

Vinicius Reis Leite
Universidade de Taubaté
viniciusreisleite@gmail.com

ESTADO DA ARTE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

RESUMO

As estruturas aeronáuticas são fabricadas a partir de materiais leves e de alta resistência, por exemplo, as ligas de alumínio, que são amplamente utilizadas na aeronave. Este trabalho visa discutir os materiais utilizados na construção de aeronaves e os fatores que influenciam na escolha do material estrutural. A evolução tecnológica que a fabricação e as matérias-primas vêm apresentando, cria novos espaços em aplicações não aeronáuticas contribuindo substancialmente para o crescimento do interesse industrial em desenvolver produtos com baixa densidade e com elevados padrões de qualidade e de resistência estrutural. A indústria aeronáutica sempre está em busca dos materiais que ofereçam grandes benefícios nas propriedades de redução de peso, custo e aumento da segurança e desempenho. Para que haja aplicação dessas ligas em aeronaves, é necessário um grande estudo detalhado das propriedades mecânicas nas diversas condições de carregamento e meio ambiente. Com o objetivo de substituir os tradicionais materiais metálicos na indústria aeronáutica e aeroespacial os materiais compósitos permitem que esses materiais sejam empregados em grande escala, a combinação que eles proporcionam de uma baixa massa específica com altos valores de resistência e rigidez torna seu uso ideal para o setor.

Palavras-chave: Compósitos; matrizes; fibras; aeronáutica; indústria.

ABSTRACT

Aeronautical structures are manufactured from lightweight materials and high-strength, for example, aluminum alloys, which are widely used in aircraft. This paper aims to discuss the materials used in the construction of aircraft and the factors that influence the choice of structural material. Technological developments that manufacturing and raw materials have, creates new spaces in aeronautical applications not contributing substantially to the growth of industrial interest in developing products with low density and high standards of quality and structural strength. The aviation industry is always in search of materials that offer great benefits in the properties for weight reduction, cost and increased security and performance. For implementation of these alloys in aircraft, it is necessary a great detailed study of mechanical properties in different loading conditions and environment. In order to replace the traditional metal materials in aerospace industry composite materials allow these materials are employed in large steps, the combination that they provide a low mass specific with high values of resistance and stiffness makes it your ideal use for the sector.

Keywords: Composites; arrays; fibers; aeronautics; industry.

Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi
Taubaté - SP
CEP 12060-440
Fone (12) 3625-4193

Editores responsáveis

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa
valesca.correa@unitau.com.br

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes vantagens que os modernos aviões comerciais ou militares apresentam em termos de desempenho é resultado da elevada qualidade dos materiais que são construídos, tanto na sua estrutura como nos sistemas de propulsão. A média de vida de um atual avião comercial é voar mais de 60.000 horas com mais de 20.000 voos em torno de 30 anos, para obter esse resultado os engenheiros, bem como a indústria, está constantemente a procura de materiais mais leves e mais fortes, quanto menor for a densidade do material, menor é o seu peso e conseqüentemente maior será o desempenho da aeronave. Para os motores a reação, os avanços tecnológicos permitem que esses materiais sejam expostos a temperaturas significativamente mais altas resultando em aumento dos níveis de empuxo.

A durabilidade das aeronaves está se tornando uma grande preocupação, durante os próximos anos é previsto um aumento significativo na demanda por viagens aéreas, e isso faz com que seja estendido o prazo de vida de uma aeronave pra muito além do projetado, isso faz com que a indústria busque novas tecnologias e materiais também para estender a vida útil, e não somente diminuir o peso e aumentar o desempenho. Alta resistência e baixo peso permanecem a combinação vencedora que impulsiona materiais compósitos no uso aeronáutico, mas outras propriedades são igualmente importantes. Os materiais compósitos oferecem um bom amortecimento de vibração e baixo coeficiente de expansão térmica, características que podem ser utilizadas para projetos em aplicações especializadas.

O setor aeronáutico requer muita segurança e confiabilidade em seus produtos. Para tanto, é necessário que seus componentes sejam testados e aprovados. Porém, um protótipo pode ter alto preço, já que são construídos em tamanho real e em materiais mais nobres que os comuns. Tais materiais podem ser ligas especiais, ligas de aço, ligas de alumínio e materiais compósitos. Dentre estes, os mais utilizados, quando se busca leveza e alto desempenho, são os materiais compósitos que devido à flexibilidade quanto a sua fabricação, podem-se obter propriedades mecânicas distintas de acordo com o projeto (MIDDLETON, 1990), esse tipo de material é ideal onde as relações altas resistência por peso e alta rigidez por peso são requeridas (NIU, 2006).

A Boeing, com a aeronave 787 Dreamliner, entrou em produção em dezembro de 2009 e fez com sucesso seu primeiro vôo utilizando 100% de materiais compostos em suas superfícies aerodinâmicas, assim os compósitos comandaram o centro das atenções no palco mundial aeroespacial. O 787 foi colocado no centro das atenções do mundo, junto com a notícia de três programas de grandes aviões administrados pela rival europeia Airbus. Esta tendência foi amplamente reforçada pelo design e desenvolvimento que a Airbus desenvolveu, a fuselagem fabricada com 53% de material compósito no Airbus A350 XWB, conforme mostra a Figura 1. Além disso, a Air France teve a entrega de seu primeiro jato de passageiros, o Airbus A380 e do avião de transporte militar A400M. Os quatro programas foram um marco de uma transformação há muito tempo esperada e que já ultrapassou não somente o mercado de aeronaves da aviação geral, mas sim que de longe tem sido utilizada na fabricação de aviões militares. O interesse na aplicação de estruturas com materiais compósitos continua a aumentar, devido essencialmente às suas excelentes propriedades mecânicas combinadas com baixo peso.



Figura 1: Fuselagem do A350 XWB, construída em materiais compósitos.

Fonte: <http://www.reinforcedplastics.com/view/13522/airbus-a350-xwb-update/>.

Compósitos se diferem dos materiais tradicionais, as peças fabricadas são compostas de duas componentes distintas – a fibra e a matriz (geralmente uma resina de polímero) - que, quando combinadas, funcionam de forma interativa criando um novo material, as propriedades mecânicas de cada uma são complementadas, o que torna uma das principais vantagens da combinação de fibra / resina.

Materiais compósitos podem ser definidos como materiais constituídos de dois ou mais materiais com diferentes propriedades. O objetivo de construir materiais compósitos é combinar diferentes materiais para obter propriedades superiores a cada um dos materiais isoladamente. (DANIEL e ISHAI, 1994).

Fibras de vidro, por exemplo, apresentam resistência relativamente elevada à tração, mas são suscetíveis a danos, por outro lado, a maioria das resinas de polímero são fracas na resistência à tração, mas são extremamente resistentes e maleáveis. Quando combinadas, a fibra e a resina tendem a neutralizar a fraqueza uma da outra, produzindo um material muito mais útil do que qualquer um dos seus componentes individuais.

A partir da década de 60 do século XX, os compósitos reforçados por fibras sintéticas foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial. O desenvolvimento de fibras de carbono, boro, quartzo ofereceu ao engenheiro a oportunidade de melhorar os projetos estruturais, atendendo assim, as necessidades de desempenho em voo, uma vez que se tornou possível projetar o material. A substituição de alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, permite uma redução de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças (ANGÉLICO, 2009).

Os materiais avançados, inicialmente desenvolvidos para o mercado aeroespacial militar, oferecem um desempenho superior ao dos metais estruturais convencionais e sua aplicação se dá em diversos setores, como a aplicação em satélites de comunicação, aeronaves, artigos esportivos, indústria pesada, exploração de petróleo e gás e na construção de turbinas eólica.

2 METAIS E LIGAS

O alumínio puro, como é conhecido na indústria, possui baixa resistência, é extremamente flexível e não possui nenhuma propriedade convincente para aplicação em estruturas, principalmente nas aeronáuticas. Entretanto quando ele é misturado com outros metais suas propriedades são significativamente melhoradas, tornando-se ideal para a aviação, com uma baixa densidade e alta resistência mecânica. No mundo da indústria aeronáutica três grupos de ligas de alumínio são amplamente utilizados por muitos anos e continuam a desempenhar um papel fundamental na construção de aeronaves.

A primeira liga de alumínio utilizada é ligada com cobre, magnésio, manganês, silício e ferro, sua composição é de 4% de cobre, 0,5% de magnésio, 0,5% de manganês, 0,3% de silício e 0,2% de ferro, sendo o restante de alumínio. A segunda liga contém um adicional de níquel de 1-2%, um teor mais elevado de magnésio e pequenas variações nas quantidades de cobre, silício e ferro. A propriedade mais importante dessa liga é a resistência a altas temperaturas, o que a torna altamente utilizada na fabricação de motores aeronáuticos. O terceiro grupo de liga de alumínio depende da inclusão de zinco e magnésio para aumentar a sua resistência, propriedade de mais importância, e possui uma composição típica de 2,5% de cobre, 5% de zinco, 3% de magnésio e 1% de níquel.

Estes três tipos de ligas citadas acima são amplamente utilizados para a construção da fuselagem, bem como em outros componentes que sofrem estresse. A escolha de qual dos três tipos de liga de alumínio que deve ser utilizada é influenciada por diversos fatores que o componente irá sofrer, como a força, ductilidade, facilidade de fabricação, resistência e receptividade ao tratamento de proteção de corrosão, resistência a fadiga e a propagação de trincas. A corrosão e a fadiga em ligas de alumínio são questões importantes na avaliação da vida útil em estruturas de aeronaves e na gestão de frotas, item que possui extrema importância econômica para as empresas de linhas aéreas. A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens do uso das ligas de alumínio.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do uso de ligas de alumínio na indústria aeronáutica. Fonte: (Martin; Evans, 2000).

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência e rigidez específica	Relativamente baixo limite de escoamento
Limite de resistência e módulo de elasticidade aceitáveis	Relativamente baixa dureza e resistência ao desgaste
Tratáveis termo-mecanicamente (trabalháveis-envelhecíveis)	Baixa temperatura de fusão
Ampla gama de variedade de propriedades mecânicas	Baixa temperatura de uso (superenvelhecimento)
Custo por unidade de massa relativamente baixo	

O Al é um metal quimicamente muito ativo, mas rapidamente desenvolve um filme natural isolante de alumina sobre a superfície quando exposto ao oxigênio. Consequentemente, este filme é capaz de proteger o metal contra corrosão em ambientes neutros porque a camada de óxido não permite que os elétrons produzidos por reações de oxidação atinjam a interface entre o óxido e o meio, evitando que as reações catódicas ocorram (HOLLINGSWORTH; HUNSICKER, 1987). Essa camada oxidada, evidentemente, é que vai ditar, de acordo com suas características, a possibilidade do processo de corrosão prosseguir (MORETO, 2008).

Cada tipo de aeronave fabricada possui suas diferentes exigências em relação a qual tipo de material deve ser utilizado na sua construção. Podemos citar como exemplo uma aeronave militar, que possui relativamente um curto período de tempo de vida, medido em centenas de horas, da qual não exige o mesmo grau de fadiga e resistência a corrosão que uma aeronave civil exige, com uma vida útil estimada de 30.000 horas ou mais. Como nem tudo é extremamente perfeito na fabricação de materiais, quando uma propriedade em particular de liga de alumínio é melhorada, consequentemente outra propriedade é sacrificada. O desenvolvimento dessas ligas se concentra na produção de materiais que possuem maior propriedade específica e que traz benefícios em relação à redução do peso, em vez de tentar aumentar a rigidez ou a resistência.

Atualmente existe uma grande variedade de peças fabricadas em materiais compostos que podem ser encontradas nos aviões em substituição aos materiais metálicos, por exemplo a fuselagem, *spoilers*, portas de trem de aterrissagem, portas internas, pás da hélice principal, hélice traseira, árvore de transmissão.

Os efeitos do meio ambiente nos componentes estruturais e não estruturais de uma aeronave, sempre foram uma preocupação para seus fabricantes; a fabricação com diversos materiais metálicos e não metálicos,

estabelecendo uma complexa equação de forma a atender requisitos de peso, elasticidade, resistência a fadiga, resistência a corrosão, etc.... faz com que a aeronave constitui um grande desafio as leis naturais, para que seu objetivo seja cumprido: transportar o homem com segurança (CHAGAS, 2002)

O primeiro grupo das ligas de alumínio possui força estática mais baixa, suportando menos que as ligas que possuem zinco, elas são as preferidas para as estruturas que devem possuir alta resistência a fadiga, como as partes inferiores das asas, onde as cargas de fadiga devido a tração são predominantes. As experiências no desenvolvimento da liga de alumínio têm mostrado que o envelhecimento natural traz vantagens importantes para algumas propriedades, como a fadiga, a resistência e resistência a propagação de trincas, além disso, foi descoberto que a inclusão de um percentual mais elevado de magnésio faz com que o material envelheça com propriedades mecânicas melhores. Esta liga possui uma composição de 4,5% de cobre, 1,5% de magnésio, 0,6% de manganês e o restante de alumínio.

De acordo com (ASM SPECIALITY, 1993) as ligas de alumínio podem ser classificadas da seguinte maneira:

1XXX – Composta por alumínio puro não ligado. Os materiais desta família caracterizam-se por possuírem as menores propriedades mecânicas, porém possuem maior condutividade térmica e elétrica, e também maior conformabilidade plástica. Essas ligas são utilizadas apenas por conformação mecânica a frio.

2XXX – Esta série de liga tem como principal elemento de liga o Cobre, e as principais características dessa família são: maior resistência, reduzida taxa de propagação de trincas, resistência térmica e facilidade de usinagem.

3XXX – Contém como elemento básico de liga o Magnésio. A liga 3003 é a liga mais representativa dessa série, pois a adição de Cobre aumenta um pouco o limite da resistência, e juntamente com a adição de Ferro possibilita a obtenção de uma estrutura granular mais fina.

4XXX – As ligas desta série se subdividem em duas categorias: baixo teor de Silício (abaixo de 2% com ou sem magnésio) e alto teor de silício (5 a 13%, com uma grande variedade de elementos adicionais de liga). As de baixo teor são utilizadas na confecção de utensílios domésticos e as de alto teor são utilizadas na fabricação de trocadores de calor.

5XXX – As ligas industriais desta série raramente contêm mais do que 5% de magnésio, pois além deste limite a estabilidade destas ligas decresce, particularmente sob influência da temperatura. Possuem como propriedades mecânicas de destaque: excelente soldabilidade alta resistência a corrosão, mesmo nas regiões soldadas e boa conformabilidade a frio.

6XXX – Contêm como elementos de liga silício e magnésio. São caracterizadas pelas seguintes propriedades mecânicas: grande aptidão para trabalho a quente (extrusão, laminação, forjamento), boa resistência a corrosão atmosférica (nível de propriedades mecânicas que pode ser incrementado pela adição de silício) boa soldabilidade (arco e brasagem), boa conformabilidade a frio e boa aptidão para tratamento de superfícies.

7XXX – As ligas desta série são aquelas que possuem maiores resistência mecânicas, e são subdivididas em duas categorias: com ou sem adição de cobre. As ligas com adição de cobre são mais fortes de alumínio que podem ser produzidas, em termos de resistência mecânica. São largamente utilizadas na indústria aeroespacial, na fabricação de moldes de conformação de termoplásticos e em estruturas onde se necessita de leveza e alta resistência mecânica.

8XXX – A adição simultânea de ferro, silício e lítio proporcionam grãos refinados e limites de resistência melhorados. Com a estrutura granular refinada e boa isotropia, estas ligas apresentam boa conformabilidade, especialmente em condições de grande dificuldade.

A busca e o interesse em ligas de alumínio-magnésio-silício têm aumentado no decorrer do tempo, mesmo estando na indústria aeronáutica há anos, esse interesse é devido que essa liga é mais barata que a liga alumínio-cobre, e é uma liga soldável, o que também faz diminuir os custos de fabricação.

Os efeitos do meio ambiente nos componentes estruturais e não estruturais de uma aeronave, sempre foram uma preocupação para seus fabricantes. Fabricada com diversos materiais metálicos e não metálicos, estabelecendo-se uma complexa equação de forma a atender requisitos de peso, elasticidade, resistência à fadiga, resistência à corrosão, etc., a aeronave constitui um grande desafio às leis naturais, para que seu objetivo seja cumprido: transportar o homem com segurança (CHAGAS, 2002).

Com o decorrer dos anos, o aço foi amplamente substituído pelas ligas de alumínio, ele possui alta densidade específica e impede seu uso generalizado na construção de aeronaves, mas mesmo assim ele manteve seu valor como material para o uso em algumas peças fundidas ou em pequenos componentes que exigem alta resistência a tração, alta rigidez e alta resistência ao desgaste.

Outra liga utilizada em aeronaves é a liga de titânio, sua utilização aumentou sensivelmente na década de 80 para a construção de aviões de combate, ao invés de aviões de transporte. A quantidade de liga de titânio que uma aeronave possui tem a mesma ordem de peso estrutural que as ligas de alumínio, elas possuem boa força de resistência a fadiga, tração e temperatura. As desvantagens ficam por conta da densidade extremamente elevada, alto custo de fabricação, cerca de sete vezes superiores ao alumínio e ao aço.

3 MATERIAS COMPÓSITOS

Como definição básica, os materiais compósitos são uma combinação de dois os mais componentes distintos, o que produz um novo material com propriedades resultantes mais atrativas em relação aquelas dos constituintes individuais. Existem vários tipos de materiais compósitos, dos quais são constituídos basicamente de um certo tipo de reforço embebido de uma determinada matriz. Dentre os compósitos mais conhecidos podemos citar o compósito de matriz polimérica, os as matrizes são constituídas de polímeros que pode ser do tipo termorrígido e termoplástico, tendo como reforço diversos tipos de fibras, como as fibras de carbono, vidro e polímeros (como por exemplo, a aramida, o polietileno e a poliamida) (NOGUEIRA,2004).

Em geral, para os materiais de uso aeronáutico usa-se fibras extremamente leves e resistentes à tração, mas que são como qualquer pedaço de linha: não se comportam de forma muito interessante em relação à compressão. Para os materiais compósitos uma matriz tipicamente de natureza polimérica (também pode ser metálica ou cerâmica) é utilizada. Essa matriz é bem menos resistente às solicitações mecânicas, porém é capaz de manter as fibras no lugar, transmitir as forças entre elas e definir a forma do componente, dessa forma foi desenvolvido os materiais compósitos. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os materiais compósitos e as ligas metálicas.

Tabela 2 – Comparação entre materiais compósitos e ligas metálicas na aplicação aeronáutica. Fonte: (PETERS, 1998).

Vantagens Materiais Compósitos	Desvantagens
Menos densos.	Mais caros.
Resistência a corrosão.	Restrita quantidade de dados estabelecidos e confiáveis de projetos e sem serviço.

Resistência à fadiga.	Corrosão dos prendedores metálicos.
Mínima usinagem requerida.	Degradação em ambientes suficientemente úmidos e quentes.
Seções e contornos complexos facilmente fabricados.	Relativamente baixa resistência a impactos.
Orientação preferencial da resistência e rigidez nas direções necessárias.	Requer proteção contra descargas elétricas.
Número reduzido de montagens e de prendedores.	Métodos de inspeção complexos e caros.
Absorvem micro-ondas de radar	Imprecisão na detecção de defeitos de colagem.
Expansão/contração térmica próximas de zero	Imprecisão na localização de defeitos.

As vantagens de compósitos de alto desempenho são muitas, incluindo a capacidade de adaptar-se a diversos tipos de layouts e mesmo assim mantendo uma ótima resistência e rigidez a fadiga, à corrosão, e, com boas práticas de projeto, redução no custo de montagem devido ao menor número de peças e elementos de fixação. A resistência de compósitos de fibras de alta resistência, em especial fibras de carbono, são mais elevadas do que outras ligas metálicas, quando se compara aos materiais utilizados na indústria aeroespacial. Isso se traduz em maior economia de peso, resultando em um melhor desempenho, maiores cargas, maior alcance e economia de combustível da aeronave.

Os militares dos EUA foram os pioneiros no desenvolvimento e adaptação de materiais compósitos. Podemos citar a aeronave AV- 8B, que tinha uma fuselagem com 27% de compósitos, isso no início de 1980. O primeiro uso em larga escala de materiais compósitos em aeronaves comerciais ocorreu em 1985, quando o Airbus A320 voou pela primeira vez com estabilizadores horizontais e verticais construídos com compósitos. A Airbus aplicou compósitos em até 15 % do peso total das estruturas para as suas aeronaves A320, A330 e A340.

Embora esses percentuais sejam menores para aeronaves comerciais, as partes das estruturas possuem um tamanho muito maior. Por exemplo, o estabilizador horizontal do Boeing 787 tem aproximadamente a mesma área de superfície da asa de um Boeing 737. O bombardeiro B-2 tem as maiores peças de compósitos fabricados até hoje e é a prova de que pelo menos alguns dos problemas de fabricação de grandes estruturas em compósito para aeronaves foram sanados. Há grandes máquinas automatizadas capazes de construir peças com um grande comprimento, no entanto, para fabricar este tipo de estrutura, no mundo avião comercial, o custo do compósito por estrutura ainda precisa ser reduzido, através de um design inovador e de fabricação de novas tecnologias. O custo dos materiais compósitos é o maior impedimento para a sua mais ampla aplicação.

Alguns dos componentes estruturais de aeronaves que são fabricados com compósitos poliméricos são: flapes, leme, carenagens, empenagens, aileron, tanques de combustível e profundor. Anteriormente esses componentes eram fabricados em ligas de alumínio, titânio e aços especiais, hoje, na sua grande maioria, já foram substituídos por materiais compósitos, como mostra a Figura 2.

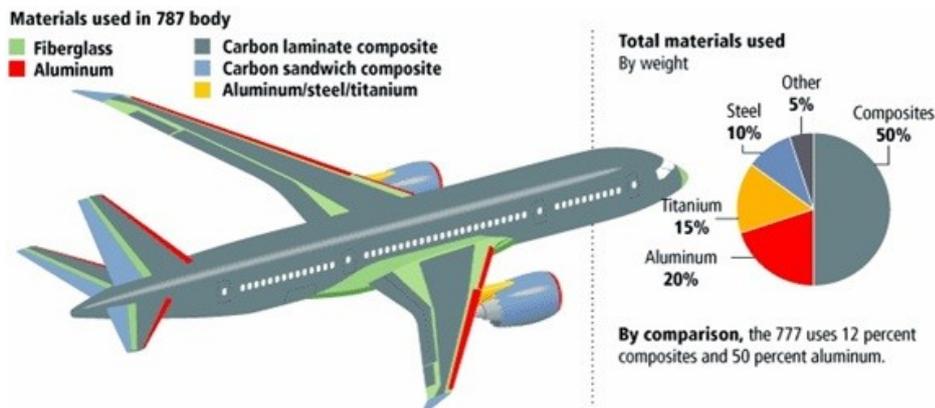


Figura 2: Materiais utilizados no Boeing 787.

Fonte: <http://www.engenhariae.com.br/wp-content/uploads/2013/01/Materiais-comp%C3%B3sitos-na-avia%C3%A7%C3%A3o.jpg>.

Os materiais compósitos não sofrem corrosão e sua resistência à fadiga é excelente, já a corrosão de ligas de alumínio é um grande custo e um problema de manutenção constante, tanto para aviões comerciais quanto para militares. A resistência à corrosão de compósitos pode resultar em grandes economias em custos de suporte e manutenção para as empresas e o governo, eles também oferecem baixa condutividade térmica, isolamento acústica e térmica e facilidade de obtenção de geometrias complexas.

Deve-se considerar também (ainda) que as etapas de cálculo estrutural, para dimensionamento de componentes e elementos da estrutura, como a determinação das propriedades físicas, mecânicas e elásticas do material, para atender aos requisitos de especificações técnicas e às necessidades dos projetistas, sejam igualmente relevantes. Não menos importantes, os processos de fabricação devem ser escolhidos com critério para abranger o trinômio produtividade-qualidade-custo e garantir competitividade ao produto. (MARINUCCI,2011)

Compósitos oferecem a oportunidade de reduzir significativamente a quantidade de trabalho na montagem e fixação dos componentes e peças de uma aeronave, elas podem ser combinadas por uma junção inicial ou por ligação adesiva.

Algumas das desvantagens de materiais compósitos são os altos custos da matéria-prima, da fabricação e da montagem. Na fabricação o custo varia entre 40-60% dependendo da complexidade da peça. Eles podem ser prejudicados pela temperatura, umidade, são suscetíveis a danos por impacto e delaminações, são mais difíceis de reparar do que a estrutura metálica.

4 COMPÓSITOS E FIBRAS

Fibras de compósitos contínuas são materiais laminados, em que as camadas individuais, lonas, ou lâminas são orientadas em direções que irão melhorar a força e a resistência na direção da carga. Na direção do ângulo de 0° os laminados unidirecionais são extremamente fortes e duros, por outro lado também são muito fracos na direção do ângulo de 90°, porque a carga tem de ser transportada pela matriz polimérica que é muito mais fraca.

Enquanto uma fibra de alta resistência pode ter uma resistência à tração de 500 ksi ou mais, uma matriz polimérica típica normalmente tem uma resistência à ruptura de apenas 5-10 ksi. A tensão e compressão das cargas longitudinais são realizadas pelas fibras, enquanto a matriz distribui as cargas entre as fibras sobtensão, estabilizando e impedindo que as fibras sofram deformação em compressão.

Com relação à orientação das fibras, verifica-se que as propriedades mecânicas dos compósitos na direção das fibras são melhores quando comparadas com aquelas medidas em outras direções (AGARWAL e BROUTMAN,

1980; FOLKES, 1985). Portanto, a estrutura irá suportar carregamentos mais elevados quando os mesmos atuarem na direção das fibras. Todavia, as fibras dispostas numa direção normal ao carregamento atuante promovem até uma redução na resistência do compósito (HULL, 1981).

A matriz também é o transportador primário de carga para cisalhamento entre as laminas (de cisalhamento entre as camadas). Embora essa abordagem possa funcionar para algumas estruturas é sempre necessário balancear a capacidade de transporte de carga em uma série de diferentes direções, como por exemplo, a 0°, 45° e 90°.

O principal papel das fibras é proporcionar resistência e rigidez; no entanto, como uma classe, as fibras de alta resistência são quebradiças, possuem comportamento de tensão e deformação de forma linear e com pouca ou nenhuma evidência de ceder, têm baixa tensão para falhas (para as fibras de carbono esse percentual fica entre 1-2%) e exibem variações de força maior do que os metais. A indústria aeronáutica exige um controle muito rigoroso na seleção de materiais que são utilizados no projeto e na fabricação de componentes, tendo como base os dados conhecidos das diferentes cargas envolvidas durante as diversas fases de operação da aeronave.

As fibras de vidro, como podem ser visualizadas na Figura 3, possuem um bom equilíbrio de propriedades mecânicas e um baixo custo de fabricação, elas são o reforço mais amplamente utilizado nas aeronaves, possuem alta densidade, boa resistência à corrosão e boas características de manobrabilidade. A fibra de vidro do tipo S-2, ou vidro "estrutural", foi desenvolvida em resposta à necessidade de uma maior força de resistência para o compartimento onde ficar armazenado os motores de foguetes. Seu custo de fabricação varia próximo a da fibra de carbono.



Figura 3: Fibra de vidro.

Fonte: <http://2.imimg.com/data2/BH/OL/MY-3994667567/fiberglass-cloth1-500x500.jpg>.

Fibras de aramida (comercialmente conhecidas como Kevlar) é uma fibra orgânica que tem uma baixa densidade e é extremamente dura, exibindo excelente tolerância ao dano. Embora tenha uma alta resistência à tração, ela possui propriedades negativas para a compressão. Ela é sensível à luz ultravioleta e não deve ser utilizada a longos períodos de tempos em temperaturas inferiores a 177°C, é uma fibra sintética muito resistente, leve e com aplicações muito variada sendo muito resistente ao calor e sete vezes mais resistente que o aço por unidade de peso (Figura 4).



Figura 4: Fibra de aramida.

Fonte: <http://www.aviacao.org/wp-content/uploads/2010/12/Tecido-de-Kevlar-trama-twill-2x2.jpg>.

Outra fibra orgânica desenvolvida é o Spectra, constituído de polietileno, ele tem uma baixa densidade, uma baixa constante dielétrica, excelente resistência ao impacto, mas, no entanto, a fraca adesão a matriz é um problema, e os tratamentos do plasma têm sido desenvolvidos para melhorar essa aderência.

A fibra de carbono contém a melhor combinação de propriedades mecânicas, mas também é mais cara que a fibra de vidro ou de aramida. A fibra de carbono tem uma densidade baixa, um baixo coeficiente de expansão térmica, e é condutora. Estruturalmente ela é muito eficiente e apresenta excelente resistência à fadiga, mas apresenta uma fraca resistência ao impacto. Sendo condutora, ela fará com que ocorra corrosão galvânica se colocada em contato direto com o alumínio. É amplamente utilizada no setor aeroespacial em aplicações estruturais como a fuselagem e em compósitos carbono/carbono para suportar temperaturas elevadas.

A corrosão custa anualmente à indústria aeronáutica milhões de reais em reparações e manutenção dos aviões (PEELER, 2002), sendo que grande parte destes custos são devidos à ausência de informações sobre a extensão ou gravidade da mesma. A corrosão na estrutura das aeronaves é resultante da combinação de certos fatores como a seleção de ligas e têmperas susceptíveis à corrosão, utilização de um sistema de proteção inadequado ou deteriorado, e exposição a vários ambientes agressivos (PIRES, 2002). A fibra de carbono está disponível em uma ampla gama de resistência e rigidez, com forças que vão 300-1000 Ksi.

Para melhorar a eficiência de consumo de combustível e aumentar o desempenho aerodinâmico das aeronaves os projetistas e engenheiros estão optando por não utilizar somente estruturas metálicas, como o alumínio aeronáutico, mas sim utilizar a fibra de carbono, que são menos densas e similares às construídas com alumínio. Os engenheiros utilizaram a fibra de carbono para construir as asas e a fuselagem do Airbus A350 XWB (Fig. 5), e com isso conseguiram reduzir em até 5% o consumo de combustível.



Figura 5: Asas do Airbus A350 XWB.

Fonte: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/imagens/010170140210-aviao-fibra-carbono-1.jpg>.

Os termos "carbono" e "grafite" são muitas vezes utilizados para descrever o mesmo material. No entanto, as fibras de carbono possuem aproximadamente 95% de carbono e são carbonizadas a 980-1500°C, enquanto as

fibras de grafite possuem aproximadamente 99% de carbono e são grafitadas a temperaturas entre 1980-3000°C. Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades mecânicas das fibras citadas acima.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das fibras. Fonte: (MEGSON, 2007).

<i>Fiber</i>	Density lb/in ³	Tensile Strength (ksi)	Elastic Modulus (msi)	Strain to Failure (%)	Diameter (mil)	Thermal Expansion Coefficient
<i>E-glass</i>	0.090	500	11.0	4.8	0.36	2.8
<i>S-glass</i>	0.092	650	12.6	5.6	0.36	1.3
<i>Quartz</i>	0.079	490	10.0	5.0	0.35	1.0
<i>Aramid (Kevlar 49)</i>	0.052	550	19.0	2.8	0.47	-1.1
<i>Spectra 1000</i>	0.035	450	25.0	0.7	1.00	-1.0
<i>Carbon (AS4)</i>	0.065	530	33.0	1.5	0.32	-0.2
<i>Carbon (IM-7)</i>	0.064	730	41.0	1.8	0.20	-0.2
<i>Graphite (P-100)</i>	0.078	350	107	0.3	0.43	-0.3
<i>Boron</i>	0.093	520	580	0.9	4.00	2.5

5 MATRIZES

A matriz mantém as fibras em sua posição correta, protege as fibras contra desgaste por atrito ou fricção, transfere e balanceia as cargas entre as fibras e proporciona resistência ao cisalhamento entre as laminas. Quando a matriz é corretamente escolhida, ela irá fornecer resistência ao calor, a produtos químicos, à umidade, além de determinar a forma do componente e a qualidade da sua superfície. Um compósito com matriz pode ser do tipo polímero, cerâmica, metal ou carbono. Matrizes poliméricas são as mais amplamente utilizadas para compósitos em aplicações comerciais e aeroespaciais de alto desempenho; as matrizes de cerâmica e de metal são normalmente utilizadas em ambientes de altas temperaturas, como os motores; e as matrizes de carbono são utilizadas em aplicações de temperaturas muito elevadas, como os freios de carbono-carbono e os bocais de foguetes.

As matrizes de polímeros mais amplamente utilizadas para compósitos em aplicações aeroespaciais são as resinas termo endurecíveis, que consiste em cadeias de polímeros que são permanentemente curadas quando misturadas com um catalisador e exposta ao calor. Essa cura geralmente ocorre sob condições de temperatura elevada e / ou condições de pressão no forno e / ou em autoclave. Existem tecnologias alternativas, mas menos utilizadas, como cura por feixe de elétrons, radiação ultravioleta, raios-X e micro-ondas.

Tabela 4 – Principais matrizes e seus compósitos. Fonte: o autor.

Matriz Polimérica	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica
Epóxi reforçado com aramida (densidade 1,43 g/cm ³)	Matriz metálica de alumínio reforçada com partículas de carbono	30% de carboneto de titânio e 70% de óxido de alumínio

Epóxi reforçado com carbono (densidade 1,53 g/cm ³)	Fibras/partículas de carbono (densidade 1,75 g/cm ³)	Fibras de óxido de alumínio em matriz de zircônio
Poliéster reforçado com fibras de vidro (densidade 1,9 g/cm ³)		

As resinas termofixas mais utilizadas para matrizes compósitas são poliésteres, vinil, epóxis, poliamidas e compostos fenólicos. Matrizes de compósitos poliméricos podem ser tanto termofixas ou termoplásticas. A resina termofixas consiste geralmente de uma resina, por exemplo, o epóxi, e um agente de cura compatível, assim quando os dois são misturados, formam um líquido de baixa viscosidade e essa reação forma uma série de ligações cruzadas entre as cadeias moleculares de modo que um grande peso molecular em forma de rede é formado, o que resulta na forma de um sólido insolúvel, que não pode ser reprocessado quando colocado sobre o aquecimento. Por outro lado, os termoplásticos, em uma temperatura suficiente alta amolecem e derretem, assim eles podem ser reprocessados várias vezes. Através de muita pesquisa e desenvolvimento foi confirmado que em compósitos termoplásticos, as resinas termofixas são de longe, as matrizes mais utilizadas para aplicação em compósitos atuais de alto desempenho.

A primeira consideração na escolha de qual de resina será utilizada, é verificar qual é a temperatura de serviço que a mesma será submetida. A temperatura de transição é um bom indicador da capacidade de temperatura que a matriz suporta. A temperatura de transição do vidro é a temperatura à qual um polímero muda de um sólido vítreo rígido para um material mais macio, semi flexível, por exemplo.

Neste ponto, a estrutura do polímero ainda está intacta, mas as ligações cruzadas não. A resina nunca deve ser utilizada acima da sua temperatura de serviço, ao menos que a vida do componente a ser fabricado seja muito curta, como a construção de um míssil, portanto para a escolha da resina deve ser avaliado para qual é a função específica para que se tenha o melhor desempenho.

Embora a escolha da fibra geralmente domine as propriedades mecânicas do material compósito, a seleção da matriz composta também pode influenciar o desempenho. Algumas resinas aderem às fibras melhores que outras, formando um vínculo químico e/ou mecânico que pode melhorar a capacidade de transferência de carga entre elas. As resinas são susceptíveis à microfissura quando expostas a temperaturas elevadas e as temperaturas de utilização (do ambiente) são muito baixas, fazendo com que esta condição crie uma grande diferença na expansão térmica entre as fibras e a matriz.

6 CONCLUSÃO

Apesar das vantagens que os materiais compósitos apresentam e que motivam a sua utilização na indústria aeroespacial, essa classe de materiais tem como desvantagem, em comparação aos metais, a susceptibilidade aos danos, perdendo muito de sua integridade estrutural quando isso ocorre. Os danos podem ocorrer durante o processamento da matéria-prima, fabricação da peça, manuseio, transporte, armazenagem, manutenção ou em serviço.

Os compósitos são resistentes à fadiga e fornecem flexibilidade de design e fabricação, que pode diminuir significativamente o número de peças necessárias para aplicações específicas, o que se traduz num produto acabado, que requer menos matéria-prima, menos articulações, fixadores e um menor custo de tempo de montagem. Eles também provaram resistência a temperaturas extremas, corrosão e desgaste, especialmente em ambientes industriais, onde essas propriedades se fazem de extremam importância para reduzir os custos do ciclo de vida do produto. Essas características têm impulsionado a ampla utilização dos materiais compósitos. O impulso para a economia de

combustível, em atenção ao aumento dos preços do petróleo, por exemplo, fez com a leveza torna-se uma prioridade em quase todos os tipos de transporte mecânico, das bicicletas até para os grandes aviões comerciais.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B.; BROUTMAN, L. *Analysis and performance of fiber composites*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1980.
- ANGELICO, R. A. *Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito*. Dissertação de Mestrado em engenharia mecânica. Escola de engenharia de São Carlos, USP, 2007.
- ALMEIDA, S. F. M.; NOGUEIRA NETO, Z. S. *Composite Structures*, 28, p. 130, 1994.
- ASM SPECIALTY Handbook: *Aluminum and aluminum alloys in aluminum-lithium alloys*. Ohio: ASM International, 1993.
- BRATUKHIN, A. G.; Bogolyubov, V. S. *Composite Manufacturing Technology*, Chapman & Hall, London, 1995.
- CHAGAS, M. M. Técnicas de controle e prevenção de corrosão em aeronaves. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 6. / Congresso Brasileiro De Corrosão, 22. Bahia, 2002. Disponível em: <<http://www.aaende.org.br/sitio/biblioteca/material/pdf/cote027.pdf>>. Acesso em: 20 de Junho de 2014.
- CHOU, T. W. *Materials Science and Technology – Structure and Properties of Composites*, v. 13, VCH Publishers Inc., New York, 1993
- DANIEL, I. M.; Ishai, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York – USA, Oxford University Press, 1994.
- CAMPBELL, F. C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Ed. Elsevier Science Ltd, 2006.
- FOLKES, M. J. *Short fiber reinforced thermoplastics*. England: Reseach Studies Press, 1985.
- HEXCEL. *Advanced Composite Reinforcements*. Hexcel Composites, Pleasanton, Califórnia, 1989.
- HULL, D. *An introduction to composite materials*. Cambridge, UK: Cambridge Uniservisty Press, 1981.
- MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*. Ed. Artliber, 2011.
- MIDDLETON, D. H. *Composite Materials in Aircraft Structures*, Logman, 1990.
- NIU, M. C. *Airframe Structural Design*, Conmilit Press LTD, California, 1988.
- NOGUEIRA, C. L. *Obtenção e caracterização de compósitos termoplásticos avançados à base de matrizes de polipropileno reforçados com fibra de carbono*. Tese de doutorado, Instituto tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2004.
- PEELER, D. T. Comprehensive damage management of the af aging fleet: the evolution of anticipate and manage technologies. In: Joint Faa/Dod/Nasa Aging Aircraft Conference, San Francisco, 2002.
- PETERS, S. T. *Handbook of composites*. London. Chapman & Hall, 1998.
- PIRES, R. R. *Melhorias implementadas nas aeronaves visando a diminuição na corrosão ao longo da vida econômica*. In: Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Congresso Brasileiro de Corrosão, Bahia, 2002.
- SILVA, R. A. *Processamento de compósitos metal/fibra-estudo de interface*, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2003.
- SCHWARTZ, M. M. *Composite Materials Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1984.
- STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*, SME, Dearbon, 1989.
- MEGSON, T.H.G. *Aircraft Structures: for engineering students*. 4ª edição. Elsevier Science Ltd, 2007.