

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENSINO GERAL
TECNOLOGIA EM MATERIAIS**

SAULO SALLES GOMES

**PROCESSOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA PARA APLICAÇÕES EM AERONAVES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SÃO PAULO

2020

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
TECNOLOGIA EM MATERIAIS**

SAULO SALLES GOMES

**PROCESSOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA PARA APLICAÇÕES EM AERONAVES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Materiais, do Departamento de Ensino Geral, da Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. José Ângelo Bortoloto

SÃO PAULO

2020

RESUMO

Os materiais compósitos de matriz polimérica têm sido utilizados como materiais estruturais de elevado desempenho em aplicações em aeronaves. Sua aplicação se iniciou no século XX e vem crescendo muito nas indústrias aeronáutica e aeroespacial ultimamente. A aplicação desses materiais avançados, que são os compósitos poliméricos, em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que este material confere ao componente que está sendo projetado e por permitir flexibilidade no projeto de peças complexas e com propriedades locais específicas. Esses compósitos poliméricos são reforçados, geralmente, com fibras de carbono, vidro ou aramida. Além disso, as matrizes utilizadas são classificadas em matrizes poliméricas termoplásticas e termofixas. No entanto, faz-se necessário que estes materiais sejam submetidos a determinados processos para se tornarem adequados para aplicações em aeronaves. Os processos que envolvem os compósitos poliméricos com matrizes termoplásticas são: tecelagem híbrida, deposição eletrostática, laminação manual com aquecedor ultra-sônico, moldagem por compressão a quente e consolidação in-situ. Já os compósitos poliméricos de matrizes termofixas são processados por: laminação manual, colocação de fitas, colocação de fibras, cura em autoclave, enrolamento filamental, pultrusão e moldagem líquida. Atualmente, os compósitos poliméricos vêm substituindo materiais tradicionais, como alguns metais, nas aplicações de aeronaves, fornecendo ótima qualidade de serviço.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos. Aplicação. Aeronaves. Processos.

ABSTRACT

Polymeric matrix composite materials have been used as high-performance structural materials in aircraft applications. Its application started in the 20th century and has been growing a lot in the aeronautical and aerospace industries lately. The application of these advanced materials, which are polymeric composites, in structural parts of aircraft grows every year, due to the excellent mechanical properties that this material gives to the component being designed and for allowing flexibility in the design of complex parts with local properties specific. These polymeric composites are generally reinforced with carbon, glass or aramid fibers. Furthermore, the matrices used are classified into thermoplastic and thermoset polymeric matrices. However, it is necessary that these materials are subjected to certain processes to become suitable for aircraft applications. The processes involving polymeric composites with thermoplastic matrices are: hybrid weaving, electrostatic deposition, manual lamination with ultrasonic heater, hot compression molding and in-situ consolidation. The polymeric composites of thermosetting matrices are processed by: hand lay up, automated tape laying, fiber placement, autoclave curing, filament winding, pultrusion and liquid molding. Currently, polymeric composites have been replacing traditional materials, such as some metals, in aircraft applications, providing excellent quality of service.

Keywords: Polymeric composites. Application. Aircrafts. Processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Várias propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma caracteristicamente assintótica com o aumento da sua massa molar.....	17
Figura 2 – Representação da síntese de um polímero	17
Figura 3 – Reforço mais matriz igual a um material compósito	23
Figura 4 – Representação esquemática dos materiais compósitos de acordo com a fase dispersa	26
Figura 5 – Diagrama esquemático apresentando conceitos de interface e interfase em materiais compósitos	29
Figura 6 – Aplicações de materiais compósitos na aeronave EMB-314.....	30
Figura 7 – Utilização de materiais compósitos em aeronaves da Boeing e Airbus...	31
Figura 8 – Porcentagens de materiais utilizados em uma série de aeronaves da Boeing.....	32
Figura 9 – Porcentagens de materiais utilizados em uma série de aeronaves da Airbus	34
Figura 10 – Aplicações de compósitos termoplásticos nas aeronaves Airbus:	38
Figura 11 – Estrutura química da poliamida 6.6.....	39
Figura 12 – Estrutura química do polímero PEEK.....	39
Figura 13 – Estrutura química do PEKK.....	40
Figura 14 – Estrutura química da PEI	41
Figura 15 – Representação da reação química para obter o PPS	42
Figura 16 – Estrutura química do PSU.....	43
Figura 17 – Resina epóxi à base de bisfenol-A	44
Figura 18 – Resina epóxi à base de Bisfenol-F.....	45
Figura 19 – Estrutura química de uma bismaleimida.....	45
Figura 20 – Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço / matriz polimérica termoplástica	48
Figura 21 – Formas de tecelagem híbrida: a) fibras de polímero com fibras de reforço unidirecional e b) fibras de polímero com fibras de reforço em forma de tecido	50
Figura 22 – Esquema do processo de deposição eletrostática	51
Figura 23 – Vista geral das tecnologias de fabricação de compósitos termoplásticos	52
Figura 24 – Laminação manual de um revestimento com pré-impregnado termoplástico utilizando aquecedor ultra-sônico	53
Figura 25 – Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço/matriz polimérica termorrígida.....	54
Figura 26 – Tipos de molde: macho e fêmea.....	55
Figura 27 – Exemplos de pré-formas utilizadas na fabricação de compósitos estruturais	56
Figura 28 – Representação esquemática do processo de laminação manual	58

Figura 29 – Representação esquemática de uma máquina de colocação automatizada de fitas	59
Figura 30 – Processo de colocação automatizada de fitas na fabricação da asa da aeronave Airbus 350	60
Figura 31 – Representação esquemática do processo de colocação automática de fibra	61
Figura 32 – Representação esquemática da máquina de colocação automática de fibra	62
Figura 33 – Representação esquemática da máquina de colocação automática de fibra	63
Figura 34 – Representação esquemática do processo de cura em autoclave.....	64
Figura 35 – Princípio de cura da autoclave	65
Figura 36 – Processo de cura em autoclave para a fabricação da asa de um Boeing 777X	66
Figura 37 – Representação esquemática do processo de enrolamento filamental .	67
Figura 38 – Representação esquemática dos padrões de enrolamento circunferencial, helicoidal e polar.....	68
Figura 39 – Representação esquemática do processo de pultrusão	69
Figura 40 – Peças compósitas, barras e hastes, que foram fabricadas pelo processo de pultrusão.....	69
Figura 41 – Representação esquemática do processo de moldagem por transferência resina.....	71
Figura 42 – Anteparo de pressão traseira da Airbus 380 fabricado pelo método infusão de filme de resina: (a) pré-forma depositada sobre o molde; (b) produto acabado	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das fibras mais utilizadas	27
Tabela 2 – Componentes presentes em uma série de aeronaves da Boeing.....	32
Tabela 3 – Componentes presentes em uma série de aeronaves da Airbus.....	34
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens na aplicação de matrizes termoplásticas e termofixas.....	74
Tabela 5 – Classificação dos polímeros de acordo com suas aplicações	75
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens da aplicação de polímeros de alto desempenho	76

LISTA DE ABREVIATURAS

P	Pressão
T	Temperatura
T _m	Temperatura de fusão
T _g	Temperatura de transição vítrea

LISTA DE SIGLAS

PAN	Poliacrilonitrila
PET	Polietileno Tereftalato
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
EVA	Acetato-Vinilo de Etileno
SAN	Estireno Acrilonitrila
PTFE	Politetrafluoretileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PBT	Polibutileno Tereftalato
PC	Policarbonato
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PPO	Polioxifenileno
PPS	Sulfeto de Polifenileno
BMI	Bismaleimidas
PA	Poliamida
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PEKK	Poli(éter-cetona-cetona)
PEI	Polieterimida
PSU	Polisulfona
BMI	Bismaleimida

LISTA DE ACRÔNIMOS

EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A
NASA	Administração Nacional da aeronáutica e Espaço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 HISTÓRICO.....	13
1.2 OBJETIVO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 O QUE SÃO POLÍMEROS.....	16
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS.....	18
2.2.1 Estrutura Química.....	18
2.2.2 Método de Preparação.....	18
2.2.2.1 Polímeros de adição.....	19
2.2.2.2 Polímeros de condensação.....	19
2.2.3 Comportamento Mecânico.....	19
2.2.3.1 Plásticos.....	19
2.2.3.1.1 Termoplásticos.....	19
2.2.3.1.2 Termorrígidos.....	20
2.2.3.1.3 Baroplásticos.....	20
2.2.3.1.4 Elastômeros.....	20
2.2.3.1.5 Fibras.....	21
2.2.4 Desempenho Mecânico.....	21
2.2.4.1 Termoplásticos convencionais (Commodities).....	21
2.2.4.2 Termoplásticos especiais.....	21
2.2.4.3 Termoplásticos de engenharia (TE).....	22
2.2.4.4 Termoplásticos de engenharia especiais.....	22
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	22
2.4 MATRIZ POLIMÉRICA.....	23
2.5 REFORÇO COM FIBRAS MAIS UTILIZADAS.....	25
2.6 TRATAMENTO QUÍMICO DA FIBRA.....	28
FONTE: BURAKOWSKI E REZENDE (2000).....	29
3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	29
3.1 UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS EM AERONAVES.....	29
3.2 POLÍMEROS MAIS UTILIZADOS.....	35
3.2.1 Termoplásticos.....	36
3.2.1.1 Poliamida 6.6 (PA 6.6).....	38
3.2.1.2 Poli(éter-éter-cetona) (PEEK).....	39
3.2.1.3 Poli(éter-cetona-cetona) (PEKK).....	40
3.2.1.4 Poli(éter-imida) (PEI).....	41
3.2.1.5 Poli(sulfeto de fenileno) (PPS).....	41
3.2.1.6 Polisulfona (PSU).....	42
3.2.2 Termorrígidos (termofixos).....	43

3.2.2.1 Epóxi.....	44
3.2.2.2 Bismaleimidas (BMI)	45
3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA	46
3.3.1 Matrizes Termoplásticas.....	47
3.3.1.2 Deposição Eletrostática.....	50
3.3.1.3 Moldagem por Compressão a Quente e Consolidação in-situ	51
3.3.1.4 Laminação Manual com Aquecedor Ultra-sônico.....	52
3.3.4 Matrizes Termorrígidas	53
3.3.4.1 Laminação manual.....	56
3.3.4.2 Colocação de fitas	58
3.3.4.3 Colocação de fibras (processo híbrido).....	60
3.3.4.4 Cura em autoclave	63
3.3.4.5 Enrolamento filamental	67
3.3.4.6 Pultrusão.....	68
3.3.4.7 Moldagem líquida.....	70
4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS EM AERONAVES	73
4.1 TERMOPLÁSTICOS X TERMOFIXOS.....	73
4.2 POLÍMEROS X MATERIAIS TRADICIONAIS	74
5. CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

Historicamente, estruturas aeronáuticas em compósitos têm sido fabricadas utilizando-se fibras longas, com comprimento igual à dimensão do componente que está sendo manufaturado. Dessa maneira, ocorre a máxima transferência das propriedades mecânicas da fibra para o compósito (sob determinadas condições de carregamento das fibras). No entanto, a fabricação de estruturas complexas, utilizando fibras contínuas, exige uma significativa quantidade de trabalho manual ou equipamentos complexos e caros de corte do reforço e laminação dos pré-impregnados. Em função disso, trabalhos recentes têm combinado o uso de pré-formas de fibras secas e picadas e processos de transferência de resina, visando ampliar o uso de compósitos poliméricos em componentes de estrutura secundária (com menor exigência estrutural). O resultado desses trabalhos mostra vantagens de custo e processabilidade e na relação peso/resistência, em comparação ao componente metálico substituído. [3]

De acordo com Baker et al (2002), o termo pré-impregnado é aplicado a todo produto intermediário, pronto para moldagem, e pode ser definido como sendo uma composição de fibras de reforço com um determinado polímero, termorrígido formulado ou termoplástico, em uma particular fração em massa. Esses materiais oferecem uma combinação de consistência e processabilidade de produto, devido à quantidade controlada de resina, porém requerem a aplicação de vácuo e pressão durante o processo de cura. As duas matérias-primas básicas para a produção de pré-impregnados são a matriz polimérica e as fibras de reforço na forma de tecido ou fitas unidirecionais. [9]

Conforme Hergenrother (2000), 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, ou durante a fabricação da peça, seu manuseio, seu transporte, sua armazenagem, manutenção ou em serviço. [9]

Costa et al (2005), concluem, ainda, que a cura de uma matriz polimérica é considerada como sendo a chave para a fabricação de compósitos poliméricos

avançados a partir de sistemas pré-impregnados, durante a qual a matriz encontra-se em um estágio intermediário de cura. A qualidade final do produto obtido pode ser controlada pelo estudo do ciclo de cura empregado, associado aos parâmetros de processo, tais como: tempo, temperatura, pressão, assim como a sequência na qual essas variáveis são combinadas. [9]

De acordo com Paiva (2006), nos últimos anos, na indústria aeronáutica tornou-se comum a utilização de pré-impregnados para a moldagem ou laminação dos compósitos poliméricos estruturais. O pré-impregnado consiste na combinação de uma matriz de resina polimérica com reforços de fibras (na forma de fitas unidirecionais ou tecidos) em um estágio semiacabado, podendo ser utilizado no processo da manufatura de componentes com diferentes geometrias. A utilização de pré-impregnados facilita a laminação dos compósitos de uso aeronáutico, pois esses são colocados esquematicamente sobre moldes metálicos, reduzindo-se o tempo de moldagem e podendo-se controlar a relação fibra/resina, número de camadas, orientação do reforço, etc. Portanto, a utilização de pré-impregnados facilita muito a realização de reparos em aeronaves. [9]

Os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX. O desafio permanente que esses materiais colocam à imaginação levou a esforços que se traduziram em aplicações cada vez mais exigentes. Assim, como o desempenho já foi testado e aprovado (sendo mesmo superior ao de estruturas metálicas convencionais), e as normas industriais relativas a tais materiais estão cada vez mais estabelecidas, aplicações usando materiais compósitos de matriz polimérica continuarão a aumentar. As elevadas resistência e rigidez específicas continuam a ser a combinação que lança os materiais compósitos para novas áreas. No entanto, a grande capacidade de amortecimento e o baixo coeficiente de expansão térmica são características que podem ser adaptadas para aplicações específicas. Os compósitos avançados reduzem os problemas de fadiga e dão uma maior flexibilidade de concepção e fabricação, o que pode reduzir significativamente o número de peças necessárias. [9]

A utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que este material confere ao componente que está sendo projetado e por permitir flexibilidade no projeto de peças complexas e com propriedades locais específicas.

Hoje, a empresa americana Hexcel Corporation, fornecedora de pré-impregnados (tecido ou cabo de reforço contínuo, impregnado com resina no estágio B) homologados internacionalmente para serem utilizados na manufatura de componentes aeronáuticos estruturais, já movimentam mais de 1 bilhão de dólares, fornecendo para empresas como a Boeing, Bombardier e EMBRAER. [3]

O crescente uso de polímeros reforçados com fibras de carbono no setor aeronáutico deve-se, principalmente, ao constante desafio que esta indústria possui na obtenção de componentes que exibam os maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis. A substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, permite uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças. [3]

Hoje, os compósitos de fibras contínuas com matriz termorrígida estão sendo utilizados na obtenção de componentes internos, externos, nervuras de asas em aeronaves da Boeing, portas de trens de aterrissagem, radome do Hércules, flapes, partes estruturais do F-16, bordas de ataque, entre outras. [3]

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial. O desenvolvimento de fibras de carbono, boro, quartzo ofereceram ao projetista a oportunidade de flexibilizar os projetos estruturais, atendendo as necessidades de desempenho em voo de aeronaves e veículos de reentrada. Em paralelo, os compósitos carbono/carbono (compósitos de Carbono Reforçados com Fibras de Carbono-CRFC) e tecidos de fibras de quartzo foram desenvolvidos e submetidos a severas condições térmicas e de erosão, em cones dianteiros de foguetes, em partes externas de veículos submetidos à reentrada na atmosfera terrestre e em aviões supersônicos. Os avanços dos compósitos criaram novas oportunidades para estruturas de alto desempenho e com baixo peso, favorecendo o desenvolvimento de sistemas estratégicos, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas. [3]

O Brasil tem ampliado a sua experiência de inovação na aplicação dos compósitos estruturais, principalmente, no setor aeronáutico, utilizando este tipo de material em componentes externos e internos de aviões (cerca de 20% da área de uma aeronave) e helicópteros e, em menor escala, na estrutura de foguetes. Em apoio, principalmente, aos trabalhos em andamento no Instituto de Aeronáutica e

Espaço do Centro Técnico Aeroespacial e à indústria aeronáutica nacional e suas ramificações, trabalhos de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados na Divisão de Materiais, enfocando o uso de diferentes matrizes poliméricas, otimização de processos e melhoria de propriedades mecânicas, principalmente pelo estudo de interfaces fibra/matriz e tratamento superficial de reforços. [5]

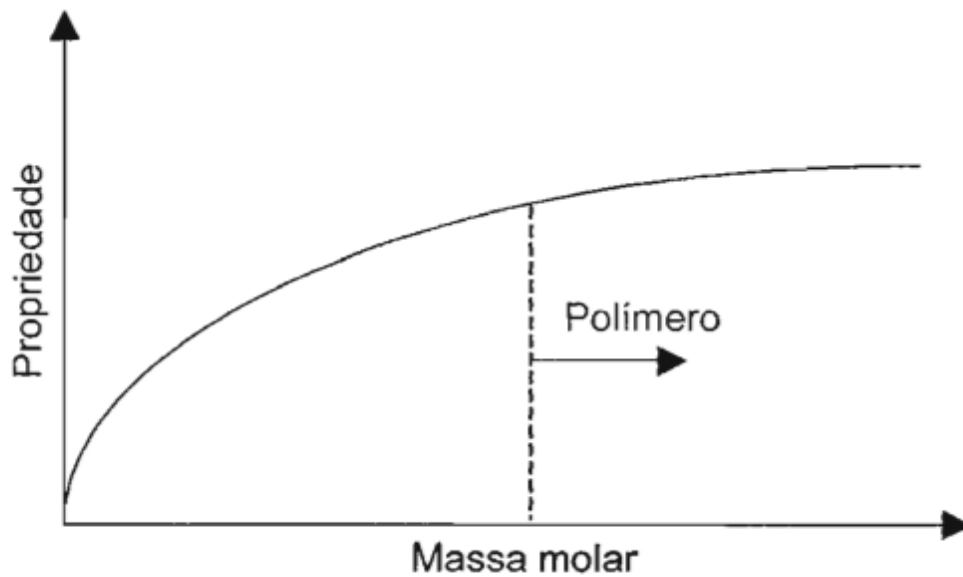
1.2 OBJETIVO

Devido a quarentena ocasionada pela pandemia por causa do Covid-19, este trabalho foi elaborado sem a realização de experimentos e testes em laboratório, contendo informações adquiridas teoricamente com base em pesquisas e artigos realizados anteriormente. Portanto, este trabalho tem como objetivo mostrar os avanços das aplicações de materiais compósitos de matriz polimérica em aeronaves, contendo seu histórico na indústria aeronáutica e aeroespacial, e principalmente, mostrar como é feito o processamento desses materiais, especificamente, para a aplicação citada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O QUE SÃO POLÍMEROS

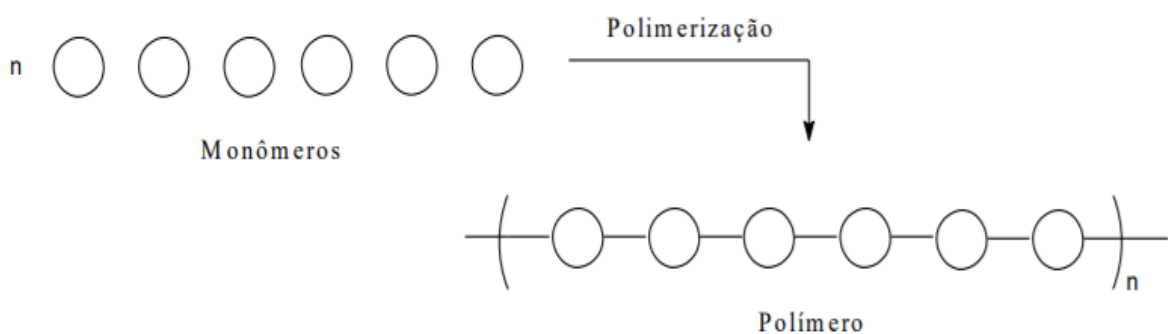
A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. (CANEVAROLO, 2002). A Figura 1 apresenta de forma esquemática a variação de uma propriedade física geral com o aumento da massa molar. A variação é assintótica (crescente, como apresentado, ou decrescente) tendendo para um valor que normalmente é o usado para referenciamento. [1]



Fonte: Canevarolo (2002) [1]

Figura 1 – Várias propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma caracteristicamente assintótica com o aumento da sua massa molar

Nem todos os compostos de baixa massa molar geram polímeros. Para sua síntese, é necessário que pequenas moléculas (monômeros) se liguem entre si para formar a cadeia polimérica. Assim, cada monômero deve ser capaz de se combinar com outros dois monômeros, no mínimo, para ocorrer a reação de polimerização, como mostra a figura 2. [4]



Fonte: Blass (1985)

Figura 2 – Representação da síntese de um polímero

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS

Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras. [1]

Muitas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula, isto é, sua massa molar. Como polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molar, é de se esperar grande variação em suas propriedades. Alterações no tamanho da molécula, quando esta é pequena, provocam grandes mudanças nas suas propriedades físicas. É possível abordar quatro diferentes classificações usualmente empregadas, isto é, quanto à estrutura química, ao seu método de preparação, às suas características tecnológicas, e quanto ao seu comportamento mecânico. [7]

2.2.1 Estrutura Química

Dentro desta classificação, analisa-se o polímero através da estrutura química do seu mero. Duas subdivisões são possíveis em princípio: polímeros de cadeia carbônica homogênea e polímeros de cadeia heterogênea. [1]

2.2.1.1 Polímeros de cadeia carbônica homogênea: poliolefinas, polímeros de dienos, polímeros estirênicos, polímeros vinílicos, polímeros acrílicos, polímeros clorados, polímeros fluorados, polímeros de ésteres, poli(fenol - formaldeído).

Polímeros de cadeia heterogênea: derivados da celulose; poliéteres; poliésteres; policarbonato; poliamidas; poliuretanos; aminoplásticos; silicones.

2.2.2 Método de Preparação

O segundo tipo de classificação dos polímeros foi sugerido por Carothers em 1929. Divide-os em duas grandes classes: polímeros de adição e de condensação. [1]

2.2.2.1 Polímeros de adição

O processo de síntese de polímeros conhecido como adição ocorre pela seguida repetição de um mesmo monômero, ou seja, haverá seguidas adições de monômeros iguais até a formação de uma macromolécula. Esses monômeros possuem insaturações, duplas ou triplas ligações, em sua cadeia carbônica. [4]

2.2.2.2 Polímeros de condensação

Os polímeros formados por condensação são caracterizados pela reação entre dois monômeros iguais ou diferentes. Porém, uma característica fundamental na reação de polimerização de condensação é a reação entre grupos funcionais, podendo ocorrerem eliminações de moléculas pequenas. Uma característica é que, ao contrário dos polímeros de adição, estes monômeros não precisam de apresentar insaturações em sua cadeia carbônica, mas são requeridos grupos funcionais nas cadeias carbônicas dos monômeros, originando novas funções orgânicas na estrutura do polímero. [4]

2.2.3 Comportamento Mecânico

Os polímeros podem ser classificados quanto ao comportamento mecânico em plásticos, elastômeros e fibras. [1]

2.2.3.1 Plásticos

Um material polimérico sólido na temperatura de utilização, normalmente a ambiente ou próxima dela. Eles podem ser subdivididos em:

2.2.3.1.1 Termoplásticos

Plásticos que, quando sob um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições. Retirada a solitação (T e P) se solidificam adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, portanto são recicláveis. São solúveis e possuem cadeia linear ou ramificada. Exemplos: PE, PP, PVC, etc. [7]

2.2.3.1.2 Termorrígidos

Também conhecidos por termofixos, termoendurecidos, polímero em rede ou em retículo, são plásticos que, quando sujeitos a um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde, reagem quimicamente, formando ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam. Subseqüentes aumentos de temperatura e pressão não têm mais influência, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não-recicláveis. [7]

2.2.3.1.3 Baroplásticos

Plásticos que, com um aumento substancial da pressão e marginal da temperatura, fluem através de rearranjos em sua conformação. Seu estado físico deve ser “borrachoso”, ou seja, a temperatura de solitação (T) deve estar entre $T_g < T < T_m$. [1]

2.2.3.1.4 Elastômeros

Polímeros que na temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas umas às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Isso define as seguintes propriedades básicas: [1]

- Aceitar grandes deformações (> 200%), mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado;
- Recuperar rapidamente a deformação, após retirado o esforço;
- Ter recuperação total da deformação.

2.2.3.1.5 Fibras

Termoplástico orientado (com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra) satisfazendo a condição geométrica de $L/D \geq 100$. A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos. Como exemplos, têm-se as fibras de poliacrilonitrila (PAN), os náilons, o poliéster (PET), etc. [1]

2.2.4 Desempenho Mecânico

Esta classificação leva em conta o desempenho mecânico do polímero quando usado em um item ou peça. [1]

2.2.4.1 Termoplásticos convencionais (Commodities)

São polímeros de baixo custo, baixo nível de exigência mecânica, alta produção, facilidade de processamento, etc. Como exemplos, temos as poliolefinas (LDPE, HDPE, PP), o poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC). [1]

2.2.4.2 Termoplásticos especiais

São polímeros com um custo levemente superior aos convencionais, mas com algumas características um pouco melhores. Nesta classe têm-se os copolímeros de etileno-acetato de vinila (EVA) e estireno-acrilonitrila (SAN) e os homopolímeros de politetrafluoroetileno (PTFE) e polimetacrilato de metila (PMMA).

Em dois deles (PMMA e SAN), procura-se alta transparência e em outro (PTFE), alta estabilidade térmica e química. [1]

2.2.4.3 Termoplásticos de engenharia (TE)

A confecção de peças de bom desempenho para aplicações em dispositivos mecânicos (engrenagens, peças técnicas para a indústria eletroeletrônica e automobilística, etc.) exige do polímero alta resistência mecânica (rigidez), boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional. Têm-se como exemplos as poliamidas (náilons em geral), os poliésteres termoplásticos, como o polietileno-tereftalato (PET) e polibutileno-tereftalato (PBT), poliacetais (homopolímeros e copolímeros), o policarbonato (PC), copolímero de estirenobutadieno-acrilonitrila (ABS) e polioxi-fenileno (PPO). [1]

2.2.4.4 Termoplásticos de engenharia especiais

Em aplicações em que alta temperatura é a exigência maior são utilizados polímeros com grande quantidade de anéis aromáticos na cadeia principal, a qual aumenta a estabilidade térmica para uso ininterrupto a temperaturas acima de 150°C. Como exemplos, têm-se polímeros contendo enxofre (polisulfonas, polisulfeto de fenileno, chamado de PPS), poliimidas (poliimida-poliamida), alguns poliuretanos, polieter-eter-cetona (PEEK) e polímeros de cristal líquido polimérico. [1]

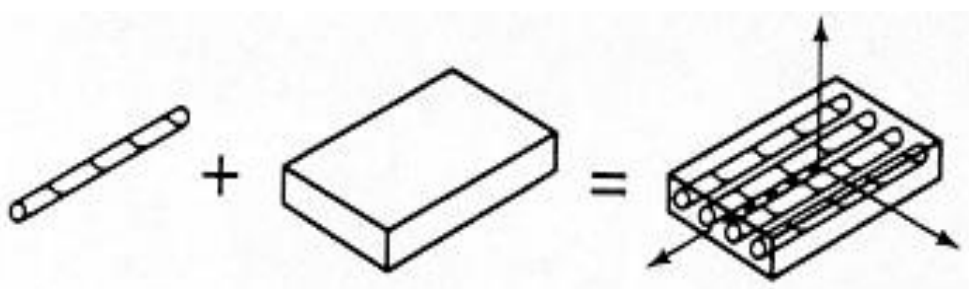
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um compósito consiste em um material multifásico feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta. [2]

Pode-se dizer que os materiais compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que as propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individual, sendo

que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço, e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço. A interface entre eles tem influência dominante sobre as suas características. São em geral empregados como materiais de engenharia, formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, que se distribuem em uma matriz flexível. [6]

Embora a associação do termo compósito esteja ligada às chamadas tecnologias de ponta, nas quais peças e dispositivos oriundos desse material são empregados em componentes utilizados em satélites, aeronaves, helicópteros, implantes ortopédicos, odontológicos biocompatíveis, veículos de Fórmula1, plataformas marítimas, plataformas de petróleo, pontes, telescópios, instrumentos musicais e estruturas inteligentes em geral, a origem desta importante classe de materiais remonta a incontáveis milhares de anos, uma vez que madeiras, ossos e tecidos musculares, são exemplos notáveis, em termos de eficiência estrutural, dos chamados compósitos naturais (Hull et. al., 1996). Nestes materiais também pode-se distinguir uma fase de reforço, normalmente na forma filamentar, e outra aglutinante (a matriz), a qual permite que os esforços transfiram ao longo de todo compósito trabalhando de forma integrada. Na figura 3 mostra a união entre o reforço (fase dispersa), em forma de fibra, e a matriz, sendo assim, resultando em um material compósito. [2]



Fonte: Zanatta (2012) [5]

Figura 3 – Reforço mais matriz igual a um material compósito

2.4 MATRIZ POLIMÉRICA

Nos últimos 40 anos, os compósitos poliméricos avançados foram introduzidos definitivamente como materiais estruturais para aplicações de elevado

desempenho nas indústrias aeronáutica e espacial. A sua utilização inicial em aplicações militares favoreceu o desenvolvimento de sistemas estratégicos nas áreas de mísseis, foguetes e aeronaves com geometrias complexas. Entretanto, após décadas de uso restrito ao setor aeroespacial, devido ao seu maior custo de obtenção, os compósitos poliméricos avançados têm ampliado a sua participação em diversos setores da indústria em geral, com um crescimento médio de aproximadamente 8% nos últimos anos. Porém, o seu uso está aumentando, com a acentuada aplicação de compósitos reforçados com fibras de carbono na indústria de aeronaves comerciais, principalmente na Boeing, com o 787 Dreamliner e na Airbus, com os A380 e A350 XWB. [6]

Os materiais compósitos são definidos como uma combinação de dois ou mais componentes distintos produzindo um novo material com propriedades resultantes mais atrativas em relação àquelas dos constituintes individuais, formados de duas fases distintas denominadas matriz e reforço. As matrizes poliméricas podem ser de dois tipos: termorrígidas ou termoplásticas, tendo como reforço diversos tipos de fibras, tais como vidro, aramida e carbono. [6]

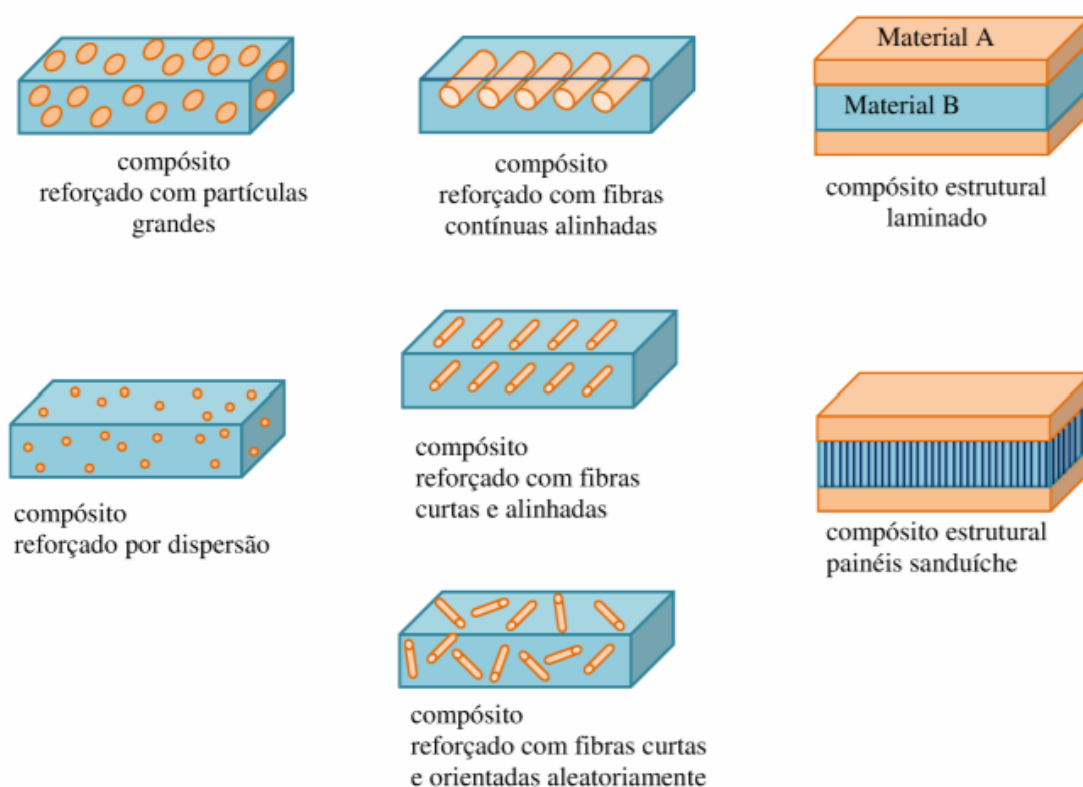
Embora os polímeros termorrígidos sejam responsáveis pela maior demanda de matrizes utilizadas no processamento de compósitos poliméricos, os polímeros termoplásticos têm continuamente se mantido como uma interessante alternativa para aplicações estruturais, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos, quando comparados aos termorrígidos. Os polímeros termoplásticos são sólidos à temperatura ambiente, tornam-se fluidos quando aquecidos acima da temperatura de fusão, no caso de matrizes semicristalinas, ou da temperatura de amolecimento, no caso de matrizes amorfas, e se solidificam novamente, quando resfriados. Em geral, os polímeros termoplásticos apresentam cadeias longas lineares ou ramificadas, não possuem ligações cruzadas como os termorrígidos, e podem ser reciclados.

No setor aeronáutico, o uso dos compósitos termoplásticos é promissor na construção de fuselagens permitindo, com isto, uma redução de peso em torno de 20 a 30%, em relação às estruturas metálicas hoje utilizadas e 25% na redução de custo final na obtenção das peças. Ao longo dos anos, esses compósitos estão sendo utilizados na obtenção de componentes internos e nervuras de asas de aeronaves das empresas Airbus e Boeing, portas de trens de aterrisagem, painéis

de piso e superfícies móveis, como portas em aviões da Fokker, radome do Hercules, flapes, entre outras. [6]

2.5 REFORÇO COM FIBRAS MAIS UTILIZADAS

No início da década de 1960, com o começo da utilização de reforços de elevado desempenho, as indústrias aeronáutica e espacial receberam um impulso significativo na fabricação de compósitos poliméricos avançados. No processamento de compósitos, os reforços podem ser utilizados como fibras contínuas, picadas ou na forma de partículas, entretanto, os reforços não têm utilidade estrutural se não forem aglutinados por uma matriz. A ideia básica do processamento de materiais compósitos é impregnar o reforço com uma determinada matriz, de tal forma que ao final do processo o componente sólido, com geometria definida, esteja praticamente em condições de ser utilizado. Nos compósitos reforçados com fibra, a fase dispersa exibe a geometria de uma fibra, ou seja, existe uma razão elevada entre o comprimento e o diâmetro (figura 4). No entanto, para os compósitos estruturais tem-se uma combinação de diferentes materiais, que podem ser do tipo homogêneo e do tipo compósito, levando à formação de laminados ou folhas, como ilustrado na figura 4. [6]



Fonte: Souza (2018) [12]

Figura 4 – Representação esquemática dos materiais compósitos de acordo com a fase dispersa

Nos compósitos poliméricos avançados, as fibras contínuas são os materiais mais empregados como reforço. Quando as fibras contínuas apresentam comprimento igual à maior dimensão de uma peça, ocorre a máxima transferência das propriedades mecânicas da fibra para o compósito. Em geral, o reforço é constituído de cabos de fibras com milhares de filamentos de diâmetro da ordem de 5 a 20 μm , dependendo do tipo de fibra, possibilitando, assim, sua fabricação em máquina têxtil. Os principais materiais utilizados como reforços são as fibras de vidro, aramida e carbono. [6]

As fibras de carbono são as mais utilizadas para a fabricação dos compósitos poliméricos avançados. Existem razões para isto, que são:

- Possuem os maiores valores de módulo específico e a maior resistência específica por unidade de massa dentre todas as fibras de reforço;
- Retêm os seus elevados módulos de tração e resistências sob temperaturas elevadas;
- Na temperatura ambiente, as fibras de carbono são pouco afetadas pela umidade e por uma grande variedade de solventes, ácidos e bases;
- Processos de fabricação para essas fibras e para os seus compósitos são relativamente de baixo custo e de boa relação custo-benefício.

Na tabela 1 a seguir, há uma comparação entre as propriedades mecânicas das fibras mais utilizadas, sendo as fibras de vidro, aramida e de carbono.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das fibras mais utilizadas

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
Coefficiente 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
Coefficiente de expansão térmica α_1 , $10^{-6} K^{-1}$	5	-4	-1

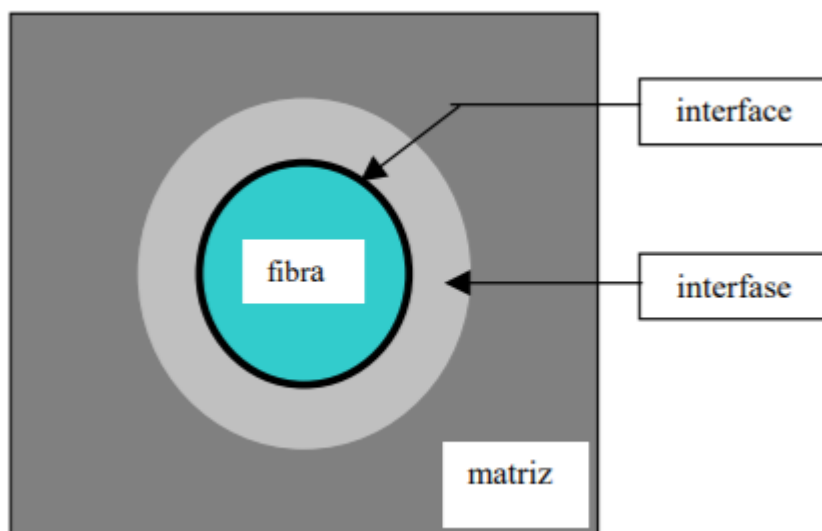
Fonte: Brito Junior (2007) [6]

2.6 TRATAMENTO QUÍMICO DA FIBRA

A fibra de carbono oferece vantagens como, alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade e baixa massa específica, além de propriedades como inércia química, resistência térmica e condutividade elétrica. Entretanto, sabe-se que, a fibra de carbono possui baixa afinidade com determinadas matrizes poliméricas dificultando, assim, a adesão fibra/matriz, fator determinante para o sucesso da aplicação desses materiais. O tratamento superficial das fibras é o método mais utilizado e mais eficaz para melhorar a adesão fibra/matriz. Uma boa adesão faz com que sejam obtidas melhores propriedades do material compósito, como consequência de uma boa interface fibra/matriz. Os tratamentos mais utilizados são: químico (com substância oxidante), eletroquímico ou oxidação anódica, oxidação térmica e técnicas com plasma. [29]

Uma interface forte aumenta a integridade dos compósitos e transfere a carga eficientemente às fibras, através da matriz, resultando em compósitos mais resistentes. As maneiras de se conseguir uma transferência eficiente de carga entre a fibra e a matriz são por meio de ligação química, adesão física e travamento mecânico. A adesão pode ser atribuída a cinco mecanismos principais que podem ocorrer na interface fibra/matriz: adsorção e molhamento; interdifusão; atração eletrostática; ligação química e adesão mecânica. É na interface que as tensões se concentram, podendo ter diferentes origens: diferença de coeficiente de expansão térmica entre a fibra e a matriz, cargas aplicadas à estrutura, contração pós-cura em matrizes termorrígidas e a cristalização em matrizes termoplásticas [2]. Essa interface de ligação entre fibras e matriz é significativa não só para a resistência e rigidez do compósito, mas também por governar o mecanismo de danos e a propagação de trincas. [29]

A figura 5 apresenta um diagrama esquemático do conceito de interface e interfase em um material compósito, sendo que nesta região é onde ocorre o processo de adesão. Essa adesão pode se dar por encaixe mecânico de cadeias da matriz polimérica em rugosidades existentes na superfície da fibra, atração eletrostática, forças de Van der Waals ou formação de ligações químicas mais fortes. [29]



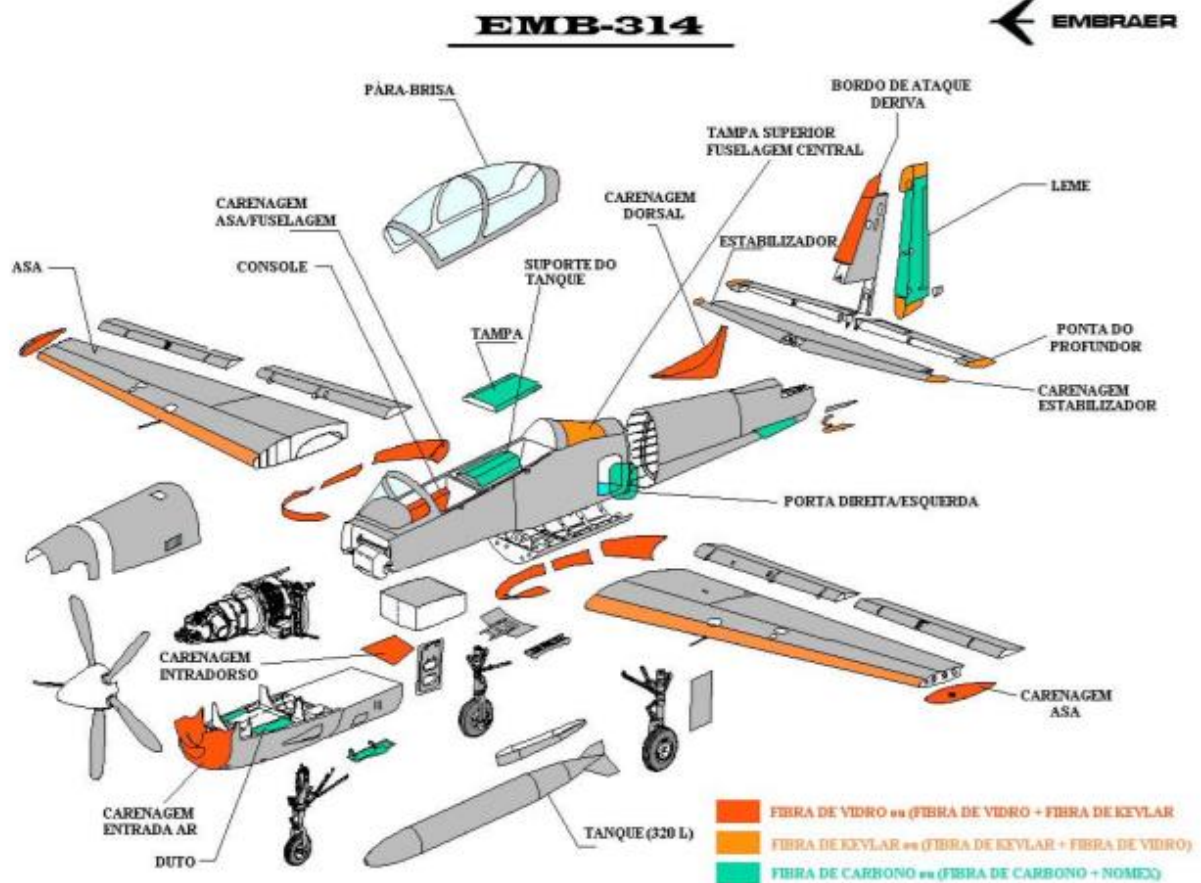
Fonte: Burakowski e Rezende (2000)

Figura 5 – Diagrama esquemático apresentando conceitos de interface e interfase em materiais compósitos

3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

3.1 UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS EM AERONAVES

Devido à sua baixa massa específica (0,9 a 1,5 g/cm³), excelentes propriedades mecânicas e por conferir ao projetista a flexibilidade de produzir peças complexas com propriedades locais específicas, os compósitos poliméricos vêm a cada ano conquistando mais espaço em aplicações como material de engenharia. A figura 6 mostra uma aeronave produzida pela EMBRAER, chamada Tucano, com ênfase nas regiões onde os compósitos são aplicados, apresentando os componentes fabricados em compósitos termorrígidos, utilizando como reforço fibras de carbono, kevlar e vidro. [8]



Fonte: Botelho, Scherbakoff e Rezende (2000) [8]

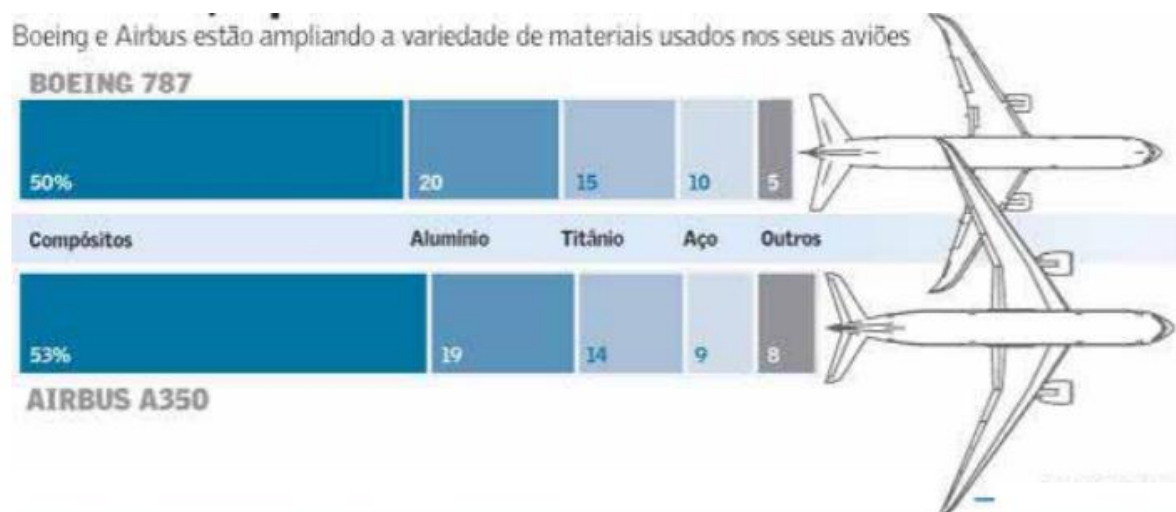
Figura 6 – Aplicações de materiais compósitos na aeronave EMB-314

O uso de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas também tem sido ampliado no setor aeroespacial, devido, principalmente, à redução drástica da fadiga, maiores valores de resistências ao impacto e ao fogo, baixa absorção de umidade, temperatura de serviço mais elevada e grande versatilidade na produção em série, exibindo propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos. No setor aeronáutico, o uso de compósitos termoplásticos é promissor na construção de fuselagens, permitindo com isto uma redução de peso em torno de 25%, em relação às estruturas metálicas hoje utilizadas. Hoje, dois processos tecnológicos estão sendo estudados, de modo a ampliar o uso deste tipo de compósitos sem, no entanto, onerar em demasia os custos com a aquisição de novas ferramentas de moldagem. O primeiro processo, conhecido como termoformagem de lâminas, consiste em laminar os pré-impregnados e pré-consolidar por prensagem a quente. Estes laminados são, então,

cortados e moldados na obtenção da peça. O segundo processo é conhecido como consolidação *in-situ*, o qual utiliza a laminação contínua e a consolidação direta da peça. Hoje, estes compósitos estão sendo utilizados na obtenção de componentes externos, como portas de aeronaves da Boeing e da Fokker. [8]

Atualmente, várias aeronaves civis e militares como as produzidas pela Embraer, Boeing (787 Dreamliner) e Airbus (A350) utilizam entre 15 a 30% de compósitos termoplásticos como componentes estruturais em suas aeronaves comprovando a alta procura por materiais compósitos, onde é possível visualizar na figura 7. [11]

Esses materiais ainda apresentam um custo elevado de processamento quando comparados aos compósitos termorrígidos, o que torna necessário um estudo de técnicas para ampliar sua viabilidade econômica. [11]

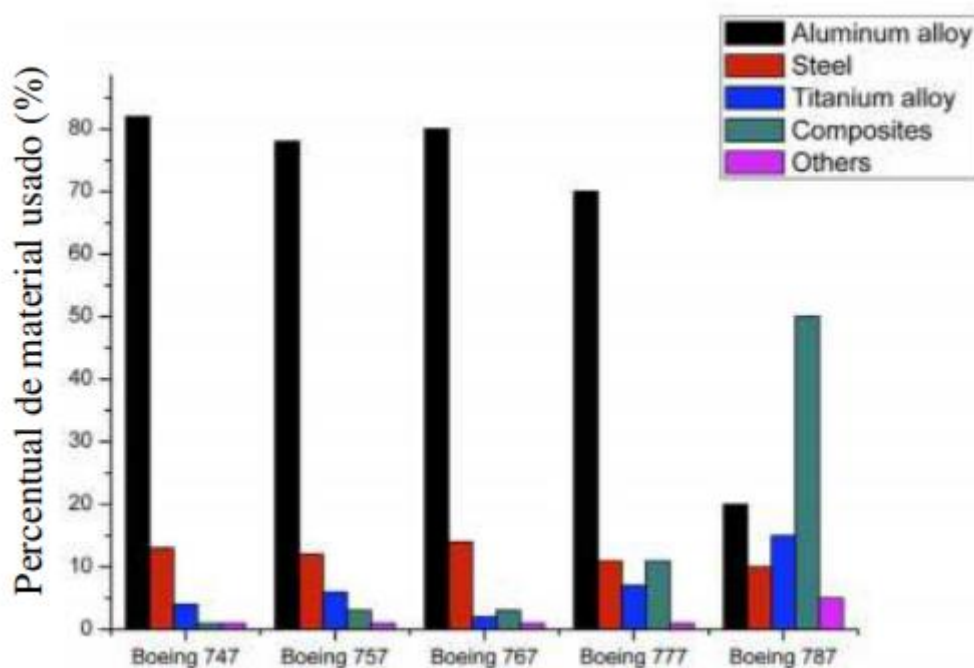


Fonte: Baker (2004) [11]

Figura 7 – Utilização de materiais compósitos em aeronaves da Boeing e Airbus

O desenvolvimento de novos materiais visando à aplicação no setor aeronáutico pode ser observado na figura 8, que ilustra as porcentagens de materiais utilizados em uma série de aeronaves da Boeing (corporação multinacional norte-americana de desenvolvimento aeroespacial e de defesa). Nesta Figura pode-se observar que, inicialmente, as ligas à base de alumínio ocupavam uma posição dominante na produção das aeronaves, no entanto, esta situação sofreu grandes alterações nos últimos anos, e o uso dos materiais compósitos tem experimentado um rápido aumento nos modelos mais recentes da Boeing. A Tabela 2 ilustra os

componentes presentes em uma série de aeronaves da Boeing que são fabricados com materiais compósitos. [12]



Fonte: ZHANG et al. (2018)

Figura 8 – Porcentagens de materiais utilizados em uma série de aeronaves da Boeing

Tabela 2 – Componentes presentes em uma série de aeronaves da Boeing

Tipo de aeronaves	Componente fabricado com o compósito
Boeing 737-200	Spoilers, estabilizador horizontal e carenagem dos trilhos dos flaps.
Boeing 737-300 e Boeing 737-400	Aileron, profundor, leme, naceles.
Boeing 747-400	Winglets, assoalho e nacelles.
Boeing 757	Aileron, profundor, leme, spoilers, flaps, carenagem e naceles.
Boeing 767	Aileron, profundor, leme, spoilers, flaps, portas do trem de pouso, carenagem e

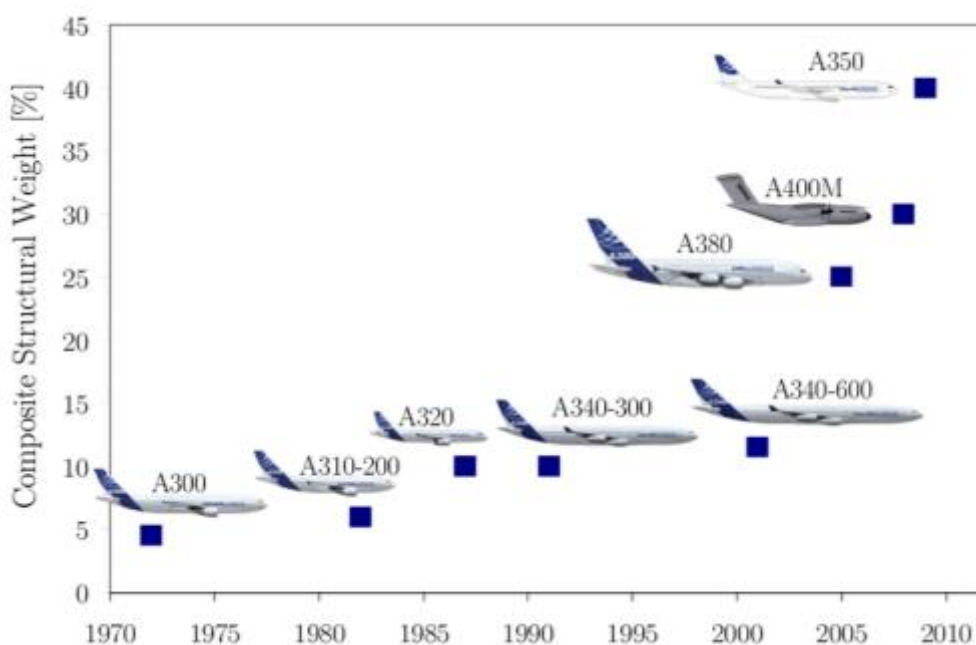
	naceles.
Boeing 777	Aileron, profundor, leme, spoilers, flaps, portas dos trens de pouso, vigas do assoalho, carenagem e naceles.

Fonte: NPTEL (2018)

Registra-se que a aeronave Boeing 787 foi produzida com 50% de material compósito, como ilustrado pela Figura 7.

Os projetos das aeronaves 757 e 767 expandiram o uso de compósitos para aproximadamente 3% do peso estrutural da aeronave (principalmente devido aos componentes de controle de voo em sanduíche de carbono). Com a introdução adicional da estrutura primária compósita, como as vigas de empenagem e de piso, a porção do peso estrutural subiu para 11%. [12]

Compósitos avançados desempenham um papel fundamental na inovação aeroespacial. A Airbus (empresa com sede em Toulouse, França) foi pioneira no uso de compósitos e outros materiais avançados no projeto e fabricação de aeronaves, resultando em uma linha de produtos de jatos econômicos e ecologicamente corretos - desde a família A320 até a do A380. A crescente utilização de materiais compósitos no setor aeronáutico também pode ser observada em uma série de aeronaves da Airbus, sendo assim, a figura 9 ilustra a porcentagem de compósitos que vêm sendo utilizados nessas aeronaves. [12]



Fonte: Assler (2006)

Figura 9 – Porcentagens de materiais utilizados em uma série de aeronaves da Airbus

A Tabela 3 ilustra os componentes presentes em uma série de aeronaves da Airbus que são fabricados com materiais compósitos.

Tabela 3 – Componentes presentes em uma série de aeronaves da Airbus

Tipo de aeronave	Componentes fabricados com compósitos
Airbus A300B2/B4	Radome, interior de cabine, interior de compartimento de carga, carenagen dos pilones, painéis traseiros da fuselagem, painéis dos bordos de ataque e fuga da asa.
Airbus A310-300	Leme, profundor, estabilizador vertical, spoilers, reversor de fluxo, portas dos trens de pouso, naceles, carenagem dos

	trilhos do flap.
Airbus A320/A319 e A321	Aileron, estabilizadores verticais e horizontais, profundor, leme, spoilers, flaps, nacele, radome, portas dos trens de pouso, assoalho, painéis da asa (bordos de ataque e fuga), carenagem dos trilhos do flap e caixa da asa.
Airbus A330	Ailerons, leme, flaps, spoilers, profundor, estabilizadores verticais e horizontais, painéis da asa (bordos de ataque e fuga), portas dos trens de pouso, naceles, carenagem dos trilhos do flap e caixa da asa.
Airbus A340	Ailerons, leme, flaps, spoilers, profundor, estabilizadores verticais e horizontais, painéis da asa (bordos de ataque e fuga), portas dos trens de pouso, naceles, carenagem dos trilhos do flap e caixa da asa.

Fonte: NPTEL (2018)

Os compósitos correspondem a cerca de 15% da estrutura da aeronave Airbus A320. Embora o peso total das estruturas compósitas seja muito maior nas aeronaves Airbus A330/A340, a porcentagem de peso em relação ao peso total das aeronaves é de quase 12%. [12]

3.2 POLÍMEROS MAIS UTILIZADOS

Com a evolução tecnológica, os materiais poliméricos com aplicações estruturais vêm ganhando espaço no setor aeronáutico, podendo ser observado um crescimento na utilização desses materiais em toda a cadeia produtiva de

fabricação. A maioria dos compósitos poliméricos avançados, atualmente utilizados na indústria aeronáutica, é obtida a partir da impregnação do reforço com resinas termorrígidas. Entretanto, os compósitos termorrígidos apresentam problemas de tensões em virtude do processamento e da natureza frágil da resina, falta de resistência à erosão e quando aquecidos podem apresentar mudanças químicas e estruturais, que limitam a sua aplicação em algumas regiões de maior temperatura de serviço da aeronave. Por esse motivo, as matrizes termoplásticas vêm se mostrando como importantes substitutas aos polímeros termorrígidos convencionais, com reconhecidas vantagens de maiores valores de rigidez, resistência ao impacto e temperatura de serviço, além de maior versatilidade de produção em série. [3]

3.2.1 Termoplásticos

A aplicação das matrizes termoplásticas em compósitos estruturais começou a ser estudada com mais atenção na década de 80. Isto teve início devido às estruturas de compósitos feitos de resinas termorrígidas de primeira geração apresentarem danos causados facilmente por impactos em baixas velocidades, sendo que algumas estruturas de aviões de caça foram seriamente delaminadas por tais impactos. Uma séria preocupação se deu devido à delaminação poder ser causada sem deixar evidências visuais na área impactada, e um subsequente carregamento estrutural poder aumentar a delaminação e propagação de trincas. [24]

A NASA e o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América impulsionaram um programa de pesquisas em várias empresas. De um modo geral, estes esforços procuravam identificar polímeros termoplásticos adequados para desenvolver produtos em compósitos, caracterizar suas propriedades e criar técnicas de processamento voltadas à aplicação aeronáutica. Devido às primeiras necessidades terem sido focadas para aviões de caça, os termoplásticos foram selecionados por possuir propriedades atrativas em temperaturas elevadas, pois na década de 80 os aviões caças em desenvolvimento eram projetados para atingir velocidades que variavam entre Mach 2,0 a 2,2. Nestas velocidades o atrito aerodinâmico pode causar nos revestimentos da aeronave um aquecimento adiabático por estagnação do ar em temperaturas de 132 a 171°C. Nestes casos,

para um material ser aceitável, este deve manter bons níveis de propriedades mecânicas e ser resistente aos danos causados por impacto a essas temperaturas. [24]

Atualmente, alguns polímeros termoplásticos de alto desempenho, que são de última geração, estão sendo utilizados na obtenção destes compósitos destacando-se: poliamida 6.6, PEEK (poli(éter-éter-cetona)), PEKK (poli(éter-cetona-cetona)), PEI (poli(éter-imida)), PPS (poli(sulfeto de fenileno)), PSU (polisulfona), entre outros. Esses materiais vêm apresentando uma participação cada vez maior no mercado aeronáutico, e isto se deve aos rígidos requisitos em serviço e ao acirrado mercado atrelado à indústria aeronáutica, que motivam uma busca constante por matrizes poliméricas com melhores desempenhos físico, químico e mecânico, além de custos mais competitivos. [3] A figura 10 apresenta aplicações de compósitos termoplásticos em aeronaves da Airbus.



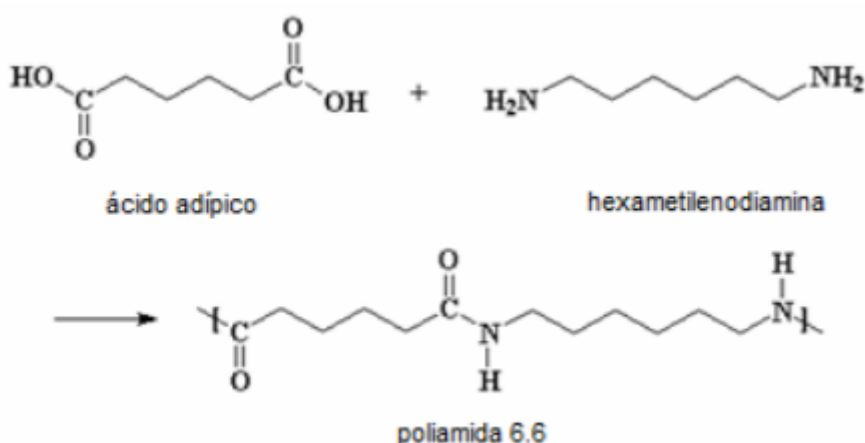
Fonte: Santana (2010)

Figura 10 – Aplicações de compósitos termoplásticos nas aeronaves Airbus:

- a)** bordo de ataque de asa da aeronave A-380, fabricado com PEI/carbono;
- b)** bordo de ataque de asa da aeronave A-380 pronto para ser instalado;
- c)** longarina transversal de piso da aeronave A-380, fabricado com PEKK/carbono;
- d)** painel de acesso de asa da aeronave A-340, fabricado com PPS/carbono e
- e)** detalhe do reforçador integrado ao painel

3.2.1.1 Poliamida 6.6 (PA 6.6)

Este é um polímero termoplástico semicristalino, que apresenta grande versatilidade de sua utilização, além de ser composto por monômeros de amida conectados por ligações peptídicas, podendo conter outros grupamentos. As poliamidas como o nylon, aramidas, começaram a ser usadas como fibras sintéticas, e depois passaram para a manufatura tradicional dos plásticos. [20] Dentre as vantagens de seu uso encontram-se: excelentes resistências à tração, ao impacto e ao rasgamento; elevada resistência a solventes orgânicos e hidrocarbonetos; fácil processabilidade e baixo custo. A poliamida 6.6 é obtida a partir de um ácido carboxílico, do ácido hexanodióico (ácido adípico) que possui seis átomos de carbono, e uma diamina, que é o hexano-1,6-diamina (hexametileno diamina) que também possui seis átomos de carbono, como se pode ver na figura 11. O aquecimento da mistura dos dois compostos leva a eliminação de uma molécula de água entre um grupo amina e um grupo carboxílico, formando assim, uma amida. Tal reação se repete por um grande número de vezes, formando um polímero de cadeia longa. Os grupos amida (NH-CO) presentes na poliamida 6,6 conferem elevados valores quanto às forças de atração intermolecular devido à presença das pontes de hidrogênio. [10]



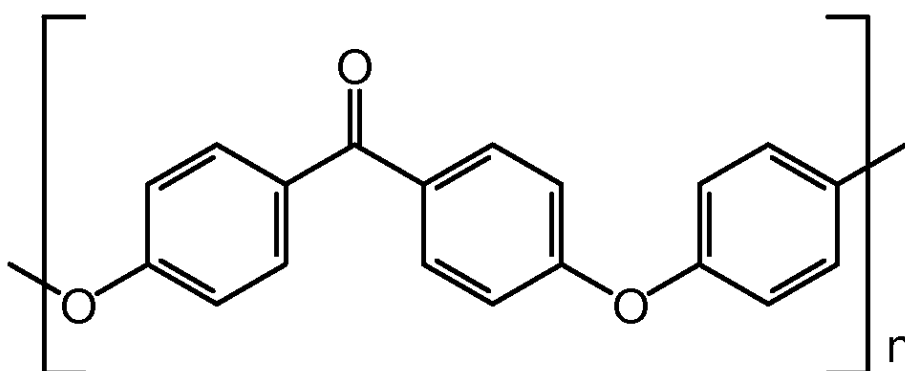
Fonte: Johnson (2002) [10]

Figura 11 – Estrutura química da poliamida 6.6

3.2.1.2 Poli(éter-éter-cetona) (PEEK)

É um polímero termoplástico semicristalino de alto desempenho, pertencente ao grupo de policetonas, constituído de monômeros de oxi-1,4-fenilenoxi-1,4-fenilenocarbonil-1,4-fenileno, como mostra a figura 12. Suas propriedades incluem elevada resistência ao desgaste, à temperatura e à produtos químicos. Possui excelente resistência mecânica e química, além de propriedades que se mantêm em altas temperaturas. [21] A estrutura química das cetonas poli aromáticas presentes no PEEK confere estabilidade a temperaturas elevadas até 300 °C, resistência química à radiação e substâncias ácidas, alta compatibilidade e maior resistência mecânica do que muitos metais, tornando-se altamente atraente para aplicações biomédicas. [22]

As condições de processamento usadas para moldar o PEEK podem influenciar a cristalinidade e melhorar as propriedades mecânicas. Esse material é utilizado em portas e tubos que protegem cabos de alta tensão. Também se utiliza como matéria-prima para suportes hidráulicos e de combustível para asas, caixa central e tanques de combustível, podendo reduzir o peso em 40%. Ele pode ser utilizado nessa aplicação por causa das seguintes propriedades: resistência ao desgaste, rigidez, baixo coeficiente de atrito. [23]



Fonte: Engenheiro de Materiais [23]

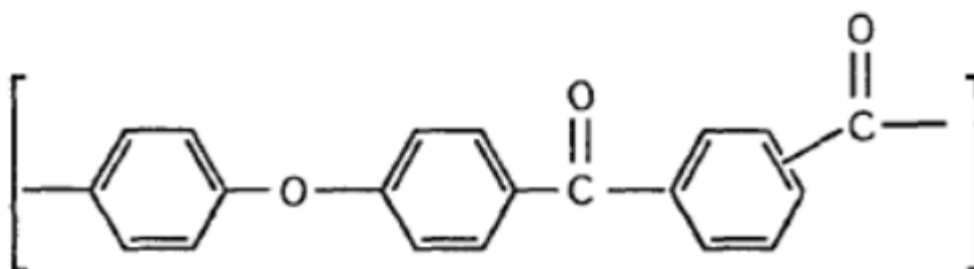
Figura 12 – Estrutura química do polímero PEEK

3.2.1.3 Poli(éter-cetona-cetona) (PEKK)

O PEKK é um polímero termoplástico de elevado desempenho, que possui um excelente balanço de propriedades, como elevada temperatura de transição vítrea ($T_g = 156^\circ\text{C}$), elevados valores de resistência mecânica, de rigidez, de tenacidade à fratura, baixa absorção de umidade e excelente resistência aos efeitos do meio ambiente. [6]

O PEKK é um polímero composto de uma série de anéis aromáticos que se alternam entre uma ligação éter (-O-) e duas cetonas (C=O), como também, por grupos meta e para isômeros, conforme ilustra a estrutura química apresentada na figura 13, e pode ser encontrado também na forma semicristalina ou amorfa. [6]

Do ponto de vista molecular, as ligações do tipo cetona são mais fortes e com maior polaridade, quando comparadas às ligações do tipo éter. Portanto, um maior número de ligações cetona contribui para o aumento da viscosidade e das temperaturas de transição vítrea (T_g) e de fusão (T_m). Por exemplo, o PEEK apresenta aproximadamente uma $T_g = 143^\circ\text{C}$ e $T_m = 340^\circ\text{C}$. Em princípio, era esperado que o PEKK apresentasse temperaturas de transição vítrea e de fusão mais elevadas, quando comparadas aos valores encontrados para o PEEK, o PEK e o PEKEKK. Entretanto, a adição de grupos meta isômeros na cadeia polimérica do PEKK promove uma redução significativa da temperatura de fusão e da sua viscosidade; enquanto que, a temperatura de transição vítrea é mantida constante (HSIAO, CHANG e SAUER, 1991). De acordo com a literatura, o PEKK apresenta uma temperatura de transição vítrea de, aproximadamente, 156°C e de fusão entre 305°C e 310°C , podendo alcançar valores mais elevados. [6]



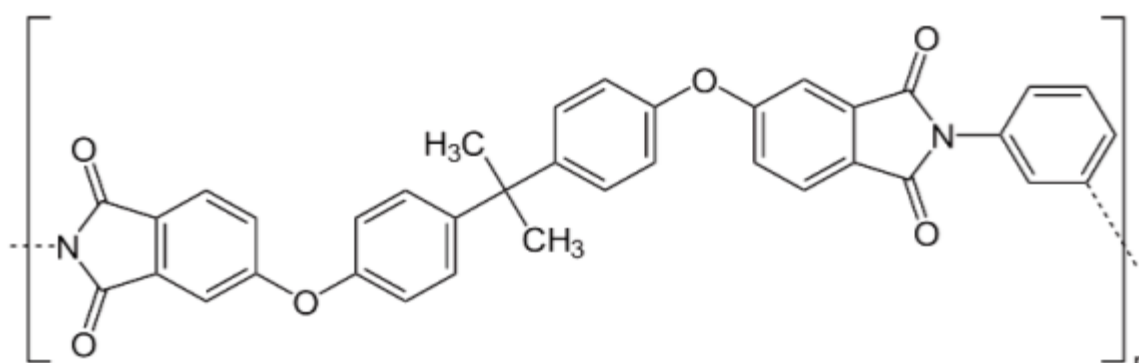
Fonte: (MCKAGUE, 2006; LEE, 1989, HSIAO, CHANG, SAUER, 1989) [6]

Figura 13 – Estrutura química do PEKK

3.2.1.4 Poli(éter-imida) (PEI)

A poli(éter-imida) é um termoplástico de engenharia, desenvolvido pela General Eletrics Inc.. É um polímero amorfo, transparente e de coloração amarelada, apresentando elevada temperatura de transição vítrea (aproximadamente 217 °C), boa processabilidade, estabilidade dimensional, excelentes propriedades mecânicas, como alto módulo de elasticidade, resistência inerente à chama com baixa evolução de fumaça e resistência química. [13]

Os grupos éter na estrutura da PEI, como pode ser visto na figura 14, provém flexibilidade à cadeia, baixa viscosidade no estado fundido, enquanto que os grupos imidas aromáticos são responsáveis pela estabilidade térmica e pelas excelentes propriedades mecânicas no estado sólido. Estas características permitem que a PEI seja um polímero passível de moldagem por métodos termo-mecânicos, como a extrusão, a moldagem por injeção, moldagem a sopro, etc. [13]



Fonte: Mark (1999) [13]

Figura 14 – Estrutura química da PEI

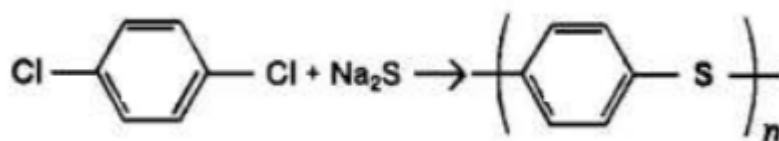
3.2.1.5 Poli(sulfeto de fenileno) (PPS)

O poli (sulfeto de fenileno) é um polímero termoplástico, semicristalino, composto por uma série de anéis aromáticos alternados com átomos de enxofre e com elevadas temperaturas de transição vítrea (90°C) e de fusão (280°C), quando comparado a outros termoplásticos convencionalmente utilizados. Esta matriz polimérica é proveniente da polimerização por condensação do para-dicloro-

benzeno com o sulfeto de sódio, em solventes polares, como apresentado na figura 15. [14]

Este material apresenta um custo elevado, porém, a estabilidade da estrutura molecular lhe confere características especiais, tais como excelentes resistências química e baixa degradação térmica. Quando misturado com fibras de vidro, de carbono ou outros tipos de reforços fibrosos, torna-se um plástico de engenharia de alto desempenho, tendo um conjunto de características dentre as quais se destacam: boa estabilidade térmica quando submetido por períodos prolongados de tempo a temperatura de até 200°C; resistência a uma grande variedade de produtos químicos, solventes e corrosivos, mesmo em temperaturas elevadas; autoextinguível (possuindo classificação de flamabilidade UL94V-0) sem que seja necessária aditivação para este fim; boa estabilidade dimensional; boas características dielétricas e isolantes – que permanecem constantes em uma grande faixa de condições. [14]

Em relação ao desempenho mecânico da matriz PPS destacam-se: elevado módulo de flexão; elevados valores de resistências à fluência e à tração; elevada resiliência e, em combustão forçada, queima com baixa geração de fumaça. Esta matriz polimérica também apresenta baixa absorção de umidade (de 0,01 a 0,05%). [14]



Fonte: MANO (1999) [14]

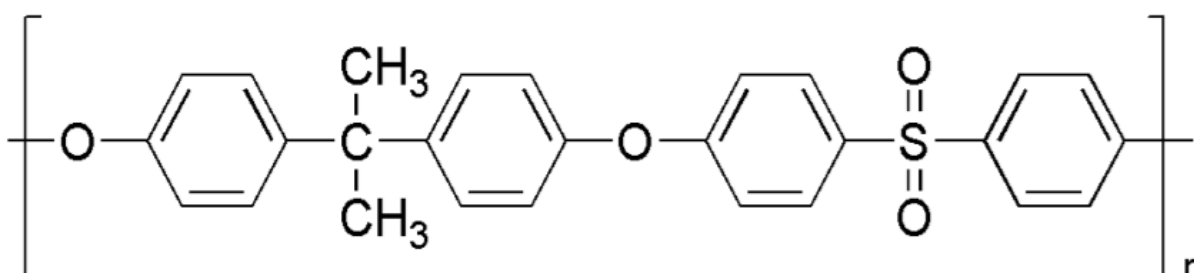
Figura 15 – Representação da reação química para obter o PPS

3.2.1.6 Polissulfona (PSU)

O polímero Polissulfona (PSU) é classificado como um termoplástico de engenharia de alto desempenho. Essa família de material é assim definida pelo elevado custo e pelas altíssimas propriedades mecânicas, térmicas e químicas. O PSU é indicado quando as condições de trabalho são extremamente agressivas, ou

seja, desenvolvida para uso em temperaturas extremas e mantendo suas boas características mecânicas, alta estabilidade dimensional, além disso, é possível acrescentar às polisulfonas a característica de alta transparência, alto isolamento elétrico e elevada retardância à chama, ou seja, baixa velocidade de queima. Portanto, a polisulfona é utilizada apenas peças que necessitem de alto desempenho de suas matrizes poliméricas. Logo, encontramos muitas vezes o PSU e sua extraordinária versatilidade, característica que o torna único entre os polímeros de engenharia sendo utilizado em projetos associados às indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística que necessitem de altas respostas mecânicas em uma elevada temperatura de trabalho. [15]

Na figura 16 se encontra a estrutura química do PSU, onde é possível localizar os seguintes grupos: O grupo sulfona-difenileno, que confere estabilidade térmica, resistência à oxidação, resistência química e mecânica, mesmo à temperaturas elevadas. O grupo sulfona, que confere um determinado grau de hidrofobicidade à polisulfona. Os grupos éter e isopropilideno, que são flexibilizantes de cadeia. [16]



Fonte: Wiebeck e Seixas (2012) [17]

Figura 16 – Estrutura química do PSU

3.2.2 Termorrígidos (termofixos)

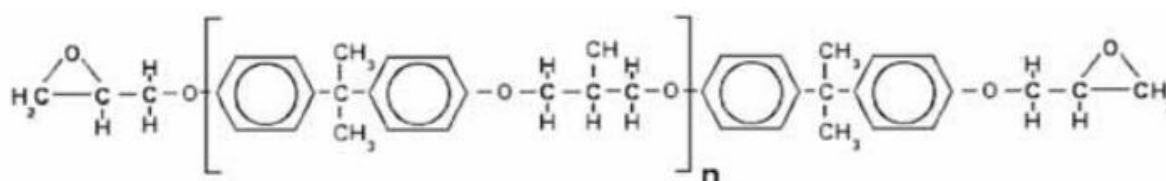
De fato, são as indústrias aeronáutica e espacial as principais beneficiárias e impulsionadoras de pesquisas, desenvolvimento e implementação dos materiais compósitos avançados. Nestas áreas, em particular, são amplamente aplicados os materiais compósitos reforçados de fibras de alto desempenho, embebidas em uma matriz de resina polimérica. [25]

Devido as grandes mudanças ocorridas no último século, foi observado um crescente número de componentes em polímeros de engenharia substituindo os metais mais tradicionais em diversas aplicações, obtendo-se, em muitos casos, maiores vantagens, como por exemplo, redução de custos de manutenção, ganho em peso, maior liberdade de projeto, etc. [25]

3.2.2.1 Epóxi

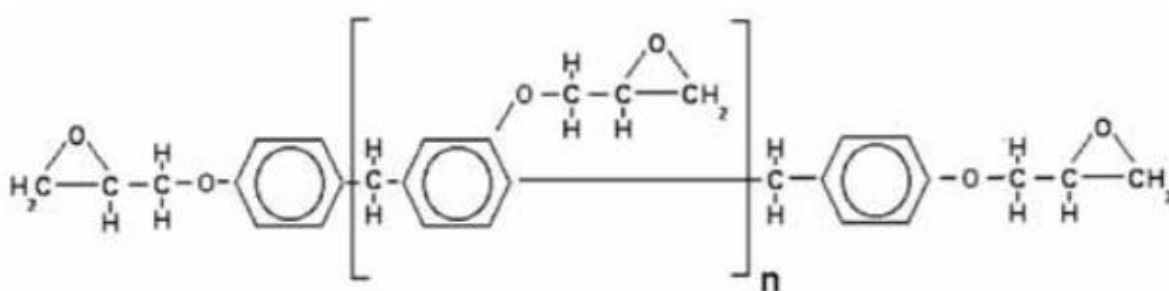
As resinas epóxi apresentam inúmeras vantagens para o desenvolvimento de projetos estruturais de alto desempenho, como por exemplo: baixa viscosidade (facilitando a moldagem), baixa contração (evitando o desenvolvimento de tensões residuais), possibilidade de cura à temperatura ambiente (o que reduz os custos da produção), alto módulo de elasticidade, possibilitando a confecção de componentes de elevada rigidez, além de uma boa compatibilidade mecânica-dimensional com fibras de carbono. [25]

As resinas epóxi têm como característica possuírem grupos epóxi em suas moléculas. As resinas mais utilizadas são resultado da reação entre bisfenol-A e epicloridina, reação que tem como resultado a resina diglicil éter bisfenol-A (DGEBA), sendo que estas resinas são bifuncionais, pois possuem dois grupos epóxi por molécula. As características deste tipo de resina são controladas pela quantidade de bisfenol-A, pelas ligações químicas feitas pelo éter e pelos grupos hidroxila e epóxi presentes. Um outro tipo de resina epóxi é a resina à base de bisfenol-F (DGEBF), onde a troca do bisfenol-A garante a resina maior número de ligações cruzadas. A temperatura ambiente ela possui alta viscosidade, e quando curada apresenta melhor desempenho mecânico, químico e térmico. As figuras 17 e 18 mostram a resina epóxi à base de bisfenol-A e bisfenol-F respectivamente. [26]



Fonte: Silveira (2009)

Figura 17 – Resina epóxi à base de bisfenol-A

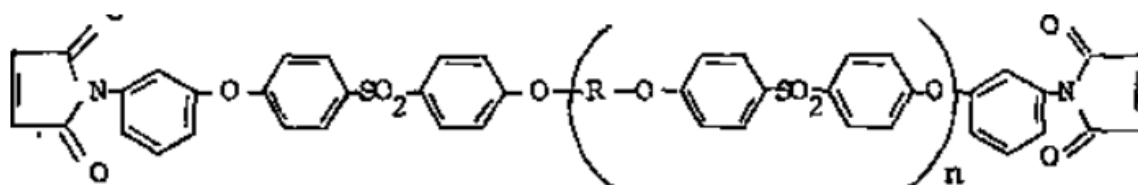


Fonte: Silveira (2009)

Figura 18 – Resina epóxi à base de Bisfenol-F

3.2.2.2 Bismaleimidas (BMI)

Na bismaleimidas comuns, o radical é o resíduo de uma diamina aromática, tal como metileno di-anilina ou m-fenileno diamina. Entretanto, nenhuma destas bismaleimidas aromáticas tem solubilidade adequada nos co-reagentes líquidos típicos para poder ser empregada em uma formulação de resina para prepreg (pré-impregnados). As modificações anteriores para melhorar a processabilidade destas bismaleimidas aromáticas incluíram o uso de misturas de menor ponto de fusão, mais solúveis, de uma ou mais bismaleimidas aromáticas com bismaleimidas alifáticas. A solubilidade das bismaleimidas aromáticas foi também melhorada pelo uso de várias diaminas para aumentar estas bismaleimidas em uma reação de adição de Michael, a fim de produzir uma mistura de bismaleimidas. Na figura 19 é apresentada a estrutura química de uma bismaleimida. [28]



Fonte:

Figura 19 – Estrutura química de uma bismaleimida

Apesar da matriz epóxi ser ainda muito utilizada no processamento de compósitos, uma nova geração de resina termorrígida modificada com

termoplásticos, as bismaleimidas (BMI), está sendo utilizada nas mais importantes e complexas aplicações de alto desempenho no setor aeronáutico, podendo-se citar as aeronaves F22, F117 e B2, do programa militar americano. Na área civil, compósitos com este tipo de matriz vêm sendo utilizados na indústria de carros de fórmula-1. Os compósitos com bismaleimida apresentam a combinação única de alta temperatura de serviço, excelentes propriedades mecânicas até cerca de 180°C em condições úmidas, exibindo tolerância a danos superior às melhores resinas epóxi. Certas BMI são capazes de serem utilizadas na faixa de temperatura de 232-288°C, apresentando comportamento semelhante à poliimida PMR-15. As BMI, também, permitem o uso do processo RTM. [3]

A aeronave supersônica F22, que atinge velocidades de 1,5 Mach, utiliza em sua estrutura 24% de material compósito polimérico, 39% de titânio, 16% de alumínio, 6% de aço e 15% de outros materiais. Sendo que, 50% do peso em compósito é constituído da matriz de resina BMI. A aeronave F22, apesar de suas velocidades de vôo, não utiliza em suas superfícies externas material retardante de chama, devido às características de resistência térmica e química da BMI. [3]

3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

O processo de fabricação a ser utilizado na produção de um material compósito pode ser manual ou automatizado, sendo que a escolha do método mais adequado é determinada pelo tipo de matriz. Existem diversos tipos de processos para a fabricação de compósitos poliméricos, sendo que os mais utilizados para a fabricação de compósitos de alto desempenho no setor aeroespacial são: por corte automatizado das camadas; por agrupamento ou laminação manual das camadas; e por cura em autoclave. [12]

Os processos que incluem matrizes termoplásticas são: tecelagem híbrida, deposição eletrostática, laminação manual com aquecedor ultra-sônico, moldagem por compressão a quente e consolidação in-situ. Outros processos, que incluem matrizes termorrígidas, são constituídos por: colocação automática de fitas,

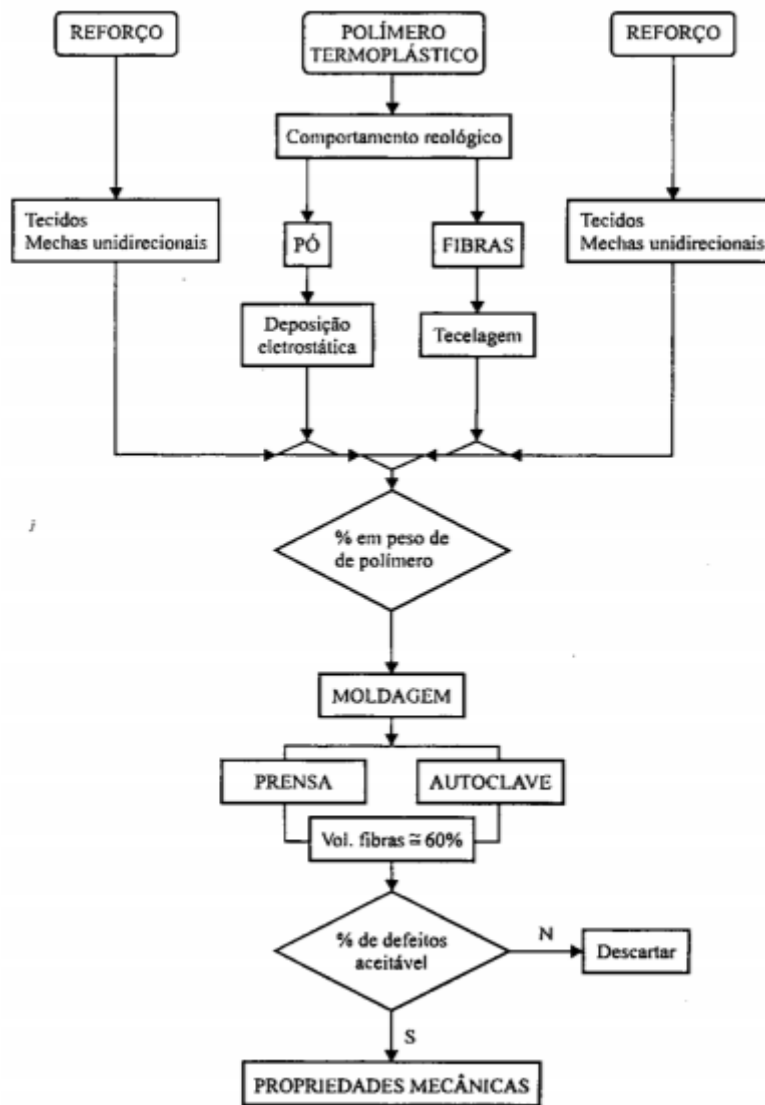
enrolamento filamentar, colocação de fibras (processo híbrido), moldagem líquida e pultrusão.

3.3.1 Matrizes Termoplásticas

O uso de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas tem sido bastante ampliado no setor aeroespacial, devido, principalmente, ao aumento da tenacidade à fratura, valores maiores de resistências ao impacto, baixa flamabilidade, baixa absorção de umidade, temperatura de operação elevada e maior facilidade de retrabalhos e reprocessamento, exibindo propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos. [27]

Compósitos com matriz termoplástica têm tenacidade à fratura e resistência ao impacto no mínimo dez vezes maior que compósitos com matriz termorrígida. O tempo de processamento de compósitos com matriz termoplástica é também relativamente curto (de aproximadamente 2 a 15 min) em relação aos compósitos com matriz termorrígida (de aproximadamente 2 a 8 horas), e não se tem limite estabelecido de validade para sua utilização. [27]

A figura 20 mostra um fluxograma esquemático das operações de fabricação de pré-impregnados utilizando polímeros termoplásticos. De maneira similar aos pré-impregnados termorrígidos, é fundamental o entendimento do comportamento reológico do polímero termoplástico que será utilizado como matriz na manufatura de pré-impregnados termoplásticos. Entretanto, as características reológicas a serem determinadas serão de utilidade quando da operação de moldagem, pois não há similaridade entre o processo de manufatura de pré-impregnados que utiliza como ponto de partida matriz termoplástica e o que utiliza matriz termorrígida em sua formulação. Isso se deve a dificuldades de dissolução de polímeros termoplásticos em solventes voláteis para incorporação de fibras de reforço. [27]



Fonte: PARDINI e PERES (1996)

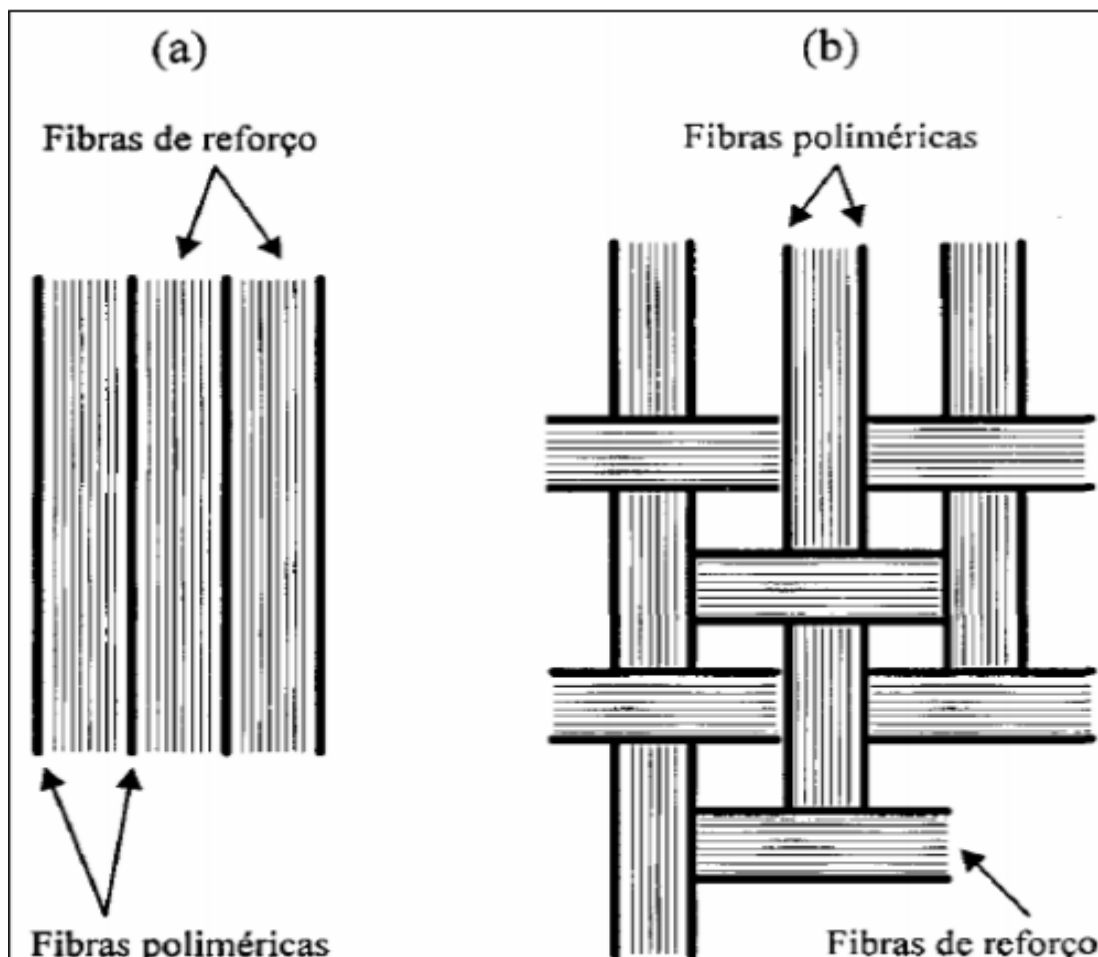
Figura 20 – Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço / matriz polimérica termoplástica

Conforme se pode verificar pela figura 20, o polímero termoplástico pode ser depositado eletrostaticamente ou ser tecido, na forma de fibras, com o reforço a ser utilizado. Os compósitos estruturais manufacturados a partir de filamentos poliméricos e de reforço não se constituem, em essência, de um pré-impregnado, mas sim de um material pré-formado, híbrido de fibra de reforço e fibra polimérica. [27]

3.3.1.1 Tecelagem Híbrida

Os métodos de obtenção de pré-impregnados com matrizes termoplásticas são diferentes dos obtidos com matrizes termorrígidas, nas quais são utilizados basicamente os métodos de tecelagem híbrida, conforme mostrado na Figura 21, e deposição do polímero na forma de pó. [24]

Os compósitos estruturais manufaturados a partir de filamentos poliméricos e de reforço não se constituem, em essência, de um pré-impregnado, mas sim de um material pré-formado, híbrido de fibra de reforço e fibra polimérica. A figura 21 mostra exemplos de materiais pré-formados para fabricação de compósitos estruturais do tipo fibra de reforço/matriz termoplástica⁵. Uma característica importante quando esse tipo de material é utilizado relaciona-se com a conformabilidade do conjunto a contornos complexos. Há que se considerar o fato de que materiais pré-formados híbridos têm que ser obtidos utilizando-se filamentos que possam ser tecidos com a tecnologia disponível de tecelagem para a produção de pré-impregnados flexíveis. Além disso, nem todos os termoplásticos de interesse estrutural são passíveis de se obter na forma de filamento para tecelagem, sendo fundamental que todas as fases do processo de fabricação do compósito sejam investigadas previamente à fabricação do pré-formado híbrido. [27]



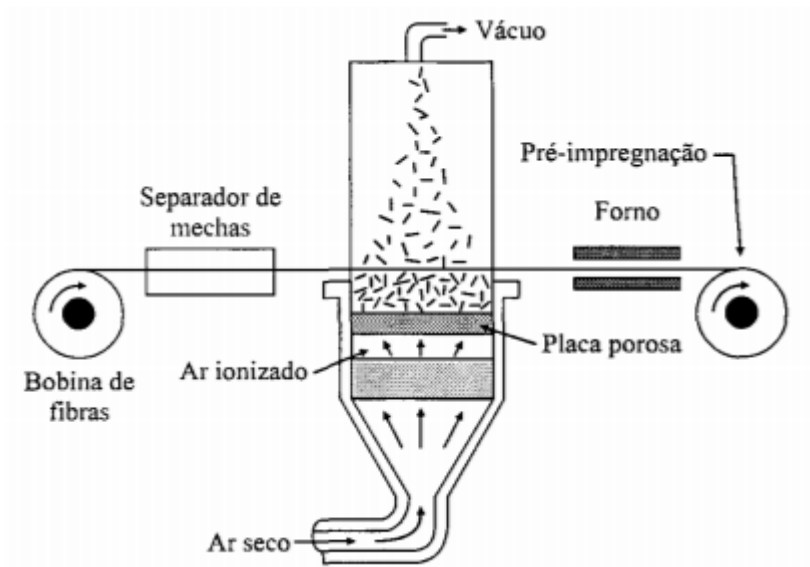
Fonte: PARDINI (1996)

Figura 21 – Formas de tecelagem híbrida: **a)** fibras de polímero com fibras de reforço unidirecional e **b)** fibras de polímero com fibras de reforço em forma de tecido

3.3.1.2 Deposição Eletrostática

Um dos métodos mais atraentes para fabricação de pré-impregnados com matrizes termoplásticas é o de deposição eletrostática. Nesse método, polímeros em pó são carregados eletrostaticamente e fluidizados em uma câmara onde aderem a mechas de filamentos de reforço. O polímero depositado é então fundido sobre as mechas por aquecimento, usualmente sob a ação de rolos de pressão, aderindo de forma permanente às fibras. A figura 22 mostra um desenho esquemático do processo de deposição eletrostática de polímeros na forma de pó para obtenção de pré-impregnados com matriz termoplástica. As condições de processo que vão determinar a quantidade de polímero em pó aderido à mecha de reforço são, basicamente, tamanho da mecha e da granulometria do pó polimérico, tempo de

residência da mecha de reforço na câmara e nível de espalhamento da mesma, fluxo de ar e tensão elétrica. [27]

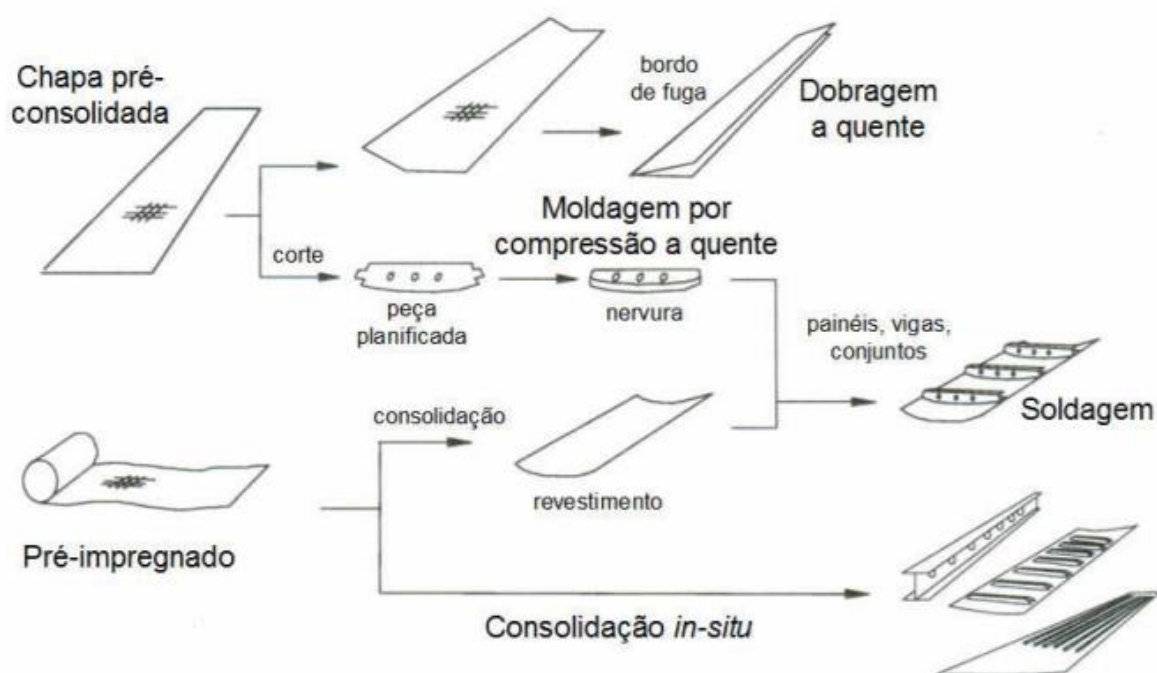


Fonte: PARDINI e PERES (1996)

Figura 22 – Esquema do processo de deposição eletrostática

3.3.1.3 Moldagem por Compressão a Quente e Consolidação in-situ

Dois processos tecnológicos estão sendo estudados no âmbito de Indústria-universidades, de modo a ampliar o uso deste tipo de compósitos sem, no entanto, onerar em demasia os custos com a aquisição de novas ferramentas de moldagem. O primeiro processo, conhecido como moldagem por compressão a quente, ou termoformagem, consiste em laminar os pré-impregnados e pré-consolidá-los por prensagem a quente. Estes laminados são, então, cortados e moldados na obtenção da peça. O segundo processo é conhecido como consolidação in-situ, o qual utiliza a laminação contínua e a consolidação direta da peça, conforme mostrado na figura 23. [24]



Fonte:

Figura 23 – Vista geral das tecnologias de fabricação de compósitos termoplásticos

3.3.1.4 Laminação Manual com Aquecedor Ultra-sônico

A necessidade de processamento em temperaturas elevadas, que podem chegar a 400°C, juntamente com a falta de adesividade dos pré-impregnados termoplásticos, tem exigido técnicas de processamento diferentes daquelas usadas para compósitos termorrígidos. Uma técnica de baixo custo tem sido a laminação e a consolidação por aquecimento de uma placa plana, seguido por uma termoformagem até o formato da peça desejada. Dependendo do tamanho ou formato da peça, é empregada uma técnica de pré-aquecimento ultra-sônico das camadas durante a laminação para compensar a falta de adesividade que poderia permitir que camadas deslizassem para fora do contorno esperado da peça, conforme a figura 24. [24]



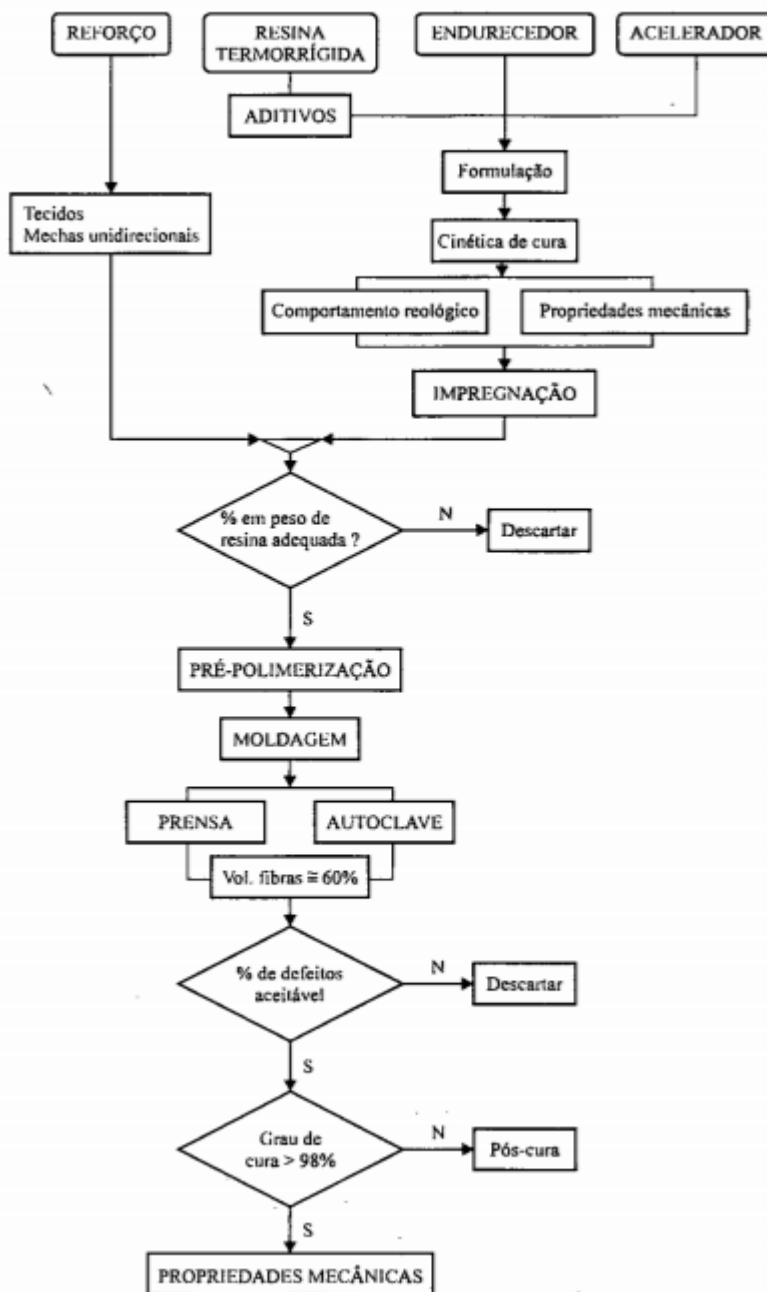
Fonte:

Figura 24 – Laminação manual de um revestimento com pré-impregnado termoplástico utilizando aquecedor ultra-sônico

3.3.4 Matrizes Termorrígidas

As duas matérias-primas básicas para a produção de pré-impregnados são a matriz polimérica e a fibra de reforço na forma de tecidos ou mechas unidirecionais. Há vários processos de fabricação de pré-impregnados que podem ser combinados entre si. O processo que converte o pré-impregnado manufaturado com matriz termorrígida em uma peça infusível sob a ação do calor e pressão é conhecido como "cura". Um compósito totalmente curado passa por um processo em que, teoricamente, foram consumidos todos os grupos químicos disponíveis para a transformação do pré-impregnado em um sólido infusível. [27]

A figura 25 mostra um fluxograma esquemático da tecnologia envolvida na manufatura de pré-impregnados tendo como matrizes polímeros termorrígidos⁴. Pode-se observar pelo fluxograma que a formulação da matriz compreende a adição de endurecedores, catalisadores de reação e outros aditivos, como agentes tenacificantes ou diluentes. Há um grande número de matrizes poliméricas termorrígidas, além de endurecedores, utilizados na fabricação de pré-impregnados.



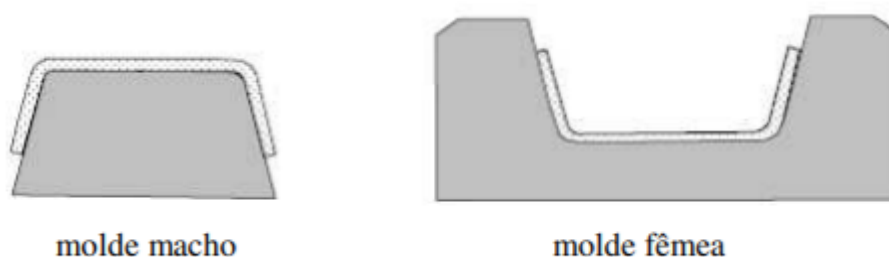
Fonte: PARDINI e PERES (1996)

Figura 25 – Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço/matriz polimérica termorrígida

Alguns processos de fabricação têm em comum a utilização de uma ferramenta de cura, denominada molde, que pode ser fabricado com metal, polímero, madeira ou até mesmo com gesso. O molde tem como objetivo transferir o calor e a pressão da autoclave, no decorrer da etapa de cura, produzindo uma peça com dimensões altamente precisas. Esta ferramenta tem elevado custo e deve ser projetada e fabricada corretamente, com base em conhecimentos prévios, a fim de se evitarem modificações ou a sua substituição. [12]

Para a cura em autoclave, os moldes são geralmente feitos de aço ou alumínio, mas outros materiais como carbono/epóxi, carbono/bismaleimida e ligas de ferro-níquel (comercialmente conhecidas como invar e Nilo) também podem ser utilizadas. Como o alumínio e o aço expandem com taxas maiores do que carbono/epóxi, durante a etapa de cura é necessário corrigir o seu tamanho, ou compensar as diferenças da expansão térmica, evitando problemas, como por exemplo, tamanho incorreto da peça, laminados rachados e danificados. [12]

Uma vez definidas as superfícies internas e externas do molde (Figura 26) tem-se que a superfície externa da linha de molde produz uma peça com um acabamento superficial extremamente suave e com maior facilidade de agrupamento das camadas, enquanto a superfície interna da linha de molde fornece um melhor ajuste com redução das lacunas e reparos. [12]



Fonte: Campbell (2006) [12]

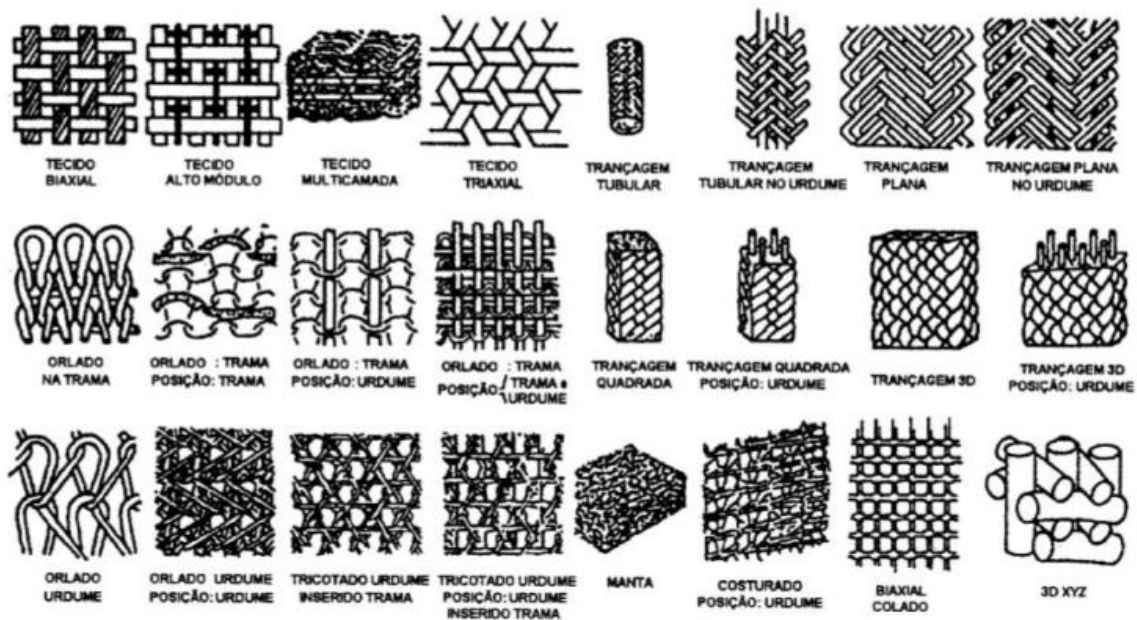
Figura 26 – Tipos de molde: macho e fêmea

Em alguns processos de fabricação, destaca-se o emprego de uma pré-forma (Figura 16), que consiste de um reforço fibroso (fibra seca, contínua e orientada) não impregnado e pré-moldado, que está pronto para uso. A pré-forma é produzida em um modelo de forma, um mandril ou em uma ferramenta, antes de ser colocada no molde da peça compósita; além disso, a pré-forma é normalmente utilizada com uma geometria pré-definida e adequada ao processamento da peça

compósita. O formato da pré-forma é muito semelhante à configuração final da peça e sua utilização reduz significativamente os custos de mão de obra e a quantidade de material de descarte. [12]

A pré-forma pode ser produzida a partir de fios, fitas unidirecionais, processos de tecelagem e ainda por tecidos que foram cortados ou costurados. A utilização das pré-formas possibilita ainda, como vantagem, a redução de desgaste na fibra, melhor tolerância a danos, e permite que as orientações das fibras sejam fixadas em locais desejados. As desvantagens incluem altos custos para a produção da pré-forma, flexibilidade limitada, maiores cuidados com a compatibilidade do aglutinante com a matriz e preocupações com a molhabilidade e a aderência da fibra para peças mais complexas. [12]

A Figura 27 ilustra alguns exemplos de pré-formas utilizadas na fabricação de compósitos estruturais.



Fonte: PARDINI (2000) [12]

Figura 27 – Exemplos de pré-formas utilizadas na fabricação de compósitos estruturais

3.3.4.1 Laminação manual

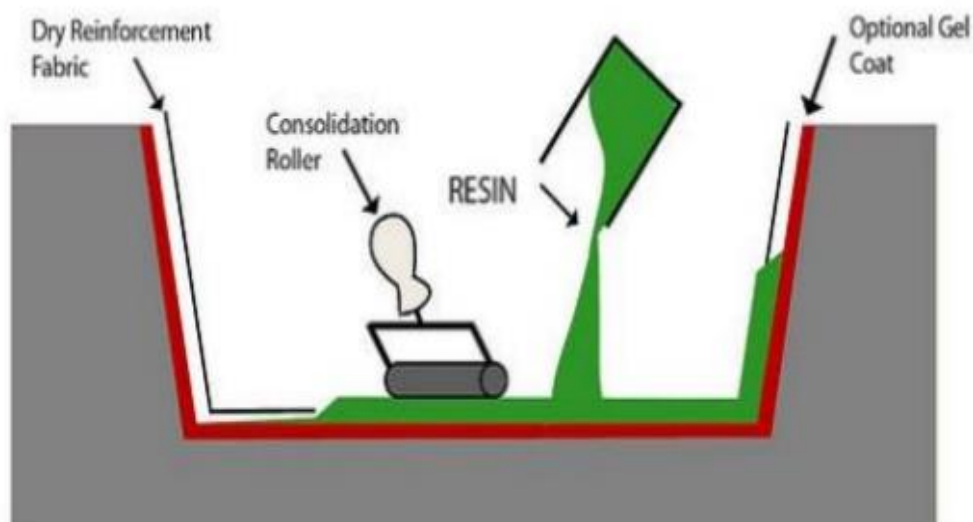
O processo de laminação manual é realizado em molde aberto, que pode ser macho ou fêmea, onde são colocadas as camadas de fibras impregnadas com resina e acelerador. Antes de iniciar a laminação, o molde deve ser limpo e revestido

com um agente líquido desmoldante ou coberto com um filme de liberação, para facilitar a desmoldagem da peça. Em seguida, o gel coat pigmentado ou transparente pode ser aplicado na superfície do molde, contribuindo para o bom acabamento da peça. Em geral, a laminação ou agrupamento manual de camadas é realizado usando uma fita pré-impregnada com 24 polegadas de largura. [12]

Após o revestimento do molde, o papel de liberação da camada é removido e em seguida as camadas são posicionadas e coladas no molde, respeitando-se o local e a orientação especificados pelo projeto. As camadas são sucessivamente aplicadas até atingir a espessura necessária, sendo recomendado não ultrapassar a aplicação de três camadas consecutivas de manta, devido ao risco de empenamento da peça, queima do gel coat e esbranquiçamento da fibra. [12]

A etapa de compactação das camadas é feita usando um rolo ou pincel que expulsa as bolhas de ar. A etapa de endurecimento por resina depende da quantidade de acelerador utilizado e da temperatura, e pode durar de alguns minutos a algumas horas. A figura 28 ilustra a representação esquemática do processo de laminação manual. Este processo demanda mão de obra volumosa e qualificada, mas pode ser o método mais econômico, se as peças forem pequenas e em quantidades limitadas, uma vez que as etapas de corte e de dobra manual representam 40-60% do custo total da peça. [12]

No setor aeroespacial, a utilização de materiais compósitos de alto desempenho para a fabricação de asas, longarinas e fuselagens em aeronaves como a Boeing 787 e a Airbus A350 (com vãos superiores a 30 m) exigem uma taxa de produção que seja significativamente superior àquela obtida na laminação manual. Para melhorar a taxa de produção nessas aplicações, foram desenvolvidos processos automatizados, como por exemplo, a colocação automatizada de fitas e a colocação automática de fibras. [12]



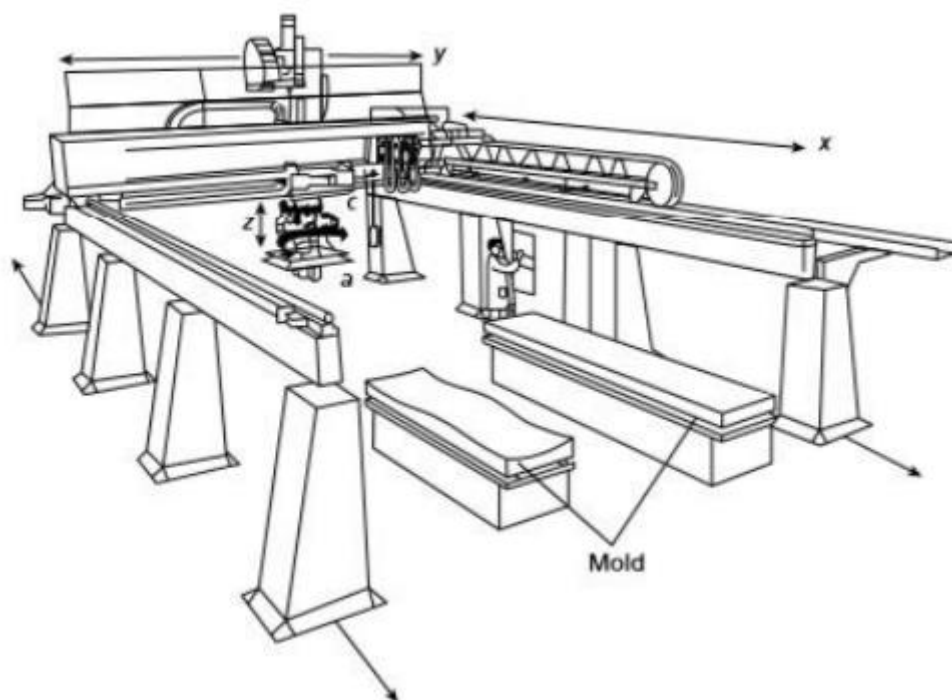
Fonte: VADIVELVIVEK (2013) [12]

Figura 28 – Representação esquemática do processo de laminação manual

3.3.4.2 Colocação de fitas

A colocação automática de fitas é um processo utilizado para a produção de grandes superfícies, tais como asas, longarinas e fuselagens em aeronaves. Geralmente, as camadas de fitas impregnadas são unidirecionais com 3, 6 ou 12 polegadas, dependendo se a aplicação é para estrutura plana ou estrutura levemente contornada. Neste processo, as camadas de fitas impregnadas com resina são depositadas no molde ou superfície por uma máquina que controla a orientação, a quantidade e a pressão com a qual o material é aplicado na peça. [12]

A Figura 29 ilustra uma máquina de colocação automatizada de fitas com dez eixos de movimento.



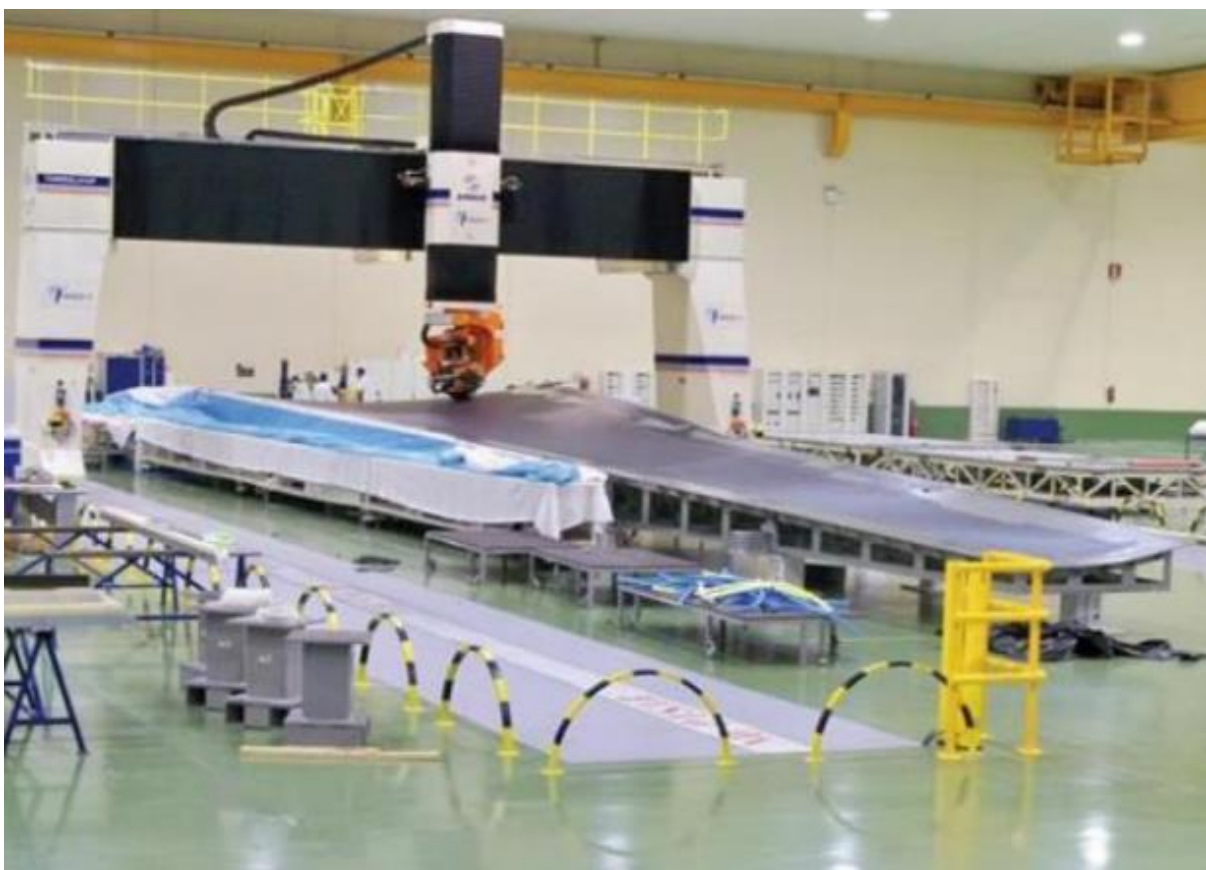
Fonte: CAMPBELL (2006) [12]

Figura 29 – Representação esquemática de uma máquina de colocação automatizada de fitas

No processo de colocação automatizada de fitas, a cabeça de deposição é responsável por conduzir e depositar as camadas de fitas impregnadas, de forma que a largura e a aderência do material são rigorosamente controladas. Para superfícies planas utilizam-se fitas com 6 ou 12 polegadas de largura, para maximizar as taxas de deposição. Já em superfícies levemente contornadas, nas quais o ângulo de aplicação corresponde a cerca de 15%, as fitas com 3 ou 6 polegadas de largura são empregadas para minimizar as folgas e as sobreposições. [12]

As fitas são comercializadas em carretéis de grande diâmetro e possuem um papel para apoio, que deve ser removido durante o processo de colocação. O carretel é posicionado na máquina e as fitas fluem através das guias, enquanto o papel de suporte é removido em um rolo de coleta. O rolo de compactação presente no cabeçote da máquina é segmentado e quando entra em contato com a superfície da peça, a fita é depositada e uniformemente compactada. [12]

A máquina é programada para depositar a fita no comprimento e ângulo pré-definidos, e quando uma camada é concluída, a cabeça de deposição levanta, retrai para a posição inicial e começa a colocar a próxima camada. As máquinas mais modernas são programadas off-line e contêm um sistema para pré-aquecer a fita, melhorando sua aderência, além de possuírem válvulas que controlam a temperatura de acordo com a velocidade, evitando o superaquecimento do material. [12] A Figura 30 exibe a máquina de colocação automatizada de fitas durante a fabricação da asa da aeronave Airbus A350.



Fonte: GARDINER (2011) [12]

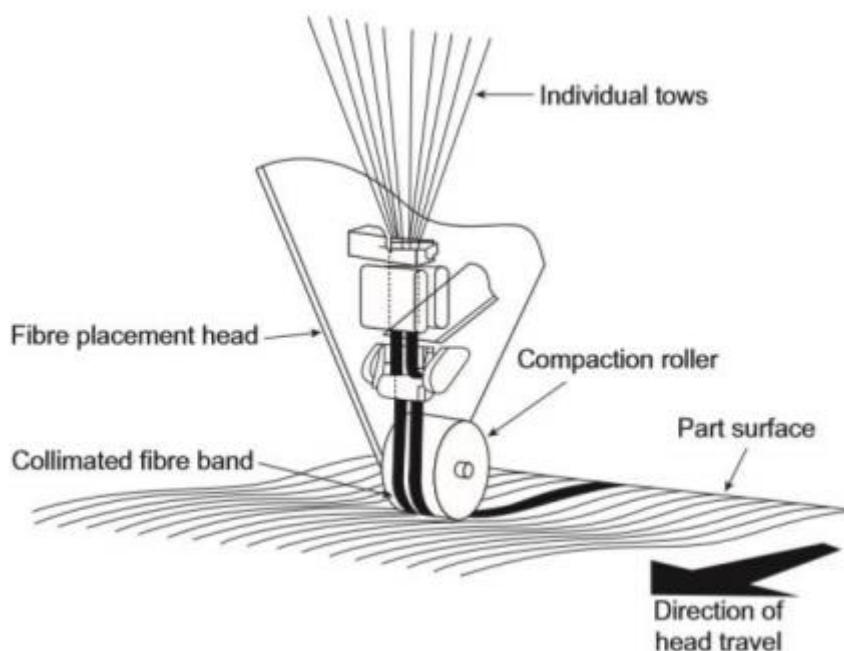
Figura 30 – Processo de colocação automatizada de fitas na fabricação da asa da aeronave Airbus 350

3.3.4.3 Colocação de fibras (processo híbrido)

O processo de colocação automática de fibras foi desenvolvido especialmente para a indústria aeroespacial. Este processo é denominado híbrido, pois combina a capacidade de deposição diferencial do enrolamento filamentar com

as qualidades da compactação com a deposição automática de fitas. Neste processo, a fibra totalmente impregnada é distribuída no molde com o auxílio de uma máquina que garante o posicionamento das camadas e a compactação necessária para a laminação, como ilustra a figura 31. [12]

A Figura 32 ilustra a representação esquemática da máquina de colocação automática de fibra, na qual os rolos individuais de prepreg (pré-impregnados) são alimentados pela cabeça de deposição e pressionados contra a superfície. Em geral, 12, 24 ou 32 rolos podem ser individualmente cortados e aplicados com velocidades distintas, de forma que cada rolo se adapte independentemente à superfície, atendendo às metas especificadas pelo projeto. [12]

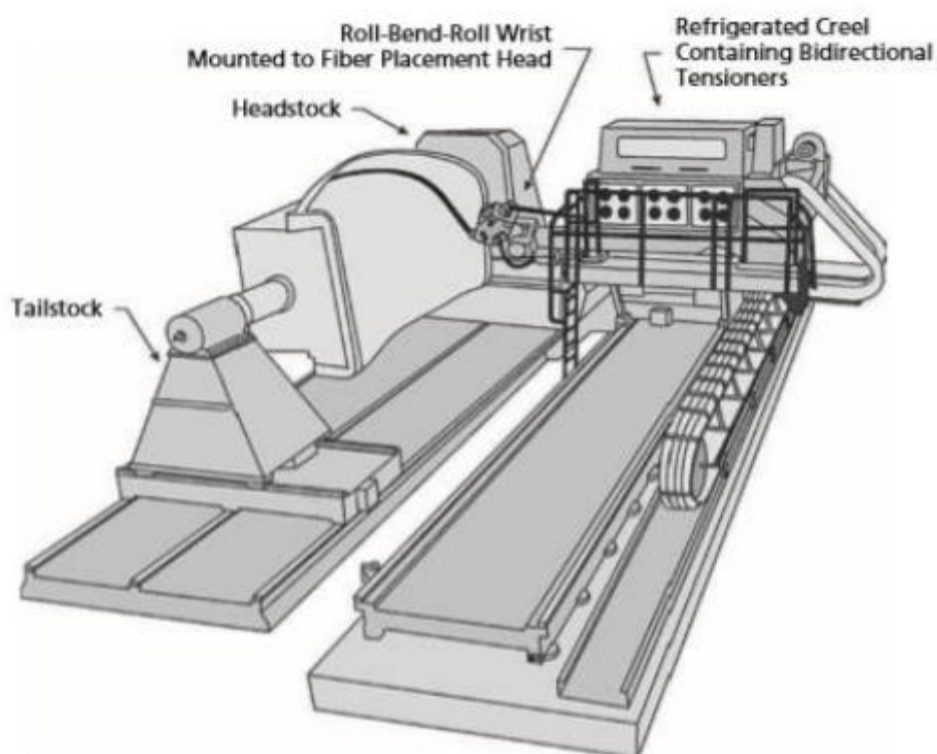


Fonte: MCILHAGGER et al. (2015) [12]

Figura 31 – Representação esquemática do processo de colocação automática de fibra

Geralmente, a largura do cabo varia de 0,125 a 0,182 polegadas e a tensão varia de 0 a 2 libras. Como a tensão é ajustável, os reboques podem ser posicionados em contornos côncavos, que são limitados apenas pelo diâmetro do rolo de compactação. Desta forma, esse processo pode ser utilizado para fabricar peças com superfícies curvas mais complexas, semelhantes àsquelas obtidas na laminação manual. A cabeça de deposição é responsável por cortar, depositar e

compactar o material com um rolo de compactação que aplica uma pressão na faixa de 0,068 a 2,757 MPa. Quando a camada é concluída, a cabeça de deposição reinicia o processo colocando a próxima camada até atingir o final do percurso, onde os reboques restantes são cortados para coincidir com a forma limite da camada. [12]



Fonte: CAMPBELL (2006) [12]

Figura 32 – Representação esquemática da máquina de colocação automática de fibra

No caso de compósitos termofixos, o molde e o laminado são embalados a vácuo e colocados em autoclave para cura. Como os reboques são adicionados e retirados de acordo com a necessidade, a taxa de material desperdiçado é baixa, variando de 2% a 5%. A cabeça de deposição contém recursos para aquecimento e resfriamento do ar, sendo que o aquecimento é usado para melhorar a aderência e a compactação das fibras, enquanto o resfriamento diminui a aderência durante o corte, a fixação e o reinício. As máquinas de colocação de fibras possuem softwares extremamente complexos e podem ter instalações muito grandes e onerosas, além

disso, as taxas de deposição são lentas quando comparadas com o enrolamento filamentar. As máquinas maiores contêm sete eixos de movimento e são capazes de manusear peças de até 6,096 metros de diâmetro e 21,336 metros de comprimento, com mandris de até 551,58 MPa. [12]

O processo supracitado é utilizado na fabricação de seção de fuselagem traseira do A380; seções de fuselagem do Boeing 787 e dos jatos executivos da Raytheon; fuselagem traseira, painéis laterais da fuselagem, portas do trem de pouso principal do Bell/Boeing V-22 Osprey VSTOL; painéis de fuselagem, revestimentos e tampas de dutos de entrada do Boeing 44 F/A18E/F Super hornet. A figura 33 ilustra a máquina de colocação de fibras durante a fabricação de uma seção de fuselagem da aeronave A380. [12]



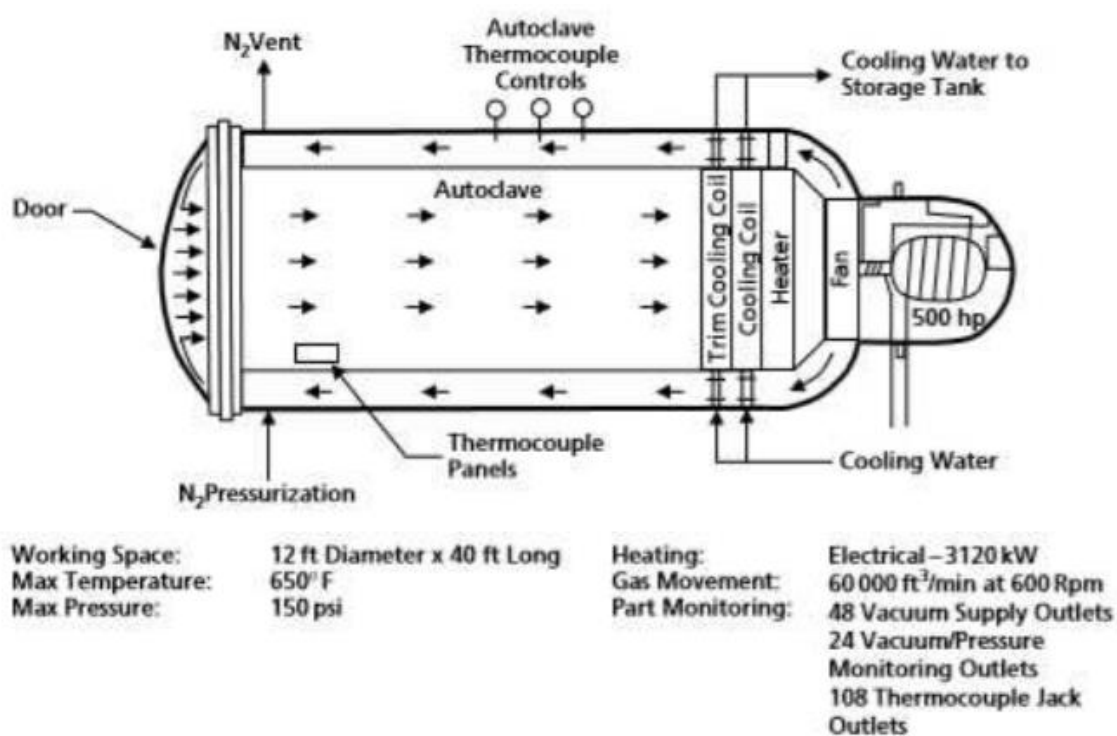
Fonte: BAUSSSET (2004) [12]

Figura 33 – Representação esquemática da máquina de colocação automática de fibra

3.3.4.4 Cura em autoclave

O processo de cura em autoclave permite produzir materiais compósitos através da aplicação simultânea de altas temperaturas, vácuo e pressão elevada durante a consolidação das reações de reticulação da resina, convertendo-a em um

termorrígido. Este processo é amplamente utilizado no setor aeroespacial para produzir laminados com alto desempenho, livres de vazamentos e mais densos. O material pré-impregnado é depositado e colado no molde até atingir a camada com a espessura desejada, em seguida uma folha de plástico macio é usada para selar o laminado. O perímetro ao redor do molde é então colado com massa de vedação e o vácuo é aplicado sob a folha de plástico. A peça sofre compactação devida à ação da pressão atmosférica e as bolhas de ar são eliminadas e todo o conjunto é levado para a autoclave, onde é aquecido sob pressão até a efetivação da cura da peça. A figura 34 ilustra a representação esquemática do processo de cura em autoclave. [12]

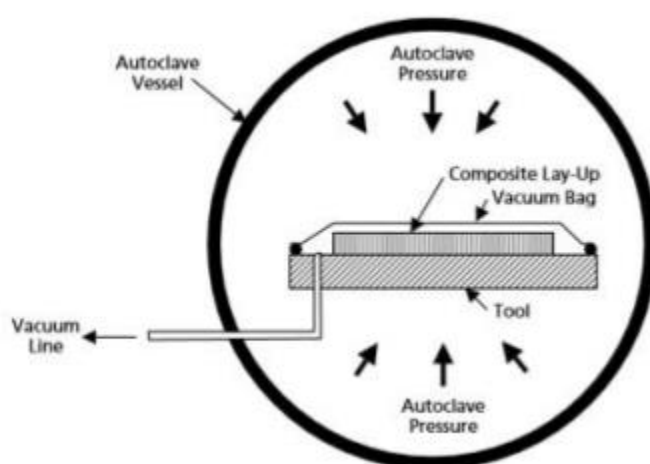


Fonte: CAMPBELL (2006) [12]

Figura 34 – Representação esquemática do processo de cura em autoclave

Durante o ciclo de aquecimento, ocorrem mudanças no estado físico da resina e a etapa de compactação sob pressão deve ser aplicada antes que o material atinja a região viscoelástica. Este processo de cura em autoclave pode levar horas e ainda exige um trabalhador altamente qualificado, pois a maioria das etapas é feita manualmente; e como a qualidade final da peça (espessura por camada, grau

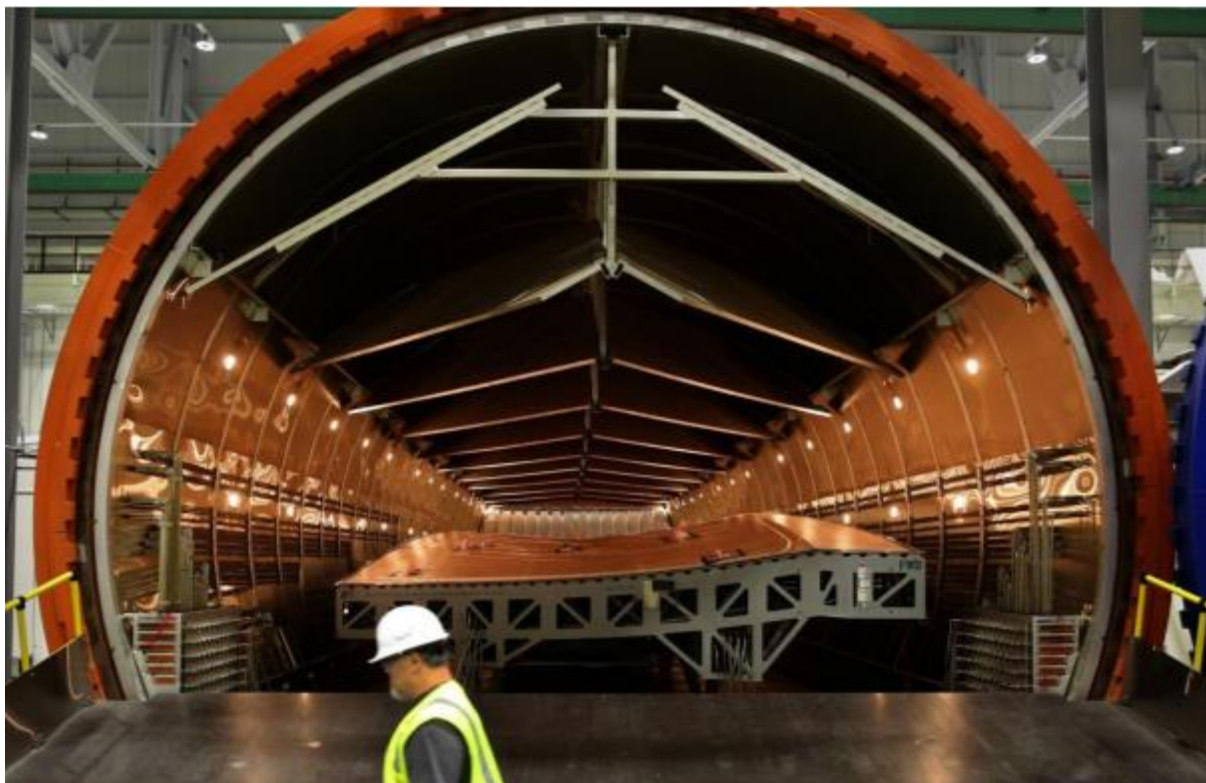
de reticulação e conteúdo de vazios e porosidade) é determinada pelo tempo de cura, ocorre um aumento no custo para a fabricação do compósito. Para a utilização deste processo é necessário um grande investimento inicial para efetuar a compra e a instalação da autoclave. A autoclave funciona segundo o princípio da pressão diferencial do gás, representado na figura 35, e geralmente opera com pressão entre 0,344 e 0,689 MPa, além disso, a atmosfera de gás inerte é normalmente utilizada para reduzir o risco de incêndio dentro da autoclave durante o ciclo de cura. [12]



Fonte: CAMPBELL (2006)

Figura 35 – Princípio de cura da autoclave

A autoclave pode acomodar uma única peça compósita de larga escala, como por exemplo, a asa de uma aeronave, ou então várias peças menores, que serão curadas simultaneamente; no entanto o tamanho da autoclave pode limitar a utilização deste processo. A figura 36 ilustra a asa de um Boeing 777X durante o processo de cura em autoclave.



Fonte: GATES (2016) [12]

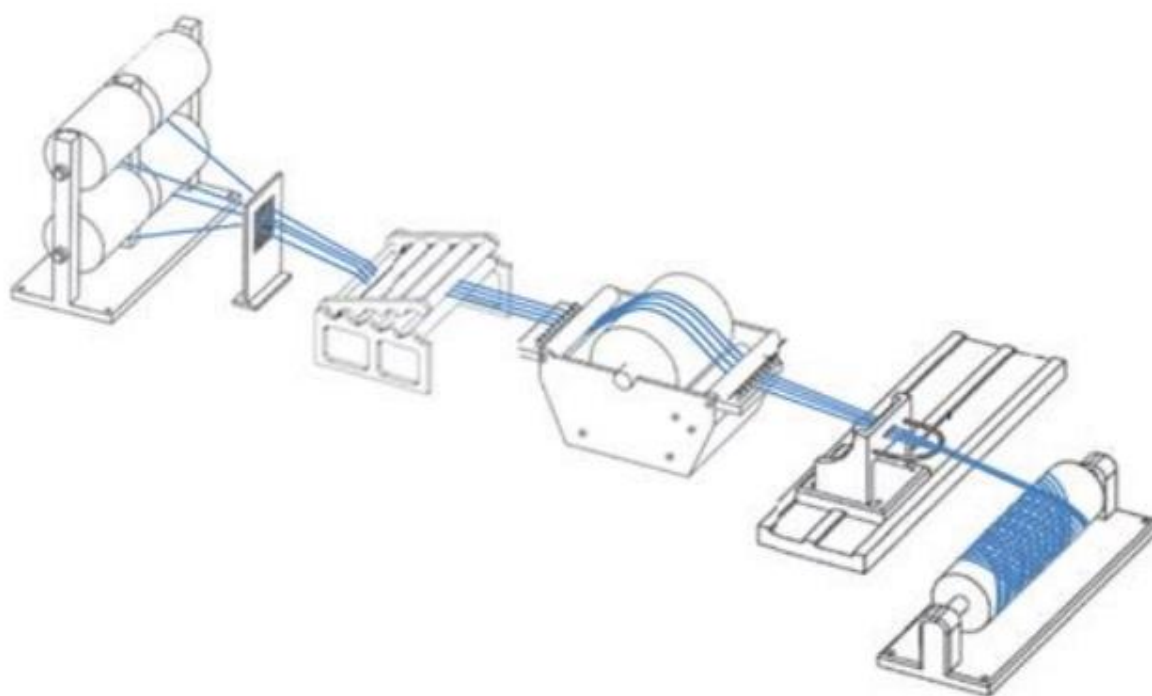
Figura 36 – Processo de cura em autoclave para a fabricação da asa de um Boeing 777X

As desvantagens deste processo incluem alterações no fluxo de gás, que podem ser causadas quando uma peça grande impede o fluxo em uma peça menor que está sendo curada ao mesmo tempo, ou então pela turbulência no fluxo de gás na região próxima à porta, impedindo a distribuição uniforme do calor que acaba provocando uma taxa de aquecimento mais alta nas peças posicionadas nessa região, no entanto, os campos de fluxo dependem do projeto real da autoclave e de suas características de fluxo de gás. A etapa de cura também pode ser realizada em prensas ou fornos, uma vez que a prensa opera em pressões que variam 500-1000 psi, reduzindo a formação de bolhas de ar durante o endurecimento das camadas. Já nos fornos, a pressão é proporcionada apenas por uma bolsa de vácuo, assim a presença de bolhas de ar nas peças curadas varia entre 5 e 10%, enquanto nas peças curadas em autoclave a presença de bolhas de ar é inferior a 1%. [12]

3.3.4.5 Enrolamento filamentar

O processo de enrolamento filamentar é utilizado para a fabricação de peças ocas, em geral cilíndricas, tais como tubos de longo comprimento. Neste processo, as fibras (contínuas) são precisamente e continuamente posicionadas em um padrão predeterminado, gerando a peça compósita oca. As fibras podem ser aplicadas no formato de fios ou mechas, que inicialmente são inseridos em um banho de resina. Em seguida, as fibras são continuamente e precisamente enroladas ao redor do mandril, até atingir o número desejado de camadas. A figura 37 ilustra a representação esquemática do processo de enrolamento filamentar. [12]

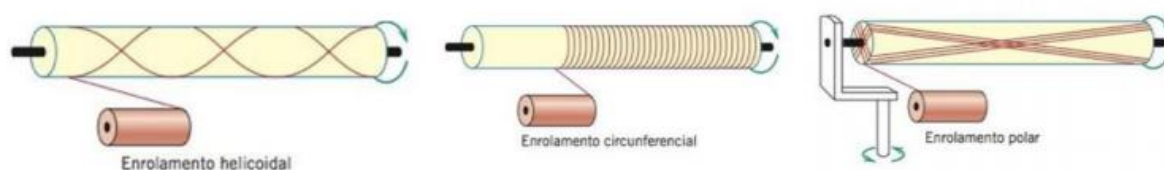
Quando a aplicação da fibra é realizada por métodos automatizados, o enrolamento filamentar se torna um processo economicamente atrativo. O compósito é curado à temperatura ambiente ou em um forno, e posteriormente o mandril é removido. As peças obtidas por enrolamento filamentar apresentam uma fração de volume de fibra elevada (até 85%), e dependem da uniformidade e da orientação do enrolamento para alcançar as características mecânicas desejadas. [12]



Fonte: PANDITA et al. (2012) [12]

Figura 37 – Representação esquemática do processo de enrolamento filamentar

A figura 38 ilustra a representação esquemática dos padrões de enrolamento circunferencial, helicoidal e polar. A taxa de produção de peças ocas utilizando o enrolamento filamentar pode atingir até 500 kg de compósito por dia. Este processo pode ser usado para fabricar vários tipos de peças ocas, por exemplo, tubos para transportar petróleo, conchas cilíndricas para mísseis, carcaças de motores de foguetes, tanques de armazenamento e tubulações, vasos de pressão, torpedos, contêineres, pás de helicópteros, e componentes com alta pressão interna, como reservatórios e bicos de propulsão. Para peças de revolução curvadas, o enrolamento filamentar pode ser feito em mandris de revolução com geometrias adaptadas. [12]



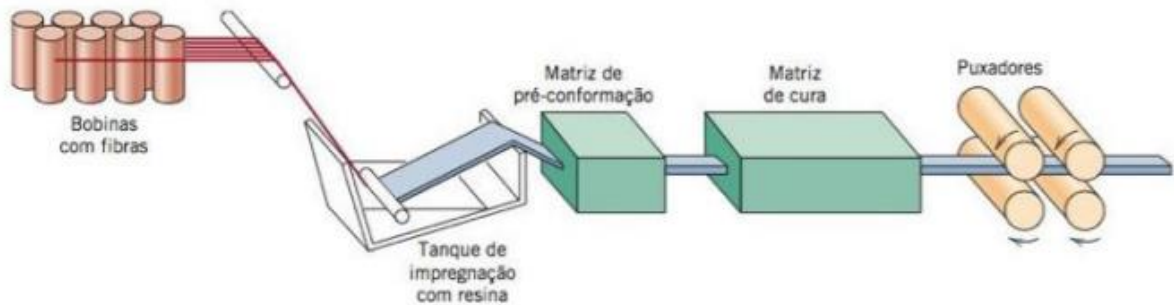
Fonte: CALLISTER, RETHWISCH (2012) [12]

Figura 38 – Representação esquemática dos padrões de enrolamento circunferencial, helicoidal e polar

3.3.4.6 Pultrusão

O processo de pultrusão utiliza um reforço fibroso contínuo e impregnado com resina para produzir componentes com comprimentos contínuos e com seção transversal constante, como por exemplo, tubos, vigas e barras. Neste processo os materiais compósitos são feitos puxando, reunindo e imergindo as fibras contínuas em um banho de resina líquida, onde as fibras são impregnadas. Ao emergir do banho, as fibras impregnadas são direcionadas para a matriz pré-formada que alinha as mechas moldando a peça de acordo com o formato desejado, além de estabelecer a razão resina/fibra. Logo após isso, o material é transferido para um molde aquecido, onde ocorre a etapa de cura, ou seja, o material é usinado com precisão e a forma final da peça é determinada. A peça emerge da matriz totalmente curada e resfria enquanto um dispositivo de extração é responsável por puxar e esticar a peça, evitando danos às fibras através destas ações. E, finalmente, a peça

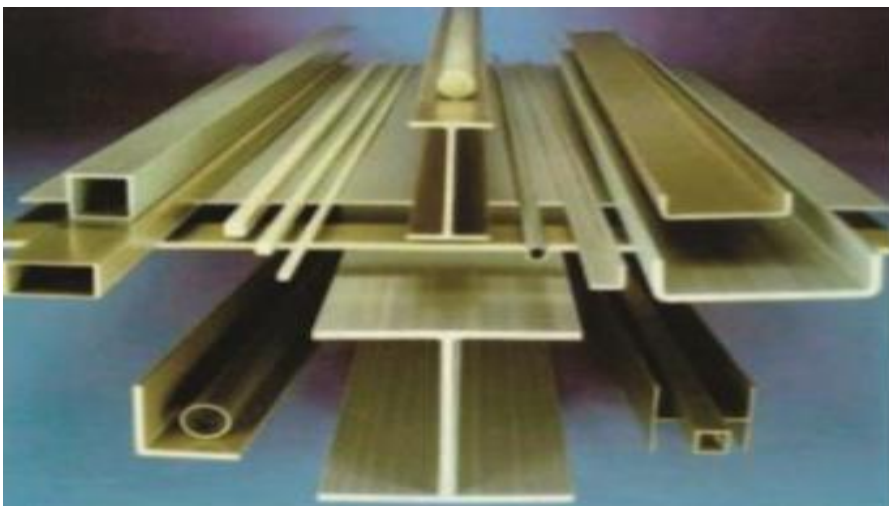
é cortada com uma serra de corte adquirindo o comprimento desejado. A Figura 39 ilustra o processo de pultrusão. [12]



Fonte: CALLISTER, RETHWISCH (2012) [12]

Figura 39 – Representação esquemática do processo de pultrusão

O formato das peças compósitas é determinado pela forma da cruz da matriz, sendo as mais comuns: forma de H ou I, quadrada, retangular e circular. A figura 40 ilustra algumas peças compósitas, barras e hastes, fabricadas pelo processo de pultrusão. Os compósitos feitos a partir deste processo apresentam as mais variadas formas de seção transversal, incluindo seções ocas quando um mandril interno é usado, além disso, essas peças possuem elevado volume de fibra que confere alta resistência ao material, destacando-se que o comprimento da peça não tem limites. [12]



Fonte: CAMPBELL (2006) [12]

Figura 40 – Peças compósitas, barras e hastes, que foram fabricadas pelo processo de pultrusão

As fibras contínuas são utilizadas na forma de mechas ou rolos de tecido, e devido à sua fragilidade são guiadas por ilhós cerâmicos para reduzir seu desgaste durante o processo, sendo os exemplos mais comuns: fibras de vidro, carbono e aramida. Normalmente, é utilizada uma resina termofixa, mas os fenólicos são mais baratos e resistem a altas temperaturas; poliéster, éster vinílico e epóxi também são utilizados, no entanto, o epóxi leva mais tempo para curar. No setor aeroespacial as vigas de carbono/epóxi representam uma potencial aplicação para pisos de aeronaves. Por ser um processo de natureza contínua, essa técnica apresenta alta produtividade, alto grau de automação, quantidades reduzidas de resíduos e baixos custos de produção e matéria-prima. No entanto, o processo é limitado a formas de seção cruzada constantes e as desvantagens incluem o fato das peças ocas exibirem espaços vazios com diâmetro mais alto do que o permitido para algumas aplicações estruturais. [12]

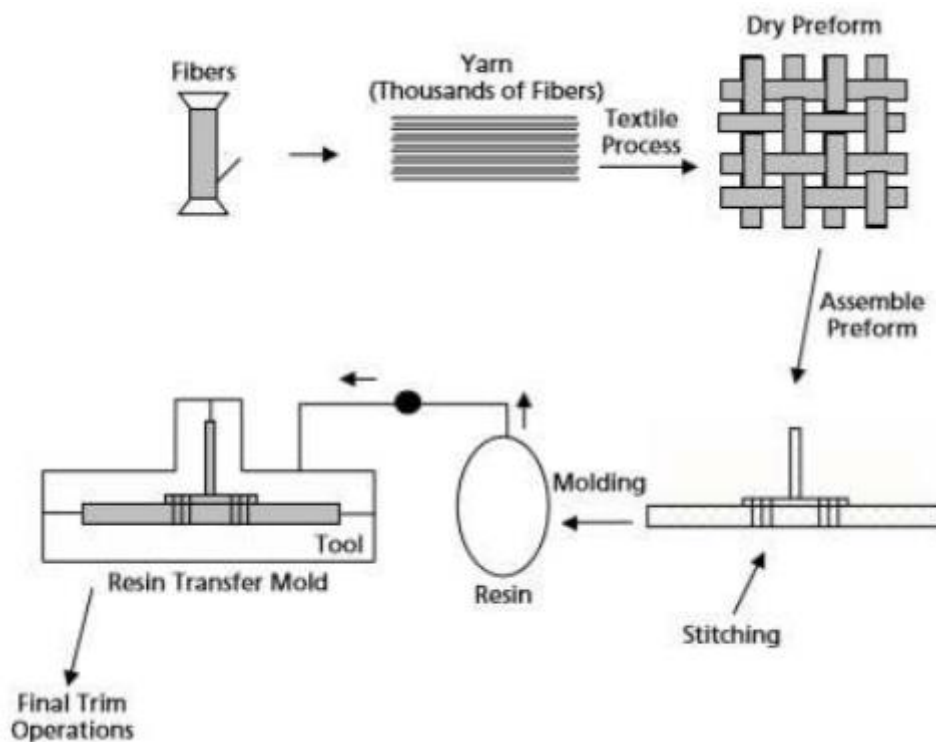
3.3.4.7 Moldagem líquida

A moldagem líquida é um termo genérico para uma família de processos capazes de produzir peças dimensionalmente complexas e precisas, com alta qualidade e ótimo desempenho. Tais processos apresentam diversos graus de automatização, resultando em maiores taxas de produção com menos refugo. Estes processos são baseados na colocação de uma pré-forma sobre o molde, acompanhados pela injeção de resina sob a combinação de pressão e/ou vácuo, seguido pela etapa de cura que geralmente possui ciclos rápidos. Dentro desta família, citam-se os processos de moldagem por transferência de resina (do inglês, resin transfer molding - RTM), moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (do inglês, vacuum assisted resin transfer molding - VARTM) e infusão de filme de resina (do inglês, resin film infusion - RFI), entre outros. [12]

A moldagem por transferência de resina é o processo mais utilizado, no qual são fabricadas estruturas tridimensionais complexas com área de superfície grande e excelentes acabamentos em ambos os lados. Esse processo pode produzir até 30 peças por dia, dependendo de sua complexidade no estágio de laminação. No processo de moldagem por transferência de resina a pré-forma de fibra seca é fabricada e posicionada no fundo do molde. O molde é fechado e a pré-forma é

comprimida até obter a fração volumétrica de fibras desejada. Em seguida, a matriz, geralmente uma resina líquida de baixa viscosidade, é injetada sob pressão dentro da cavidade do molde até que todas as fibras sejam impregnadas e o molde totalmente preenchido com resina. O molde pode ser aquecido para encurtar o tempo de cura e, nesses casos, os moldes de aço são mais adequados. A pressão dentro do molde é aumentada para garantir a eliminação das bolhas de ar presentes no interior do molde. A etapa de cura da peça é realizada em temperaturas elevadas e, finalmente, o molde é aberto e a peça é removida. [12] A figura 41 ilustra a representação esquemática do processo de moldagem por transferência de resina.

No processo de infusão de filme de resina, os filmes de resina curada são posicionados na parte superior e/ou inferior da pré-forma. Na autoclave, uma combinação de calor e pressão é aplicada para conduzir a resina através da pré-forma. Já o processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo, tem-se a utilização de um sistema de vácuo para conduzir a resina através da pré-forma. O molde é fechado utilizando uma bolsa de vácuo, sendo assim utilizado um molde de lado a lado. [12]



Fonte: CAMPBELL (2006) [12]

Figura 41 – Representação esquemática do processo de moldagem por transferência resina

Os moldes utilizados no processo de moldagem por transferência de resina devem possuir pelo menos uma entrada, para realizar a injeção da resina, e uma saída, para o escape do ar existente no interior do molde, sendo comum a presença de mais orifícios na fabricação de peças maiores. Os materiais usados para a fabricação do molde incluem: aço, alumínio, níquel, resina epóxi e laminados epóxi/poliéster, sendo os plásticos os materiais mais utilizados. [12]

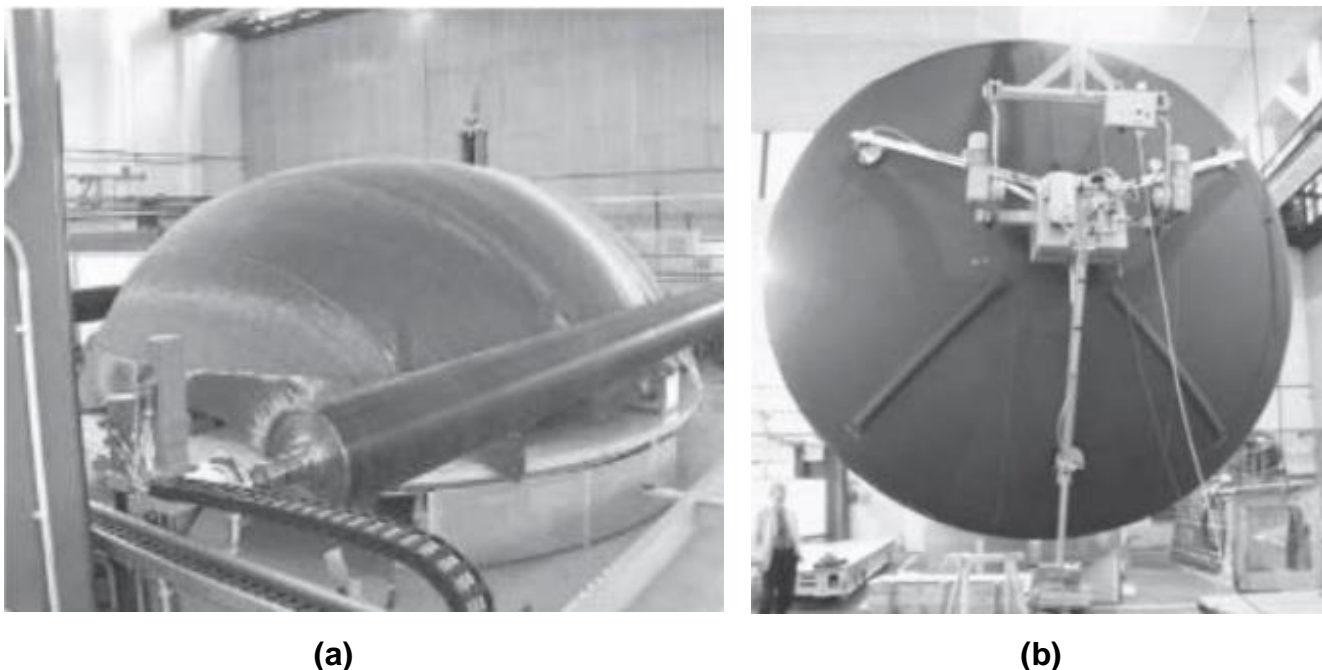
As resinas utilizadas no processo moldagem por transferência de resina devem apresentar baixa viscosidade, baixa volatilidade, longa capacidade de armazenamento, boa compatibilidade e adesão com as fibras, além de boa resistência à umidade e a solventes. As resinas mais comuns são bismalimidas, epóxis, fenólicas, poliésteres e ésteres vinílicas.

As pré-formas são constituídas basicamente por fibras, e a seleção da fibra depende dos valores adequados de resistência mecânica e rigidez, da boa interação fibra/matriz, da permeabilidade, conformabilidade e durabilidade. As fibras comumente utilizadas são fibras de vidro, de carbono, Kevlar e até compósitos híbridos. [12]

As vantagens do processo de moldagem líquida incluem os custos reduzidos de montagem e fabricação; peças com boa tolerância dimensional e boa qualidade de superfície em ambos os lados (RTM); peças grandes podem ser produzidas por VARTM e RFI, pois não é necessária autoclave ou pressão de fechamento, e maiores frações de volume de até 65% podem ser alcançadas.

As principais desvantagens são os custos elevados para fabricação do molde e o contramolde, bem como o tamanho limitado das peças (RTM). No processo VARTM é necessária uma resina de baixa viscosidade, o que limita os materiais disponíveis. [12]

O processo de infusão de filme de resina é utilizado para a produção do anteparo de pressão traseira da Airbus A380, e o processo de moldagem por transferência de resina é usado na fabricação de peças de fixação da cauda vertical das A330, A340 e A380. A figura 42 mostra o anteparo de pressão traseira a Airbus A380 fabricado pelo método de infusão de filme de resina. [12]



Fonte: LONG (2005) [12]

Figura 42 – Anteparo de pressão traseira da Airbus 380 fabricado pelo método infusão de filme de resina: (a) pré-forma depositada sobre o molde; (b) produto acabado

4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS EM AERONAVES

4.1 TERMOPLÁSTICOS X TERMOFIXOS

Os materiais termoplásticos, usados como matriz em compósitos, no geral, apresentam menor rigidez e resistência sendo indicados para aplicações estruturais apenas se carregados e reforçados. Além disso, apresentam baixa resistência ao escoamento (creep), especialmente em temperaturas elevadas, se comparados ao termofixos. Apesar de não apresentarem as vantagens de integração em nível tão elevado como os compósitos de matriz termofixa, os compósitos de matrizes termoplásticas têm vantagens em sua manutenção. A tabela 4 apresenta as vantagens e desvantagens na aplicação/utilização de matrizes termoplásticas e termofixas. [30]

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens na aplicação de matrizes termoplásticas e termofixas

	Vantagens	Desvantagens
Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo reduzido de processo, gerando alta produtividade - Podem ser re-conformados com calor e pressão - Facilmente reciclável 	<ul style="list-style-type: none"> - Maquinário chega a custar 100 vezes mais caro comparado para o termofixo - Dificuldades em processar e em impregnar o reforço
Termofixos	<ul style="list-style-type: none"> - Processamento mais fácil, pois a resina, inicialmente, se encontra no estado líquido - Melhor molhabilidade do reforço, gerando menos vazios e porosidades - Menor gasto de energia, pois requerem menor temperatura e pressão - Maquinário de menor custo para processamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor taxa de produção, pois apresenta elevado tempo de cura - Depois de curadas não podem ser re-conformadas - Não recicláveis

Fonte: Harsteln (2008)

4.2 POLÍMEROS X MATERIAIS TRADICIONAIS

Os polímeros têm demonstrado alto índice de confiabilidade e muitas vantagens em relação aos materiais tradicionais que vieram a substituir, como aço,

alumínio e vidro. Além de permitir maior flexibilidade de projeto e economia na produção, sua baixa densidade é essencial para a redução de consumo de combustíveis, uma vez que a substituição de materiais diversos por cerca de 100 kg de polímeros, a cada 1 tonelada desses materiais diversos, resulta numa economia de combustível de 7,5%. [7]

Os materiais poliméricos podem ser divididos em três grandes grupos, como mostra a tabela 5, considerando o grau de diferenciação, a escala de produção, nível de consumo e valor agregado, como: polímeros para usos gerais (commodities) e que são produzidos em larga escala e com custo baixo; polímeros para usos específicos (quasi-commodities), que também é produzido em larga escala, porém para um mercado específico e com características próprias; e polímeros de alto desempenho (engenharia) que apresentam alto desempenho, propriedades definidas e aplicações em produtos de alto valor agregado devido ao maior conteúdo tecnológico aplicado em sua produção, que são os polímeros mais utilizados em aeronaves. Pode-se correlacionar os atributos de cada polímero e defini-lo em determinada classe, observando-se que quando o volume de produção é alto, conseqüentemente o grau de diferenciação, preço e conteúdo tecnológico, são menores. [18]

Tabela 5 – Classificação dos polímeros de acordo com suas aplicações

Commodities	Quasi – Commodities	Alto desempenho
<US\$ 7/kg	US\$ 2 – 7 /kg	>US\$ 7/kg
10⁷ t/a	10⁵ t/a	100 t/a



Fonte: Ferreira (2017) [18]

A tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens que os polímeros de alto desempenho proporcionam para os veículos em geral, assim como, as aeronaves.

De uma forma geral, pode-se depreender que a principal vantagem advinda do uso de plásticos se refere à economia, tanto de combustível quanto de investimentos em produção. Por outro lado, existe a possibilidade de sofisticação do design, o uso de formas e soluções menos tradicionais e o aumento de segurança. [19]

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens da aplicação de polímeros de alto desempenho

Vantagens	Desvantagens
Redução de peso	Inflamabilidade
Redução da emissão de CO₂	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 designs mais modernos	
Formatos mais complexos	
Excelente processabilidade	
Aumento da segurança	

Fonte: Hemais (2003) [19]

5. CONCLUSÃO

Com base nos dados pesquisados que foram apresentados, é possível concluir que há um elevado crescimento na aplicação de materiais compósitos matriz polimérica em aeronaves, tanto os compósitos de matriz termoplástica quanto os de matriz termofixa. Entretanto, as matrizes termoplásticas vêm sendo muito estudadas, pois apresentam vantagens que as matrizes termofixas não apresentam, como por exemplo, a possibilidade de reciclagem, vantagem de elevada significância ecológica.

Os polímeros utilizados nas estruturas e peças das aeronaves são polímeros de engenharia (materiais de alto desempenho), os quais mostraram alta eficiência em suas aplicações, fornecendo propriedades mecânicas, físicas e químicas, como resistência à temperatura de serviço, redução do peso da aeronave, que conseqüentemente contribui com a economia de consumo de combustível, resistência à corrosão, etc.

Um dos maiores desafios na preparação desses compósitos é a adesão entre a fibra e matriz, onde deve ser feito um tratamento químico superficial na fibra, e assim a adesão da interface fibra/matriz é realizada, atribuindo melhoria às propriedades do material. O processamento desses compósitos possui vantagens e desvantagens em relação aos processos feitos para termoplásticos e termofixos, porém, apresentam vantagens altamente relevantes em relação a outros materiais, como alguns metais, que esses compósitos de matriz polimérica vêm substituindo, ultrapassando 50% das estruturas das aeronaves. Dessa forma, as aeronaves apresentam menos massa, conseqüentemente menos peso, podendo ser fabricadas com uma geometria mais complexa, melhorando a aerodinâmica, possibilitando atingir uma maior velocidade, e com segurança, além de gerar grande economia de consumo de combustível por serem mais leves.

A aplicação de materiais compósitos de matriz polimérica em aeronaves, seja na indústria aeronáutica ou aeroespacial, tem um grande futuro, portanto, é muito importante a continuação da realização de testes e estudos de técnicas de processos com esses materiais, para que suas aplicações possam ser ainda mais viáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª edição., São Paulo: Artliber Rditora Ltda, 2002.
- [2] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 8ª Ed, Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos S/A., 2007.
- [3] REZENDE, M. C. **O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial**. Polímeros, São Carlos, v.10, n.2, abr./jun. 2000.
- [4] RODRIGUES, T. S. **Polímeros naturais e sintéticos: uma abordagem das características a partir de uma transposição didática**. 2012. Monografia de Graduação – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.
- [5] ZANATTA, R. **Materiais compósitos na aviação**. Cultura Aeronáutica, 2015. Disponível em: <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/10/>>. Acesso em: 23 setembro 2020.
- [6] MAZUR, R. L. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas monteiro**. 2010. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2010.
- [7] DOS SANTOS, A. L. **Aplicação de componentes em poliamida no sistema de refrigeração de transmissão automática em veículos pesados: Estudo de caso**. 2012. Monografia de Pós-Graduação – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul-SP, 2012.
- [8] BOTELHO, E. C., SCHERBAKOFF, N., REZENDE, M. C. **Monitoramento da espessura do recobrimento de nylon 6/6 na fibra de carbono via otimização da síntese do polímero**. 2000. Pesquisa – Instituto Tecnológico de Aeronáutica/Centro Técnico Aeroespacial, São José dos Campos-SP, 2000.
- [9] DA SILVA, G. G. X. **Desenvolvimento de processo de fabricação de compósito plano polimérico e fibra de vidro para uso em revestimento aeronáutico pelo processo de moldagem por infusão de resina (RTM)**. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2013.

[10] FACTORI, I. M. **Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6,6 reforçada com partículas de vidro reciclado**. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

[11] FOGAÇA, K. O. **Avaliação dos efeitos ambientais nas propriedades do compósito de poliamida 6,6/fibras de carbono**. 2015. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2015.

[12] SOUZA, J. D. **Elaboração de material didático-instrucional de processos de fabricação de material compósito de matriz polimérica utilizado na indústria aeronáutica**. 2018. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018.

[13] ALEXANDRINO, E. M. **Compósitos poliméricos de poli (éter-imida) /polianilina: preparação e caracterização**. 2012. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2012.

[14] DE FARIA, M. C. M. **Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de PPS/fibras contínuas**. 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2008.

[15] ALMEIDA, Odair José Albrigo de et al. **Síntese e propriedades da polisulfona (PSU)**. Orient. Marcos Rogério de SOUZA. São Paulo: FATEC-FOC, 2015.

[16] MIERZWA, J. C. **Processo de separação por membranas para tratamento de água e efluentes**. 2018. Pesquisa – Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

[17] WIEBECK, H., SEIXAS, M. V. **Materiais poliméricos de alto desempenho para aplicações na Indústria em geral**. 2012. Pesquisa – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

[18] FERREIRA, M. B. S. **Estudo da influência dos métodos de reticulação sobre as propriedades do polietileno**. 2017. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2017.

[19] HEMAIS, C. A. **Polímeros e a indústria automobilística**. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v.13, n.2, abr./jun. 2003.

[20] FERNANDES, R., SANTO, A. M. E. **Comportamento das propriedades físicas da poliamida 6.6 (nylon 6.6) após a reciclagem.** Pesquisa – Universidade do Vale do Paraíba, Paraíba.

[21] TELES, J. T. **PEEK – Poli(éter-cetona-cetona).** Encimat, 2018. Disponível em: <<http://www.encimat.cefetmg.br/2018/06/21/peek-polieter-eter-cetona/>>. Acesso em: 10 outubro 2020.

[22] MONTERO, J. F. D. **Análise química, microscópica e microbiológica de poli-éter-éter-cetona (PEEK) funcionalizado para incorporação de antibiofilmes orgânicos.** 2012. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2015.

[23] ENGENHEIRO DE MATERIAIS. Disponível em: <<https://engenheirodemateriais.com.br/?s=PEEK>>. Acesso em: 23 setembro 2020.

[24] SANTANA, F. de A. **Estudo do processamento de compósitos termoplásticos a partir de pré-impregnados PEEK/fibra de carbono por moldagem por compressão a quente.** 2010. Dissertação de Mestrado – Universidade de Taubaté, Taubaté-SP, 2010.

[25] FREITAS, A. J. C. de. **Comportamento de desgaste de pares metal-compósito de grau aeronáutico.** 2009. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2009.

[26] ZARGISKI, R. T. **Estudo do comportamento das propriedades termomecânicas da resina epóxi a partir do processo de pós-cura.** 2018. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville-SC, 2018.

[27] 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 Paulo, v. 11, p. 32-42, abr./jun.1996.

[28] ESCAVADOR. Disponível em: <<https://www.escavador.com/patentes/619109/bismaleimida-composicao-de-resina-prepregavel-prepreg-e-composto>>. Acesso em: 12 dezembro 2020.

[29] BURAKOWSKI, L., REZENDE, M. C. **Tratamento superficial de fibras de carbono por método químico.** 2000. Pesquisa – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, 2000.

[30] HARSTELN, R. E. **Produção, caracterização e aplicação de polietileno reforçado com farinha de madeira através de moldagem rotacional**. 2008. Trabalho de Graduação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.