

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Materiais compósitos de matriz polimérica na indústria
aeronáutica e perspectiva crítica de potencialidade:
polímeros com memória de forma**

Chiara Prado Nunes

SÃO CARLOS -SP
2023

Materiais compósitos de matriz polimérica na indústria aeronáutica e perspectiva crítica de potencialidade: polímeros com memória de forma

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Juliano Marini

São Carlos-SP
2023



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Chiara Prado Nunes

RA: 759003

TÍTULO: Materiais compósitos com matriz polimérica na indústria aeronáutica e perspectiva crítica de potencialidade: polímeros com memória de forma

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Juliano Marini

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 24/03/2023, 09h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Juliano Marini	8,0	9,0
Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio	8,0	9,0
Média	8,0	9,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Juliano Marini

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANO MARINI
Data: 24/03/2023 10:10:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS HENRIQUE SCURACCHIO
Data: 24/03/2023 10:50:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aos meus pais, que foram os meus maiores motivadores todos esses anos.

RESUMO

O presente trabalho tem como tema central o uso de materiais compósitos de matriz polimérica em aeronaves a partir de uma perspectiva da propriedade memória de forma. A aplicação de materiais poliméricos por meio de compósitos em aviões está sendo usada como um método principalmente de redução de custos, contudo, está diretamente atrelado à inovações e avanços tecnológicos que essa classe de materiais pode proporcionar; seja por um aspecto estrutural ou até mesmo por um fator de multifuncionalidade, característica essa que vem ganhando cada vez mais força nas indústrias de alta performance. Com isso, aprofundar estudos técnicos e específicos nessa classe de materiais tem se tornado crucial para a Ciência e Engenharia de Materiais, já que simboliza avanços significativos tanto para a academia científica, quanto para o setor industrial aéreo. Com essa finalidade, o objetivo geral é realizar uma análise crítica e de progresso de materiais compósitos de matriz polimérica com foco em uma propriedade particular: a memória de forma, analisando a possibilidade e viabilidade de usar materiais dessa classe em uma determinada peça articulada da asa do avião, o *flap*, uma vez que é um componente da asa que se movimenta em diferentes fases do voo e em diferentes temperaturas, a presença de uma propriedade no material que traz a mobilidade e multifuncionalidade, se torna chamativo para a aplicação. Assim, instituições de referências na aeronáutica estão dedicando esforços para melhorar a eficiência dos aviões, e aprimorar conhecimentos e o maior desafio a ser superado está sendo nas propriedades mecânicas e o entendimento completo do comportamento desses materiais para simulações mais precisas, no entanto, o uso de reforços na matriz é uma técnica que pode mitigar a deficiência mecânica encontrada. Logo, compósitos à base de estireno e, principalmente, os compósitos à base de epóxi estão se mostrando muito promissores nesse âmbito. Por fim, materiais compósitos de matriz polimérica com memória de forma é um tema em ascensão e a indústria aeronáutica possui uma grande colaboração nesse progresso científico.

Palavras-chave: Compósito. Polímero. Memória de forma. Multifuncionalidade. Aeronáutica.

ABSTRACT

The present work has as its central theme the use of composite materials of polymeric matrix in aircraft from a perspective of the shape memory property. The application of polymeric materials through composites in aircraft is being used as a method mainly to reduce costs, however, it is directly linked to innovations and technological advances that this class of materials can provide; either by a structural aspect or even by a multifunctionality factor, a characteristic that has been gaining more and more strength in high-performance industries. Thus, further technical, and specific studies on this class of materials have become crucial for Materials Science and Engineering, since it symbolizes significant advances for both scientific academia and the aeronautical industrial sector. To this end, the general objective is to carry out a critical analysis and progress analysis of composite materials of polymeric matrix focusing on a particular property: shape memory, analyzing the possibility and feasibility of using materials of this class in a certain articulated part of the airplane wing, the flap, since it is a component of the wing that moves in different phases of flight and at different temperatures, the presence of a property in the material that brings mobility and multifunctionality becomes attractive for the application. Thus, reference institutions in aeronautics are devoting efforts to improving the efficiency of aircraft and improving knowledge the biggest challenge to be overcome is in the mechanical properties and complete understanding of the behavior of these materials for more accurate simulations, however, the use of reinforcements in the matrix is a technique that can mitigate the mechanical deficiency found. Therefore, composites based on styrene and mainly composites based on epoxy are showing great promise in this area. Finally, shape memory polymer matrix composites are a growing subject, and the aeronautic industry has a great collaboration in this scientific progress.

Keyword: Composite. Polymer. Shape memory. Multifunctionality. Aeronautics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Molécula da resina epóxi à base de bisfenol-A.	06
Figura 2 - Molécula da resina epóxi à base de bisfenol-F.	06
Figura 3 - Representação esquemática da formação de um material compósito.	07
Figura 4 - Diferentes formas de inserir o reforço na matriz do compósito polimérico.	07
Figura 5 - Processo esquemático do RTM.	10
Figura 6 - Título do gráfico	16
Figura 7 - Força específica de materiais aeronáuticos em função da temperatura.	17
Figura 8 - Aeronave Boeing 787 com nariz distintivo adquirido pela empresa de aviação LATAM.	18
Figura 9 - Proporção de compósitos no Boeing 787.	19
Figura 10 - Principais estruturas da aeronave Boeing 787.	19
Figura 11 - Fabricação dos cascos da asa inferior do A350 (parte do esqueleto).	21
Figura 12 - Fluxograma da classificação dos materiais com mudança em propriedades físicas.	22
Figura 13 - Ciclo esquemático de memória estimulado pelo calor.	24
Figura 14 - Diagrama 3D de tensão-deformação-temperatura demonstrando o comportamento termomecânico de SMPs.	25
Figura 15 - Diagrama esquemático de um ciclo de memória de forma para um polímero	26
Figura 16 - Representação lúdica da estrutura dos flap.	30
Figura 17 - Principais modelos de flaps.	30
Figura 18 - Processo de seleção de modelos de aeronaves do futuro	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de propriedades de diferentes tipos de compósitos poliméricos.	04
Tabela 2 - Comparação de propriedades mecânicas das 3 principais fibras de reforço.	08
Tabela 3 - Uso de compósitos poliméricos por componentes em variados modelos de aeronaves.	11
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens da aplicação de polímeros de alta eficiência em aviões.	13
Tabela 5 - Requisitos de aviões e demandas de design.	14
Tabela 6 - Propriedades das principais ligas de alumínio usadas nas asas das aeronaves.	35
Tabela 7 - Propriedades de compósito polimérico à base epóxi e resina epóxi.	35
Tabela 8 - Propriedades da resina epóxi.	35

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos Gerais	3
3. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica	4
3.1 Materiais Compósitos	4
3.2 Compósitos poliméricos aplicados em aeronaves	11
3.2.1 Modelos de aeronaves com compósitos poliméricos	18
3.3 Propriedade de memória de forma e polímeros	21
4. O uso de polímeros com memória de forma em aeronaves	29
5. Análise crítica	34
6. Conclusão	37
7. Referências	38

1. Introdução

O uso de materiais compósitos de matriz polimérica em aeronaves é uma estratégia muito utilizada atualmente por reduzir custos e possibilitar um desenvolvimento de desempenho. A indústria aeronáutica tem como prioridade a melhoria de eficiência sem que comprometa a segurança dos passageiros, com isso, muitos estudos relacionados à materiais multifuncionais estão sendo alvo de esforços dessa indústria, ao passo que as empresas Airbus e Boeing já desenvolveram aeronaves comerciais com até 50% da sua estrutura inteiramente de materiais compósitos, o que valida a potencialidade ascendente dessa classe de materiais. Assim, materiais com grande potencialidade para avanços tecnológicos e inovadores estão ganhando espaço nos investimentos científicos aeronáuticos.

Desse modo, materiais com memória de forma se apresentam como grandes candidatos para a aplicabilidade em aviões, isso porque são materiais com uma característica única: mudar de forma mediante um estímulo específico [1]. Essa propriedade se conecta diretamente com a estrutura, morfologia e multifuncionalidade tecnológica; partindo de conceitos da ciência e engenharia de materiais, a memória de forma pode ser revolucionária para melhorias aéreas, trazendo mais estabilidade, funcionalidade e rendimento para os voos e suas fases.

Nessa perspectiva, materiais compósitos de matriz polimérica com memória de forma possuem vantagens e desvantagens quando aplicados em aviões, como, redução de peso e baixa resistência mecânica, respectivamente. Contudo, com o auxílio de reforços, como, fibra de carbono na matriz, algumas das limitações podem ser superadas, unindo as boas propriedades durante o processamento das peças. Desse modo, os principais polímeros que podem apresentar propriedade de memória de forma com potencial aplicação no setor aeronáutico são os polímeros à base epóxi e de estireno, visto que apresentam propriedades estruturais para aplicações de alto desempenho.

Ao serem reforçados, esses materiais podem atuar em diversas áreas, como na medicina, em tubulações, para controle vibracional e aeronáutica; além disso, podem responder à estímulos tais quais calor, pressão, eletricidade, campo magnético, luz e químicos, o que mostra seu amplo espectro de possibilidades de atuação. Assim, instituições como NASA (*National Aeronautics and Space*

Administration), Airbus, Boeing já demonstram seu interesse tanto por materiais compósitos de matriz polimérica, quanto pela propriedade de memória de forma em si, conduzindo estudos que avaliam a propriedade mecânica de materiais compósitos poliméricos com memória de forma.

Ademais, compósitos à base epóxi se mostram promissores em comparação às propriedades de ligas de alumínio atualmente utilizadas em determinadas peças articuladas da asa do avião, como o *flap*, que é uma parte da asa que precisa se movimentar e é essencial para a decolagem e pouso. Com isso, tendo o *flap* como referência, a propriedade memória de forma nessas peças se torna um diferencial; isso porque o *flap* tem como função se movimentar gerando mais estabilidade aos voos e quando a propriedade memória de forma é aplicada, essa movimentação é vinculada por meio de um estímulo específico.

Nesse sentido, a propriedade memória de forma se mostra muito promissora para as aeronaves de um futuro próximo, as quais visam multifuncionalidade, eficiência e maior conforto, ao passo que o setor aeronáutico e aeroespacial sempre designaram interesse e dedicação para a inserção de polímeros de alto desempenho nas estruturas dos aviões.

2. Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise da ascensão do uso de compósitos poliméricos com memória de forma em aeronaves modernas, avaliando como esses materiais se comportam, seu processamento, suas vantagens e desvantagens e comparação.

Além disso, tem-se por objetivo também realizar uma análise crítica do uso dessa classe de materiais em aeronaves, seja em estruturas primárias ou secundárias.

3. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica

3.1 Materiais Compósitos

Os compósitos estão dentro de uma classe de materiais que são formulados a partir de outros materiais com natureza distinta, em que o principal objetivo é conciliar propriedades. Normalmente a matriz é de um material continuado com fase(s) dispersa(s); além disso, aspectos como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e compatibilidade interfacial influenciam diretamente nas propriedades que o material compósito possui [2]. Com isso, os materiais compósitos precisam ter uma afinidade entre os materiais constituintes, logo, é crucial conhecer as propriedades químicas e físicas dos constituintes.

A adesão dos materiais está relacionada com as interações estruturais, tais como, ligações químicas (covalente, força de van der Waals, ligações de hidrogênio) e interações eletrostáticas, logo, a afinidade química também é fundamental.

Os compósitos poliméricos podem ser classificados como materiais de matriz termofixa ou termoplástica, em que sua principal diferença fica aparente quando são aquecidos, ou seja, os termofixos após a cura possuem uma alta densidade de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares, o que os restringe da capacidade de serem moldados várias vezes; já os termoplásticos possuem essa característica de serem moldados diversas vezes pois no aquecimento se tornam fluidos e no resfriamento solidificam [2]. Na Tabela 1 são listadas algumas características desses dois tipos de matrizes para compósitos poliméricos:

Tabela 1 – Comparação de propriedades dos diferentes tipos de matrizes para compósitos poliméricos [2].

<u>Termoplásticos</u>	<u>Termofixos</u>
Recicláveis mecanicamente	Não recicláveis mecanicamente
Tempo ilimitado de prateleira	Tempo limitado de prateleira
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento

Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Com isso, os termofixos são os mais usados para uso estrutural em compósitos, visto que possuem vantagens importantes para a indústria aeronáutica, como [3]:

- Alta rigidez, estabilidade térmica e dimensional;
- Isolamento elétrico e térmico;
- Resistência à fluência e relaxação;
- Processamento facilitado;
- Em resinas termofixas as fibras apresentam boa molhabilidade, ocasionando menos porosidade e menores espaços vazios na peça.

Contudo algumas das desvantagens podem ser listadas como [3]:

- Tempo de cura grande, acarretando menores taxas de produção;
- Não pode ser reprocessado para atingir novas geometrias;
- Não pode ser reciclado.

Nesse sentido os principais termofixos (e propriedades de destaque) utilizados como matrizes em materiais compósitos são [4] :

- **Resinas de poliéster insaturado:** baixa resistência térmica (120 a 150°C), baixo custo;
- **Resinas fenólicas:** média resistência térmica (150 a 230°C), médio custo;
- **Resinas epóxi:** média resistência térmica (230 a 260°C), custo mais elevado, maior resistência mecânica;
- **Resinas amínicas:** elevada resistência térmica (315 a 480°C), custo muito elevado.

Um dos termofixos mais usados em aeronaves são as resinas epóxi. Isso porque apresentam muitas vantagens para projetos estruturais de alto desempenho, a exemplo [5]:

- Baixa viscosidade - moldagem facilitada;
- Baixa contração - tensões residuais não se desenvolvem;
- Possibilidade de cura em temperatura ambiente - menor custo de produção;
- Alto módulo de elasticidade;
- Boa compatibilidade mecânica-dimensional com fibra de carbono.

As resinas que mais são usadas são advindas da reação do bisfenol-A e epícloridrina, resultando na resina diglicil éter bisfenol-A (DGEBA), sendo resinas bifuncionais com dois grupos epóxi por molécula. Outra resina epóxi é a resina à base de bisfenol-F (DGEBF), em que trocar bisfenol-A por bisfenol-F resulta em uma resina com maior densidade de ligações cruzadas, logo, quando curada, tem um melhor desempenho mecânico, químico e térmico. Nas figuras abaixo estão representadas as moléculas de resina epóxi à base de bisfenol-A (Figura 1) e bisfenol-F (Figura 2) [6].

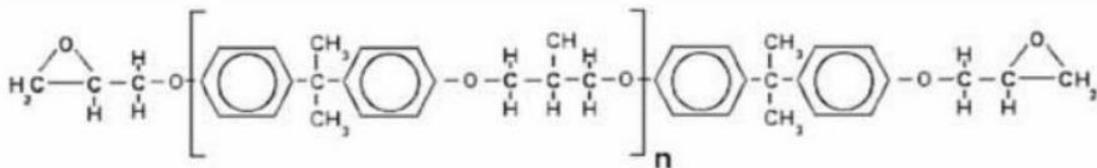


Figura 1 – Molécula da resina epóxi à base de bisfenol-A [6].

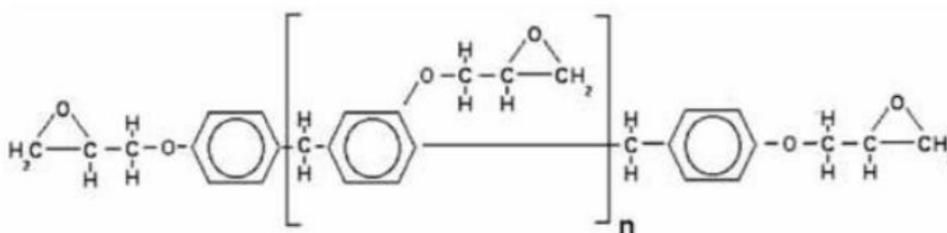


Figura 2 – Molécula da resina epóxi à base de bisfenol-F [6].

De modo geral, o que resulta num material compósito é, essencialmente, a união de um reforço com uma matriz, em que na Figura 3 é demonstrado esquematicamente esse processo, unindo um reforço com forma de fibra (fase dispersa) com uma matriz [6].

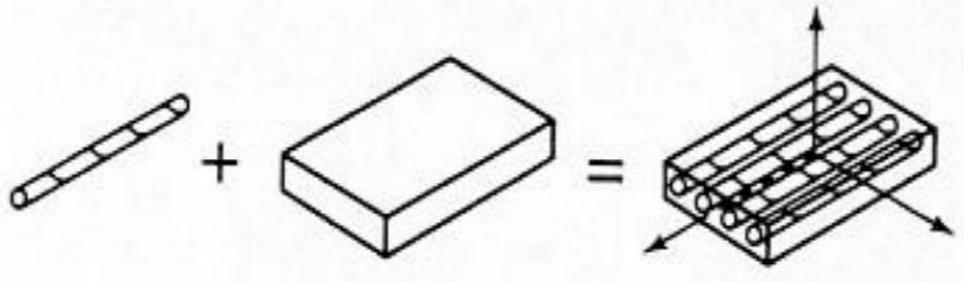


Figura 3 – Representação esquemática da formação de um material compósito [6].

Os termofixos podem ser reforçados com fibras ou particulados, os quais podem ser inseridos na matriz de diferentes formas como demonstrado na Figura 4:

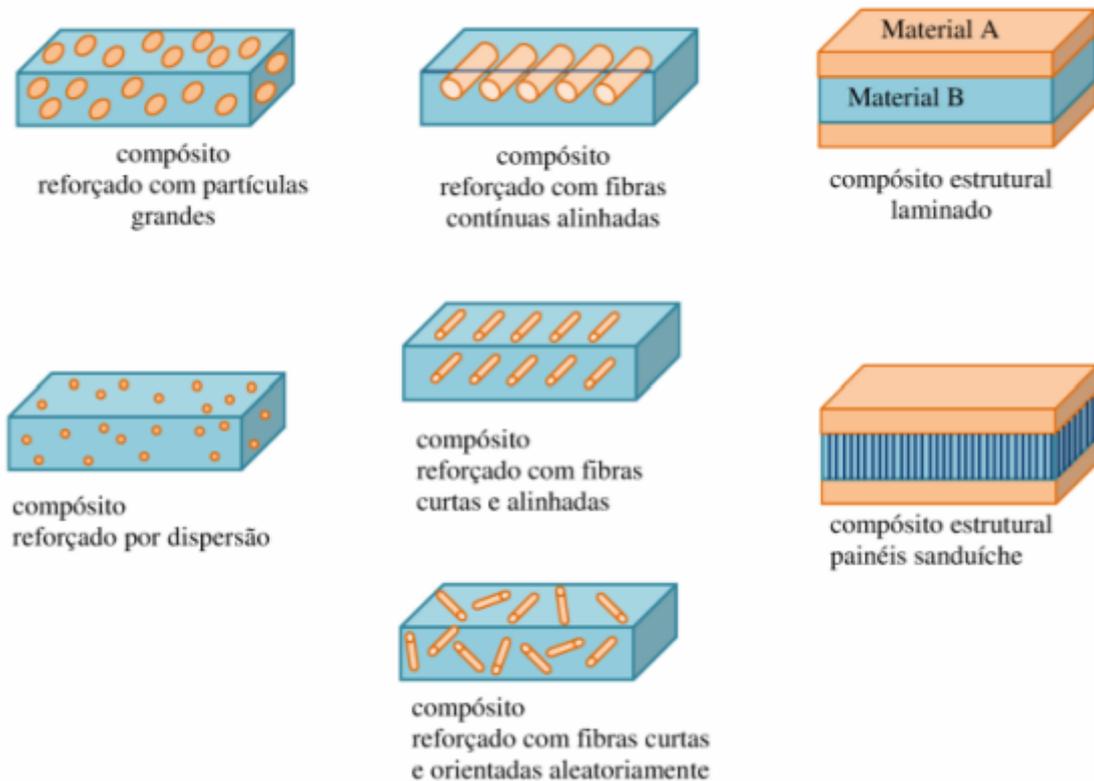


Figura 4 – Diferentes formas de inserir o reforço na matriz do compósito [6].

O tipo de reforço mais utilizado na fabricação de compósitos poliméricos avançados é a fibra de carbono, isso porque possuem os maiores valores de módulo específico e a maior resistência específica por unidade de massa (comparando com as outras fibras de reforço); além disso, retêm altos módulo de tração e resistência em altas temperaturas; em temperatura ambiente, as fibras de carbono são pouco afetadas pela umidade e diversos solventes, ácidos e bases e a fabricação de peças com esse compósito tem um ótimo custo benefício. Na Tabela 2 é apresentado a comparação entre as principais fibras usadas (vidro, carbono e aramida), mostrando valores específicos de propriedades mecânicas [6].

Tabela 2 – Comparação de propriedades mecânicas das 3 principais fibras de reforço [6].

Propriedades	Vidro	Aramida	Carbono
Massa específica ρ_f (g/cm ³)	2,45	1,47	1,77
Módulo de elasticidade longitudinal E_1 (GPa)	71	154	224
Módulo de elasticidade transversal E_2 (GPa)	71	4,2	14
Coeficiente de Poisson ν_{12}	0,22	0,35	0,2
Módulo de cisalhamento (GPa)	30	12	14
Resistência à tração longitudinal (MPa)	3500	2800	2100
Elongação (%)	3,5	2,3	0,6
Coeficiente de expansão térmica α_1 ($10^{-6} K^{-1}$)	5	-4	-1

Contudo, por mais que a fibra de carbono apresente boas propriedades para ser inserida em uma matriz polimérica, também possui pouca afinidade com algumas matrizes poliméricas, o que dificulta a adesão da fibra com a matriz, sendo um fator determinante para a aplicabilidade desses materiais na indústria aeronáutica. Desse modo, se faz necessário um tratamento superficial das fibras para melhorar a adesão interfacial, visto que uma boa adesão influencia em

melhores propriedades do compósito polimérico. Os tratamentos mais usados são os químicos, eletroquímicos, oxidação térmica e técnicas com plasma [6].

Uma boa interface gera um aumento na integridade do compósito, transferindo a carga eficientemente para as fibras, ocasionando uma maior resistência mecânica. Ao passo que essa interface de ligação da fibra com a matriz é fundamental também para governar mecanismos de danos e a propagação de trincas, o que na indústria aeronáutica deve ser extremamente monitorado, visto que é uma aplicação que precisa ter uma segurança e eficiência elevada.

O processamento de compósitos poliméricos termofixos, por sua vez, pode ser feito de diversas formas, podendo ser listados em [7]:

- Moldagem manual (*hand lay-up*);
- Moldagem por aspersão ou laminação por projeção (*spray-up*);
- Moldagem a vácuo (*vacuum bag*);
- Tecnologia de pré-impregnados (*prepregs*);
- Moldagem em autoclave/hidroclave;
- Moldagem por compressão;
- Bobinagem contínua (*filament winding*);
- Pultrusão (*pultrusion*);
- Moldagem por transferência de resina (RTM);
- Moldagem por injeção.

Na indústria aeronáutica, um processamento a ser destacado é a moldagem por transferência de resina (RTM) – Figura 5, processo esse que se inicia com a deposição do reforço seco dentro do molde e em seguida se tem o fechamento do molde. Depois a resina é injetada com baixa pressão - evitando que haja movimento - com uma ou mais válvulas dentro do molde, nesse período a resina flui através do reforço, ocasionando seu molhamento uniforme; após esse processo o ar é expelido por válvulas situadas em locais opostos da injeção, seguido do aquecimento do molde para ter a cura e por fim se tem a remoção da peça do molde [7,8].

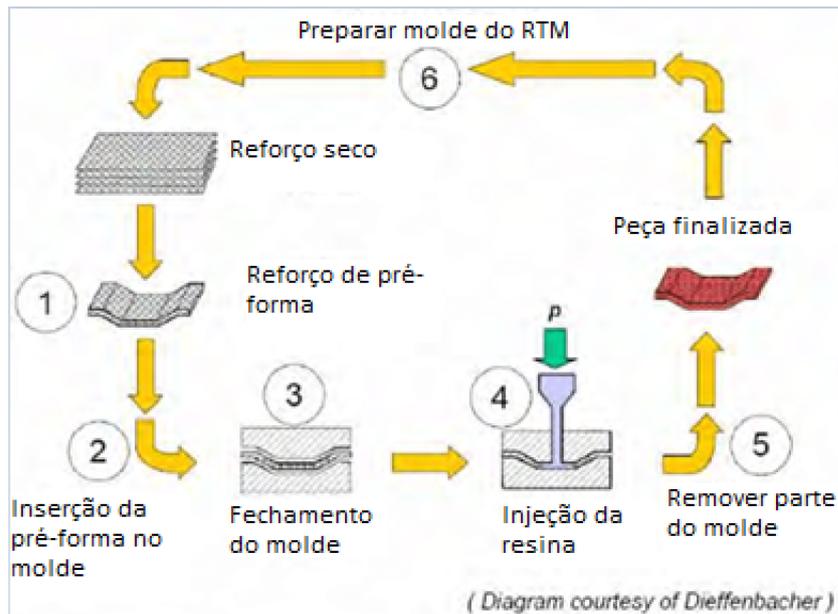


Figura 5 – Processo esquemático do RTM. Adaptado de [8].

Esse processo é vantajoso por ter alto desempenho, bom acabamento, baixa emissão de solventes, flexibilidade no projeto de moldes e devido às variações no processo, possibilita produção de peças complexas, de grande espessura e tamanho, o que é um aspecto importante para a indústria de aviação. Porém suas desvantagens também devem ser consideradas, como, alto custo de equipamento e ferramentas e para moldar estruturas complexas as abordagens são tentativa e erro ou simulação de fluxo para garantir que a porosidade e partes secas livres de fibra sejam evitadas durante o processo [7]. Pensando no contexto da aeronáutica, se torna um processo que deve ser altamente monitorado, já que se trata de processamento de peças que não podem falhar, logo, com extremos padrões de qualidade.

Nessa perspectiva, o projeto precisa estudar os seguintes aspectos: pré-forma (tipo, arquitetura, orientação e permeabilidade), ferramental (projeto, material, permeabilidade), sistema de injeção (temperatura, viscosidade da resina, permeabilidade e cinética de cura) e processo de cura (transferência de calor, tempo e temperatura). Parâmetros esses que caso apresentem alguma mudança, podem interferir diretamente no produto final da peça e ser extremamente prejudicial [7,9].

A classe de materiais compósitos sempre foi importante para diversos setores da indústria, em especial, a aeronáutica; setor esse que investe

significativamente na otimização de processos de fabricação, em materiais compósitos de matriz polimérica e melhoria de materiais utilizados nos aviões. Grandes esforços em torno dessa temática são feitos, principalmente financeiros, com cerca de 1 bilhão de dólares investidos todos os anos [10]. Nessa perspectiva, compósitos de fibras contínuas com matriz termofixa são usados em componentes dos aviões, como, os internos, externos, nervuras da asa, porta de trens de aterrissagem, *flaps*, bordas de ataque e outros, o que acarreta a esses materiais uma grande importância associada com a sua potencialidade expressiva de crescimento, principalmente no setor aeronáutico.

3.2 Compósitos poliméricos aplicados em aeronaves

Materiais poliméricos quando aplicados em aeronaves possuem várias vantagens como o baixo peso, alta resistência e rigidez específica, resistência à fadiga e corrosão, disponibilidade de otimização (adaptação da resistência e rigidez direcional), boa processabilidade, estabilidade, baixa perda dielétrica, baixo perfil de radar alcançável e disponibilidade furtiva. No entanto, algumas das desvantagens são: em alguns casos se tem uma fraca adesão nas interfaces, o que resulta em uma baixa resistência a solicitações de tração, suscetibilidade a danos por impacto e absorção de umidade (e, conseqüentemente, à degradação) [11].

O uso de materiais compósitos avançados vem ocorrendo em um grande número de componentes do avião, sendo esses estruturais ou não; na Tabela 3 é demonstrado esse uso em aviões comerciais e militares [11]:

Tabela 3 – Uso de compósitos poliméricos por componentes em variados modelos de aeronaves. Adaptado de [11].

Tipo de avião	Partes e componentes que usam compósitos	(%) de material
Airbus A300B2/B4	Radome, bordo de ataque e ponta de aleta, painéis da borda de fuga da aleta, mobília da cabine e do porão de carga. Carenagem-pilão, asa/fuselagem traseira	5

Airbus A310-300	Leme, profundor, estabilizador vertical, spoilers, carenagem (entrada e ventilador), reversor de empuxo, porta do trem de pouso principal e de nariz dos painéis de bordo de ataque e de fuga da asa. Carenagens - lon, flap track, ganhar fuselagem.	7
Airbus A320 / A319 / A321	Aileron, estabilizador horizontal e vertical, profundor, leme, spoilers, flaps, capô do motor, radome, portas do trem de pouso (borda de ataque e de fuga), outros painéis de acesso. Carenagem-faixa, asa/fuselagem (dianteira e traseira), perna do trem de pouso principal.	15
Airbus A330	Ailerons, leme, flaps, spoilers, elevador, estabilizador horizontal e vertical, painéis de asa (borda dianteira e traseira), portas do trem de aterragem (principal e nariz). Carenagens - trilho de aba, asa / fuselagem (dianteira e traseira)	12
Airbus A340	Ailerons, leme, flaps, spoilers, elevador, estabilizador horizontal e vertical, painéis de asa (borda dianteira e traseira), portas do trem de aterragem (principal e nariz). Carenagens - trilho de aba, asa / fuselagem (dianteira e traseira)	12
Boeing 737 (200, 300, 400)	Spoilers e estabilizador horizontal, abas de bordo de fuga. Aileron, elevador, leme.	<13
Boeing 757	Aileron, elevador, leme, spoilers, flaps (dentro e fora de bordo), carenagens.	3
Boeing 777	Aileron, elevador, leme, spoilers, flaps (dentro e fora de bordo), vigas de chão, carenagens.	10

Na Tabela 4 são apresentadas as vantagens e desvantagens que os polímeros de alto desempenho proporcionam para os aviões, em que a principal vantagem é, de fato, relacionado com a economia (combustível e investimento em produção), além disso, existe a possibilidade de sofisticação do design, uso de formas e soluções menos tradicionais e possivelmente aumento de segurança. Contudo, a adesão interfacial ainda é um fator limitante para a completa aceitação de polímeros nas aeronaves [6].

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens da aplicação de polímeros de alta eficiência em aviões [6].

Vantagens	Desvantagens
Redução de peso	Inflamabilidade
Redução da emissão de CO ₂	Baixa resistência ao impacto
Redução de custos	Dificuldade de adesão de película de tinta
Redução do tempo de produção	Facilidade de manchas permanentes
Aumento da resistência à corrosão	Baixa estabilidade dimensional
Possibilidade de design mais modernos	
Formatos mais complexos	
Excelente processabilidade	
Aumento da segurança	

As aeronaves estão cada vez mais tecnológicas e suas estruturas mais adaptáveis à modernização, principalmente em relação a materiais poliméricos. Dessa forma, estruturas específicas do avião precisam cumprir requisitos, tais como manter a segurança, vedação de combustível, durabilidade e entre outros; características essas que são alcançadas de acordo com vários fatores, especialmente dos materiais que são usados e seus processos de fabricação.

Tendo isso em vista, ao usar materiais compósitos poliméricos, acarreta, por vezes, numa maior segurança, sustentabilidade e tecnologia a esses meios de transporte. Fibras de menores densidades utilizadas como reforço em compósitos poliméricos resultam em menores gastos com combustível, além de serem em até 20% melhores em relação a resistência específica do que metais comumente utilizados nas aeronaves [11], uma vez que melhoram o desempenho aerodinâmico e apresentam menor custo de fabricação.

Somado a isso, peças produzidas a partir de materiais poliméricos podem apresentar formatos e geometrias complexas, ser fabricado em uma única etapa e muitas vezes com reduzido esforço de produção. Na Tabela 5 é demonstrado alguns requisitos para os materiais, suas demandas de design e aplicação [11]. Dessa forma, uma avaliação precisa dos materiais é crucial para cumprir os requisitos demandados.

Tabela 5 – Requisitos de aviões e demandas de design. Adaptado de [11].

Requerimento	Demandas de design	Aplicação
Baixo peso	Semi-monocoque; Construção; Caixa de paredes finas ou estruturas endurecidas; Uso de materiais de baixa densidade: madeira, ligas de Al, compósitos; Alta relação resistência/peso, alta relação rigidez/peso.	Todos os setores de aeronáutica
Alta confiabilidade	Rigorous controle de qualidade; Extensos testes para dados confiáveis; Certificação: prova de projeto.	Todos os setores de aeronáutica
Segurança de passageiro	Uso de materiais e revestimentos retardantes de fogo; Testes extensivos; Resistência ao choque;	Transporte de passageiro

Performance da aerodinâmica	Carregamento altamente complexo; Asas finas e flexíveis e superfícies de controle; Forma deformada: aeroelasticidade, dinâmica; Formas contornadas complexas: processabilidade, usinagem, moldagem.	Todos os setores de aeronáutica
Furtividade	Superfície e forma específicas de aeronaves; Revestimentos furtivos.	Setores militares
Todas as condições meteorológicas de operação	Proteção contra raios, resistência à erosão/corrosão; Prevenção de corrosão; Questões de danos e vida segura, extensão da vida; Extensos testes para ambiente necessários; Materiais finos com alta integridade.	Todos os setores de aeronáutica

Usar materiais poliméricos em aeronaves é uma realidade, contudo para partes estruturais se restringe na aplicação por meio de compósitos; e teve sua aplicação desenvolvida a priori tanto em estruturas internas, tais como piso, *sidewalls* e poltronas, quanto em carenagens. Com o avanço da tecnologia, houve um crescimento do uso dessa classe de materiais em estruturas secundárias - *flaps*, *ailerons*, profundor, portas e trem de pouso. E chegando na atualidade, se tem a aplicação desses materiais em peças de estrutura primária, a exemplo, empenagem horizontal e vertical, fuselagem e asa [11].

O uso de materiais compósitos acarreta inúmeros benefícios, dentre eles, a economia de combustível e o processamento de uma única peça de geometria complexa para a montagem, as quais são as principais vantagens dessa prática.

Tendo isso em vista, projetos como da Boeing 787 Dreamliner (2004) e Airbus A350 XWB (2004) exploraram intensamente o uso de polímeros por meio dos materiais compósitos nos seus aviões, sendo, por consequência, aeronaves concorrentes entre si em suas categorias [5,12].

A indústria aeronáutica foi uma das primeiras a ter interesse pelos benefícios dos compósitos, em que ao fabricar aeronaves militares, melhoraram a velocidade e a manobrabilidade com esses materiais. Desse modo, o avanço nas pesquisas científicas desses materiais forneceu um banco de dados confiável para projetar peças com propriedades físicas e químicas únicas para uso nessa indústria. Dessa forma, a engenharia aeronáutica teve e tem grandes transformações com a inserção da fibra de carbono e compósitos poliméricos nas estruturas das aeronaves [11]. Na Figura 6 é apresentada o uso das principais técnicas de processamento de compósitos no setor aeronáutico, no período entre as décadas de 1970 e 2020 [13].

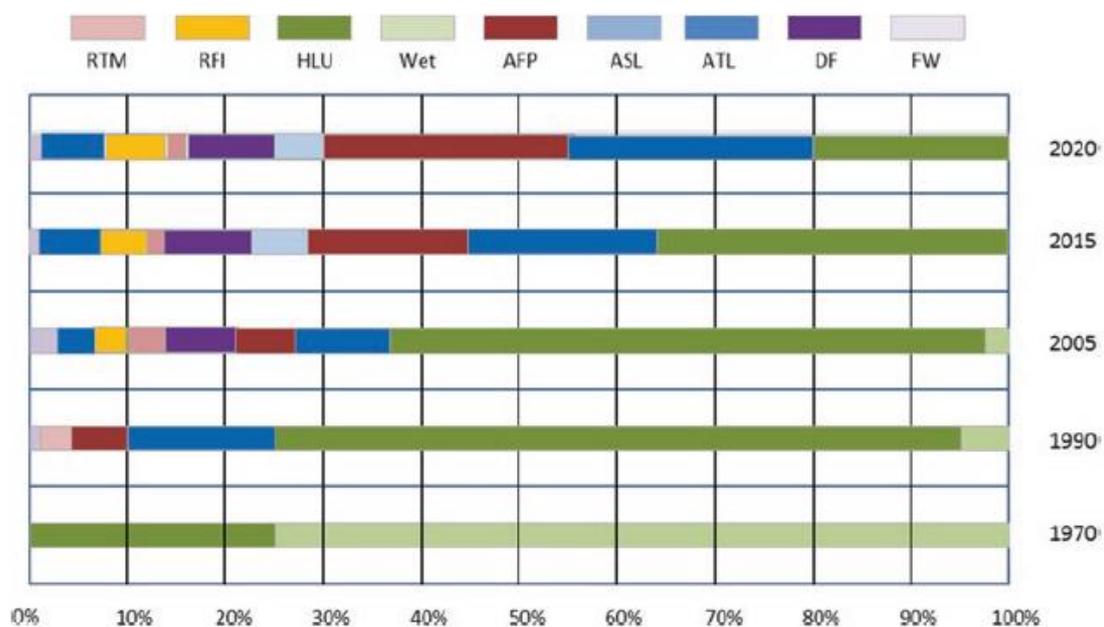


Figura 6 – Processamento de compósitos poliméricos no setor aeroespacial de 1970 a 2020. RTM: *Resin Transfer Molding* (Moldagem por transferência de resina); RFI: *Resin Film Infusion* (Infusão de filme de resina); HLU: *Hand Lay Up* (Moldagem manual); Wet: Método de fazer ou consertar uma peça reforçada com resina; AFP: *Automated Fiber Placement* (Colocação de fibra automatizada); ASL: *Automated Stringer Lamination* (Laminação automática de longarinas); ATL: *Automated Tape Laying* (Deposição automática de fita); DF: *Dry Fibre Placement* (Deposição de fibra

seca); FW: *Filament Winding* (Embobinamento de filamento) [13].

Para a garantia de qualidade do material, testes de flexão e cisalhamento mostram que o estilo de trama simples de arranjo de tecido de carbono favorece o aumento de propriedades mecânicas; isso porque é um arranjo balanceado e favorece uma melhor ancoragem interfacial entre fibra e matriz [4, 14].

Nessa perspectiva, compósitos com materiais poliméricos e com o reforço de fibras trouxe um avanço expressivo nas construções de estruturas mais leves nas aeronaves; em que Plástico Reforçado com Fibra de Carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP*), teve seu uso bastante difundido em fuselagens e peças de motor, reduzindo o consumo de combustível [15]. CFRP possui a densidade de 1/5 do aço e 3/5 de ligas de alumínio, e mesmo que os materiais aeroespaciais tenham avançado bastante, desafios como resistência inadequada ainda se fazem presentes, para se ter significativas demandas para materiais leves e seu desenvolvimento científico [15].

Dessa forma, na Figura 7 é possível identificar que os compósitos de matriz polimérica possuem alta resistência, contudo, somente em temperaturas menores. Sendo, assim, uma das dificuldades de usar nas estruturas primárias do avião.

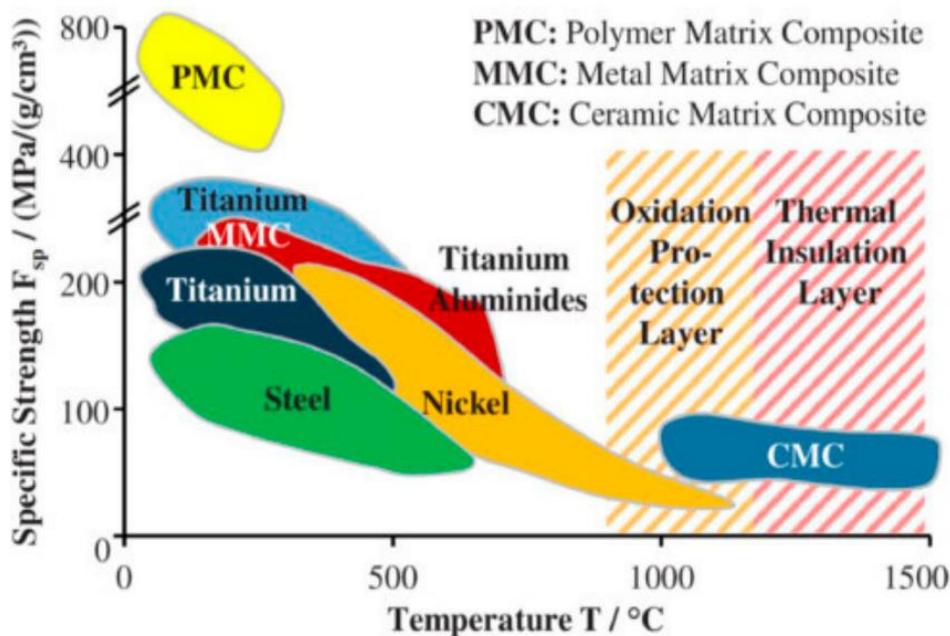


Figura 7 – Força específica de materiais aeronáuticos em função da temperatura [15].

3.2.1 Modelos de aeronaves com compósitos poliméricos

Dreamliner 787 - Boeing

O Dreamliner 787 é um avião com fuselagem larga, bimotor *turbofan* (motor a reação usado em aeronaves que atingem altas velocidades). Essa aeronave tem seu início de desenvolvimento em 2004 e o início de sua montagem de 2007, e seu maior diferencial além do motor, é a fuselagem toda em materiais compósitos, aerodinâmica refinada, tendo em até 20% de redução no consumo de combustível em comparação com a versão anterior [16, 17, 18, 19]. Sua capacidade é entre 242 e 335 passageiros, sendo considerada o avião mais eficiente da empresa Boeing, em que em suas características se tem o nariz do avião distintivo (para proteção de equipamentos complexos – Figura 8), o uso total do sistema *fly-by-wire* (sistema de controle por cabo elétrico), asas curvadas e redução de ruídos nos motores [19].



Figura 8 - Aeronave Boeing 787 com nariz distintivo adquirido pela empresa de aviação LATAM [20].

Dessa forma, o desenvolvimento do Boeing 787 se alinhou com a estratégia da companhia de ser mais sustentável e eficiente, sendo esse um modelo econômico quando comparado aos modelos semelhantes anteriores [16, 45]. Na Figura 9 é demonstrado as proporções de uso de compósitos na estrutura do avião Boeing 787 *Dreamliner*, já na Figura 10 é esquematizado as principais partes da estrutura dessa aeronave [1,3].

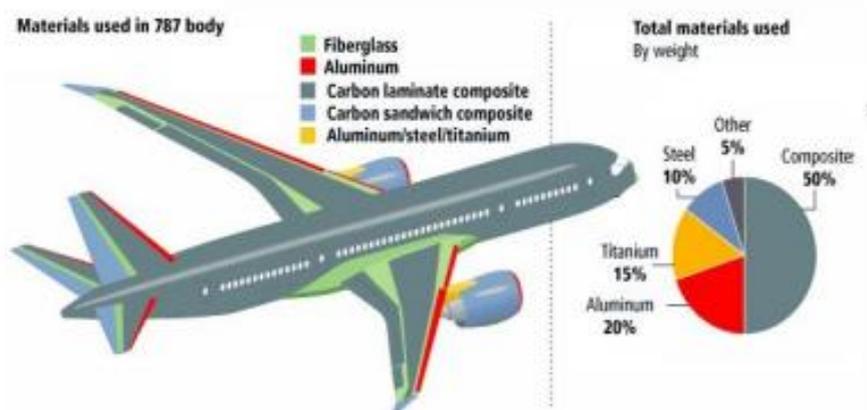


Figura 9 - Proporção de compósitos no Boeing 787 [11].



Figura 10 - Principais estruturas da aeronave Boeing 787 [21].

Nessa perspectiva, os materiais compósitos formam 50% da estrutura principal do 787, incluindo áreas críticas como fuselagem e asas, eliminando, assim, cerca de 1.500 chapas de alumínio e em torno de 50.000 fixadores para apenas uma sessão de fuselagem, uma vez que a manufatura é feita em uma só peça [5,7]. Além disso, essa aeronave possui 20% em alumínio, 15% em titânio e 15% em aço.

O principal material compósito usado na fabricação desse modelo foi o CFRP, reduzindo o peso sem ter perda de resistência. Embora a fibra de carbono seja usada há bastante tempo na aviação militar, por exemplo, ainda é pouco

adotada na aviação comercial, uma vez que não deixa transparecer o desgaste sofrido ao longo do tempo. Sem a ferrugem e as rachaduras, fica mais difícil fazer a inspeção periódica que, até hoje, é quase que totalmente visual [18].

O uso de novos materiais nessa indústria partiu de um extensivo programa de testes, a exemplo, a queda ensaiada de uma seção da fuselagem montada a uma altura de 4,6m, além disso, outro teste submeteu o corpo do avião a uma pressão 150% maior do que a esperada em condições normais, logo, o material se demonstrou resistente para ser incorporado na aeronave 787 Dreamliner. Somado a isso, a montagem da fuselagem é diferente do método tradicional, o qual utiliza várias folhas de alumínio presas por muitos rebites, assim, o 787 usa 6 tubos que se unem para a formação do corpo do avião [18].

A350 XWB - Airbus

Aeronave com bimotor *turbofan Trent XWB* (motor mais eficiente) e a fuselagem e asas são feitas principalmente de fibra de carbono e compósito polimérico. Teve o início do projeto em 2004 [12, 22]. Ademais, para uma maior eficiência, a asa desse avião muda de forma em voo para redução de carga de trabalho do piloto. Dessa forma, essa aeronave possui cerca de 25% a menos de consumo de combustível e emissão de CO₂, reforçando a sustentabilidade de viagens aéreas [22].

Essa aeronave é composta de 53% de compósito, 19% alumínio-lítio, 14% titânio, 6% em aço e 8% de materiais diversos [23]. Os compósitos foram adicionados na estrutura dessa aeronave gradativamente, possuindo, dessa forma, uma vasta experiência de fabricação e serviço de polímeros com comportamento reforçado. Nessa perspectiva, a maior mudança dessa aeronave para a concorrente norte-americana é a fabricação da fuselagem, em que a Airbus optou por revestir um esqueleto de fuselagem pré-fabricado com grandes painéis compostos de fibra de carbono [23, 24], conforme mostrado na Figura 11. Essa abordagem reduz riscos de fratura, é mais leve, tem um manuseio mais fácil e autoclaves mais baratos [25]. Para fins acadêmicos, poucas informações sobre a aeronave da Airbus são disponibilizadas.



Figura 11 - Fabricação dos cascos da asa inferior do A350 (parte do esqueleto) [25].

Nesse contexto, é notável o crescimento significativo e a necessidade do uso de materiais/compósitos poliméricos na indústria aeronáutica. Demonstrando, dessa forma, que materiais adaptáveis são grandes candidatos a assumirem papéis importantes nas construções de gerações futuras da aeronáutica, visto que se mostram serem multifuncionais pela sua capacidade estrutural, quando reforçados, e a mudança de forma que está atrelada com a adaptabilidade para as diferentes fases dos voos que a aeronave é submetida.

3.3 Propriedade de memória de forma e polímeros

O efeito de memória de forma foi observado pela primeira vez em 1938 por Arne Olander, a princípio em ligas metálicas, e na década de 60 que estudos direcionados a esse tema começaram a surgir, gerando grandes interesses nesses materiais adaptáveis. Tendo o início desse estudo em materiais poliméricos em 1984 com os conhecidos polímeros com memória de forma (*Shape Memory Polymer* - SMPs) [26, 27]. Nessa perspectiva, a propriedade de memória de forma permite uma deformação temporária, em que o material após a deformação é possibilitado de retornar ao formato original mediante a um estímulo externo. Vários polímeros possuem essa propriedade, como, poliuretano, polinorborno, copolímeros de estireno-butadieno, polietileno reticulado e polímeros à base de epoxi [28]. Nesse sentido, para um material ter uma ótima performance em memória de forma, precisa ter alta taxa de retenção de forma e resposta rápida. A nomenclatura técnica desses materiais é: "*Stimulus-responsive materials*" (materiais com resposta a estímulo). Os estímulos podem ser químicos ou físicos [29]:

- Aplicação de calor - termo sensíveis;
- Pressão - resposta mecânica;
- Corrente elétrica e tensão - eletro sensíveis;
- Campo magnético - magneto sensíveis;
- Alteração do pH/solvente/umidade - quimiossensíveis;
- Luz - fotossensíveis.

Além disso, materiais com resposta a estímulo possuem uma classificação específica, podendo ser divididos em grupos de acordo com a alteração nas propriedades físicas ou químicas; sendo uma classificação com um grande número de ramificações. Na Figura 12 pode-se observar a esquematização dessa classificação para o grupo referente à mudança de propriedades físicas focado em materiais com memória de forma.

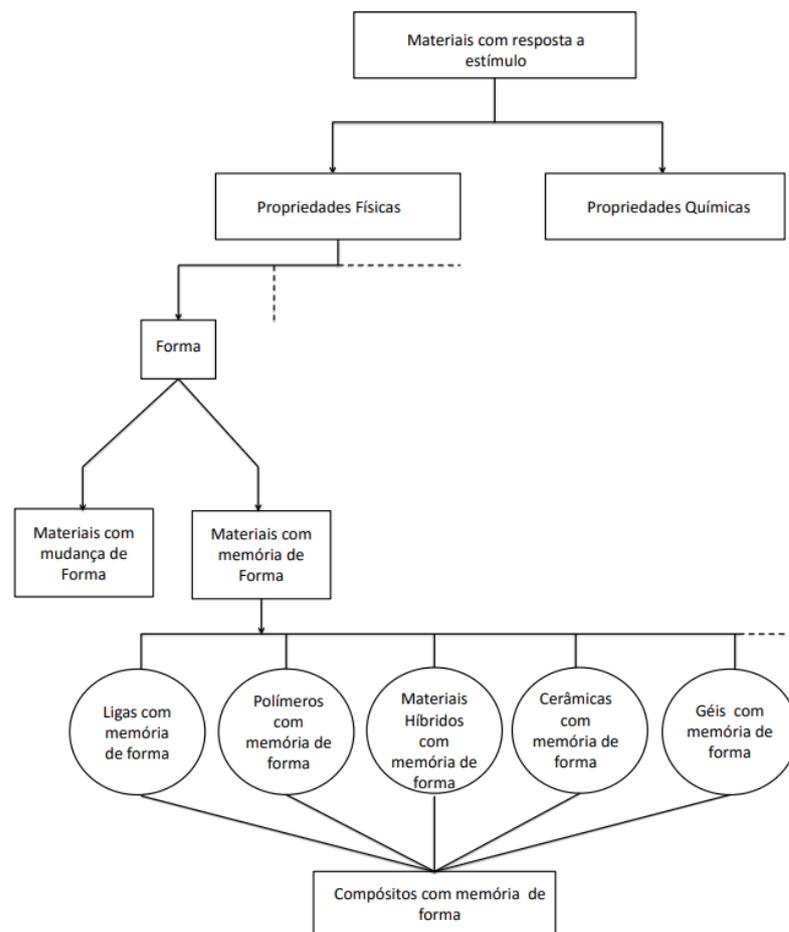


Figura 12 - Fluxograma da classificação dos materiais com mudança em propriedades físicas [29].

De modo geral, os materiais com memória de forma podem armazenar uma forma específica temporariamente e posteriormente recuperar o formato original com algum estímulo. Os materiais metálicos, como citado, foram pioneiros nos estudos desse efeito, contudo, materiais cerâmicos, poliméricos, géis e híbridos também podem apresentar o efeito de memória de forma, mas com mecanismos causadores diferentes [29].

Desse modo, materiais com memória de forma são aplicados em diversas áreas, visto que a modelagem é micro e macroscópica. Assim, possuem o seu escopo principalmente voltado para [26]:

- Controle vibracional em estruturas adaptativas;
- Controle vibracional variando o módulo de elasticidade do material;
- Medicina;
- Odontologia;
- Tubulações;
- Aeronáutica.

Materiais poliméricos com memória de forma são capazes de um desempenho multifuncional, podendo ser estrutural ou não. Desse modo, a atuação térmica é o principal estímulo do comportamento de memória de forma nesses materiais. No entanto, a atuação elétrica também se faz muito importante, principalmente para a indústria moderna da aeronáutica, além da luz, água e campos magnéticos [30, 31]. A mudança de forma é geralmente alcançada pela presença de uma estruturação de fases separadas compostas por segmentos flexíveis (fase reversível) e segmentos rígidos (fase fixa) [31].

Nessa perspectiva, epóxis, poliuretanos e materiais com matriz de estireno são materiais com memória de forma endurecíveis muito usados, ao passo que os de base epóxi são preferíveis para partes estruturais de aeronaves. Suas principais vantagens são a facilidade de fabricação e elevada deformação elástica.

As moléculas da resina epóxi não reagem quimicamente umas com as outras em temperatura ambiente, o que faz necessário o processo de cura para se transformarem em termofixos, em que nesse estado ou estrutura passa por uma transformação na forma tridimensional. Além disso, a resina epóxi tem baixa contração na cura, o que oferece uma ótima precisão na dimensão para fabricação

de peças. Com isso, o agente de cura tem o intuito de formar ligação cruzada com grupos reativos da resina epóxi para finalizar o processo de cura [5].

Na Figura 13 é representado esquematicamente a mudança de forma com a exposição ao calor, em que o material começa no estágio A1 com seu estado vítreo, em seguida o calor é aplicado no material, reduzindo o módulo até seu estado borrachoso, no estágio B, com alta temperatura, há a deformação (estágio C), mantendo a forma, se tem o resfriamento até seu estado vítreo (estágio D), a força é removida e o material passa para o estágio E, e quando se tem o reaquecimento, o material retorna ao seu estado original (estágio F) com posterior resfriamento até o estágio A2 que é a forma mais próxima do material no estágio A1. Importante frisar que quanto melhor a memória de forma do material, mais próximo o A2 é do A1 [32].

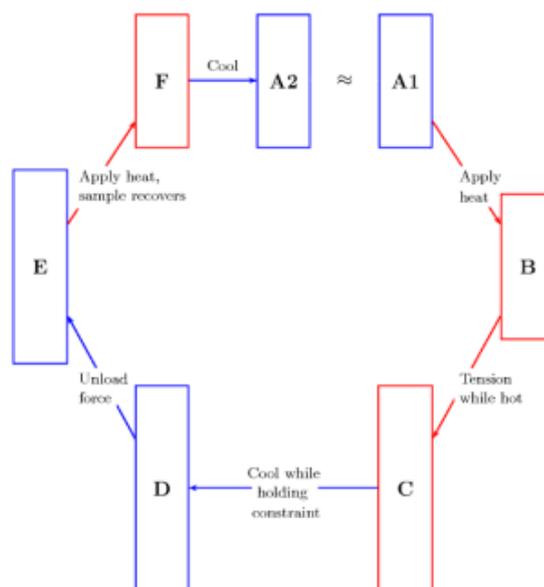


Figura 13 - Ciclo esquemático de memória estimulada pelo calor [32].

SMPs podem ser compostos de termoplásticos com ligações cruzadas fisicamente induzidas (TP-SMP), podem ser também polímeros termoendurecíveis com ligações cruzadas covalentes (TS-SMP); em que se faz necessário que a estrutura da rede molecular tenha pelo menos duas fases separadas. Suas temperaturas de transformação são de dois tipos: temperatura de fusão (T_m) para TP-SMPs e temperatura de transição vítrea (T_g) para TS-SMPs [33].

Na Figura 14 é possível visualizar um diagrama 3D de tensão-deformação-temperatura, ilustrando o comportamento termomecânico de SMPs, sendo esse comportamento dividido em 4 etapas [34].

- Etapa A → B: estado de deformação em alta temperatura. Módulo elástico baixo e alongamento da fratura grande, parte do material demonstra propriedades viscoelásticas.
- Etapa B → C: resfriamento de tensão constante. Aumento do módulo de elasticidade e força para manter a deformação constante, com a redução de temperatura.
- Etapa C → D: descarga em baixa temperatura. Recuperação parcial da deformação.
- Etapa D → A: recuperação com aquecimento. Tensão zero nessa etapa e a pré-tensão reduz gradativamente com o aumento da temperatura até o retorno ao formato original do material.

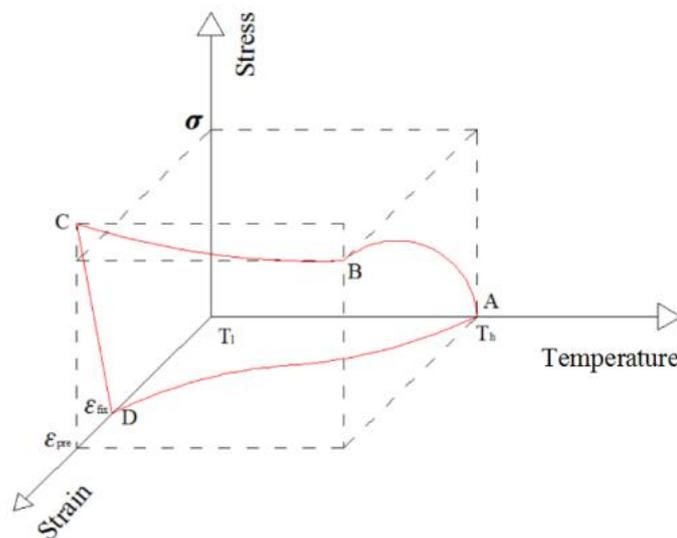


Figura 14 - Diagrama 3D de tensão-deformação-temperatura demonstrando o comportamento termomecânico de SMPs [34].

Dessa forma, por mais que o calor seja a forma mais usada de desencadear essa propriedade, o controle dessa atuação é difícil por causa da lenta transferência de calor e baixa eficiência térmica [30].

Tendo isso em vista, um outro meio de estímulo à memória de forma é por meio da eletricidade, em que os SMPs podem ser condutores elétricos quando são

incorporados reforços condutivos como nanotubos de carbono, negro de fumo ou partículas de níquel, polímeros condutores, entre outros; possuem, no entanto, várias problemáticas como possível separação de fases e pobre compatibilidade entre reforço e matriz. Na literatura ainda não se tem certeza sobre a real eficiência da atuação elétrica, mas na Figura 15 é demonstrado um diagrama de como funciona o ciclo de memória de forma para SMPs [30].

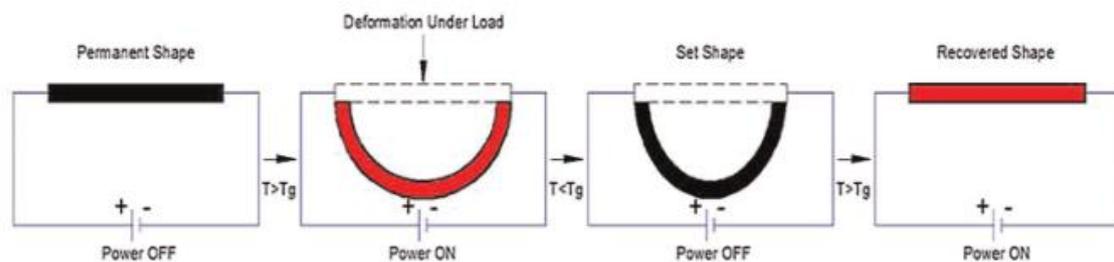


Figura 15 - Diagrama esquemático de um ciclo de memória de forma para um polímero [30].

De modo geral, SMPs podem suportar grandes deformações e se recuperar, em que esse processo de recuperação é ativado por um estímulo externo e muitas vezes possui vantagens às ligas metálicas de memória de forma como a baixa densidade, alta habilidade de recuperação, boa processabilidade e relativo baixo custo. Tendo, além disso, grande potencial para ser usado em compósitos que sofrem transformações em aviões [32].

Além do mais, o comportamento de memória de forma do material é diretamente dependente do número de ciclos realizados, da taxa de deformação empregada e tempos de espera introduzidos durante o processo, sendo essas, variáveis que precisam ser controladas e consideradas ao aplicar esses materiais. Uma taxa de deformação mais rápida, mantendo o material menos tempo no estado borrachoso exige menos força para a deformação, o que permite uma melhor recuperação da forma original [32].

Além disso, SMPs com capacidade de ter múltiplos formatos são materiais que memorizam várias formas, logo, requerem uma estrutura polimérica e morfologia apropriada, apresentando uma variedade de temperaturas de transição térmica (T_m e T_g). Ao passo que um grande intervalo de T_g é o principal fator para permitir a deformação em vários formatos temporários [33]. Sendo uma

característica importante para a aplicação aeronáutica, já que durante as várias fases do voo, o material passa por um grande intervalo de temperatura.

Embora seu grande potencial para a indústria aeronáutica, o maior desafio a ser superado é a compreensão efetiva da sua complexidade molecular, o que acarreta uma ausência de modelos termodinâmicos para produção e dados detalhados das propriedades; além disso, a reatividade com outros polímeros e a lentidão na reação para recuperação da forma (em alguns polímeros), também são problemas associados à esses materiais, o que atrela algumas incertezas ao uso em aviões [1].

Com isso, os SMPs com maior potencial são os polímeros à base epóxi e de estireno, visto que são os que apresentam propriedades estruturais para aplicações de alto desempenho, tais como as peças de aeronaves. Peças essas que precisam necessariamente serem de alta confiabilidade e eficiência. Assim, as peças articuladas são as mais favoráveis de serem produzidas com polímeros com memória de forma.

O compósito à base de epóxi, controlando o grau de reticulação, pode ter T_g variando de 13°C até 95°C [46]. Além disso, a propriedade memória de forma surge após a cura do material, o que é resultado da reação entre anéis epóxi da sua estrutura com outros compostos químicos, formando ligações cruzadas e um sistema tridimensional; com isso, se tem uma mudança das propriedades químicas e o material sai do estado líquido viscoso para um estado sólido vítreo. De acordo com a cura, proporção de componentes, tempo e temperatura, é possível obter vários sistemas epóxi, com diferentes características térmicas, físicas e mecânicas; ademais, a quantidade de locais reativos na estrutura e a distância entre eles possui uma influência na propriedade de memória de forma e quanto menor a quantidade e maior a distância de um ponto reativo de outro, mais macio e flexível é o material [43].

Atualmente a indústria aeronáutica está muito voltada para melhoria de eficiência e mais inovações tecnológicas, além de o fator custo sempre ser um aspecto de relevância. Com isso, os compósitos de matriz polimérica, por natureza, trouxeram resultados benéficos, ofertando leveza, resistência, mais qualidade e facilidade de processamento, o que conseqüentemente melhora o desempenho sem perder propriedades específicas; logo, os polímeros com memória de forma, por serem materiais multifuncionais, com as proporções certas de massa, reforço e

matriz, se apresentam como ótimos candidatos para o cargo de melhor funcionalidade das aeronaves com uma margem de segurança para os usuários.

Portanto, um exemplo disso é o seguinte cenário: as asas dos aviões começaram a ganhar diferentes variações a partir da década de 30, o que acarretou num ganho de mobilidade, gerando mais sustentação e conforto aos passageiros durante as fases do voo, assim, a geometria termicamente variável permite à asa se adaptar morfologicamente às fases do voo (temperatura, pressão, velocidade). Com isso, a NASA (*National Aeronautics and Space Administrator*) está tendendo cada vez mais para essa classe de materiais como uma alternativa de adaptabilidade, sustentação e inovação para aviões [35].

4. O uso de polímeros com memória de forma em aeronaves

Materiais com memória de forma para uma aplicação estrutural nas aeronaves estão sendo cada vez mais desenvolvidos. Desse modo, polímeros com memória de forma normalmente possuem características tanto de elastômeros quanto de termoplásticos, em que alguns SMPs são advindos de novas formulações que possuem a propriedade de memória de forma [36].

Tendo isso em vista, um dos principais materiais usados para esses tópicos de estudo é o poliestireno, o qual é um termoplástico linear e amorfo, em que cadeias lineares amolecem ao aquecer devido às ligações secundárias, as quais ligam as moléculas umas às outras. Com a plastificação, o polímero pode fluir de forma viscosa, permitindo a formação do mesmo. Ademais, a geometria de empacotamento amorfa juntamente com a faixa de massas molares, permite que se tenha uma faixa de temperatura para a plastificação do material. Dessa forma, para SMPs essa faixa de temperatura pode ser usada para adquirir novas formas, assim, o efeito de memória de forma é atingido depois do reaquecimento da nova geometria acima da temperatura de transição vítrea (T_g) sem nenhuma força aplicada, em que o material irá recuperar a sua forma original devido às cadeias esticadas voltarem ao estado original de equilíbrio [36].

Com isso, uma tecnologia que permite a transformação de aviões são as peles flexíveis (revestimentos flexíveis), em que a pele precisa lidar com cargas aerodinâmicas e cargas de cisalhamento. Nesse sentido, nesses revestimentos, para uma boa eficiência, quanto mais flexível a pele, mais pontos de fixação é preciso para evitar “efeitos de almofada”. Logo, um dos materiais promissores para as peles são os polímeros com memória de forma, em que com o controle de T_g , fornece também um controle sob demanda sobre o módulo de armazenamento, controlando a forma de uma asa por meio de grandes flexões ou alongamento [36]. Contudo, as propriedades dessa classe de material são dependentes do tempo e temperatura, já a força e a potência para acionar os SMP dependem diretamente de taxa de deformação; somado a isso, uma transformação lenta acarreta menos energia, logo, uma alta força é necessária, o que não é alcançado atualmente.

Nesse sentido, os *flaps* (Figura 16) são estruturas móveis dos aviões, os quais são inseridos nas asas, provendo a alteração de altitude e/ou mudança na direção.

Logo, para o avião realizar boas manobras, os *flaps* precisam ser eficientes; os quais usam grandes sistemas hidráulicos que precisam de bombas e atuadores, aumentando, assim, o custo e o peso das aeronaves. Dessa forma, o uso de materiais com memória de forma é uma das soluções para a aplicação.

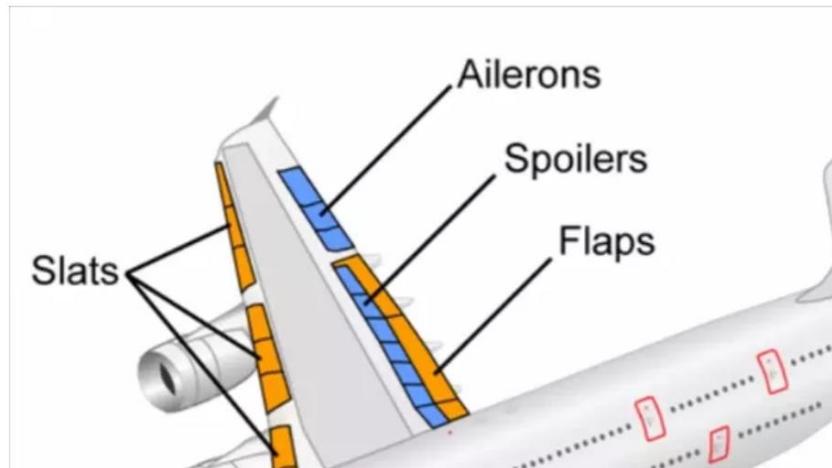


Figura 16 - Representação lúdica da estrutura dos flap [37].

Nessa perspectiva os *flaps* são dispositivos de hipersustentação com formato de abas ou superfícies articuladas que ficam nos bordos de fuga das asas, assim, quando acionados eles são estendidos, o que muda a geometria do perfil e aumenta a sustentação e o arrasto. Desse modo, a função do *flap*, nos períodos críticos do voo, é permitir que o avião decole e pouse percorrendo uma distância curta com a velocidade adequada para cada momento. Existem 4 tipos principais de modelo de *flaps*, como apresentado na Figura 17 [38]:

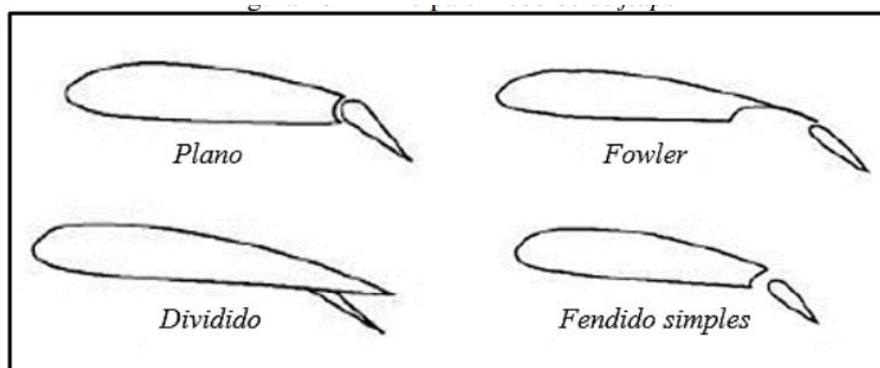


Figura 17 - Principais modelos de flaps [38].

- **Flap plano:** possui a seção traseira articulada para que possa ser rotacionado, além de apresentar um valor para o coeficiente de sustentação alto, ou seja, cria maior sustentação.
- **Flap dividido:** apenas a parte inferior é articulada, o coeficiente de sustentação também é alto, mas gera muito arrasto no seu uso, levando esse modelo ao desuso.
- **Flap Fowler:** deflete para baixo aumentando o arqueamento e modifica o bordo de fuga, aumentando a sustentação.
- **Flap Fendido simples:** a fenda presente entre as superfícies superior e inferior da asa permite que o ar em alta pressão flua por esse espaço, o que modifica e estabiliza a camada limite formada sobre o *flap*, logo, o fluxo permanece colado na superfície da asa mesmo em grandes deflexões do *flap*, tendo sua sustentação bastante elevada.

Tendo em vista que é uma temática em ascensão de crescimento, logo, referências que descrevem a produção de *flap* com a utilização de polímeros com memória de forma, especificamente, não foram encontradas durante o período de produção do presente trabalho.

Contudo, pesquisas sobre a criação de aeronaves que se transformam foram conduzidas por programas como [27]:

- *Defense Advanced Research Project Agency's* - DARPA;
- *Morphing Aircraft Structures* - MAS;
- *National Aeronautics and Space Administration's* - NASA;
- *Revolutionary Fight Concepts projects*.

Nessa perspectiva, o programa MAS define que para um melhor desempenho durante diferentes missões, é necessária mudanças nas asas das aeronaves. Em que uma aeronave que possui transformações teria diferentes configurações de asa para cada um dos 4 períodos do voo (decolagem, loiter, cruzeiro e corrida). Dessa forma, para alcançar tais mudanças apropriadas para realização dos voos, deve ser desenvolvida uma pele que suporte grandes deformações e ainda suporte cargas aerodinâmicas. Com isso, um estudo conduzido pela *NextGen Aeronautics* (empresa ligada ao MAS) a fim de

desenvolver essa melhoria estrutural para os aviões com SMPs, não chegou em resultados conclusivos sobre a aplicação de SMPs num contexto geral de aeronaves. No entanto, em um teste adicional, se notou a eficácia do SMP à base de epóxi e estireno para suportar cargas aerodinâmicas em seu estado duro [27], mostrando, dessa forma, uma tendência crescente da intenção de uso dessa classe de materiais para aeronaves mais modernas.

Nesse contexto, a empresa Airbus está investindo fortemente no conceito de aviões futuristas, investimento esse baseado em um estudo da NASA que apresenta uma coleção de modelos aeronáuticos modernos. Tal estudo começou dando espaço a todas as possibilidades que surgiram, dando espaço a modelos bem diferenciados, contudo, com o passar do tempo, a pesquisa foi afinando para o que é mais próximo do factível (Figura 18).

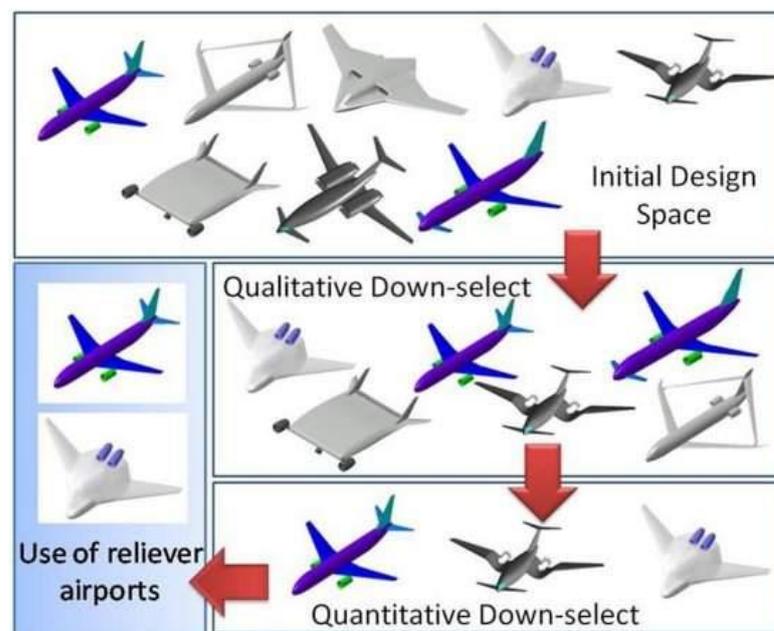


Figura 18 - Processo de seleção de modelos de aeronaves do futuro [39].

Embora os aviões selecionados ainda sejam bastante semelhantes fisicamente com os atuais, suas características estruturais ganham radicais mudanças tecnológicas. De início, se tem a inclusão de materiais com memória de forma tanto em estruturas primárias como fuselagens duplas construídas com esses materiais, asas dobráveis e altamente flexíveis, quanto em estruturas secundárias na parte interna do avião, trazendo mais conforto aos passageiros devido à sua capacidade de deformação e retorno ao formo inicial [39, 40].

De modo geral, polímeros com memória de forma estão cada vez mais inseridos na aeronáutica, num contexto moderno e também num contexto de necessidades básicas para melhores e mais eficientes aeronaves.

5. Análise crítica

Fica evidente que materiais compósitos de matriz polimérica com memória de forma se apresentam como alternativas realistas de um presente e/ou futuro próximo.

No entanto, no momento presente, a maior dificuldade de usar essa classe de materiais nas estruturas dos aviões é o custo elevado para o ferramental e a reparabilidade; assim, ainda não é amplamente usada, especialmente, em aviões de menores portes, os quais ainda mantêm maior parte da sua estrutura primária em alumínio.

Com a construção do Boeing 787 e Airbus A350, muita tecnologia de compósitos poliméricos já foi implementada, trazendo desenvolvimento nas estruturas primárias e secundárias. Somado a isso, várias instituições seguem trazendo ainda mais desenvolvimento para essa classe de materiais; além da necessidade de materiais multifuncionais estarem cada vez mais fortes no setor aeronáutico.

Com isso, fica perceptível o quanto o trabalho científico e acadêmico sobre a propriedade de memória de forma, especialmente em polímeros, aumentou consideravelmente, atrelando o desenvolvimento dos SMPs em aplicações avançadas, como, peças estruturais e articuladas na aeronáutica. O foco dessas pesquisas se pauta na melhoria do desempenho mecânico do polímero com memória de forma, além da fixidez de forma, recuperação de forma e de estresse.

Uma estratégia amplamente utilizada é reforçar com fibras (normalmente fibra de carbono) que afetam os parâmetros de mudança de forma ou desempenho mecânico de SMPs, aprimorando ainda mais as peças estruturais ou articuladas das aeronaves. Poliuretanos, epóxis e os à base de estireno são os principais alvos de estudo com essa finalidade [33].

Sendo assim, essa classe de materiais é altamente comparável à classe de materiais comumente utilizada nas aeronaves, mais especificamente, o alumínio. Assim, nas Tabelas 6, 7 e 8 são apresentadas as propriedades de alumínio da asa do avião (liga de alumínio 7075 e 2024) e compósito à base epóxi e resina epóxi, respectivamente, com a finalidade de contrastar valores de uso na aplicação em questão. Importante frisar que a forma de avaliar as propriedades de classes de materiais diferentes, como metais e polímeros, é diferente, seja pelo tipo de ensaio

ou tipo de resultado, o que cabe ao avaliador interpretar os valores e concluir resultados.

Tabela 6 – Propriedades das principais ligas de alumínio usadas nas asas das aeronaves [44].

Propriedade	7075	2024
Limite de resistência à tração (MPa)	540	395
Limite de escoamento (MPa)	485	290
Alongamento (%)	7	12
Dureza (HB)	145	120
Módulo de elasticidade (GPa)	71	74
Condutividade elétrica (IACS - %)	30	30
Coefficiente térmico de expansão ($K^{-1} \cdot 10^{-6}$)	24	23
Condutividade térmica (cal/cm/cm ² /seg °C)	0,29	0,29

Tabela 7 – Propriedades de compósito polimérico à base epóxi. [41,43]

Propriedade	Compósito polimérico à base epóxi
Resistência à compressão (MPa)	98,8
Módulo de elasticidade (GPa)	33,98
Massa específica (Kg/m ³)	1,64
Taxa de fixação e recuperação da forma (%)	98-96

Tabela 8 – Propriedades da resina epóxi. [42]

Propriedade	Resina epóxi
Módulo de elasticidade (GPa)	3,5
Densidade (g/cm ³)	1,20
Resistência a tração (GPa)	0,09

Como comentado anteriormente, é evidente que o compósito de matriz polimérica tem o déficit em relação a resistência e dureza, aspectos esses que podem ser corrigidos inserindo reforço no material. Outro ponto importante é a recuperação da forma, que é praticamente integral, ponto crucial para a aplicação

em questão que é justamente a forma morfológicamente adaptável para a peça; propriedade essa que aparenta ser inviável para os materiais de alumínio que possuem valores baixos de alongamento.

À vista disso, por mais que existam condições limitantes aos polímeros, ainda se apresentam como materiais com grande potencial para aplicação na aeronáutica, já que as restrições podem ser contornadas com estratégias de melhoria, além disso, várias vantagens são adquiridas ao usar os SMPs, a exemplo, redução de peso, multifuncionalidade, processabilidade e desempenho estrutural. Sendo, portanto, uma alternativa em desenvolvimento crescente para peças articuladas de aviões.

Desse modo, por ser uma temática bastante nova e emergente, a literatura ainda não é muito específica acerca de compósitos de matriz polimérica com memória de forma, contudo é notório que esforços já estão sendo direcionados ao assunto como uma alternativa provável para novas gerações aéreas. Instituições como a NASA, MAS e DARPA estão intensamente dedicadas para melhorias de eficiência e funcionalidade, o que traz à tona a propriedade de memória forma.

6. Conclusão

Materiais multifuncionais atraem muito interesse para várias indústrias, especialmente, a aeronáutica, uma vez que apresentam uma grande potencialidade no mercado, na ciência e inovação e até na segurança de aviões comerciais e militares.

Por ser um assunto em ascensão comercial e de desenvolvimento acadêmico, encontrar na literatura, artigos, teses, dissertações, livros e monografias com finalidade de memória de forma em aviões ainda é uma dificuldade muito presente, contudo é de conhecimento geral que as indústrias aeronáutica e aeroespacial investem bastante recursos financeiros para o desenvolvimento dessa classe de materiais, o que remete a grande potencialidade que esses materiais possuem.

Embora as limitações mecânicas sejam evidentes, a engenharia possibilita alternativas, com reforço de fibra de carbono por exemplo, para superar esses limites e alavancar a potencialidade desse material, o que traz grande avanço para diversos setores, em especial, a aviação. Atualmente nas asas dos aviões são usadas ligas de alumínio e os possíveis substituintes com a memória de forma seriam principalmente compósitos à base de epóxi e com matriz de estireno, os quais apresentam desempenho estrutural compatível com a aplicação.

Por fim, esses materiais adaptáveis representam parte do futuro da engenharia de materiais, isso porque são extremamente adaptáveis e moldáveis, podendo apresentar diversas funcionalidades para muitos âmbitos sociais, e por mais que no presente trabalho a aviação tenha sido o foco, polímeros com memória de forma vão muito mais além disso e estão ganhando o mercado funcional com a sua maior vantagem: adaptação e multifuncionalidade.

7. Referências

- [1] LENDLEIN, Andreas. Biodegradable , Elastic Shape-Memory Polymers for Potential Biomedical Applications. v. 296, n. May, p. 1673–1677, 2002.
- [2] SILVA, I.A.L. **JUTA, D. PROPRIEDADES E ESTRUTURA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTINUAS.** 2014. Dissertação (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, CAMPOS DOS GOYTACAZES, 2014.
- [3] COELHO, L. C. R. **ESTUDO DE MATRIZES POLIMÉRICAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS AVANÇADOS.** 2017. Dissertação (Especialização em Engenharia Aeronáutica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2017.
- [4] Pardini, L. C., Peres, R. J. C. Tecnologia de Fabricação de Pré-Impregnados para Compósitos Estruturais Utilizados na Indústria Aeronáutica. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia. São José dos Campos, São Paulo. Abr/96. Disponível em: <<https://revistapolimeros.org.br/article/5883713d7f8c9d0a0c8b47d2/pdf/polimeros-6-2-32.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2023.
- [5] SILVA, B. G. C. Estudo de materiais compósitos híbridos na indústria aeronáutica e aeroespacial e avaliação de argila organofílica e resina epóxi para aplicação em usinagem no torno CNC. 2019. Dissertação (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.
- [6] Gomes, S. S. **PROCESSOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA APLICAÇÕES EM AERONAVES.** 2020. Dissertação (Tecnólogo em Materiais) - Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2020.
- [7] CHAWLA, K.K. Composite Materials: science and engineering. 3.ed. EUA: Springer-Verlag, 1998.
- [8] Figure 1: Resin Transfer Molding (RTM) Process. 2. ResearchGate. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Resin-Transfer-Molding-RTM-Process-2_fig1_280294304>. Acesso em: 14 mar.2023

- [9] Gelin, J. (1996). Manufacture of thin composite structures by the RTM process: Numerical simulation of the shaping operation. *Composites Science and Technology*, 56(7), 711–718. doi:10.1016/0266-3538(96)00011-5. Acesso em: 13 fev.2023
- [10] REZENDE, Mirabel C. ; BOTELHO, Edson C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros*, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/Sp5xW8K4WctGhyppz5Fhbmb/?lang=pt>>. Acesso em: 15 jan.2023
- [11] TANASA, Fulga; ZANOAGA, Madalina. Fiber-reinforced polymer composites as structural materials for aeronautics. *Proceedings of the International Conference of Scientific Paper, Brasov*, 23–25 Mai 2013. 2013.
- [12] DOS, C. aeronave bimotor para transporte de passageiros. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Airbus_A350>. Acesso em: 21 out. 2022
- [13] Pantelakis, S., Tserpes, K. *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. 2. ed. Switzerland: Springer, 2020. 405 p.
- [14] Rezende, M. C., Costa, M. L., Botelho, E. C. *Compositos Estruturais - Tecnologia E Pratica*. 1. Ed. São Paulo: ARTLIBER. 2011. 396 p.
- [15] PARVEEZ, Bisma; KITTUR, M. I.; BADRUDDIN, Irfan Anjum; et al. *Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review*. *Polymers*, v. 14, n. 22, p. 5007, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/22/5007>>. Acesso em: 15 fev. 2023
- [16] AEROFLAP. Há 10 anos o primeiro Boeing 787 era apresentado em Everett. Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/h-10-anos-o-primeiro-boeing-787-era/>>. Acessado em: 19 out. 2022
- [17] BOEING 787 DREAMLINER. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.pgsskroton.com/bitstream/123456789/2104/1/Boeing%20787%20dreamliner.pdf>>. Acessado em: 30 out. 2022
- [18] MACHADO, J. Boeing 787: o avião mais moderno já produzido pelo homem. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/aviao/14491-boeing-787-o-aviao-mais-moderno-ja-produzido-pelo-homem.htm>>. Acesso em: 11 dez. 2022
- [19] DOS, Contribuidores. Boeing 787. *Wikipedia.org*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Boeing_787>. Acesso em: 18 dez. 2022
- [20] THIAGO VINHOLES. Conheça o Boeing 787-9 Dreamliner, novo avião da Latam Airlines Brasil. Disponível em:

<<https://www.cnnbrasil.com.br/business/conheca-o-boeing-787-9-dreamliner-novo-aviao-da-latam-airlines-brasil/>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

[21] GLORIA, A. et al. Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives. *Metals*, v. 9, n. 6, p. 662, 6 jun. 2019.

[22] <HTTPS://WWW.FACEBOOK.COM/AIRBUS>. A350 Family. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a350-family>>. Acesso em: 20 out. 2022

[23] MARSH, G. Airbus A350 XWB update. *Reinforced Plastics*, v. 54, n. 6, p. 20–24, nov. 2010.

[24] MARSH, G. Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB. *Reinforced Plastics*, v. 51, n. 11, p. 26–29, dez. 2007.

[25] Marsh, G. (2010). Airbus A350 XWB update. *Reinforced Plastics*, 54(6), 20–24. doi:10.1016/s0034-3617(10)70212-5

[26] Silva Junior, E. M., Santos, B. H., Santos, D. F., & Filho, A. C. (2019). LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA - (Shape Memory Alloy – SMA). *Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS*, 5(2), 263.

[27] Gross, K., & Weiland, L. (2007). Flexural Testing of Shape Memory Polymers for Morphing Aircraft Applications. Volume 10: Mechanics of Solids and Structures, Parts A and B. doi:10.1115/imece2007-43219

[28] Liu, Y., Han, C., Tan, H., & Du, X. (2010). Thermal, mechanical and shape memory properties of shape memory epoxy resin. *Materials Science and Engineering: A*, 527(10-11), 2510–2514. doi:10.1016/j.msea.2009.12.014

[29] MARTINS, G. S. Tenacificação de polímeros frágeis com a inserção de uma segunda fase polimérica dotada de memória de forma. 2015. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

[30] Murugan, M. S., Rao, S., Chiranjeevi, M., Revathi, A., Rao, K. V., Srihari, S., & Dayananda, G. (2017). Actuation of shape memory polymer composites triggered by electrical resistive heating. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(17), 2363–2371. doi:10.1177/1045389x17689944

[31] Gupta, P., Garg, H., Mohanty, J., & Kumar, B. (2020). Excellent memory performance of poly (1,6-hexanediol adipate) based shape memory polyurethane filament over a range of thermo-mechanical parameters. *Journal of Polymer Research*, 27(12). doi:10.1007/s10965-020-02345-5

- [32] McClung, A. J. W., Tandon, G. P., & Baur, J. W. (2011). Deformation rate-, hold time-, and cycle-dependent shape-memory performance of Veriflex-E resin. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 17(1), 39–52. doi:10.1007/s11043-011-9157-6
- [33] Mora, P., Schäfer, H., Jubsilp, C., Rimdusit, S., & Koschek, K. (2019). Thermosetting Shape Memory Polymers and Composites Based on Polybenzoxazine Blends, Alloys and Copolymers. *Chemistry – An Asian Journal*. doi:10.1002/asia.201900969
- [34] Wang, Z., Liu, J., Guo, J., Sun, X., & Xu, L. (2017). The Study of Thermal, Mechanical and Shape Memory Properties of Chopped Carbon Fiber-Reinforced TPI Shape Memory Polymer Composites. *Polymers*, 9(11), 594. doi:10.3390/polym9110594
- [35] DO, R. Asas dos aviões começam a mudar de forma durante o voo. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=asas-avioes-comecam-mudar-forma-durante-voo&id=010170221128#.Y_ObmHbMI2w>.
- [36] Michelle M. Keihl, Robert S. Bortolin, Brian Sanders, Shiv Joshi, and Zeb Tidwell "Mechanical properties of shape memory polymers for morphing aircraft applications", Proc. SPIE 5762, Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, (5 May 2005); <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1117/12.600569>. Acesso em: 1 mar. 2023
- [37] Partes do avião – Parte 2. Guia do Aviador. Disponível em: <<https://guiadoaviador.wordpress.com/2018/04/13/partes-do-aviao-parte-2/>>. Acesso em: 3 fev. 2023
- [38] MOLLON, B. M. ANÁLISE DO USO DE LIGA COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA NA ATUAÇÃO DO FLAPE DE UMA AERONAVE RADIOCONTROLADA. 2017. Dissertação (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.
- [39] DO, Redação. NASA apresenta conceitos dos aviões do futuro. Site Inovação Tecnológica. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=avioes-futuro&id=010170101213#.Y8vdOXbMI2w>>. Acesso em: 3 fev. 2023
- [40] DO, Redação. Airbus apresenta conceito futurista de avião. Site Inovação Tecnológica. Disponível em:

<<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=airbus-conceito-futurista-aviao&id=010170110615#.Y8vdL3bMI2w>>. Acesso em: 5 fev. 2023

[41] PANZERA, T. H. et al. Mechanical properties of composite materials based on Portland cement and epoxy resin. *Cerâmica*, v. 56, p. 77-82, 2010.

[42] Canevarolo Jr., S. V.; “Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros”; Editora Artliber; 2ª edição; São Paulo, 2006; pág. 203-208.

[43] MILAGRES, K. I. FORMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA RESINA EPÓXI COM MEMÓRIA DE FORMA. 2015. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, CAMPOS DOS GOYTACAZES. 2015.

[44] Tabelas Técnicas Alumínio - Ligas de Alumínio Metalthaga. Disponível em: <<https://metalthaga.com.br/tabelas-tecnicas-aluminio/>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

[45] Boeing: Boeing Brasil - 787. Disponível em: <<https://www.boeing.com.br/produtos-e-servicos/avioes-comerciais/787.page>>. Acessado em 24 fev. 2023.

[46] Patel, Krishan & Purohit, Rajesh. (2018). Future Prospects of shape memory polymer nano-composite and epoxy based shape memory polymer- A review. *Materials Today: Proceedings*. 5. 20193-20200. 10.1016/j.matpr.2018.06.389.