibras DuPont *Kevlar* são usadas em uma variedade de artigos de vestuário, acessórios e equipamentos para torná-los mais seguros e duráveis. Com cinco vezes a resistência do aço com base em um peso idêntico, ela é a fibra preferida em equipamentos de proteção e acessórios (DUPONT, 2019, *online*).

Esse material, identificado pela sua coloração amarela, é bastante usado no meio aeronáutico em peças estruturais primárias e secundárias, assim como em carenagens de radar², por permitir a passagem de ondas eletromagnéticas.

² Carenagens de radar é a estrutura responsável por cobrir e prover segurança aos radares das aeronaves. Devem ser fabricadas a partir de materiais capazes de permitir a passagem das micro-ondas.

Fotografia 3 - Tecido de fibra de Aramida



Fonte: BARRACUDA (2019)

Esse tipo de fibra é muito empregado para formar um composto de matriz PMC, onde o material da matriz é feito à base de polímero, que o torna muito resistente e propicia aplicação semelhante às fibras de carbono.

2.2.4 Laminados

Laminados refere-se a uma estrutura compósita formada por várias camadas de reforços e matrizes, as quais podem ser dispostas em ângulos - 0° , 45° , 90° - e fibras – carbono, vidro, aramida – quais sejam de materiais iguais ou diferentes. Quando a aplicação é constituída de materiais diferentes são chamados de laminados híbridos. “As fibras são orientadas ao longo das direções no plano de carga principal da aeronave para fornecer alta rigidez, resistência à força e fadiga e a matriz do polímero liga as fibras ao material” (MOURITZ, 2012, p. 501, tradução nossa).

Na figura 2 pode-se notar um exemplo da montagem de uma estrutura compósita laminada, alguns tipos de fibra usadas na construção e a disposição das direções das fibras em ângulos.

Figura 2 - Compósitos laminados



Fonte: FRANCO. Vitor (2011)

Essa aplicação pode conter, além dos reforços de fibras e a matriz de resina, um material sólido - como alumínio- que a partir dessa combinação gera um material mais leve, forte e resistente à fadiga, além de resistência a impactos e ser tolerante a eventuais danos causados. A aplicação mais comum desse tipo de construção é o *Glare*TM, que combina finas camadas de liga de alumínio ligadas a fibra de vidro (MOURITZ, 2012, p. 28).

2.2.5 Padrão *Sandwich*

O padrão “sanduíche” é uma junção compósita de materiais montada a partir de fibras, resina (matriz) e um enchimento interno, normalmente feito de materiais leves e resistentes, tais como as espumas PVC (*polyvinyl chloride*), PMI (*polymethacrylimide*), PEI (*polyetherimide*) ou por *honeycomb* (colmeias), que podem ser de polipropileno, aramida (*nomex*) ou alumínio.

O uso de materiais de núcleo está diretamente ligado a estruturas e projetos em construção “sanduíche”, que consiste basicamente na união de duas faces ou substratos de revestimentos finos e resistentes, interligadas por meio de um material de núcleo leve e espesso, possibilitando a construção de estruturas rígidas, leves e altamente duráveis. Além disso, algumas propriedades, como condutividade térmica, o isolamento acústico e a resistência ao fogo, podem ser melhorados com o uso de materiais de núcleo adequados (DIPROFIBER, 2020, *online*).

Materiais com núcleo são empregados principalmente em carenagens, portas de trem de pouso, portas de bagageiro, superfícies de comando, pisos e em pás de rotores de helicópteros.

a) Espuma PVC (*polyvinyl chloride*)

A espuma PVC é um material de enchimento leve, com grande elasticidade e resistência a temperaturas elevadas. Muito empregada na aviação, pode ser usada com todos os tipos de fibras ou matrizes, apresenta alta rigidez a produtos químicos e é de fácil manuseio (BARRACUDA, 2019).

Fotografia 4 - Espuma PVC



Fonte: BARRACUDA (2016)

A empresa brasileira ACS – *AVIATION* desenvolve pequenos aviões desde 2006 e faz uso da espuma de PVC nas estruturas de suas aeronaves. O ACS-100 SORA, um dos modelos, tem “toda a sua célula fabricada com uma construção sanduíche de fibra de vidro, impregnada com resina epóxi e espuma de PVC” (ACS AVIATION, 2015, *online*).

Fotografia 5 – Primeiro voo do ACS-100 SORA-e



Fonte: AVIATION. Acs (2015)

O ACS-100 SORA-e é a nova versão da aeronave, com implementos na utilização de compósitos estruturais gerando ao mesmo tempo leveza e rigidez à fuselagem.

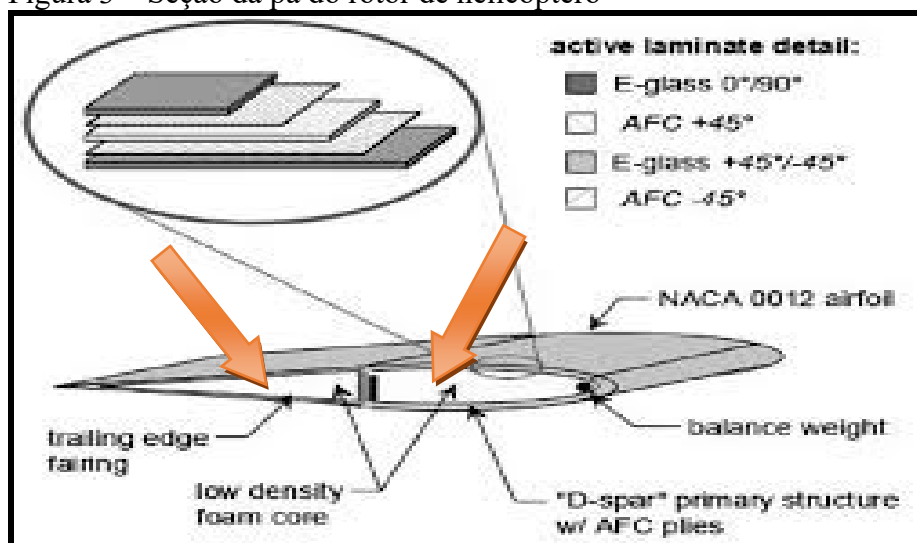
b) Espuma PMI (*Polymethacrylimide*)

A espuma PMI é usada como material de enchimento para as estruturas sanduíche, onde se requer performance estrutural elevada. No setor aeroespacial tem sido utilizada em estruturas de aviões, e é frequentemente usada nas pás do rotor principal e do rotor de cauda em helicópteros, bem como em painéis de fuselagem (RIFENG, 2020). A PMI acompanhou a evolução dos materiais desde a década de 1970, e tem ampliado o seu uso no atual mercado aeroespacial.

A espuma PMI ® *Rohacell* foi especificada para as primeiras aplicações de aeronaves em 1971, no helicóptero *Eurocopter Ecureuil* EC120. Hoje, aproximadamente 1.800 peças individuais nas aeronaves BK117, EC 120, EC 135, Tiger e NH90 incorporam núcleos de espuma rohacell® de alto desempenho (JEC GROUP, 2005, *online*, tradução nossa).

A aplicação de espuma como material de enchimento nas pás de rotores de helicóptero é demonstrada na figura 3, na qual se observa a espuma (*Foam*) - no detalhe colorido - aplicada na parte interna do aerofólio, garantindo a resistência necessária ao conjunto composto.

Figura 3 – Seção da pá do rotor de helicóptero



Fonte: O autor, adaptado de Miller (2006)

Além das pás, usa-se espuma PMI para enchimento estrutural em portas do trem de pouso, painéis do piso, radomes e outros elementos da fuselagem, como superfícies de comando de voo e estabilizadores horizontal e vertical (RIFENG, 2020).

Fotografia 6 – Espuma PMI



Fonte: RIFENG (2020)

A PMI assegura altas propriedades mecânicas, resistência ao calor e boa resistência a fadiga em relação a espuma PVC e, contudo, obtém-se melhor absorção de umidade que os painéis *honeycomb* (RIFENG, 2020).

c) Espuma PEI (*polyetherimide*)

A espuma de *polyetherimide* - PEI - tem a mesma função de preenchimento estrutural das demais espumas, porém a escolha desse material está diretamente ligada às propriedades físicas que possui. Segundo a *Composite One* - empresa especialista em estrutura compósita - “a espuma PEI de grau aeroespacial tem resistência às altas e baixas temperaturas e propriedades excepcionais de desempenho à incêndio [...] é comumente usada em radomes e interiores de aeronaves” (COMPOSITE ONE, 2020, *online*, tradução nossa).

Fotografia 7 – Espuma *FITS PEI*



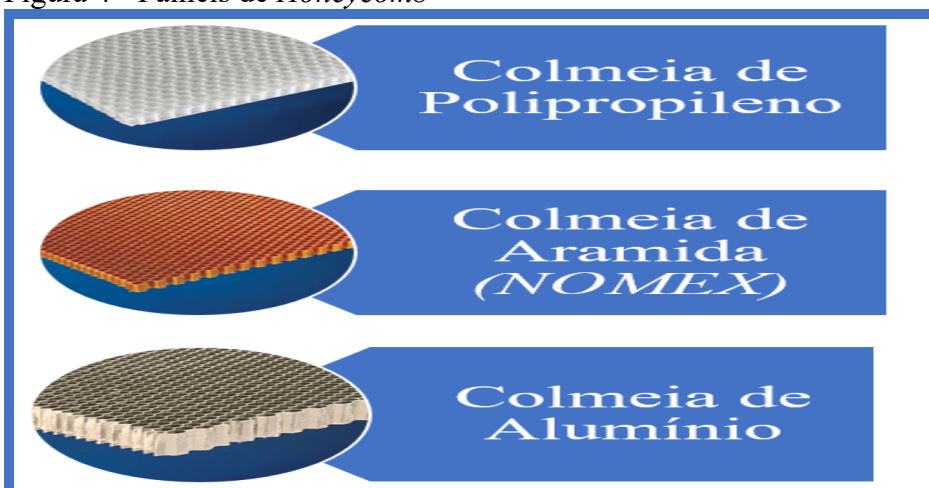
Fonte: TECNOLOGY. Fits (2020)

Tal material de núcleo está em desenvolvimento avançado e, segundo a empresa, “[...] os painéis PEI da FITS passaram por todos os testes relevantes da FAA” (TECNOLOGY. Fits, 2020, *online*, tradução nossa). Ainda segundo a empresa, as fabricantes “Airbus e Boeing testaram painéis FIT PEI e confirmam que estão totalmente em conformidade com os requisitos de fogo, fumaça e toxicidade da aviação” (TECNOLOGY. Fits, 2020, *online*, tradução nossa).

d) *Honeycomb*

Honeycomb ou (colmeia de abelha) é um dos materiais de núcleo mais utilizados em estruturas aeronáuticas para construção de peças leves e rígidas. Os painéis de *Honeycomb* para enchimento na aviação normalmente são produzidos a partir de materiais como polipropileno, aramida (*nomex*) e alumínio. Esse material pode ser encontrado em diversos tamanhos e pode ser utilizado em conjunto com as fibras de vidro, carbono e aramida (BARRACUDA, 2012).

Figura 4 - Painéis de *Honeycomb*



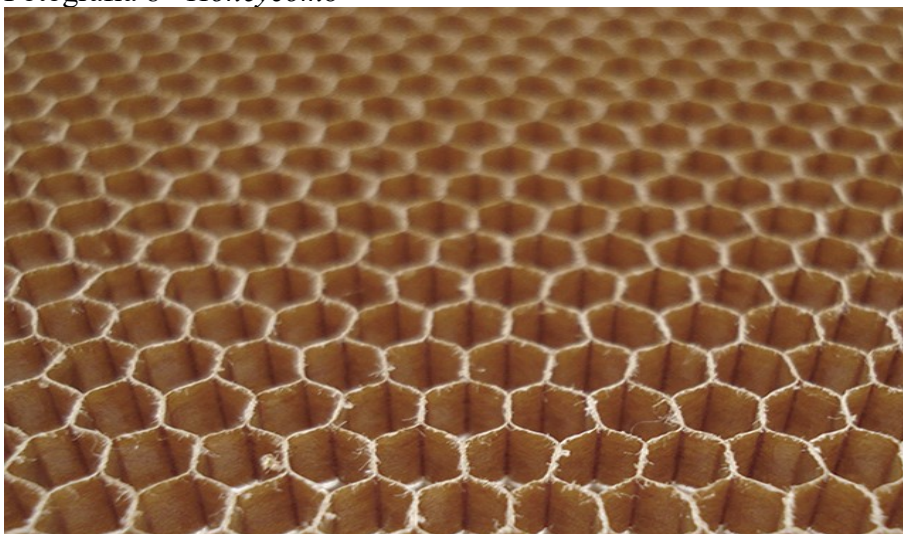
Fonte: O autor, adaptado de Plascore (2020)

A empresa *Hexcel*, uma das maiores fabricantes desse tipo de material explica que o *Honeycomb*:

É um material de núcleo leve que está disponível com células hexagonais regulares ou em forma de OX super-expandida. Oferece versatilidade em densidade, tamanho celular e outras propriedades e é adequado para fabricação de alto volume (HEXCEL, 2020, *online*, tradução nossa).

Independente do material, o *Honeycomb* tem a sua construção baseado em uma colmeia natural de abelha. Pode-se notar na fotografia 8 o exemplo de um fragmento de colmeia de Aramida.

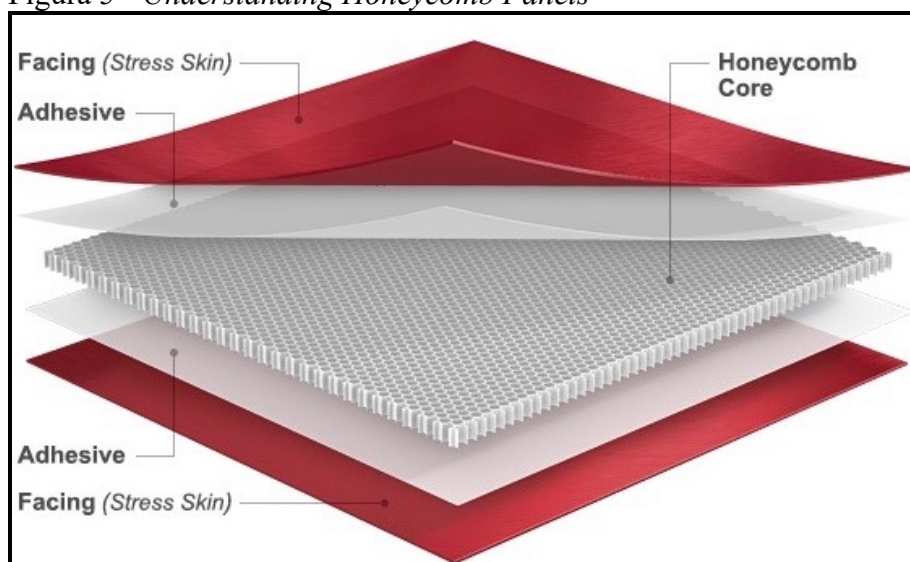
Fotografia 8 - *Honeycomb*



Fonte: BARRACUDA (2016)

A montagem final desse tipo de aplicação, assim como o de espuma de enchimento, consiste basicamente em isolar o núcleo de *Honeycomb* dos reforços de fibra e da matriz. A montagem típica de um painel de compósito de alta resistência com *Honeycomb* é demonstrado na figura 5.

Figura 5 - *Understanding Honeycomb Panels*



Fonte: PLASCORE (2020)

A resistência do painel se dá com o núcleo - elemento que suporta as forças de tensões verticais - e a pele “fibra e matriz” - elemento que recebe as tensões laterais. - Tais elementos trabalham juntos para criar alta resistência ao material (PLASCORE, 2020). Dessa forma, se obteve nessa seção o conhecimento dos principais materiais utilizados na aviação para a construção estrutural tecnológica à base de materiais compósitos.

2.3 APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS POR FABRICANTES DE AERONAVES

No tocante à fabricação de aeronaves, se pode notar que as principais empresas do setor já utilizam materiais de alta tecnologia para a fabricação das partes estruturais de suas aeronaves. Nesse sentido, destacar-se-ão algumas das principais fabricantes de aeronaves no panorama mundial.

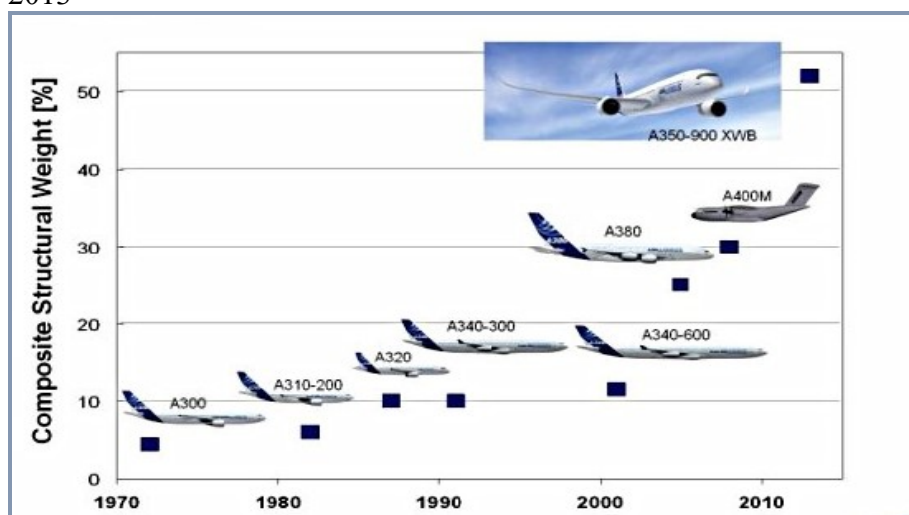
2.3.1 Empresa Airbus

A Airbus é uma das maiores fabricantes de aeronaves atualmente. Muito conhecida por sua tecnologia, atua no mercado de aviões comerciais, helicópteros e na área militar. Nos últimos anos, foi protagonista por produzir a maior aeronave de passageiros já vista, usando uma tecnologia inovadora em estruturas. Porém, esses materiais não são novidade para a Airbus. Segundo Fualdes (2019), chefe de certificação de aeronaves da empresa e especialista em fuselagens produzidas com o uso de materiais compósitos:

Em 1983, o A310-200 tinha *spoilers*, *airbrakes* e *rudders* feitos de fibra de carbono. Apenas três anos depois, à medida que a tecnologia composta avançava, o A310-300 tornou-se a primeira aeronave a usar compósitos em uma estrutura primária com um estabilizador vertical em CFRP (CHANTAL FUALDES, 2019, *online*, tradução nossa).

O gráfico 1 ilustra o percentual de crescimento do uso de materiais compósitos em aeronaves da Airbus entre os anos de 1970 e 2013. Os pioneiros da empresa começaram a utilizar tais materiais na década de 70, quando o mercado da aviação se viu obrigado a diminuir o peso das aeronaves, devido a crise no combustível. Percebeu-se, então, que a utilização desses materiais geraria um grande avanço em relação às ligas de alumínio usadas na época, diminuindo peso e aumentando a resistência estrutural da fuselagem (AIRBUS, 2019).

Gráfico 1 - *Increase in Airbus composite parts as percentage of total aircraft weight/ 1970 - 2013*



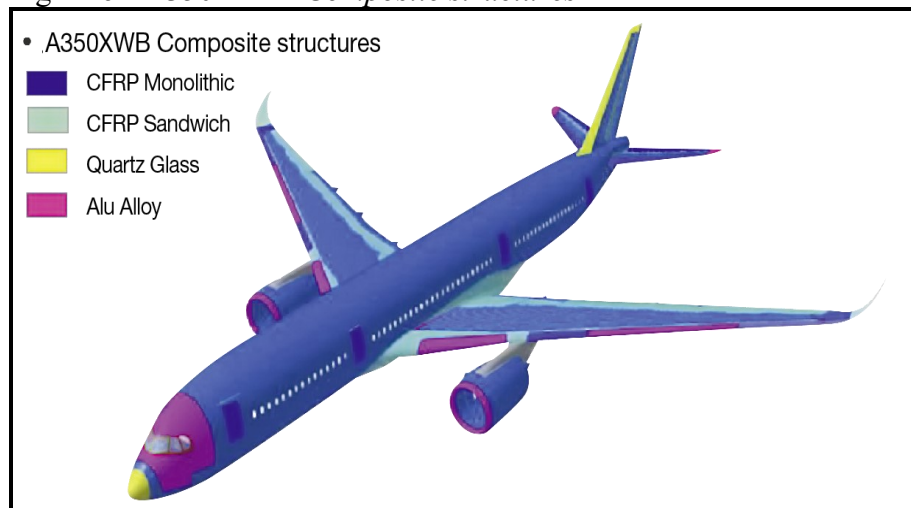
Fonte: SCRIBOL (2018)

Dentre as inovações da Airbus, destaca-se o A350 – XWB, uma aeronave produzida com cerca de 53% em compósitos CFRP - *Carbon Fibre Reinforced Plastic* (plástico reforçado com fibra de carbono). Segundo a empresa:

Como em todos os modelos A350 XWB, a fuselagem é construída com plástico reforçado de fibra de carbono (CFRP) – que garante menor queima de combustível, manutenção mais fácil e maior resistência à corrosão. As asas do *jetliner* também são mais eficientes e silenciosas devido ao seu design avançado, o que lhes permite adaptar-se enquanto no ar – adaptando-o para máxima eficiência aerodinâmica nas várias fases de voo (AIRBUS, 2020, *online*, tradução nossa).

A fuselagem do A350 é na sua maioria composta por fibra de carbono monolítico e em sanduíche, como se pode notar na figura abaixo.

Figura 6 - A350 XWB *Composite structures*



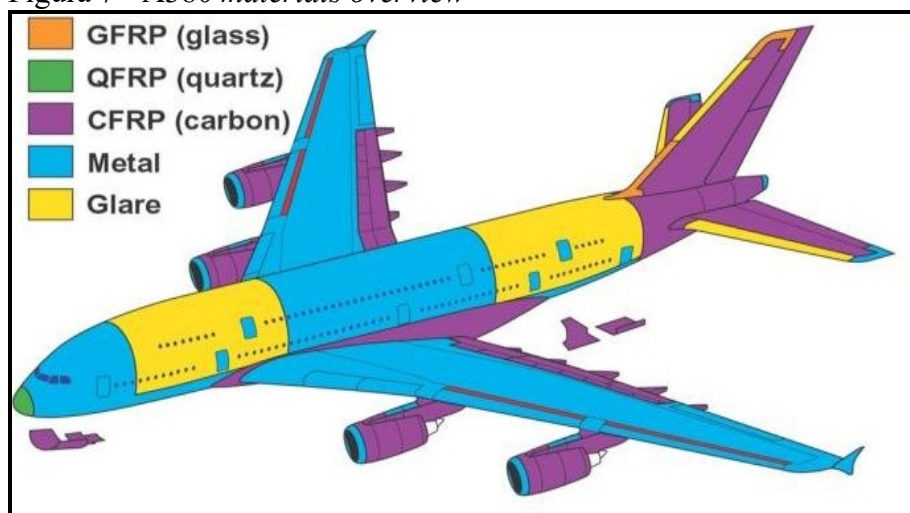
Fonte: AIRBUS (2019)

Outra aeronave da Airbus que usou o material em tela e se destaca por seu tamanho é o gigante A380, o qual foi produzido com cerca de 25% a 30% da sua estrutura em compósitos reforçados. Ao incorporar novas tecnologias à fuselagem, a aeronave oferece cerca de 15 % de diminuição de custo por acento, fato que está diretamente relacionado à diminuição de peso estrutural. Os materiais compósitos estão presentes na raiz e longarinas das asas e na seção traseira da estrutura (AIRBUS, 2020). A aeronave é constituída de um material inovador conhecido como *Glare*TM. Segundo a empresa:

*Glare*TM é um laminado incorporando camadas alternativas de liga de alumínio e adesivo reforçado com fibra de vidro, com suas propriedades otimizadas ajustando o número de tecido e orientação das fibras de vidro. Isso oferece uma redução significativa do peso e fornece características avançadas de resistência a fadiga e danos (AIRBUS, 2020, *online*, tradução nossa).

A divisão de materiais no A380 é ilustrada a seguir e se pode notar a presença principalmente do *Glare*TM, nas partes frontal e traseira da aeronave.

Figura 7 - A380 materials overview



Fonte: O autor, adaptado de KESARWANI (2017)

Por outro lado, assim como no âmbito das aeronaves de asa fixa, a linha de helicópteros do grupo Airbus tem acompanhado a evolução de materiais. Atualmente, todos os modelos de aeronaves de asas rotativas têm alguma porcentagem de materiais compósitos. Há de se ressaltar que a maioria deles tem a aplicação do *Fenestron*, uma espécie de carenagem no rotor de cauda, região essa toda produzida em compósitos. Segundo a fabricante:

O *Fenestron* foi certificado pela primeira vez no modelo Gazelle em 1972 e posteriormente no Dolphin [...] A segunda geração veio no final da década de 1970, com um *Fenestron* totalmente feito em materiais compósitos [...] Em 1994, a terceira geração foi instalada no modelo H135 e em 1999 o H130 fez seu voo inaugural com o *Fenestron* derivado desta versão. O modelo H145 fez o mesmo em 2010. 50 anos depois, o H160 possui o maior e mais recente *Fenestron* a ser construído em um helicóptero Airbus, com um diâmetro de 1m 20 (AIRBUS, 2018, *online*, tradução nossa).

A fotografia 9 apresenta uma aeronave Airbus modelo H145 com rotor de cauda *Fenestron*, manufaturado em materiais compósitos. “O rotor de cauda ‘carenado’ do H145 é a solução mais segura para o pessoal de solo” (Airbus, 2020, *online*, tradução nossa). Além disso, há diminuição do ruído e maior segurança operacional, principalmente por se tratar de uma aeronave atuante no resgate aeromédico, a qual requer pousos em lugares não totalmente preparados.

Fotografia 9 – Aeronave Airbus H145 com rotor de cauda *Fenestron*



Fonte: AIRBUS (2018)

O novo H160 está sendo produzido com 100% de sua estrutura em materiais inovadores, o que demarca um grande avanço em aeronaves de asas rotativas.

O H160 é o primeiro helicóptero civil totalmente composto, resultando em uma estrutura mais leve em peso, mais robusta, resistente à corrosão e fadiga, ao mesmo tempo em que requer menos manutenção. O conjunto do rotor principal da Airbus Helicopters é ainda mais aprimorado com a aplicação de tecnologia termoplástica composta inovadora – que reduz o peso e aumenta a tolerância a danos (AIRBUS, 2015, *online*, tradução nossa).

O protótipo do H160 recebeu o certificado de tipo da *European Union Aviation Safety Agency* - EASA em 2020, o que atesta o parecer favorável da agência europeia às questões do aeronavegabilidade e segurança de voo por parte da aeronave e seus componentes.

Fotografia 10 - Airbus H160



Fonte: AIRBUS (2020)

Com tal certificação se conseguiu vencer mais uma etapa de fabricação e a empresa continua revolucionando o mercado da aviação, em face ao aumento de tecnologia capaz de produzir aeronaves leves, resistentes e econômicas.

2.3.2 Empresa Boeing

A Boeing também domina o mercado da aviação e ao desenvolver novos produtos, busca inovar no uso de tecnologias e materiais leves e resistentes. Um de seus produtos mais evoluídos estruturalmente é o B787, que segundo a empresa, apresenta implementações no uso de compósitos:

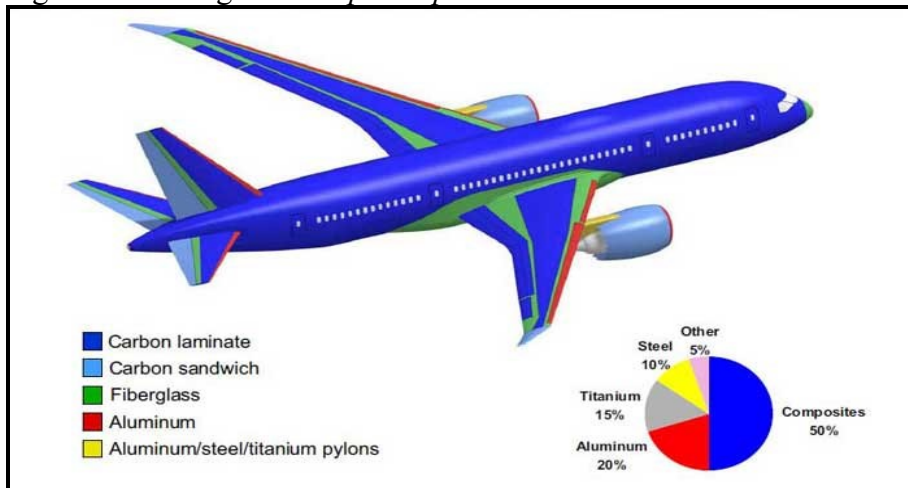
A principal tecnologia material inovadora no 787 é o aumento do uso de compósitos. O peso do 787 é 50% em compósitos. A maior parte da estrutura primária é feita de materiais compostos, mais notavelmente a fuselagem (BOEING, 2019, *online*, tradução nossa).

O B787 emprega fibras de carbono em praticamente toda a sua fuselagem central. O desenvolvimento de um novo modelo de aeronave permitiu que os engenheiros da empresa especificassem o material ideal a ser usado na fuselagem da aeronave. O resultado foi uma estrutura que oferece cerca de 20% de economia de peso e a redução de fadiga em relação as estruturas de alumínio convencionais (BOEING, 2008). A seleção desses materiais resulta principalmente em melhorar a vida útil da aeronave. A empresa explica que:

Os materiais selecionados para o B787 *Dreamliner* fornecem os menores custos operacionais ao longo da vida útil do avião. Selecionar materiais ideais significa analisar cada área da aeronave para determinar a melhor solução baseada no ambiente operacional e cargas experimentadas ao longo de sua vida útil (BOEING, 2019, *online*, tradução nossa).

A figura 8 demonstra a distribuição de materiais ao longo da fuselagem do B787, com utilização notável de compósito de fibra de carbono na maior parte de sua estrutura.

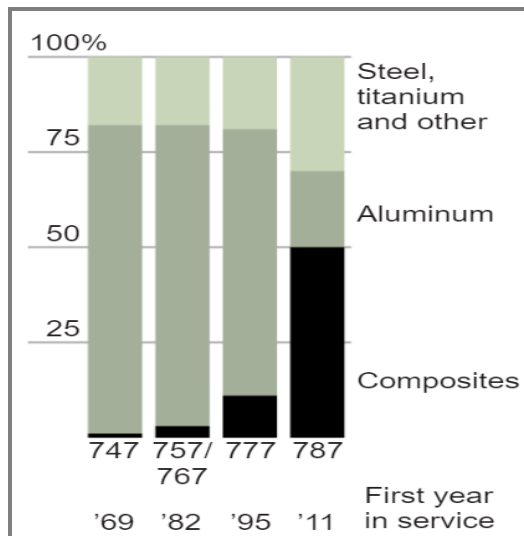
Figura 8 - Boeing 787 composite parts



Fonte: KNOWLEDGE. Aviation (2012)

O gráfico abaixo ilustra uma comparação da utilização de materiais compósitos em modelos da fabricante norte-americana, onde se nota a diminuição de utilização das ligas de alumínio e aumento em materiais compósitos de alta tecnologia.

Gráfico 2 - Materiais usados nas aeronaves da Boeing no período de 1969 a 2011



Fonte: TIMES. The new york (2013)

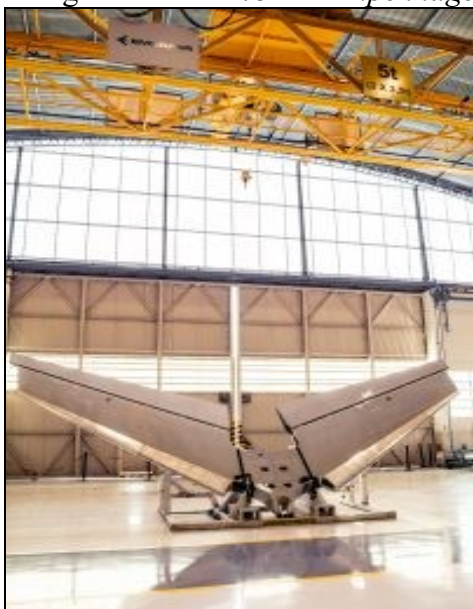
Pode-se notar um avanço nesses materiais a partir 1995, devido à afluência no setor em produzir aviões mais leves e eficientes. Isso representou um salto de 50% de utilização de materiais compósitos a partir de 2011, com o desenvolvimento do modelo Boeing 787.

2.3.3 Empresa Embraer

A fabricante de aeronaves brasileira é referência no mercado de jatos executivos e aeronaves comerciais para os segmentos regionais. Em constante desenvolvimento, apresenta tecnologia para desenvolver diversas partes de suas novas aeronaves em materiais compósitos, tais como superfícies de comando, radome e carenagens. Segundo a Embraer (2020, *online*) “o Phenom 300, jato executivo de maior sucesso da última década, tornou-se ainda melhor, graças a avanços de desempenho, conforto e tecnologia”. Ademais, o luxuoso acabamento interno desta aeronave também é feito em fibra de carbono, fato que se permite identificar quanto tem aumentado o uso desses materiais.

Além disso, a empresa desenvolve componentes tais como estabilizador horizontal, superfícies de comando de voo, piso da cabine e carenagens feitos com materiais de alta tecnologia para suas aeronaves (EMBRAER, 2018). A fotografia 11 mostra o primeiro estabilizador horizontal do modelo E175 – E2 manufaturado em materiais compósitos pela empresa, em Portugal.

Fotografia 11 - E175-E2 *Empennage*



Fonte: EMBRAER (2018)

O modelo Legacy 500 incorpora materiais inovadores à estrutura e, da mesma forma que o E2, tem sua empenagem em materiais compósitos, cuja fabricação ocorre na cidade de Évora em Portugal. Segundo a empresa *Composites Today* (2020, *online*, tradução

nossa), a empenagem do Legacy é “feita principalmente de partes de fibra de carbono, permitindo maior eficiência em operações como perfuração e rebite em estruturas primárias feitas em composto”. É possível notar na imagem a seguir a seção da empenagem instalada na estrutura, num dos hangares de montagem da linha Legacy na Embraer.

Fotografia 12 – linha de montagem do Legacy 500/600



Fonte: AEROIN (2018)

2.3.4 Empresa COMAC

A *Comercial Aircraft Corporation of China* - COMAC, principal empresa de fabricação de aeronaves da China, foi fundada em 2008 e desde então, em parceria com a CRAIC da Rússia, vem trabalhando novas tendências de materiais na construção de partes estruturais. O novo CR -929 tem data prevista para 2025, com mais de 50% da sua estrutura feita em materiais compósitos. O modelo ARJ 21, que foi o primeiro projeto da empresa, já está certificada a voar no país.

As aeronaves ARJ21-700 obtiveram o Certificado de Tipo da Administração de Aviação Civil da China (CAAC) em 30 de dezembro de 2014 e o Certificado de Produção (PC) do CAAC em 9 de julho de 2017 (COMAC, 2019, *online*, tradução nossa).

Em 2018, a COMAC apresentou um modelo da seção central do seu novo equipamento que, segundo a empresa, “[...] é mais um marco do programa CR929 [...] marcando um importante passo em frente no desenvolvimento da estrutura composta” (COMAC, 2018, *online*, tradução nossa), como se pode notar abaixo.

Fotografia 13 - Seção central em compósito – CR929



Fonte: COMAC (2018)

Ao explorar o uso de materiais compósitos avançados, a empresa visa alcançar o mercado Asiático nos próximos anos e continuar desenvolvendo aeronaves com tecnologias semelhantes as maiores fabricantes mundiais.

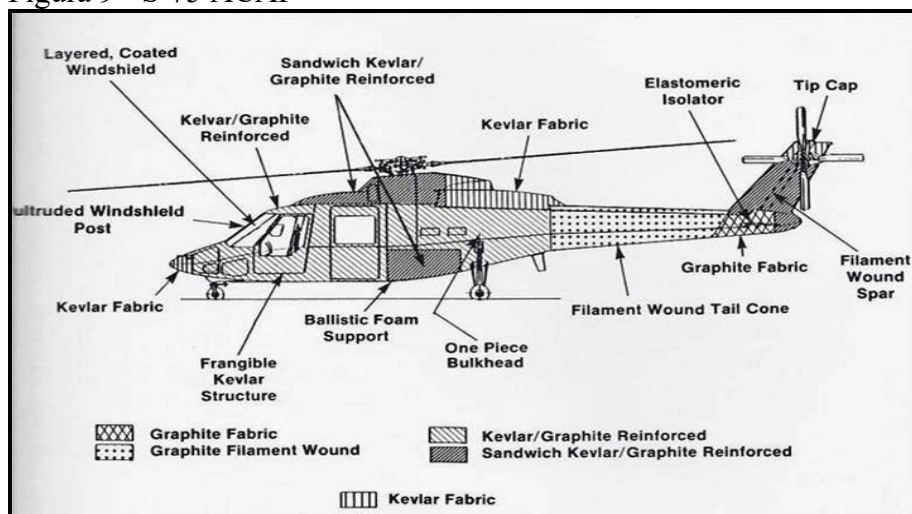
2.3.5 Empresa Lockheed Martin

A Lockheed Martin, assim como a Sikorsky, utiliza materiais compósitos em muitas das suas aeronaves há anos. Contudo, observa-se aumento significativo dessa concepção de emprego, assim como as demais empresas do setor. Segundo a fabricante:

Podemos alcançar um desempenho inovador e menor custo do ciclo de vida projetando e fabricando produtos e sistemas de última geração usando polímeros avançados, nano materiais, compósitos avançados e metais modernos leves (LOCKHEED, 2020, *online*, tradução nossa).

No que tange ao uso diversificado de materiais, destaca-se a aeronave *Sikorsky S-75*, na qual se observa principalmente a presença de materiais como o *KEVLAR®*.

Figura 9 - S-75 ACAP



Fonte: SIKORSKY. Igor. I (2013)

Nota-se que, com o passar do tempo, as empresas pioneiras na aviação passaram a utilizar com frequência os materiais compósitos em suas aeronaves e, no mesmo sentido, as novas fabricantes estão entrando no mercado, e projetando seus produtos com materiais leves e resistentes.

2.4 FATORES CONTRIBUINTES PARA O AUMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM ESTRUTURAS DE AERONAVE

O desenvolvimento estrutural das aeronaves deu-se após a segunda guerra mundial, onde os engenheiros viram a necessidade de aumentar o desempenho da estrutura e dos materiais dos motores aeronáuticos. Em seguida, com a adição de aeronaves pressurizadas voando em altas altitudes e devido ao aumento das cargas de pressão exercidas no voo, constatou-se necessário desenvolver painéis estruturais usando materiais de alta resistência. Contudo, constatou-se que esses materiais sofriam com a fadiga do metal com o passar do tempo. Com isso, as resistências a fratura e fadiga se juntaram aos demais fatores, para a seleção de novos materiais. Por fim, a junção desses fatores com a necessidade de diminuir o peso das aeronaves levou o emprego de materiais compósitos em estruturas aeronáuticas, onde os principais objetivos a se alcançar foram o desempenho estrutural, o fator econômico e o ambiental (MOURITZ, 2012).

2.4.1 Desempenho Estrutural

O desempenho estrutural refere-se ao arcabouço de forças que uma estrutura de aeronave está sujeita a sofrer durante o seu ciclo de vida. Altas velocidades, sustentação, tração e arrasto, expansão e contração devido a pressurização nas aeronaves maiores, peso e eficiência aerodinâmica. A estrutura da aeronave deve ser capaz de suportar todas as forças do voo, além de ser leve. Nesse sentido, as aeronaves evoluíram desde os primórdios até as fabricantes encontrarem a liga de alumínio, que está sendo utilizado atualmente na maioria dos aviões, porém, devido ao fato da corrosão, e a não possibilidade de criar certos modelos aerodinâmicos na fuselagem e nas asas, alguns engenheiros começaram a projetar novos modelos utilizando materiais compósitos. Segundo Mouritz (2012):

Compósitos foram gradualmente introduzidos em componentes de aeronaves semiestruturais durante a década 1950 e 1960, como capô de motor e portas de trem de pouso, para reduzir o peso e evitar corrosão (MOURITZ, 2012, p. 58, tradução nossa).

Para a *Cirrus Aircraft*, uma fabricante americana de aeronaves de pequeno porte, os materiais compósitos são a solução para substituir o alumínio aeronáutico nos próximos anos e criar aviões com maior eficiência e rigidez estrutural.

Materiais compostos, como fibra de vidro e fibra de carbono, são facilmente moldados em formas complexas e aerodinâmicas. Eles podem criar estruturas muito fortes e tolerantes a grandes variações de temperatura exigindo pouca manutenção. Hoje, o uso de compósitos substituiu o de alumínio em muitas áreas e é encontrado em todas as áreas da aviação, desde aviões até aeronaves esportivas leves - *Light Sport Aircraft* - (CIRRUS AIRCRAFT, 2020, *online*, tradução nossa).

Desde a década de 1950 até o cenário atual, a melhoria no desempenho estrutural das aeronaves foi um dos fatores contribuintes para o avanço dos materiais compósitos na aviação mundial.

2.4.2 Fator Econômico

No que se refere à economia, as fabricantes tiveram que mudar a concepção de seus aviões e implementar novos materiais, a fim de diminuir o peso, e subsistir à crise do

combustível, protagonizada pela Organização dos países exportadores de petróleo - OPEP - na década de 1970.

Durante esse período, as viagens aéreas mudaram à medida que a atenção foi dada à economia e eficiência dos aviões, especialmente depois que os custos de combustível aumentaram drasticamente por causa do embargo petrolífero árabe em 1973 (LOMBARDI, 2003, *online*, tradução nossa).

O preço do combustível subiu de 25% para 55 % dos custos operacionais e, para continuar voando, as aeronaves deveriam ser mais leves, substituindo matérias tradicionais como o alumínio, por materiais compósitos que pesam cerca de 20% menos para a mesma função (AIRBUS, 2019). Desde então, as fabricantes de aviões prosseguiram em busca de novos materiais para construir aeronaves com menor peso estrutural, com a finalidade de diminuir o percentual de queima de combustível nos voos, em relação aos passageiros transportados. “Novos aviões tiveram que ser mais econômicos [...], levando a uma nova geração de aviões de alta tecnologia eficientes em combustível que apareceriam na década de 1980” (LOMBARDI, 2003, *online*, tradução nossa).

2.4.3 Fator Ambiental

No contexto ambiental, sabe-se que o planeta tem sofrido com o aumento da liberação de Gás Carbônico - CO₂ - na atmosfera, proveniente da queima de combustíveis a base de petróleo. Pode-se notar que a aviação tem contribuído para tal fato. De acordo com a *International Air Transport Association* - IATA, “a aviação representa 2% das emissões globais de carbono feitas pelo homem. Em 2012, estima-se que foram 677 milhões de toneladas de CO₂” (IATA, 2013, *online*, tradução nossa). Assim, as organizações responsáveis pela aviação mundial têm incentivado o setor aeronáutico a inovar com o propósito de diminuir os níveis de contaminação da atmosfera. Em suma, uma das opções das fabricantes foi inovar em materiais, o que permitiu diminuir o peso das aeronaves, tornando-as mais eficientes, consumindo, portanto, menos combustível.

O 787 foi projetado para ser mais ambientalmente progressivo ao longo do ciclo de vida do produto. O avião é fabricado usando menos materiais perigosos, consome menos combustível e produz menos emissões. O 787 também é mais silencioso para as comunidades aeroportuárias do que qualquer avião anterior. E no final da vida útil do avião, os materiais utilizados para o 787 são recicláveis (BOEING, 2019, *online*, tradução nossa).

Pode-se notar que o B787, além da menor contaminação à atmosfera, compõe-se de materiais passíveis de reciclagem ao final da sua vida, diminuindo assim a poluição do planeta. Na Airbus, do mesmo modo, a proposta de reciclagem vem ganhando espaço no processo produtivo.

Os dois tipos mais usados de CFRP são '*termoset*' e '*termoplástico*'. Embora os CFRPs *termoset* sejam atualmente mais difundidos na indústria aeronáutica, os termoplásticos estão ganhando popularidade por causa de sua reciclagem - uma importante consideração do ciclo de vida que tem sido um fator contra a adoção mais ampla do CFRP (AIRBUS, 2017, *online*, tradução nossa).

Outra questão ambiental estudada ao longo dos últimos vinte anos é o ruído aeronáutico. As empresas encontraram uma solução para um percentual de diminuição de ruído na engenharia de materiais. “A Airbus implementou elementos de design de redução de ruído que incluem tratamento acústico aprimorado do motor e a otimização do *design* das asas” (AIRBUS, 2020, *online*, tradução nossa). Doravante, pode-se notar que o fator ambiental está presente na aviação no tocante ao aumento de materiais tecnológicos e estruturais, das atuais e futuras aeronaves.

2.5 PRINCIPAIS VANTAGENS PARA O SETOR DA AVIAÇÃO

A engenharia de materiais proporcionou à aviação a oportunidade de investir em matéria-prima tecnológica na construção de estruturas de aeronaves. A aplicação de materiais compósitos em fuselagens é capaz de gerar maior economia ao operador, o qual é reflexo da diminuição do peso estrutural em relação as estruturas metálicas e aumento da eficiência aerodinâmica, fato possível devido tal material permitir a construção de partes em variados formatos e tamanhos. Consequentemente se consegue menor custo de operações às companhias aéreas de forma que as aeronaves param menos para as manutenções referentes a parte estrutural e permanecem por mais tempo em voo. O aumento do alcance - distância de um ponto a outro - ou seja, a aeronave consegue ir mais longe e gera-se uma economia que igualmente pode-se sentir em componentes que tem sua vida útil em ciclos de voo ³. De certa forma, tal fato se transforma em maior segurança para a aviação visto a diminuição de pousos e decolagens, - em voos com escala por exemplo - o que diminui as cargas de trabalhos da tripulação (BOEING, 2019).

³ Ciclo de voo é um tipo de medida de vida útil para componentes aeronáuticos. um ciclo compreende uma decolagem e um pouso, ou seja, 1 ciclo = 1 voo completo.

Os materiais compósitos, diferente dos metais, não sofrem com a corrosão - observada principalmente nas ligas de alumínio - devido a sua boa resistência. Aqueles materiais, por outro lado, requerem menores inspeções ao longo da sua vida, com maior margem de segurança operacional.

Embora inicialmente mais caros de produzir do que as peças metálicas tradicionais, os componentes CFRP podem economizar dinheiro dos operadores de aeronaves em custos futuros de manutenção [...]. Um A350 XWB, por exemplo, requer 50% menos tarefas de manutenção da estrutura, e o limite para verificações de aeronaves é de 12 anos em comparação com oito para o A380 (AIRBUS, 2017, *online*, tradução nossa).

A concepção de compósitos é capaz de fornecer maior conforto e satisfação aos passageiros. No Boeing 787 por exemplo, pode-se abaixar a pressurização da aeronave em até 2000 *ft*, mantendo-a à 6000 *ft*, diferentemente das demais aeronaves que voam com uma altitude de cabine⁴ de 8000 *ft*. Pressurizar uma aeronave de alumínio a 6000 *ft* pode causar dano e fadiga na estrutura, porém, ao se empregar fuselagem compósita, isso pode ser feito sem nenhum impacto estrutural e os passageiros experimentam menos tontura e dor de cabeça durante o voo (BOEING, 2020).

Outra vantagem neste segmento é a diminuição do ruído originado nos motores de aeronaves e em rotores de helicópteros. O H160 da Airbus incorpora as “lâminas (pás) de rotor *Blue Edge* redutoras de som para operações mais silenciosas” (AIRBUS, 2020, *online*, tradução nossa). Fabricadas com a mais alta tecnologia em compósitos aeronáuticos, garantem menor poluição sonora em sua operação. Portanto, pode-se notar as principais vantagens dos materiais compósitos para a construção aeronáutica, utilizada por fabricantes a nível mundial, com ênfase em menor peso estrutural, emissões a atmosfera e ruído aeronáutico. Além disso, demanda-se menor tempo de parada para inspeções de estruturas, como também se propicia maior rigidez à fuselagem, conforto aos passageiros, aumento da vida útil da aeronave e, principalmente, segurança para o setor aeronáutico.

⁴ Altitude de cabine é o nome dado a pressão mantida dentro de uma cabine pressurizada em voo para assegurar a oxigenação normal de todos a bordo. (normalmente uma pressão referente a altitude de no máximo 8000 *ft*).

3 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo principal entender de que forma a evolução aeronáutica contribuiu para o aumento de materiais compósitos em estruturas de aeronaves. Para esta proposta, analisaram-se aspectos históricos e conceituais referentes à utilização de materiais compósitos em estruturas de aeronaves. Ao se identificar os principais fabricantes de aeronaves que utilizam materiais compósitos, evidenciaram-se as vantagens da aplicação dessa tecnologia no meio aeronáutico. Ainda nessa direção, conheceram-se os materiais empregados na construção aeronáutica, o grau de utilização e os benefícios do uso desses materiais, inclusive no que tange ao incremento da segurança operacional.

Desde os primórdios da aviação os inventores de aeronaves focaram-se na escolha dos materiais que seriam usados em seus aviões, com o propósito de melhorar resistência e desempenho. De início, viu-se na madeira um ótimo desempenho estrutural para a época. Com o passar do tempo e eventual aumento no tamanho dos aviões, foi necessário o uso de matérias estruturalmente melhores e mais leves. Com o decorrer dos anos e em face ao surgimento de novas tecnologias, os materiais compósitos passaram a ocupar posição de destaque no setor aeronáutico.

“Materiais compósitos” é a expressão que representa uma junção de pelo menos dois materiais com a intenção de se obter um terceiro produto, com melhores características, a fim de suprir uma necessidade específica. Tais materiais são gerados a partir de ligação química entre uma matriz - material responsável por envolver o reforço, prover proteção e distribuir esforços uniformemente - e um reforço. Viu-se que esse tipo de material é mais leve e resistente que o alumínio. Os materiais compósitos são usados tanto na aviação civil quanto militar, em aviões e helicópteros, principalmente em carenagens, radomes, pás do rotor e revestimento. Dentre os materiais compósitos mais utilizados atualmente, há de se destacar os reforços fibrosos como fibras de carbono, vidro e aramida, reforços estruturais laminados e sanduíches, utilizando espumas e colmeias como material de núcleo que, juntos com as matrizes, combinam diferentes tipos de materiais para a indústria aeronáutica.

No tocante as fabricantes, foi possível notar que a empresa Airbus já utiliza há anos esses materiais de maior tecnologia em suas aeronaves de asa fixa - desde o modelo A310 até o atual A350, que tem percentual de compósito chegando a 53% da sua fuselagem - passando por modelos de asas rotativas, onde se viu a concepção do *Fenestron* e a introdução do H160 com estrutura completamente fabricada com materiais leves.

A empresa Boeing, no âmbito da aviação comercial, tem investido em materiais inovadores e mudou o conceito de voar com o modelo B787, o qual emprega 50% de compósitos em sua fuselagem, além de outros modelos que já utilizavam esta tecnologia em partes da estrutura. Já na empresa Embraer, notou-se um gradual aumento de materiais principalmente em carenagens e partes da empenagem, itens esses produzidos em Portugal e enviados para todas as fábricas da empresa. Na China, a empresa COMAC está revolucionando o mercado de aviação asiático, implementando novas tendências e produzindo uma futura aeronave com o percentual de aproximadamente 50% de materiais compósitos. Também nessa direção a empresa Lockheed Martin, junto com a empresa Sikorsky, utilizam materiais compósitos em muitas das suas aeronaves há anos.

No que se refere ao segmento aeronáutico, reparou-se que o desenvolvimento estrutural das aeronaves se deu início após a segunda guerra mundial, quando os engenheiros viram ser necessário aumentar o desempenho estrutural dos materiais dos motores aeronáuticos. Na operação em altas altitudes e em face ao aumento das cargas de pressão, constatou-se a necessidade de desenvolver painéis estruturais usando materiais de alta resistência. O fator econômico é um aspecto a se considerar quando da diminuição de peso estrutural para se economizar combustível e o fator ambiental sugere o uso de materiais recicláveis que possam diminuir o ruído e a queima de combustível. O avião atinge maior alcance em voo e agride menos a atmosfera e esse fato se reverte ao operador em economia de capital, maior segurança nas operações e satisfação do cliente. Além disso, com materiais compósitos é possível a diminuição de ruído e maior eficiência aerodinâmica.

A aviação está em constante mudança em diversos cenários; materiais inovadores entraram em uso desde a segunda guerra mundial e fatores como economia, segurança e medidas de redução de degradação do meio ambiente contribuíram para o aumento do uso de compósitos em estruturas de aeronaves. Portanto, pode-se notar as principais vantagens dos materiais compósitos para a construção aeronáutica em nível mundial, com ênfase em menor peso estrutural, emissões a atmosfera e ruído aeronáutico. Além disso, demanda-se menor tempo de parada para inspeções de estruturas, como também se propicia maior rigidez à fuselagem, conforto aos passageiros, aumento da vida útil da aeronave e, principalmente, segurança para a operação. Constatou-se, ainda, que a eficiência aerodinâmica pode ser alcançada com materiais compósitos, devido às características de fabricação em variadas formas e ao fato de que pequenas manutenções podem ser feitas em linha, com um profissional de estrutura especializado. Dessa forma, Devido ao crescente

aumento nesta área, considera-se haver um futuro promissor para o setor de inovação de materiais aeronáuticos nos próximos anos.

A presente pesquisa atingiu o objetivo geral de entender de que forma a evolução aeronáutica contribuiu para o aumento de materiais compósitos em estruturas de aeronaves e enfatiza-se que o estudo que ora se encerra poderá servir de base para novas abordagens em pesquisas futuras, de forma a ampliar a visão aqui apresentada.

REFERÊNCIAS

- AEROIN. **Linha de montagem do Legacy 500/600**. 2018. Il. Fotografia 12 color. Online. Disponível em: <https://www.aeroin.net/voamos-no-embraer-legacy-500-um-dos-jatos-executivos-mais-rapido-do-mundo/>. Acesso em: 07 out. 2020.
- AIRBUS. **Airbus in France**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/company/worldwide-presence/france.html>. Acesso em: 14 out. 2020.
- AIRBUS. **A350 XWB Composite applications**. 2019. Il. Figura 6 color. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/techdata/general-information/Airbus-A350-XWB-Airframe-Composite-guide-for-firefighters.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.
- AIRBUS. **A 350 XWB family aircraft**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family/a350-900.html>. Acesso em: 06 out. 2020.
- AIRBUS. **A 380 - Environment**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380/environment.html>. Acesso em: 07 out. 2020.
- AIRBUS. **Composites: Airbus continues to shape the future**. 2017. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/08/composites--airbus-continues-to-shape-the-future.html>. Acesso em: 06 out. 2020.
- AIRBUS. **Have a nose around our materials labs**. 2019. Online. Disponível em: <http://www.airbus.com/company/history/airbus50/day26.html>. Acesso em: 17 set. 2020.
- AIRBUS. **H145**. 2018. Il. Fotografia 9 color. Online. Disponível em: https://www.airbus.com/search/image.html?q=&results_page_index=2&lang=en&tags=products-and-solutions:commercial-helicopters/h145&tagLogicChoice=OR#searchresult-image-all-72. Acesso em: 14 out. 2020.
- AIRBUS. **H160 certified by EASA**. 2020. Il. Fotografia 10 color. Online. Disponível em: https://www.airbus.com/helicopters/civil-helicopters/medium/h160.html#medialist_copy_2010816655-image-image-all_ml_0-2. Acesso em: 19 out. 2020.
- AIRBUS. **Innovation at your service**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/helicopters/civil-helicopters/medium/h160.html#tech>. Acesso em: 19 out. 2020.
- AIRBUS. **More details on the Airbus A380**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380/innovation.html#reliability>. Acesso em: 06 out. 2020.
- AIRBUS. **Onshore and offshore oil & gas**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/helicopters/civil-helicopters/light-twin/h145.html>. Acesso em: 14 out. 2020.
- AIRBUS. **The future is now! Airbus Helicopters unveils its all-new H160**. 2015. Online. Disponível em: <http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2015/03/the-future-is>

now-airbus-helicopters-unveils-its-all-new-h160-as-the-benchmark-for-medium-class-rot.html. Acesso em: 03 ago. 2020.

AIRBUS. **50th anniversary of the trademark Fenestron**. 2018. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/04/50th-anniversary-of-the-trademark-fenestron.html>. Acesso em: 07 out. 2020.

AIRCRAFT, Cirrus. **This choice is simple**. 2020. Online. Disponível em: <http://www.whycirrus.com>. Acesso em: 15 set. 2020.

AVIATION, Acs. **Acs SORA-e**. 2015. Online. Disponível em: <https://www.acs-solutions.com.br/index.php/produtos>. Acesso em: 28 set. 2020.

AVIATION, Acs. **Primeiro voo Sora-e**. 2015. Il. Fotografia 5 color. Online. Disponível em: <https://www.acs-solutions.com.br/index.php/fotos?layout=edit&id=54>. Acesso em 28 set. 2020.

BARRACUDA. **Espuma PVC**. 2016. Il. Fotografia 4 color. Online. Disponível em: <http://www.barracudacomposites.com.br/site/produtos/>. Acesso em 28 set. 2020.

BARRACUDA. **Espuma PVC**. 2019. Online. Disponível em: <http://www.barracudacomposites.com.br/site/portfolio/espuma-pvc/>. Acesso em: 28 set. 2020.

BARRACUDA. **Honeycomb**. 2016. Il fotografia 8 color. Online. Disponível em: <http://www.barracudacomposites.com.br/site/produtos/>. Acesso em: 03 ago. 2020.

BARRACUDA. **Materiais Sandwich, Honeycomb**. 2012. Online. Disponível em: http://www.barracudacomposites.com.br/prod_honeycomb.htm. Acesso em: 05 out. 2020.

BARRACUDA. **Tecido de fibra de aramida**. 2019. Il. Fotografia 3 color. Online. Disponível em: <http://www.barracudacomposites.com.br/site/portfolio/fibra-de-aramida/>. Acesso em: 02 ago. 2020.

BARRACUDA. **Tecido de fibra de vidro**. 2019. Il. Fotografia 1 color. Online. Disponível em: <http://www.barracudacomposites.com.br/site/portfolio/fibra-de-vidro-2/>. Acesso em: 02 ago. 2020.

BOEING. **Advanced composite use**. 2019. Online. Disponível em: <http://www.Boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>. Acesso em: 29 jul. 2020.

BOEING. **Boeing 787 from the ground up**. 2008. Online. Disponível em: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html. Acesso em: 06 out. 2020.

BOEING, **787 dreamliner by design**. 2019. Online. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/lower-cabin-altitude>. Acesso em: 19 out. 2020.

BOEING. **787 dreamliner by design**. 2019. Online. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/reduced-emissions>. Acesso em: 05 out. 2020.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, Jr. David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc- Livros Técnicos e Editoras, 2012. 845 p. Sergio Murilo Stamile Soares.

CALLISTER. **Um esquema de classificação para vários tipos de compósito**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc- Livros Técnicos e Editoras, 2012. P. 360., Il. Figura 1 P&b. Adaptado pelo autor.

COMAC. **ARJ21**. 2019. Online. Disponível em: <http://english.comac.cc/products/rj/>. Acesso em: 07 ago. 2020.

COMAC. **Full-scale barrel section of CR929 composite fwd fuselage rolls out**. 2018. Online. Disponível em: http://english.comac.cc/news/latest/201901/08/t20190108_6677671.shtml. Acesso em: 04 ago. 2020.

COMAC. **Seção central em compósito – CR929**. 2018. Il. Fotografia 13 color. Online. Disponível em: http://english.comac.cc/news/latest/201901/08/t20190108_6677671.shtml. Acesso em: 04 ago. 2020.

DIPROFIBER. **Fibra de carbono**. 2020. Online. Disponível em: <http://diprofiber.com.br/fibra-de-carbono/>. Acesso em: 02 ago. 2020.

DIPROFIBER. **Materiais de núcleo**. 2020. Online. Disponível em: <http://diprofiber.com.br/materiais-de-nucleo/>. Acesso em: 03 ago. 2020.

DUPONT. **Fibra de Aramida**. 2020. Online. Disponível em: <http://www.dupont.com.br/fabrics-fibers-and-nonwovens/kevlar-for-aerospace.html>. Acesso em: 02 ago. 2020.

EMBRAER. **E175-E2 Empennage**. 2018. Il. Fotografia 11 color. Online. Disponível em: <https://www.embraercommercialaviation.com/news/first-e175-e2-horizontal-empennage-is-ready-for-tests/>. Acesso em: 07 out. 2020.

EMBRAER. **First Horizontal Empennage for the E175-E2**. 2018. Online. Disponível em: <https://www.embraercommercialaviation.com/news/first-e175-e2-horizontal-empennage-is-ready-for-tests/>. Acesso em: 07 out. 2020.

EMBRAER. **Phenom 300E se torna o primeiro jato single-pilot a atingir Mach 0,80 e recebe avanços de desempenho, conforto e tecnologia**. 2020. Online. Disponível em: <https://executive.embraer.com/br/pt/noticias?slug=1206687-phenom-300e-se-torna-o-primeiro-jato-single-pilot-a-atingir-mach-0-80-e-recebe-avancos-de-desempenho-conforto-e-tecnologia>. Acesso em: 04 ago. 2020.

FRANCO, Vitor. **Compósitos laminados**. 2011. Il. Figura 2 color. Online. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8777350-Notas-sobre-dano-em-materiais-compositos.html>. Acesso em: 03 ago. 2020.

FUALDES, Chantal. **Have a nose around our materials labs**. 2019. Online. Disponível em: <https://www.airbus.com/company/history/airbus50/day26.html>. Acesso em: 03 ago. 2020.

GROUP, Jec. **High performance in helicopters**. 2011. Online. Disponível em: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/high-performance-helicopters>. Acesso em: 03 out. 2020.

HEXCEL. **Honeycomb**. 2020. Online. Disponível em: <https://hexcel.com/Products/Honeycomb/>. Acesso em: 05 out. 2020.

KESARWANI, Shivi. **A380 materials overview**. 2017. Il. Figura 7 color. Online. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Composite-structure-of-A380-The-A380-is-the-first-aircraft-ever-that-boasts-a-CFRP_fig5_317607272. Acesso em: 06 out. 2020.

KNOWLEDGE, Aviation. **Boeing 787 composite parts**. 2012. Il. Figura 8 color. Online. Disponível em: <http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:boeing-787-advancements>. Acesso em: 06 out. 2020.

LOMBARDI, Mike. **Progress, despite a recession**. 2003. Online. Disponível em: http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2003/october/i_history.html. Acesso em: 16 set. 2020.

MARTIM, lockheed. **Advanced Manufacturing**. 2020. Online. Disponível em: <http://www.Lockheedmartin.com/en-us/capabilities/advanced-manufacturing.html>. Acesso em: 04 ago. 2020.

MILLER. **Active Fiber Composite in ATR**. 2006. Il. figura 3 P&B. adaptado pelo autor. Online. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Application-of-helicopter-rotor-blade-active-Miller-Narkiewicz/ef8ed8b0ac76c489135e7fc686c1fbde5df2c264/figure/35>. Acesso em: 13 out.2020.

MOURITZ, Adrian P. **Introduction to aerospace materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limite, 2012. 1036 p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/read/282656648/Introduction-to-Aerospace-Materials#>. Acesso em: 20 out. 2020.

PLAScore. **Painéis de Honeycomb**. 2020. Il. Figura 4 color. Adaptado pelo autor. Online. Disponível em: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/>. Acesso em: 06 out. 2020.

PLAScore. **Understanding Honeycomb Panels**. 2020. Il. Figura 5 color. Online. Disponível em: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>. Acesso em 06 out. 2020.

PLAScore. **Understanding Honeycomb Panels**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>. Acesso em: 06 out. 2020.

RIFENG. **Espuma PMI**. 2020. Il. Fotografia 6 color. Online. Disponível em: <http://rfpmi.com/Product-show-1-Rifeng-WH.html>. Acesso em: 05 out.2020.

RIFENG. **Product show**. 2020. Online. Disponível em: <http://rfpmi.com/product.html>. Acesso em: 14 out.2020.

RIFENG, Rifeng wh. 2020. Online. Disponível em: <http://rfpmi.com/Product-show-1-Rifeng-WH.html>. Acesso em: 05 out. 2020.

SCRIBOL. **Increase in Airbus composite parts as percentage of total aircraft weight/ 1970-2013**. 2018. Il. Gráfico 1 color. Online. Disponível em: <https://scribol.com/technology/aviation/airbus-a350-composites-on-trial-part-i/>. acesso em: 06 out. 2020.

SIKORSKY, Igor. I. **S-75 ACAP**. 2013. Il. Figura 9 P&B. Online. Disponível em: <https://www.sikorskyarchives.com/S-75%20ACAP.php>. Acesso em: 04 ago. 2020.

TECHNOLOGY, Fits. **FITS PEI Thermoformable panels**. 2020. Online. Disponível em: http://www.fits-technology.com/FITS_PEI.html. Acesso em: 05 out. 2020.

TECHNOLOGY, Fits. **Espuma FITS PEI**. 2020. Il. Fotografia 7 color. Online. Disponível em: <http://www.fits-technology.com/Manufacturingmethods.html>. Acesso em 06 out.2020

TIMES, The new York. **Materiais usados nas aeronaves da Boeing no período de 1969 a 2011**. 2013. Il. Gráfico 2 color. Online. Disponível em: <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/interactive/2013/07/29/business/The-Jump-to-a-Composite-Plane.html>. Acesso em: 19 out. 2020.

TODAY, Composites. **Embraer's Portugal Composites Facility Sends First Legacy 500 Parts**. 2020. Online. Disponível em: <https://www.compositestoday.com/2012/12/embraers-portugal-composites-facility-sends-first-legacy-500-parts/>. Acesso em: 07 out. 2020.

VRZONE. **Mass Production of Carbon Fiber Making New Strides**. 2017. Il. Fotografia 2 color. Online. Disponível em: <https://vrzone.com/articles/mass-production-carbon-fiber-making-new-strides/122457.html>. Acesso em: 07 out. 2020.

ZANATTA, Rodrigo. **Materiais compósitos na aviação**. 2012. Online. Disponível em: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/7/>. Acesso em: 01 ago. 2020.