



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ARTHUR VIVAN APPELT

**ESTUDO DE PROCESSOS DE INFUSÃO E TRANSFERÊNCIA DE RESINA EM
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Palhoça

2019

ARTHUR VIVAN APPELT

**ESTUDO DE PROCESSOS DE INFUSÃO E TRANSFERÊNCIA DE RESINA EM
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Produção
Universidade do Sul de Santa Catarina como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Juliano Mazute, Ms. Eng.

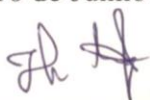
Palhoça
2019

ARTHUR VIVAN APPELT

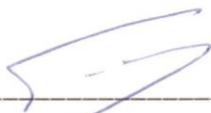
**ESTUDO DE PROCESSOS DE INFUSÃO E TRANSFERÊNCIA DE RESINA EM
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenharia de Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Produção da Universidade do Sul de Santa Catarina.

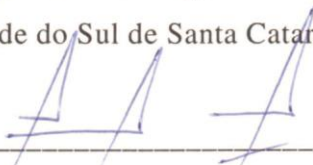
Palhoça, 10 de Junho de 2019.



Professor e orientador Juliano Mazute, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Paulo May, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Paulo Valadares, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus familiares e aos meus amigos que me apoiaram e me deram suporte.

AGRADECIMENTOS

A todos os colaboradores da Universidade do Sul de Santa Catarina por todo apoio no desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso.

A todos os professores que participaram desta caminhada, pela ajuda durante os meus estudos e elaboração do meu TCC. Quero agradecer especialmente o meu professor orientador Juliano Mazute, pelo empenho dedicação ao meu projeto de pesquisa e por todo apoio e paciência ao longo da elaboração do meu projeto final.

Quero agradecer à minha mulher Andrea Puperi por estar sempre ao meu lado durante todo o percurso, aos meus pais e irmã, que apesar de estarem longe sempre me incentivaram nos meus estudos.

Aos meus amigos de trabalho e parceiros de pesquisa, por toda a ajuda e apoio durante este período tão importante da minha formação acadêmica.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“A melhor coisa que você pode fazer para cultivar a verdadeira sabedoria é praticar a consciência de que o mundo é um sonho.” (Paramahansa Yogananda)

RESUMO

Os materiais compósitos são formados por mais de um material, que quando combinados entre si proporcionam propriedades superiores às que cada um deles apresenta separadamente. A combinação de materiais para obtenção de propriedades melhores é antiga na humanidade, e remete aos tempos antes de Cristo. Já a história dos compósitos poliméricos é mais recente, e devido às suas excelentes propriedades gerou uma revolução no que se refere ao estudo e aplicação de materiais para engenharia. Hoje os materiais compósitos são fundamentais na construção de aeronaves, embarcações, carros de corrida e geradores eólicos. Para a obtenção de resultados positivos na utilização destes materiais, os métodos de processamentos escolhidos são fundamentais e cada um deles proporcionará resultados distintos. Os métodos de infusão e transferência de resinas tem ganhado bastante espaço devido a maior produtividade, limpeza do processo e sustentabilidade. Dentre estes processos os mais comuns na literatura e na indústria são o VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*), o RTM (*Resin Transfer Moulding*) e o RTM *Light*. A escolha adequada do método é crucial, uma vez que o resultado do processo dependerá desta e de sua correta aplicação. Além disso, os custos operacionais e de investimento de cada processo possuem grande disparidade. A partir destes fatos foi desenvolvido um estudo dos métodos citados para facilitar a escolha do processo mais adequado para cada aplicação. Mesmo que os princípios de aplicação dos métodos do estudo sejam parecidos, eles possuem propostas de aplicação bastante diferentes, que irão exercer impacto direto no produto final, seja em custos ou propriedades mecânicas. Existem algumas variáveis abordadas no estudo que nos permitem realizar a escolha adequada de qual método utilizar para uma possível implantação. Os resultados e discussões nos permitem visualizar de forma clara quais os motivos para a escolha de cada método.

Palavras-chave: Materiais. Compósitos. Processo. VARTM. RTM. Infusão. Transferência. Resina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de fase Matriz e Fibras	17
Figura 2 - Classificação de Compósitos	17
Figura 3 - Estrutura química de poliéster insaturado com adição de monômero e passando pelo processo de cura.....	22
Figura 4 - Estruturas químicas de resinas poliésteres de acordo com seus ácidos	23
Figura 5 - Estruturas químicas dos epóxis mais utilizados.....	26
Figura 6 - Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras	29
Figura 7 - Esquema de injeção de resina no processo RTM.....	39
Figura 8 - Molde para processo RTM com fechamento através de parafusos.....	39
Figura 9 - Esquema ilustrativo de molde para RTM Light.....	41
Figura 10 - Esquema ilustrativo do processo VARTM.....	42
Figura 11 - Classificação da pesquisa.....	44
Figura 12 - Esquema comparativo dos processos RTM, RTM Light e VARTM.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Segmentação Compósitos de Poliéster e Epóxi 2013	18
Gráfico 2 - Uso mundial da fibra de carbono em 2012	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferentes atributos dos tipos de resina poliéster.....	24
Quadro 2 - Informações e propriedades de variados sistemas epoxídicos	27
Quadro 3 - Propriedades comparativas de fibras de reforço	30
Quadro 4 - Propriedades comparativas de materiais de engenharia.....	30
Quadro 5 - Composição (%) típica de fibras de vidro	32
Quadro 6 - Propriedades típicas da Fibra de Carbono.....	33
Quadro 7 - Propriedades comparativas de laminados de fibra de carbono unidirecional	35
Quadro 8 - Propriedades comparativas de laminados de fibra de aramida	36
Quadro 9 - Ferramenta 5W1H.....	47
Quadro 10 - Comparativo aproximado de produtividade de cada RTM	48
Quadro 11 - Ferramenta 5W1H: planta de processamento de compósitos.....	48
Quadro 12 - Ferramenta 5W1H: possíveis melhorias na implantação	50
Quadro 13 - Comparativo entre os processos do estudo	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALMACO - Associação Latino Americana de Materiais Compósitos

DGEBA - Diglicidil Éter de Bisfenol A

HDT - Temperatura de Distorção Térmica

PAN - Poliacrilonitrila

RTM - *Resin Transfer Moulding*

VARTM - *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos.....	13
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA	14
1.5	DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	16
2.2	RESINAS	19
2.2.1	Resina Poliéster	20
2.2.2	Resina Epóxi	25
2.3	FIBRAS	27
2.3.1	Fibra de vidro	31
2.3.2	Fibra de carbono	32
2.3.3	Fibra de aramida	35
2.4	PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS.....	37
2.4.1	RTM (<i>Resin Transfer Moulding</i>)	37
2.4.2	RTM Light	40
2.4.3	– VARTM (<i>Vacuum Assisted Transfer Moulding</i>).....	41
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	43
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	43
4	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	45
4.1	FERRAMENTA 5W1H	45
4.2	ANÁLISE DOS PROCESSOS	46
4.2.1	RTM	46
4.2.2	RTM Light	47
4.2.3	VARTM	49
4.3	COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS.....	50
5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS.....	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A constante busca da engenharia por melhores soluções relacionadas a qualquer aspecto da vida humana na terra tem proporcionado descobertas e inovações que não cessam, e no campo dos materiais não é diferente. Nas últimas décadas os materiais poliméricos modificados têm desempenhado um papel extremamente importante na sociedade, substituindo materiais antes tradicionais, como metais, cerâmicas e materiais naturais. Junto de todo este desenvolvimento surgiram os compósitos poliméricos. O compósito “é qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades” (CALLISTER JUNIOR, 2002, p. 359).

De acordo com Holloway (1994) materiais compósitos são definidos como a combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica para formar um material útil, frequentemente exibindo propriedades que nenhum dos componentes exibe independentemente. No presente trabalho o termo “materiais compósitos” estará fazendo referência somente aos compósitos poliméricos.

É importante ressaltar que a utilização dos materiais compósitos é muito antiga, e seu emprego possui referências Bíblicas, onde os egípcios usavam palha misturada ao barro na fabricação de tijolos para as construções. Já os compósitos poliméricos são mais recentes. No ano de 1942 foi fabricado o primeiro casco de barco em material compósito, já o trançado dos filamentos foi inventado em 1946 e aplicado à tecnologia de mísseis em 1950. Atualmente os materiais compósitos desempenham um importante papel nas indústrias do segmento naval, aeroespacial, automotiva, construção civil, energia eólica, etc.

Através da utilização dos materiais compósitos podemos obter componentes com propriedades muito superiores aos materiais tradicionais, tais como resistência e leveza, e por estes motivos os compósitos estão presentes em embarcações, aeronaves, carros de corrida e geradores eólicos. No entanto a forma de processamento destes materiais é crucial para a obtenção destas propriedades, além de influenciar diretamente nos custos dos componentes a serem fabricados. Por estas razões existe a busca pelo desenvolvimento constante de tecnologias de processamento de materiais compósitos. De acordo com Levy Neto e Pardini (2006) há uma extensa variedade de métodos de processamento disponíveis para se produzir compósitos de matriz polimérica, que podem ser classificados em processos de molde aberto, processos de molde fechado e processos contínuos. Dentro destes processos existem os

processos de moldagem manual, por infusão e transferência de resinas, pultrusão, entre outros.

Tecnologias baseadas na infusão e transferência de resina tem ganhado cada vez mais espaço no mercado, principalmente na fabricação de médios e grandes componentes. Entre estas tecnologias de processamento podemos citar o VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*), o RTM (*Resin Transfer Moulding*) e o RTM *Light*. A utilização destas tecnologias permite a obtenção de peças de qualidade, processos com boa produtividade, limpos e que não sejam demasiadamente agressivos ao meio ambiente.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Diversas empresas fabricantes de artigos em materiais compósitos utilizam processos de fabricação totalmente manuais e artesanais, que possuem um alto grau de insalubridade e prejudicam a saúde dos colaboradores. Estes processos produtivos também limitam o volume de produção, fato este que impacta diretamente no potencial crescimento da empresa. Além disso, os processos manuais utilizados em compósitos têm maior impacto no meio ambiente.

Diante deste cenário, foi proposto o desenvolvimento de um estudo para encontrar alternativas para os processos produtivos de empresas do segmento.

A partir dos fatos, este trabalho tem como problema de pesquisa, a seguinte pergunta: Como definir o processo de infusão e transferência de resina mais adequado para implantação baseado nas bibliografias existentes?

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico estão descritos os objetivos desta monografia, que são apresentados e divididos em geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Através do estudo e da pesquisa de tecnologias disponíveis para o processamento de materiais compósitos por infusão e transferência de resina, este trabalho visa propor uma solução adequada para as empresas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir planos de ação para os processos de infusão de resina em materiais compósitos com ferramenta 5W 1H;
- Verificar teoricamente uma variação dos processos de infusão de resina já existentes;
- Ter um comparativo entre os processos estudados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Proporcionar maior produtividade, qualidade, limpeza e sustentabilidade nos processos que envolvem materiais compósitos são os objetivos relacionados à implantação dos métodos que se baseiam em infusão e transferência de resinas em moldes. Segundo Nasseh (2007) procurar tecnologias e processos que possibilitem o bem-estar dos funcionários, lucratividade para as empresas sem prejuízo para o meio ambiente é o dever de todo empresário, construtor amador ou semiprofissional.

Devido às excelentes propriedades mecânicas possibilitadas pela utilização de materiais compósitos o seu mercado é substancial no Brasil. Segundo a ALMACO (Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos) o setor de compósitos deve fechar 2018 registrando um faturamento de R\$ 2,697 bilhões, alta de 3,8% em comparação ao ano anterior. Estima-se que o consumo de matérias-primas no período alcance 202 mil toneladas, volume 3,1% maior do que o anotado em 2017. Para 2019, o presidente da ALMACO confia na retomada dos demais setores que mais consomem os compósitos, principalmente o da construção civil, líder brasileira na demanda pelo material. E ainda ressalta que com a estabilidade política e melhora do cenário econômico, a construção tende a ser uma das primeiras beneficiadas (BRUNI, 2018).

A partir destes dados, o estudo e conhecimento sobre tecnologias de processamento de compósitos se mostra fundamental para todos aqueles que atuam no setor. Este trabalho irá apresentar o estudo, baseado nas bibliografias existentes, das principais metodologias sobre o processamento de compósitos por infusão e transferência de resina, para empresas de pequeno e médio porte atuantes no setor.

1.4 ESTRUTURA

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo é constituído pela introdução, problema de pesquisa, objetivos e justificativa do trabalho, que

define o assunto e a importância deste estudo para com a sociedade, o mercado e aprendizado dos envolvidos.

O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica baseada em conceitos e métodos já existentes, e que foram estudados para disseminar o conhecimento e possibilitar melhorias relativas a processos no segmento em questão. Ao longo do capítulo serão abordadas três metodologias distintas e conceitos importantes relacionados ao processamento de compósitos.

A classificação da metodologia deste trabalho, que especifica a classificação da pesquisa, será abordada no terceiro capítulo.

O quarto capítulo compreende o desenvolvimento do estudo a partir do mapeamento das metodologias referentes ao processamento de materiais compósitos por infusão e transferência de resina.

O quinto capítulo irá discutir sobre as conclusões e resultados finais do trabalho. Será levado em conta todo o estudo desenvolvido com base nas bibliografias existentes e informações sobre o mercado.

Por fim, no sexto capítulo estão dispostas as referências utilizadas na construção deste trabalho.

1.5 DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO

No segmento dos materiais compósitos existem diversos métodos de construção, cada um deles com suas atribuições, que podem ser vantajosas ou não dependendo das variáveis de cada situação. Além da diversidade de métodos existe também uma grande variedade de materiais e combinações entre os mesmos, e cada um destes possui uma proposta diferente uma da outra, ou seja, a escolha, utilização e combinação de materiais deverão ser feitas de acordo com o resultado que se deseja obter.

Este trabalho se delimita na apresentação das técnicas de infusão e transferência de resina em materiais compósitos existentes na literatura, sem aplicação e verificação na prática. Assim sendo, tem como foco um comparativo entre as metodologias de infusão e transferência de resina em compósitos, para que assim a escolha adequada para possível implantação do método seja feita com sucesso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos sobre materiais compósitos e sua utilização, assim como as metodologias de processamento destes materiais. A partir da contextualização dos conceitos e teorias, torna-se possível o mapeamento dos processos de infusão e transferência de resina em materiais compósitos.

A revisão da literatura sobre compósitos, suas utilizações e formas de processamento fazem parte do presente capítulo.

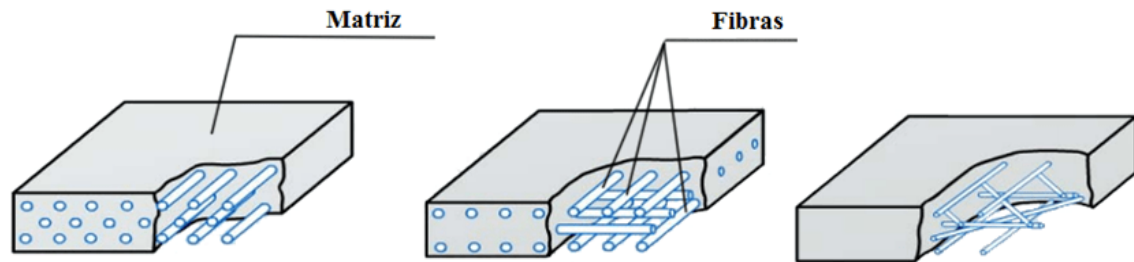
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Conforme já é sabido, materiais compósitos são formados pela combinação de dois ou mais materiais com o objetivo de obter propriedades superiores para o material resultante. De acordo com Kaw (1997), compósito é um material multifásico que combina dois ou mais materiais constituintes não solúveis entre si.

Segundo Sheldon (1982) os compósitos são materiais formados por uma fase contínua, chamada de matriz, e por uma fase dispersa que é descontínua. A fase dispersa é aquela que contém o material de reforço, geralmente constituído por fibras ou partículas. A matriz pode ser composta por materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, bem como a fase de reforço. As fases são melhores ilustradas pela figura 1.

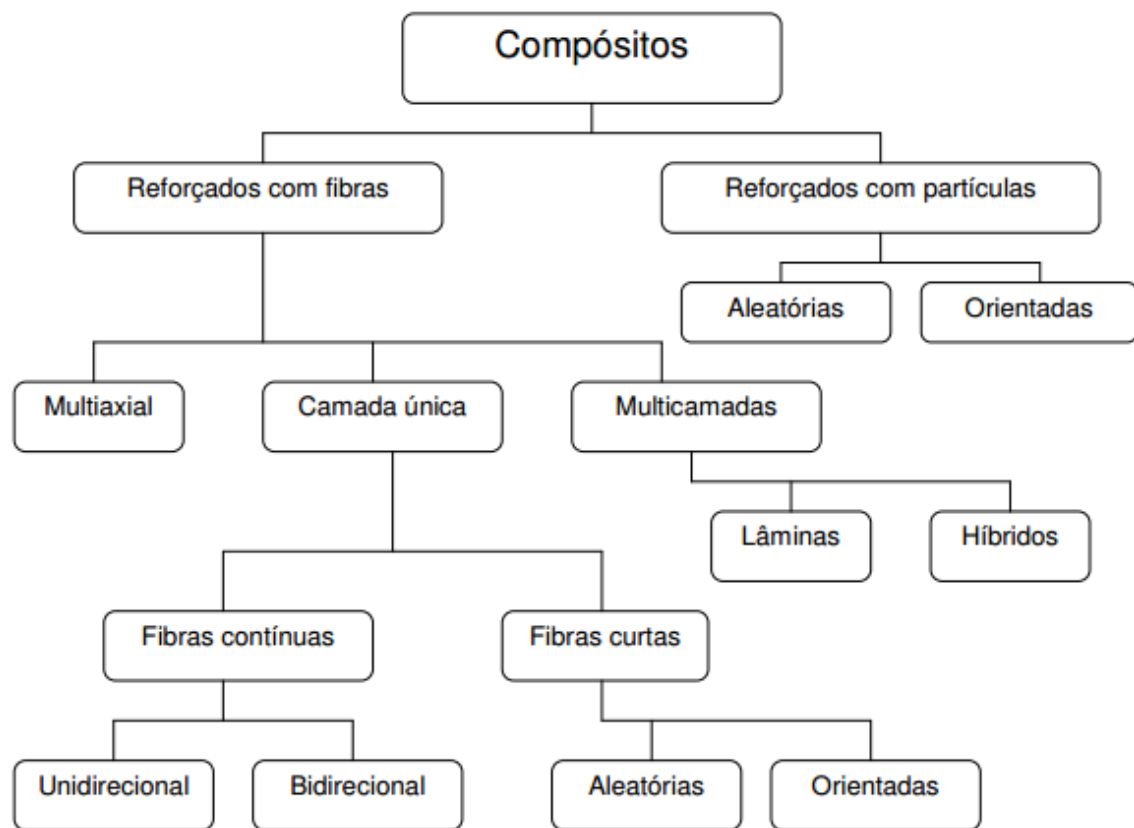
No segmento dos compósitos poliméricos existem inúmeras possibilidades de combinações que podem ser feitas através da utilização de diversos tipos de resinas e uma grande variedade de fibras, entre estas fibras de vidro, carbono e aramida, cada uma delas possuindo uma proposta diferente no que se refere à obtenção de propriedades mecânicas. Estes materiais são amplamente utilizados na indústria aeroespacial e naval, em geradores eólicos e veículos de alto desempenho, ou seja, as propriedades proporcionadas pelos compósitos podem ser muito superiores às dos materiais mais tradicionais como metais e cerâmicas. Os compósitos poliméricos podem ser classificados de acordo com o diagrama demonstrado na figura 2 (LEVY NETO; PARDINI, 2006, p. 4).

Figura 1 - Ilustração de fase Matriz e Fibras



Fonte: (BETA EQ, 2017).

Figura 2 - Classificação de Compósitos



Fonte: (LEVY NETO; PARDINI, 2006, p. 4).

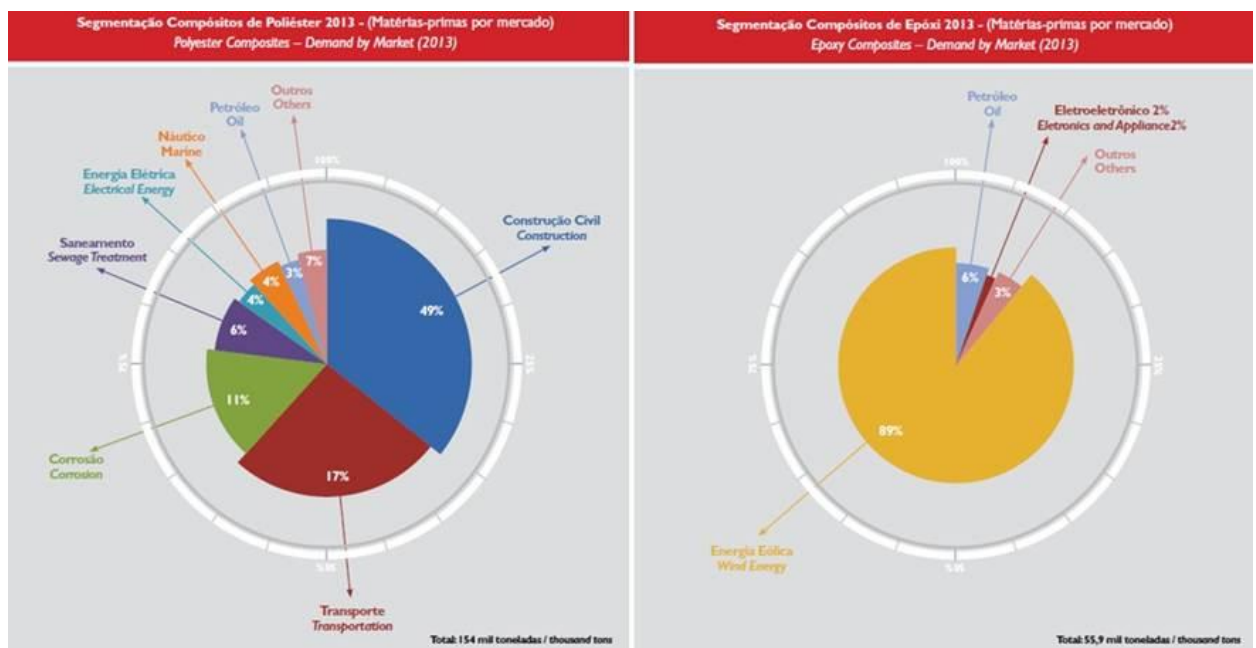
Existem muitas vantagens na aplicação de materiais compósitos em projetos de engenharia. Segundo Peterhans (2013) eles englobam em uma única aplicação várias características que os fazem um material de excepcional qualidade, tais como:

- a) Excelentes propriedades mecânicas: sua resistência à tração, flexão e ao impacto faz com que possa ser utilizado em aplicações estruturais;
- b) Leveza;

- c) Alta rigidez dielétrica: por não conduzir energia elétrica, pode ser empregado como isolante em condições severas;
- d) Flexibilidade de projeto: ele permite moldar peças de alta complexidade, sejam elas pequenas, médias ou grandes;
- e) Estabilidade dimensional: mantém suas formas e dimensões inalteradas sob diversas condições de uso, pois o baixo coeficiente de dilatação térmica aliado à baixa absorção de água permite que ele seja usado juntamente com outros materiais em locais de grandes variações de temperatura;
- f) Resistência à corrosão: não enferruja e tem excelente resistência em ambientes agressivos se comparado com os materiais convencionais.

Devido às vantagens proporcionadas na aplicação destes materiais, são muitas as indústrias que os utilizam. Através do gráfico 1, da Segmentação Compósitos de Poliéster e Epóxi 2013, disponibilizados pela ALMACO, podemos visualizar com maior clareza o mercado de compósitos no Brasil, com percentual de participação de cada segmento:

Gráfico 1 - Segmentação Compósitos de Poliéster e Epóxi 2013



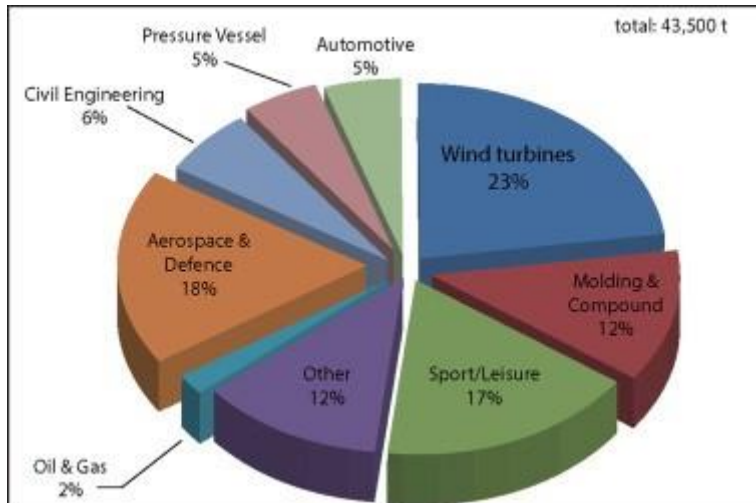
Fonte: (ALMACO, 2013).

Segundo publicação da revista Tecmundo (HAMANN, 2017):

Em 2012, um relatório publicado na *Reinforced Plastics* mostrou os usos da fibra de carbono em escala global. Na época, a maior utilização dos materiais era relacionada à produção das turbinas de vento para fins aeroespaciais e automobilísticos (23% do

total). Em seguida, produtos para fins bélicos e construção aeronáutica somavam 18%, seguidos de perto por materiais esportivos (17%).

Gráfico 2 - Uso mundial da fibra de carbono em 2012



Fonte: (HOLMES, 2013).

O alto desempenho proporcionado pela aplicação dos materiais compósitos, cada vez mais, desperta o interesse de novas indústrias e segmentos. A utilização destes materiais, na construção de artigos e equipamentos esportivos de pequeno e médio porte, tem ganhado cada vez mais espaço. Segundo reportagem da revista Tecmundo, ainda em relação aos esportes, “é preciso dizer que a fibra de carbono pode ser vista em muitos locais diferentes. A empresa Zoltek afirma que a utilização do material pode ser vista em “tacos de golfe, raquetes de tênis, esquis, snowboards, tacos do hóquei e varas de pescar” (HAMANN, 2017).

De acordo com a empresa DuPont, as demandas da indústria de artigos esportivos exigem o uso de materiais consistentes, de alto desempenho e econômicos. Além disso, a DuPont ressalta que a fibra aramida é usada em componentes de materiais esportivos que vão desde capacetes para bicicleta, roupas para motociclistas, cascos para veleiros/ barcos, botas de escalada e componentes de raquetes a luvas de baseball, até máscaras de apanhador, cascos de canoa e de caiaque, carcaças de carro de corrida e armaduras e botas de esqui (DUPONT, 2019).

2.2 RESINAS

Conforme conceito de ASM INTERNACIONAL (1993), as resinas são materiais poliméricos de alta massa molar, acima de dez mil, cuja estrutura pode ser representada por

pequenas unidades repetidas, denominadas mero. Segundo Mano e Mendes (1999) o polímero pode ser dividido em dois grandes grupos: naturais e sintéticos.

De acordo Nasseh (2007) as resinas de maneira geral são polímeros sintéticos que foram desenvolvidos nos últimos 60 anos e uma característica comum aos polímeros é ter cadeias muito longas, resultantes da união de muitos segmentos idênticos. Os polímeros sintéticos, de importância primordial como material de engenharia, geralmente tem estruturas bem simples. A molécula final do polímero pode ser formada de milhares de unidades repetidas, sendo cada unidade chamada de monômero.

Nasseh (2007) ainda diz que quando este polímero tem ligações cruzadas muito fortes para serem rompidas por aquecimento moderado eles são chamados de termofixos, e podem gerar resinas do tipo poliéster, éster-vinílico, epóxi ou fenólica, etc.

As ligações cruzadas são responsáveis pela alta rigidez e estabilidade desses materiais à ação de solventes e à elevação da temperatura, tornando-os insolúveis e infusíveis, comportamento que justamente lhes confere a denominação termofixo (CHANDA; ROY, 2008).

No mercado naval, as resinas mais utilizadas no desenvolvimento de compósitos são as resinas poliéster, éster-vinílico e epóxi (KAVERMAN, 1991). Segundo Peterhans (2013) a escolha da resina deve levar em conta os seguintes aspectos:

- a) Aspectos físico-químicos: compatibilidade com o ambiente onde o produto final será usado, como umidade, sol, temperatura; HDT (Temperatura de termodistorção); contração e qualidade superficial; característica anti-chama e nível de fumaça; reatividade;
- b) Aspectos propriedades mecânicas: rigidez; elongação; resistência à tração; resistência ao impacto;
- c) Aspectos econômicos: custo comparativo entre os diversos tipos de resinas disponíveis; valor do estoque; vida útil do produto;
- d) Aspectos de manufatura: viscosidade inicial e final da resina; acabamento superficial; cuidados em termos de higiene e segurança do trabalho em função do uso da resina; parâmetros operacionais dos equipamentos.

2.2.1 Resina Poliéster

As resinas poliméricas mais comumente utilizadas e com menor custo são as resinas poliéster e estervinílicas; estas matrizes são utilizadas principalmente para compósitos reforçados com fibras de vidro (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2010).

Conforme Nasseh (2007) nas matrizes de resina poliéster, o radical éster, o menor segmento de um poliéster, é o resultado da reação de um álcool e um ácido com eliminação de água. O poliéster, portanto, é a ligação química entre vários ésteres. Estas ligações e estruturas químicas podem ser visualizadas nas figuras 3 e 4. Dependendo do tipo de ácido utilizado na reação, obtém-se o poliéster saturado, que dão origens às fibras, tintas, etc., e o poliéster insaturado, com pontos altamente reativos que podem ser curados a frio. Este último, quando reforçado, apresenta as características básicas de um material estrutural leve, durável, incrivelmente resistente, que pode ser empregado na fabricação de quase todos os tipos de produto.

Nasseh (2007) ainda diz que a estrutura básica de um poliéster insaturado é composta de três componentes: o ácido insaturado que fornece os pontos reativos com ligações duplas, chamados pontos de instauração, um glicol, ou bi-álcool, que proporciona o meio para aumentar a cadeia polimérica, e um ácido saturado que determina o grau de espaçamento das moléculas entre os ácidos insaturados. Este plástico é dissolvido num monômero que servirá, futuramente, pela ação do catalisador, como um agente de interligação entre os seus pontos de instauração presentes na cadeia do poliéster acima mencionado.

O mesmo autor ainda afirma que o processo de cura da resina se inicia no momento em que o catalisador é misturado, sendo que a velocidade de cura pode ser controlada através do acelerador da resina para que se consiga laminar toda a peça. Muitos componentes podem ser usados como acelerador, mas os mais comuns são aqueles a base de cobalto. Geralmente, é necessária uma baixa dosagem de acelerador na resina poliéster, até a faixa de 0,5%. É importante notar que as substâncias utilizadas para catalisar e acelerar a resina, se misturadas diretamente, irão reagir de forma explosiva.

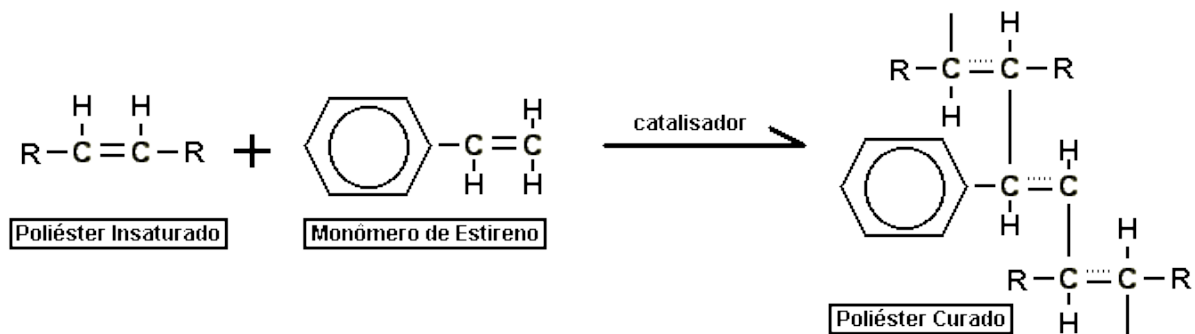
Por segurança, e também pela facilidade de manuseio, a maioria das resinas vem pré-aceleradas pelo fabricante. O processo de cura da resina poliéster pode ser dividido em três estágios. O primeiro, de *gelificação* (gelttime), é o período que vai desde a hora em que se mistura o catalisador até o ponto em que a resina começa a ficar em forma de gel e se inicia o aumento de temperatura. A partir deste momento não se poderá mais usar a resina.

Por este motivo, se faz necessário um bom controle da dosagem do catalisador e do acelerador para garantir que o laminador já tenha retirado todas as bolhas de ar antes que o início da gelificação ocorra. Geralmente, em resinas poliéster, a temperatura máxima durante

o processo de gel pode chegar aos 150 °C. Esta temperatura limite é chamada de pico exotérmico. Após o tempo de gel, vem o tempo de endurecimento (segundo estágio), que é o período necessário para o laminado obter uma parte significativa das propriedades mecânicas do laminado e a peça possa ser retirada do molde. O estágio final é o tempo de maturação, durante o qual o laminado desenvolve toda a sua estabilidade e dureza. O processo de maturação é a parte vital do ciclo de cura, o que pode levar dias ou talvez semanas, dependendo da temperatura na qual o laminado for mantido.

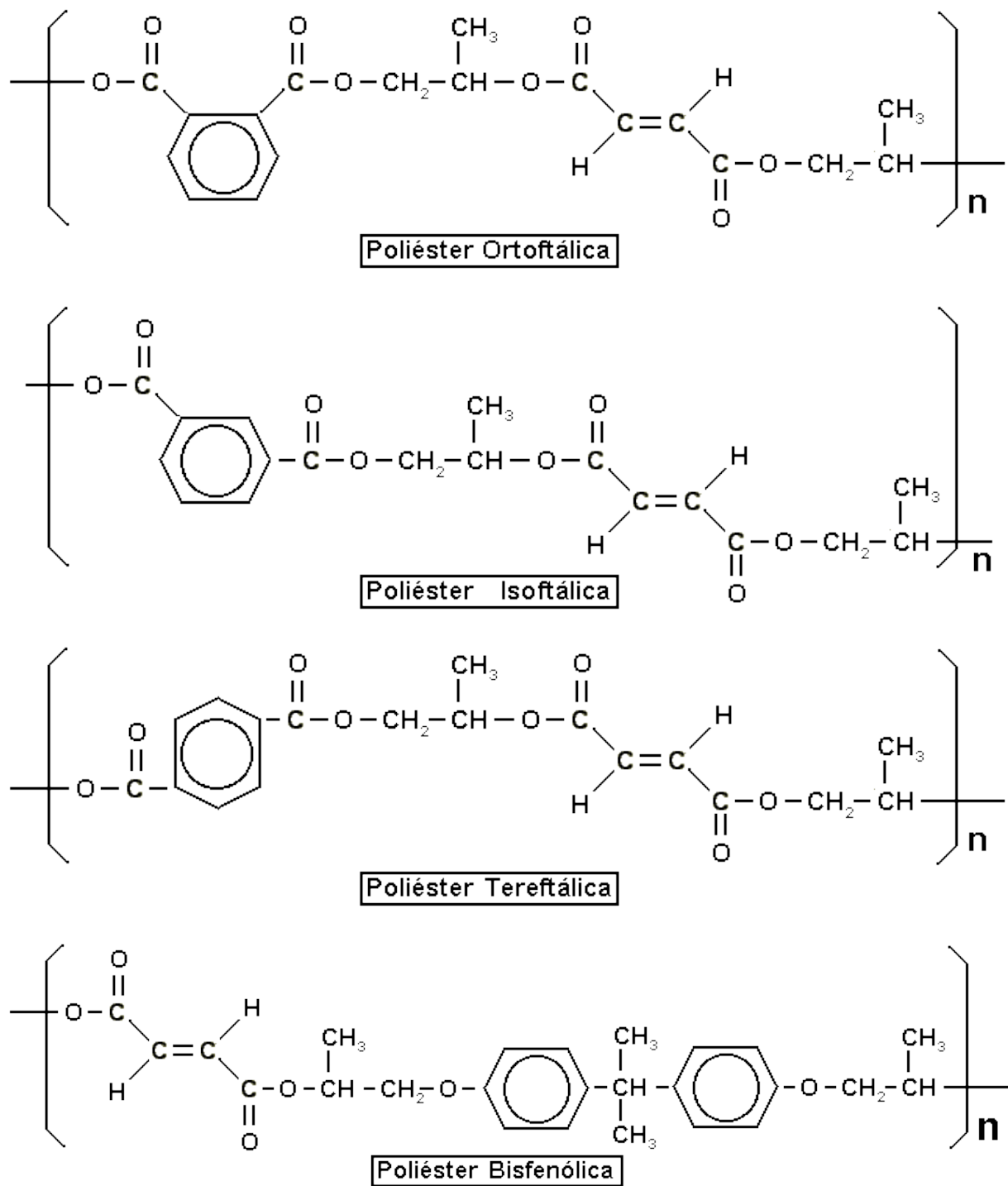
Os atributos das diferentes resinas poliéster estão disponíveis no quadro 1.

Figura 3 - Estrutura química de poliéster insaturado com adição de monômero e passando pelo processo de cura



Fonte: (SILAEX, 2019a).

Figura 4 - Estruturas químicas de resinas poliésteres de acordo com seus ácidos



Fonte: (SILAEX, 2019b).

Quadro 1 - Diferentes atributos dos tipos de resina poliéster

ÁCIDOS INSATURADOS	ATRIBUTOS
Maleico (anidrido) Fumárico	Fontes de insaturação (duplas ligações que irão reagir com as duplas ligações do estireno. Obrigatório em toda resina de poliéster insaturado.
GLICÓIS	ATRIBUTOS
Monoetilenoglicol (MEG)	Custo Baixo e Alta Rigidez
Propilenoglicol (PGI)	Excelente Compatibilidade com Estireno. Boa molhabilidade.
Dietilenoglicol (DEG)	Custo Baixo e Boa Flexibilidade.
Dipropilenoglicol (Di-PGI)	Boa Flexibilidade e Alta Resistência Mecânica.
Neopentilglicol (NPG)	Estabilidade ao UV e resistência à Hidrólise.
ÁCIDOS SATURADOS	ATRIBUTOS
Ortoftálico (Anidrido)	Baixo Custo e Compatibilidade com Estireno.
Isoftálico	Boa Resistência Mecânica, Química e à Água.
Tereftálico	Alto HDT.
Adípico	Boa Flexibilidade e Alta Dureza.
Bromados ou Clorados (Clorêndrica)	Retardamento de Chama.
SOLVENTES	ATRIBUTOS
Estireno	Baixo Custo.
Vinil Tolueno	Boa Resistência e Rigidez.
Metacrilato de Metila (MMA)	Baixa Flamabilidade e Boa Flexibilidade.

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 31).

2.2.2 Resina Epóxi

Resinas epóxi são muito conhecidas por serem utilizadas na produção de compósitos aeroespaciais. A grande variedade disponível de epóxis torna estes sistemas muito versáteis em termos de latitude de processamento e obtenção de propriedades físicas (MAY, 1988; LEE; NEVILLE, 1967).

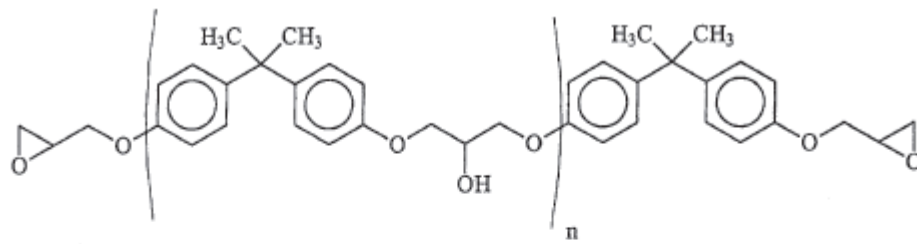
Nasseh (2007) diz que embora o uso de resinas epóxi tenha aumentado significativamente na construção de barcos, seja pela utilização de processos à vácuo ou infusão, as aplicações de maior volume ainda incluem tintas, recobrimento de pisos, adesivos, equipamentos para indústria química, laminados elétricos e eletrônicos. Existem apenas três grandes produtores mundiais de resina epóxi, que detêm 70% do mercado, e fornecem resina básica para uma dezena de outras empresas que formulam resinas de alta performance para o segmento de compósitos, de modo que um construtor de barcos possa ter acesso à mesma tecnologia empregada em estruturas aeroespaciais.

Segundo Nasseh (2007) as resinas epóxis mais utilizadas tem como base o diglicidil, éter do bisfenol A (DGEBA), e são sintetizadas a partir de uma reação entre a epicloridrina e o bisfenol A. A relação molar epicloridrina / bisfenol A pode variar em um grande espectro podendo produzir resinas líquidas e sólidas. A estrutura de uma matriz de epóxi consiste de grupos de epóxi terminais e de uma unidade de repetição no meio. Como as unidades de repetição, que podem ser incorporadas à molécula, variam entre cada tipo de formulação, elas irão influenciar nas propriedades finais da matriz final da resina.

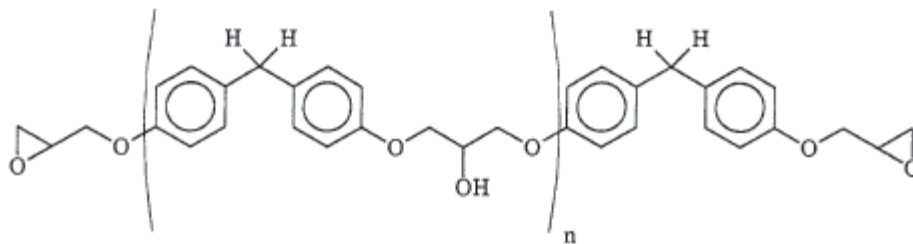
Nasseh (2007) ainda afirma que resinas epóxi podem também ser obtidas com características multifuncionais, como as resinas glicidil éter de novolac, glicidil de aminas trifuncionais ou tetrafuncionais. Estas resinas apresentam alta viscosidade à temperatura ambiente, acima de 5.000 cps, e permitem obter materiais com maior grau de reticulação em relação a resinas do tipo DGEBA, fazendo com que tenham melhor desempenho a altas temperaturas.

Podemos visualizar as estruturas químicas das diferentes resinas epóxis na Figura 5.

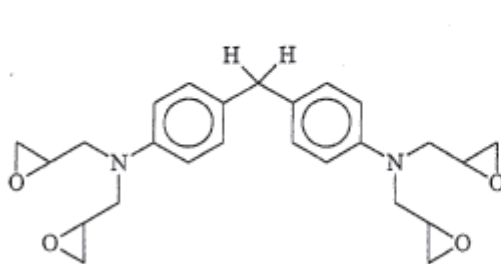
Figura 5 - Estruturas químicas dos epóxis mais utilizados



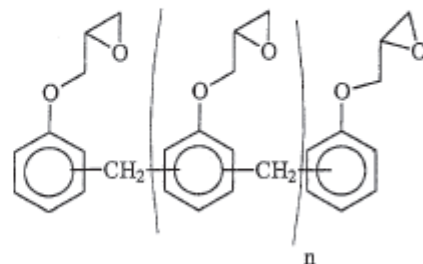
Diglycidyl Ether of Bisphenol A



Diglycidyl Ether of Bisphenol F



Tetraglycidylmethylenedianiline



Phenol Formaldehyde Novolac Epoxy

Fonte: (PUCKETT; PETERVARY, 1998, p. 56).

Quadro 2 - Informações e propriedades de variados sistemas epoxídicos

SISTEMAS DE LAMINAÇÃO EPOXY						
	AR500 AH30	AR500 AH90	AR500 AH150	AR600 AH30	AR600 AH90	AR600 AH150
Viscosidade da Resina, cps	5,000	5,000	5,000	6,000	6,000	6,000
Viscosidade do Endurecedor, cps	50	30	15	30	30	15
Viscosidade da Mistura, cps	900	600	350	2,250	1,500	950
Proporção da Mistura (Peso)	100A:33B	100A:33B	100AD:33B	100A:33B	100A:33B	100A:33B
Proporção da Mistura (Vol.)	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B	3A:1B
Gel Time, 25°C, 150g, min.	30	180	600	30	180	600
Dureza	81D	81D	80D	81D	81D	83D
Resistência a Tração, psi	11,900	11,200	9,800	11,900	11,600	9,900
Alongamento, %	3.2	3.9	6.9	3.2	3.9	6.9
Resistência a Compressão, psi	21,900	19,600	25,000	21,900	19,600	25,000
Resistência a Flexão	14,700	16,800	15,700	14,700	16,800	15,700
Módulo da Flexão	542,000	479,000	459,000	542,000	516,000	511,000
HDT, Room Temp. Cure, °C	60	65	60	60	65	60
HDT, Post Cure, °C	85	85	85	85	85	85
Impacto Izod, ft-lb/in	1.28	1.22	1.05	1.22	1.24	1.05
Contração, in/in	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 34).

Resinas epóxi requerem um agente de cura para formar um polímero acabado. Existe uma grande variedade de escolhas disponíveis de agentes de cura para resinas epóxi. A escolha do agente de cura é crucial no uso de epóxios, pois determina as propriedades térmicas e mecânicas do polímero formado, e define também a temperatura para mudança de viscosidade que controla o processamento do sistema. Os agentes de cura mais utilizados para resinas epóxi são as aminas ciclo-alifáticas, anidridos e fenólicos (PUCKETT; PETERVARY, 1998).

De acordo com Nasseh (2007) a cura de uma resina está diretamente ligada ao calor, seja ele fornecido por uma fonte externa, como uma estufa, lâmpadas de aquecimento infravermelho, moldes aquecidos, ou então por uma fonte interna, a exotermia, ou seja, o próprio calor liberado pela resina pela quebra das duplas ligações insaturadas, provocadas pelos radicais livres.

2.3 FIBRAS

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem, com frequência, alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo

específico, que correspondem, respectivamente, às razões entre o limite de resistência à tração e a massa específica e entre o módulo de elasticidade e a massa específica. Compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos excepcionalmente elevados são produzidos empregando fibras e matrizes de baixa massa específica (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). As fibras de reforço representam o principal componente estrutural nos compósitos avançados (PUCKETT; PETERVARY, 1998).

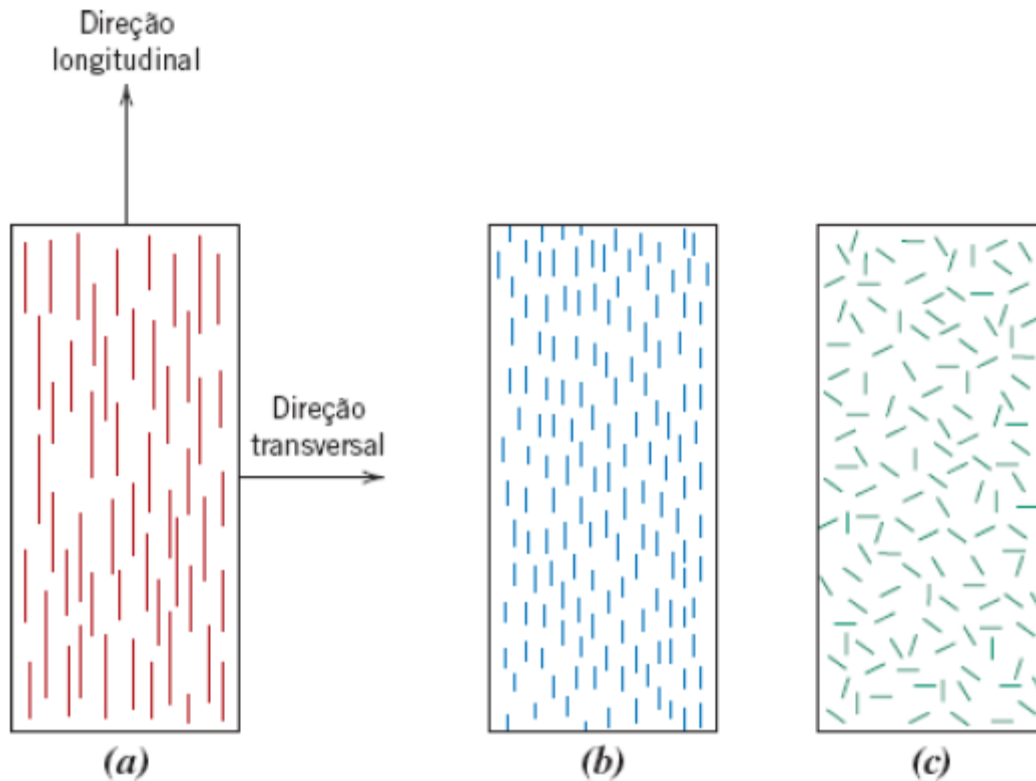
Conforme Nasseh (2007), dentro da estrutura do material composto, as fibras são responsáveis pela transferência das tensões através da matriz de resina. Dentre todas as características das fibras de reforço, o tipo de filamento, a interação da sua superfície com a matriz da resina, a quantidade de resina e finalmente a orientação do reforço são as que irão determinar a performance final do laminado.

O mesmo autor ainda afirma que o grau de interação superficial da fibra com a resina controla as características de adesão entre elas, e no final proporciona a coesão do laminado, o que é altamente influenciado pelo tipo de tecelagem, trama e tratamento superficial. Tipos de reforço com maior poder de compactação irão fornecer maior fração em volume de fibras e maiores propriedades mecânicas. Neste processo o alinhamento das fibras é fundamental para reduzir os espaços vazios a serem preenchidos pela resina. Laminados produzidos com baixa tecnologia de tecelagem irão produzir espaços vazios entre os cabos e reduzir o grau de compactação. O diâmetro das fibras também é importante, e como regra geral, quanto menor o diâmetro, melhor será a adesão entre as fibras e a matriz de resina, melhor a compactação e menor o índice de porosidade, e finalmente maior a resistência. Geralmente quanto maior a quantidade de fibras maior a resistência do laminado, entretanto a partir de 70% de fração em volume a matriz de resina não consegue manter a coesão das fibras e a tendência é haver redução das propriedades mecânicas. Pela própria natureza as fibras produzidas com filamentos contínuos são mais propícias a resistir aos esforços em sua própria direção. O uso de fibras alinhadas com a direção dos esforços reduz a quantidade de material sem função estrutural dentro do composto.

O arranjo ou a orientação das fibras, a concentração das fibras e sua distribuição apresentam uma influência significativa sobre a resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação, há, possivelmente, duas situações extremas: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) um alinhamento totalmente aleatório. As fibras contínuas estão normalmente alinhadas na Figura 6(a), enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas Figura 6(b), orientadas aleatoriamente Figura 6(c), ou parcialmente orientadas. Um melhor conjunto geral de

propriedades dos compósitos é obtido quando a distribuição das fibras é uniforme (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

Figura 6 - Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras



Fonte: (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016, p. 590).

Legenda: (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.

Callister Junior (2016) ainda afirma que uma característica importante da maioria dos materiais, especialmente dos frágeis, é que uma fibra com pequeno diâmetro é muito mais resistente do que o material volumétrico. Ele ainda diz que com base no diâmetro e na natureza, as fibras são agrupadas em três classificações diferentes: whiskers, fibras e arames. Whiskers são monocristais muito finos com razões comprimento-diâmetro extremamente grandes. Os materiais classificados como fibras podem ser policristalinos ou amorfos, e possuem diâmetros pequenos; os materiais fibrosos são geralmente polímeros ou cerâmicas (por exemplo, aramidas poliméricas, vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carbetos de silício).

Nasseh (2007) afirma que não existe um único tipo de fibra que reúna todas as melhores propriedades. Cada material, dentro de sua própria característica, divide boas e más propriedades. Resistência, rigidez, compressão, resistência ao impacto, compatibilidade das fibras com a resina e, finalmente, custo devem ser investigados.

Quadro 3 - Propriedades comparativas de fibras de reforço

FIBRAS DE REFORÇO - PROPRIEDADES COMPARATIVAS			
	Aramida	Carbono	Vidro
Alta Resit. a Tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência a Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência a Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resist. Interlaminar ao Cisalhamento	B	A	A
Resistência ao Cisalhamento	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência a Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

A = Excelente B = Aceitável C = Baixo

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 18).

Quadro 4 - Propriedades comparativas de materiais de engenharia

MATERIAIS DE ENGENHARIA				
	Res. Tração (ksi)	Módulo Elást. (msi)	Tração Esp.	Módulo Esp.
Carbono HS	508	35	282	19
Carbono IM	769	47	427	26
Carbono HM	508	64	282	35
Carbono UHM	290	73	161	40
Aramida LM	522	9	373	6
Aranida HM	450	17	321	12
Aramida UHM	493	26	352	19
Vidro E	348	10	139	4
Vidro S	500	12	200	5
Alumínio	67	10	24	4
Titânio	135	16	30	4
Aço	90	30	12	4
Aço Inoxidável	210	29	27	4
Aço Extrudado	349	30	45	4
Madeira de Pinho	7	2	13	3

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 51).

2.3.1 Fibra de vidro

A fibra de vidro é o reforço disponível mais popular. Ela oferece o melhor valor proporcionando resistência intermediária, dureza suficiente e custo baixo. A fibra de vidro é, no entanto, mais pesada que outros reforços populares como fibra de carbono e fibra de aramida (PUCKETT; PETERVARY, 1998). A expressão fiberglass ou fabricado em fibra identifica um compósito que consiste em fibras de vidro, contínuas ou descontínuas, contidas em uma matriz polimérica; esse tipo de compósito é produzido em grande quantidade (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

Conforme explica Nasseh (2007), as fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida, e resfriado a alta velocidade. Por meio do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros variados. Os filamentos de diâmetro contínuo são tratados para melhorar sua adesão e resistência à abrasão e umidade. O tipo de tratamento dos fios é determinado, em uma fase seguinte, de acordo com a sua aplicação.

O mesmo autor conta que a história das fibras de vidro começou em 1836, quando foi patenteado na Europa um método de tecer vidro maleável. É lógico que o material não resistiu à competitividade de outros produtos industrializados de sua época e logo desapareceu. Levou praticamente um século até que esse material ressurgisse no mercado mundial para utilização em isolamento de cabos e condutores elétricos. A partir de 1940, o desenvolvimento de resinas sintéticas promoveu uma ampla utilização para esse tipo de fibra e suas aplicações abriram uma grande variedade de mercados.

Ainda segundo Nasseh (2007) as fibras de vidro são produzidas em uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas, e designadas por uma letra do alfabeto. De toda essa variedade, as fibras de vidro do tipo E, C e S são as mais utilizadas. Ele ainda afirma que o vidro tipo E tem baixo teor alcalino, boa resistência à tração e boa rigidez em relação à flexão. Os filamentos usados no laminado são produzidos num diâmetro de 6 a 15 microns. Em sua forma original, esses filamentos têm excelentes propriedades mecânicas. Contudo nos volumes em que é maciçamente produzida, a fibra perde quase metade de sua resistência original, sendo, com certeza, a menos resistente de todas as fibras disponíveis para o construtor. Ele diz ainda que a demanda da indústria aeronáutica e aeroespacial por fibras mais resistentes e que tivessem propriedades mecânicas melhores que apresentadas pelo tipo E, introduziu os tipos de fibras conhecidas por tipo S e R. Embora o vidro tipo S tenha sido desenvolvido inicialmente para

aplicação espacial, uma versão com custo mais reduzido, chamada tipo S-2 ou CS (*Commercial S-Glass*), está disponível para aplicações que não requerem certificado para utilização aeroespacial ou militar. Em sua formulação química, os vidros tipo R e S contêm uma maior proporção de alumínio e sílica, o que pode representar um aumento de 20% a 40% nas propriedades mecânicas quando comparados com o vidro tipo E. Outro benefício dos vidros tipo R ou S é o diâmetro dos filamentos, aproximadamente metade do diâmetro do vidro E. Isto significa que para o mesmo peso de vidro, as fibras tipo R e S tem mais ou menos duas vezes a área superficial daquela apresentada pelo vidro tipo E, consequentemente maior poder de compactação. Este aumento de área permite que a resina tenha uma melhor aderência com as fibras, aumentando a adesão entre a matriz de resina e os filamentos do material, protegendo e adicionando mais resistência ao laminado.

Quadro 5 - Composição (%) típica de fibras de vidro

COMPOSIÇÃO	A	E	S	R
SiO ₂	72.0	52.4	64.4	60.0
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	1.5	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	17.2	-	9.0
MgO	2.5	4.6	10.3	6.0
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	0.8	0.3	-
B ₂ O ₃	-	10.6	-	-

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 66).

2.3.2 Fibra de carbono

O carbono é uma fibra de alto desempenho, sendo o reforço mais comumente utilizado em compósitos avançados com matriz polimérica (ou seja, que não são fiberglass) (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). Nasseh (2007) explica que as fibras de carbono são produzidas pela oxidação controlada, carbonização e grafitação de precursores orgânicos de carbono, sendo que dentre todos eles a poliacrilonitrila é mais usual, pois fornece uma boa média de propriedades mecânicas de tração, compressão e módulos de elasticidade. O mesmo autor ainda diz que o primeiro cientista a patentear o uso de fibras de carbono foi Thomas Edison 1877, que utilizou filamentos dessas fibras para produzir filamentos elétricos. Entretanto somente em 1959 uma empresa americana desenvolveu um processo econômico para carbonização de fibras acrílicas de *rayon*, e logo em seguida uma empresa japonesa produziu filamentos de carbono a partir da poliacrilonitrila (PAN). Mas só em 1967 foi produzida a primeira tonelada de fibras de carbono experimental para o

laboratório da força aérea inglesa. Atualmente, o autor diz que as fibras de carbono são produzidas por mais de uma dúzia de fabricantes e variam de acordo com suas propriedades mecânicas e sistemas de produção. A maioria das fibras é produzida a partir de um componente básico conhecido como poliacrilonitrila (PAN).

Quadro 6 - Propriedades típicas da Fibra de Carbono

PROPRIEDADES TÍPICAS DA FIBRA DE CARBONO					
	Tração KSI	Módulo MSI	Diâmetro Microns	Alongamento %	Densidade g/cm ³
Alta Resistência (Módulo < 36 msi)					
AS4	631	33	7	1.88	1.78
AS4C	680	36	7	1.92	1.78
AS4D	696	40	7	1.74	1.80
T300	512	33	4	1.50	1.76
T300J	610	33	4	1.80	1.78
T400	639	36	4	1.80	1.80
T600	625	33	4	1.90	1.79
T700S	711	35	4	2.10	1.80
PANEX 33	551	33	4	1.60	1.81
PANEX 35	669	36	4	1.67	1.83
Módulo Intermediário (Módulo < 44 msi)					
IM4	800	42	5	1.90	1.80
IMC	811	40	5	2.00	1.80
IM6	751	40	5	1.90	1.80
IM7	800	42	5	1.84	1.80
IM7C	811	44	5	2.10	1.80
IM8	880	42	5	1.90	1.80
T800	796	43	4	1.90	1.81
T100	924	43	4	2.20	1.80
Alto Módulo (Módulo < 64 msi)					
M35J	682	50	4	1.40	1.75
M40J	639	55	4	1.20	1.77
M46J	610	63	4	1.00	1.84
IM9	500	64	4	1.00	1.87
Módulo Superior (Módulo > 64)					
M50J	597	69	4	1.00	1.88
M55J	597	78	4	0.80	1.91
M60J	554	85	4	0.80	1.94
UHM	500	64	4	1.00	1.87

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 69).

Segundo Nasseh (2007) as fibras de carbono podem ser encontradas em quatro principais tipos e qualidades, dependendo de suas propriedades: Alta Resistência (HS – *High Strength*) ou Módulo Comercial, Módulo Intermediário (IM – *Intermediary Modulus*), Alto Módulo (HM – *High Modulus*) e Módulo Superior (UHM – *Ultra High Modulus*). Nos últimos, HM e UHM, as superfícies dos filamentos são ligeiramente oxidadas para melhorar a adesão entre fibra e resina.

O mesmo autor ainda afirma que os filamentos de carbono têm um diâmetro típico de 7 a 11 microns e são normalmente agrupados em até 48 mil filamentos. A densidade do carbono varia entre todos os seus tipos, mas na maior parte das vezes está localizada entre a do vidro e a do *Kevlar*®. A resistência à tração é compatível com os vidros R e S e é superior a qualquer outro tipo de fibra quando é necessário se obter maior rigidez, ou seja, módulo de tração e flexão. As fibras de carbono também possuem excelente resistência à fadiga e à vibração. Elas são, contudo, fibras que desenvolvem resistência com uma elongação muito pequena, por isso, muitas vezes são utilizadas em conjunto com outros tipos de fibra, como vidro R e o *Kevlar*®, a fim de aumentar a sua resistência ao impacto, que é realmente muito baixa. Uma outra razão para não se usar fibras de carbono sozinhas é o custo, pois elas são as mais caras de todas as fibras disponíveis no mercado.

Quadro 7 - Propriedades comparativas de laminados de fibra de carbono unidirecional

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO UNIDIRECIONAL			
Tipo de Filamento	T300	T300	T300
Tipo de Resina	AR300	AR260	AR200
Resina TG C°	100.00	210.00	150.00
Volume de Fibra %	65.00	60.00	60.00
Densidade (g/cm³)	1.57	1.54	1.54
Módulo (msi)	19.29	19.58	18.13
Tensão (ksi)	218.95	255.20	258.10
Compressão (ksi)	208.08	198.65	227.65
ILSS (ksi)	14.50	14.50	15.95
Módulo Específico	12.28	12.71	11.77
Tensão Específica	139.46	165.71	167.60
Compressão Específica	132.53	128.99	147.82

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO UNIDIRECIONAL		
Tipo de Filamento	T800	T800H
Tipo de Resina	AR260	AR260
Resina TG C°	120.00	150.00
Volume de Fibra %	60.00	60.00
Densidade (g/cm³)	1.54	1.57
Módulo (msi)	21.75	23.20
Tensão (ksi)	420.50	411.80
Compressão (ksi)	232.00	227.65
ILSS (ksi)	14.50	13.05
Módulo Específico	14.12	14.78
Tensão Específica	273.05	262.29
Compressão Específica	150.65	145.00

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO UNIDIRECIONAL			
Tipo de Filamento	M46J	M60J	M60J
Tipo de Resina	AR260	AR300	AR260
Resina TG C°	150.00	120.00	150.00
Volume de Fibra %	60.00	60.00	60.00
Densidade (g/cm³)	1.59	1.65	1.65
Módulo (msi)	37.70	44.95	47.85
Tensão (ksi)	284.20	284.20	255.20
Compressão (ksi)	127.60	127.60	113.10
ILSS (ksi)	10.15	11.60	10.15
Módulo Específico	23.71	27.24	29.00
Tensão Específica	178.74	172.24	154.67
Compressão Específica	80.25	77.33	68.55

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 70).

2.3.3 Fibra de aramida

Conforme explica Nasseh (2007) as fibras aramidas são mais conhecidas pelo nome *Kevlar®*, marca registrada da empresa *Dupont*, e, na verdade, representam um tipo de fibra

derivada do nylon. Embora existam hoje várias fábricas produzindo fibras aramidas com nomes registrados como *Twaron*® e *Tecnora*®, elas são basicamente o mesmo produto.

O mesmo autor ainda relata que as fibras aramidas foram desenvolvidas em 1965, e muito tempo passou até que alguns tipos de aplicações comerciais aparecessem para sua utilização. Duas formas principais de fibras aramidas são produzidas: o *Kevlar*® 29, usado em cabos e coletes a prova de bala, e o *Kevlar*® 49 utilizado como reforço em plásticos reforçado. O maior uso das fibras aramidas tipo *Kevlar*® 49 está na área aeroespacial e em carros de corrida. Nasseh (2007) diz que quando comparadas com outros materiais, as fibras aramidas mostram uma resistência específica (resistência/densidade) muito grande, acima de qualquer outro tipo de fibra disponível. São cinco vezes mais resistentes que o aço e duas vezes mais resistentes que o vidro E.

As fibras de aramida são utilizadas mais frequentemente em compósitos de matrizes poliméricas; materiais comuns para as matrizes são os epóxis e os poliésteres. Uma vez que as fibras são relativamente flexíveis e um tanto dúcteis, elas podem ser processadas usando as operações têxteis mais comuns. As aplicações típicas desses compósitos com aramidas são em produtos balísticos (coletes e blindagens balísticas), artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis, e vasos de pressão, e como um substituto para o amianto em freios automotivos e em revestimentos de embreagens e gaxetas (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). No Quadro 8 podemos visualizar as propriedades comparativas de laminados de fibra de aramida.

Quadro 8 - Propriedades comparativas de laminados de fibra de aramida

PROPRIEDADES MECÂNICAS - FIBRAS ARAMIDAS							
Tipo de Filamento	Resina	Fração de Resistência a Volume (%)	Resistência a Tração ($\text{lb/in}^2 \times 10^3$)	Módulo de Tração ($\text{lb/in}^2 \times 10^6$)	Resistência a Compressão ($\text{lb/in}^2 \times 10^3$)	Módulo de Compressão ($\text{lb/in}^2 \times 10^6$)	Densidade (g/cm^3)
Woven Roving	Poliéster	36	49.3	3.05	14.5	2.4	1.23
Unidirecional	Poliéster	40	116	7.25	27.6	7.25	1.24
Híbrido (Vidro)	Poliéster	36	38.72	2.1	21.8	-	1.39
Woven Roving	Epoxy (Cura Fria)	44	59.28	4.1	20.5	4.1	1.29
Unidirecional	Epoxy (Cura Quente)	60	203	11	40	11	1.38

Fonte: (NASSEH, 2007, p. 67).

2.4 PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS

Existem vários tipos de técnicas de processamento de compósitos disponíveis para processar os vários tipos de reforços e matrizes (SANTOS, 2014). O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos tem permitido acentuar o grau de automatização e tornar os diferentes processos de fabricação economicamente mais competitivos. Este fator, aliado ao melhor conhecimento do comportamento em serviço, tem garantido a contínua expansão dos materiais compósitos, impondo-os definitivamente em áreas tão díspares como a aeronáutica, a indústria automóvel, indústrias de componentes elétricos e eletrônicos, construção civil, transportes, esportes e lazer. Os diferentes processos podem ser genericamente classificados em dois tipos processos, em molde aberto ou processos em molde fechado. Os componentes obtidos por processos com moldes fechados apresentam excelente acabamento nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade. Outra vantagem inerente aos moldes fechados é a menor emissão de produtos voláteis, nocivos à saúde, nomeadamente o monómero de estireno, presente na maior parte dos processos que envolvem as resinas de poliéster. Recentes diretivas internacionais impõem limites apertados a estas emissões, fato que tem estimulado o desenvolvimento de novos materiais e métodos de fabricação onde o controle dessa emissão é maior (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2009).

Assim como na escolha dos materiais, a definição de qual processo utilizar irá interferir nas propriedades mecânicas, no acabamento e no custo da peça produzida. Processos que favoreçam maior produtividade a menores custos e com qualidade compatível à utilização do produto têm obtido atenção. Com isto, os compósitos avançados têm ampliado as suas aplicações em outras áreas da engenharia, ao nível mundial. Exemplos destes processos incluem o VARTM (*Vaccum-Assisted Resina Transfer Molding*), o RTM (*Resin Transfer Molding*), e o RTM *Light* (REZENDE; BOTELHO, 2000).

2.4.1 RTM (*Resin Transfer Moulding*)

Segundo Levy Neto e Pardini (2006) o processo de moldagem por transferência de resina, ou RTM (*Resin Transfer Moulding*), possui esta designação pelo fato de que acontece a transferência de resina localizada no vaso de injeção adjacente à câmara do molde. O RTM é caracterizado por ser um processo de molde fechado (RÄCKERS, 1998). Conforme Garay (2010) o processo RTM tem sido bastante utilizado na indústria aeroespacial, automobilística e de materiais esportivos, pois podemos obter produtos com geometria complexa e excelente controle de propriedades.

Peterhans (2013) diz que durante os anos 1970 aconteceu uma grande corrida para a utilização do RTM nos países desenvolvidos. Existia a crença de que o RTM seria uma grande descoberta, se comparando com a descoberta na fibra de vidro nos anos 1940. O mesmo autor afirma que o RTM é um ótimo processo, desde que o mesmo seja utilizado de forma adequada e adaptada em termos de volume produtivo, parâmetros técnicos, e exista um suporte técnico para o desenvolvimento do produto e processo.

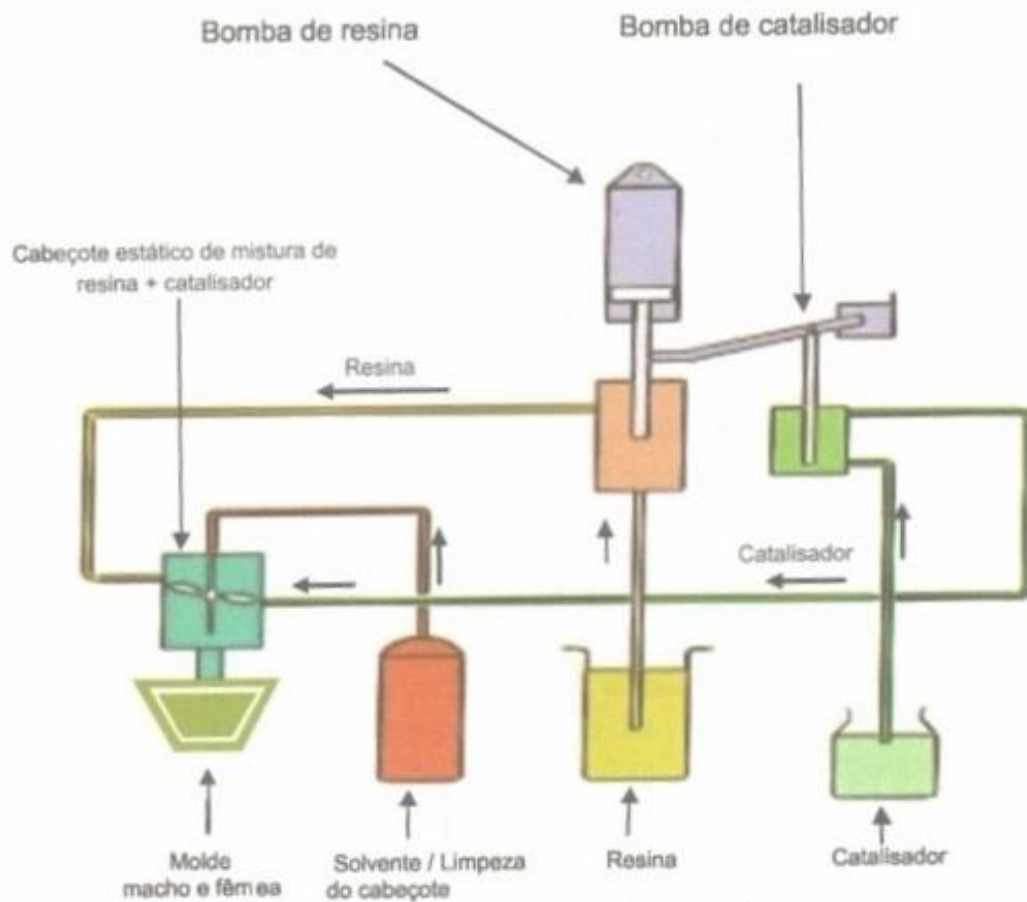
De acordo com Peterhans (2013) o RTM possui alta produtividade quando comparado com processos manuais como o spray-up. Além disso, o processo possui uma boa repetitividade quando existe um bom trabalho da engenharia no desenvolvimento do produto e um bom trabalho na manutenção do processo e dos moldes. Ele ainda diz que a redução de mão de obra pode chegar pela metade, dependendo da peça. O ambiente de trabalho também se torna muito mais limpo e organizado, além de reduzir drasticamente as emissões de estireno. Por outro lado, o RTM se torna vantajoso somente quando existe uma produção de médios e grandes volumes para viabilizar o investimento em moldes.

Conforme Levy Neto e Pardini (2006) o processo RTM inicia-se com a colocação das fibras e reforços dentro do molde, respeitando o formato e orientação definidos dentro do molde. Posteriormente ocorre o fechamento do molde. A resina polimérica, de baixa viscosidade é então injetada dentro do molde, sob baixa pressão, de 1 a 10 bar, para que não ocorra movimentação das fibras ou reforços. Ao longo do processo de injeção a resina flui dentro do molde e ocorre a impregnação dos reforços, e o ar interno é expelido com o auxílio de válvulas localizadas em locais opostos à injeção. Existe também a utilização de vácuo para auxiliar a saída do ar e excesso de resina. Após ocorre o aquecimento do molde para acelerar o processo de cura. Na figura 8 é possível visualizar um esquema ilustrativo de um molde para processo RTM.

Peterhans (2013) diz que todo este processo é realizado com o auxílio de uma máquina injetora composta por uma bomba de transferência, para resina e catalisador, além de um misturador estático, onde acontece a mistura entre catalisador e resina. Em relação ao molde o autor fala sobre a necessidade de bicos para saída para o excesso de resina, que servirá para informar que as cavidades estão completamente preenchidas. Ele ressalta a necessidade de uma borracha de vedação ao longo de todo o perímetro do molde, isto para evitar a saída de resina e ainda criar uma contrapressão interna no molde.

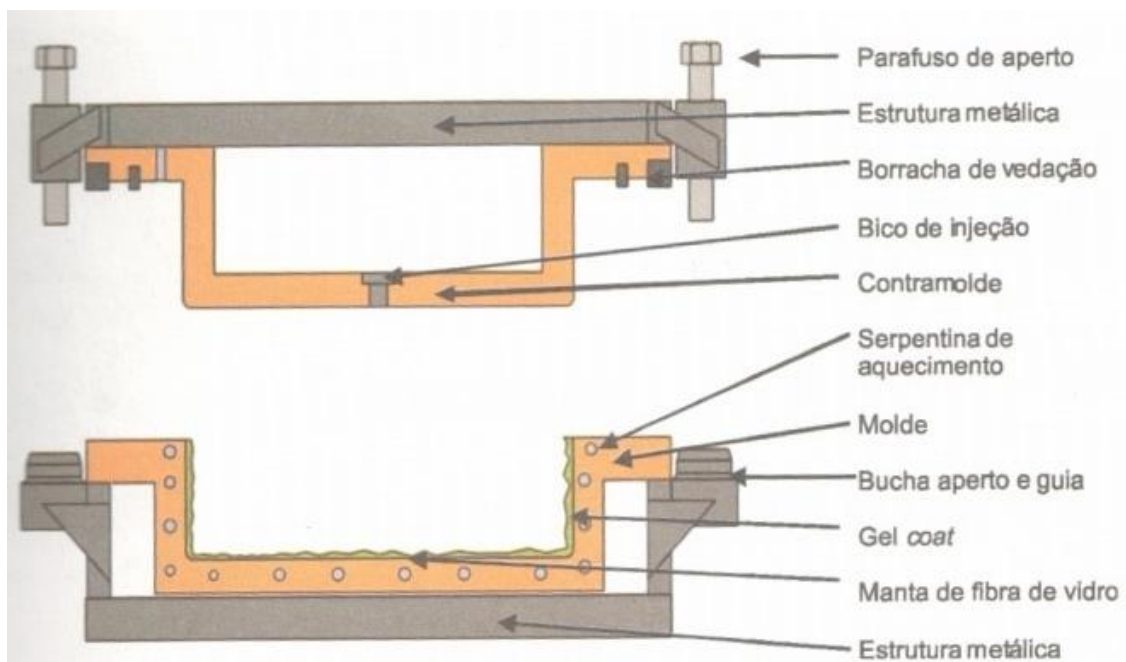
Na figura 7 temos um esquema ilustrativo do processo RTM.

Figura 7 - Esquema de injeção de resina no processo RTM



Fonte: (PETERHANS, 2013, p. 38).

Figura 8 - Molde para processo RTM com fechamento através de parafusos



Fonte: (PETERHANS, 2013, p. 39).

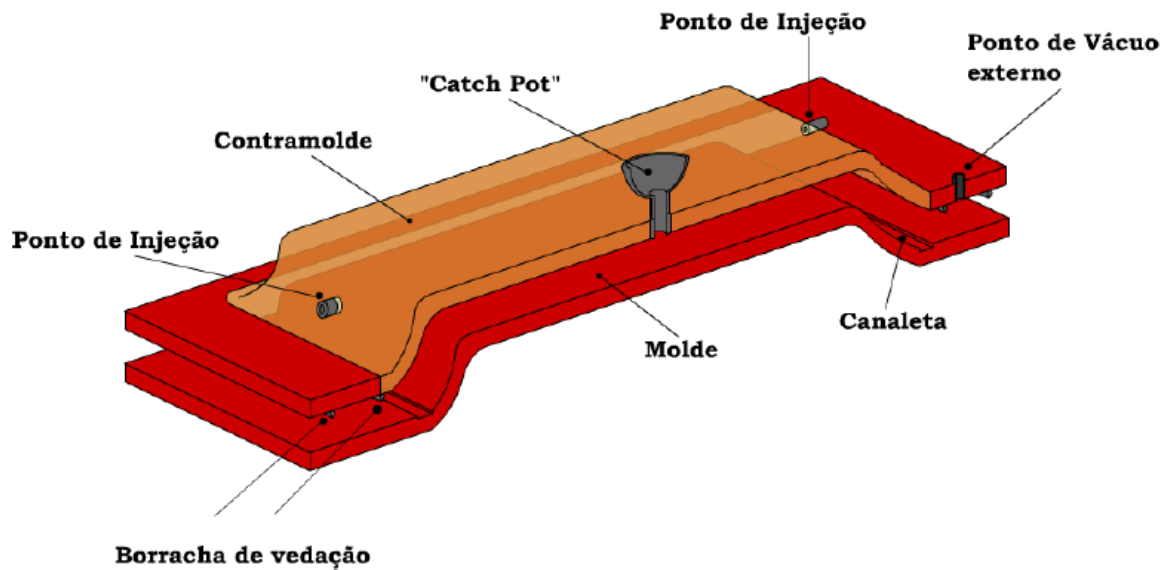
2.4.2 RTM Light

Segundo Harper (2009) o RTM Light é uma evolução do RTM, onde a transferência de resina é realizada com o auxílio de vácuo e uso de baixa pressão. O procedimento em questão ajuda no escoamento da resina e na impregnação dos reforços, removendo também vazios que podem se formar no componente moldado (SCHMIDT *et al.*, 2009). O RTM Light une as vantagens do RTM às propriedades de materiais avançados, como mantas moldadas, enxertos e resinas. Quando comparado com moldagens manuais como o hand lay-up e spray-up, o RTM Light gera menor emissão de estireno, proporcionada um processo padronizado, facilita o isolamento do colaborador em relação às resinas, além de possuir flexibilidade na moldagem das peças, desde componentes menores até com maiores dimensões (TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 2019).

Os moldes para o processo RTM Light são mais leves, podem ser construídos de forma similar à construção de moldes para processos de moldagem manual em compósitos. O contra molde é leve e pode ser translúcido para que seja possível acompanhar melhor o fluxo de resina. Neste processo a pressão de injeção é sempre baixa, logo os moldes não necessitam de estrutura robusta, estes podem ser fabricados em materiais compósitos, o que gera um custo menor para o processo. Outro fator importante são as borrachas ou silicones para vedação, que possuem a função de evitar a entrada de ar dentro do sistema, além de evitar a passagem da resina para fora do molde (GARAY, 2010).

O contramolde possui três orifícios, sendo que o primeiro serve para criar vácuo em todo o sistema, e deve ter pressão a partir de 0,9 bar. Já o segundo orifício serve para a injeção da resina, com baixa pressão, em geral utiliza-se 0,5 bar. A pressão maior para o molde serve para manter o molde fechado, assim isolando o ambiente de trabalho. Existe a exigência estrita por um molde que não permita qualquer tipo de vazamento, mesmo sendo pequeno. No terceiro orifício do contra molde localiza-se uma bandeja (*catch pot*) que armazena o excesso de resina (TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 2019).

Figura 9 - Esquema ilustrativo de molde para RTM Light



Fonte: (GARAY, 2010, p. 18).

Qualquer máquina de baixa pressão para injeção de resina pode servir para utilizar no processo RTM Light. Máquinas de injeção, que tem seu funcionamento à base de ar comprimido, sem conexões elétricas por causa da utilização de material inflamável, são fáceis de operar.

Peterhans (2013) diz que as resinas para RTM Light devem possuir baixa viscosidade. André Admilson Trevizan, técnico da Elekeiroz, de São Paulo (SP) ainda complementa dizendo que as resinas utilizadas em RTM Light devem ter, além de viscosidade baixa, características específicas para o processo. “O RTM Light funciona a baixa pressão e por isso não trabalha com moldes e contramoldes de espessura muito alta”, afirma. “Isso faz com que, para se atingir os parâmetros técnicos desejados para a peça final, a resina proporcione espessura uniforme e cura rápida”.

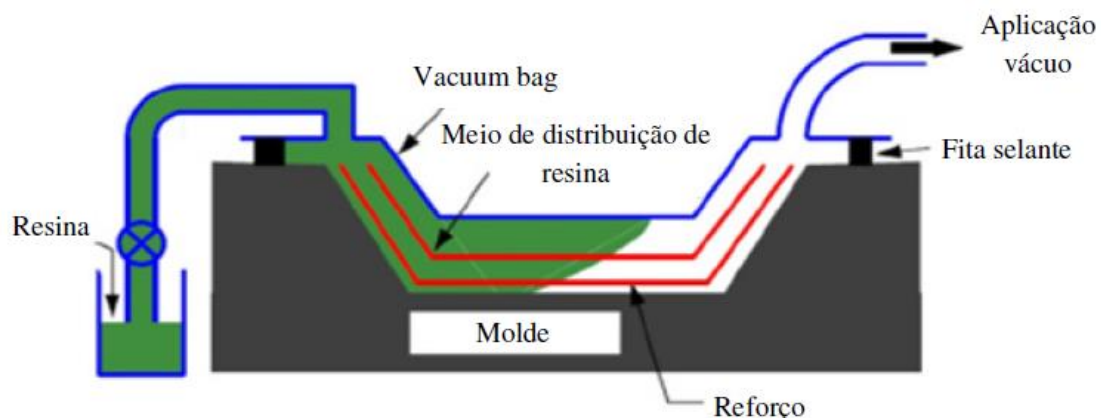
2.4.3 – VARTM (Vacuum Assisted Transfer Moulding)

Segundo Garay (2010) no processo VARTM a resina é transferida pelo reforço, disposto dentro do molde, com o auxílio de pressão a vácuo. De acordo com Nasseh (2007) o VARTM também é conhecido por processo de laminação por infusão a vácuo. Ele diz que o processo tem semelhança com a laminação a vácuo, só que neste caso todo o material é envolvido por um envelope plástico ou bolsa de vácuo. Este é um processo muito utilizado para laminação de peças de barcos com alto grau de qualidade. O primeiro processo de

VARTM patenteado é conhecido como “Método Marco”, que foi utilizado na construção de barcos para guarda costeira americana na década de 1940. Em 1964 dois engenheiros do Texas melhoraram o processo, que neste caso utilizava canais do material sandwich (materiais de núcleo utilizados em compósitos) para auxiliar no fluxo de resina. O mesmo autor salienta que neste processo devido ao diferencial de pressão proporcionada pelo vácuo, a resina se movimenta pelas porosidades das tramas das fibras ou material sandwich. O vácuo é mantido até a cura total da peça, mesmo que os reforços tenham sido completamente impregnados. É um processo capaz de produzir peças extremamente leves e resistentes, com teor de fibras podendo alcançar 65% do laminado, diferente de peças produzidas manualmente, que possuem teor de fibras entre 20 e 30%. A utilização deste processo permite um ambiente de trabalho mais limpo quando comparado aos processos manuais de laminação, além de reduzir também as emissões de estireno e diminuir as perdas de resina geradas pelo manuseio presente em processos de hand lay-up. Al

Conforme cita Garay (2010) as etapas do VARTM podem ser divididas da seguinte forma: a) Colocação do reforço seco dentro do molde; b) Meio de distribuição de resina é colocado na pré-forma para acelerar o fluxo; c) A última camada é coberta com um plástico impermeável ou bolsa de vácuo (vacuum bag); d) O vácuo é aplicado com o auxílio de uma bomba de vácuo; e) A linha de resina é aberta e inicia-se a impregnação do reforço; f) Finaliza-se a impregnação dos reforços e o processo de cura para que seja possível desmoldar a peça. O autor ainda afirma que algumas vantagens da utilização do VARTM são o baixo custo do processo e construção dos moldes, boas propriedades mecânicas, elevado teor de fibras e baixo teor de vazios. Nasseh (2007) diz que este processo é muito utilizado na construção de embarcações, aeronaves e pás eólicas.

Figura 10 - – Esquema ilustrativo do processo VARTM



Fonte: (GARAY, 2010, p. 16).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia utilizada para construção deste trabalho será abordada nesta seção.

A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Essa vantagem torna-se particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço (GIL, 2002).

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Neste capítulo é relatada a classificação da pesquisa do trabalho realizado, no que se refere à sua natureza, ao tipo de abordagem do tema, assim como o objetivo e procedimento adotado, que é possível observar na Figura 11.

A presente pesquisa é de natureza básica ou pura, como também é chamada. Na pesquisa pura o pesquisador está voltado para satisfazer a uma necessidade intelectual de conhecer e compreender determinados fenômenos. (BARROS; LEHFELD, 2007). A pesquisa pura é uma modalidade de pesquisa que procura o progresso científico, a ampliação de conhecimentos teóricos, sem a preocupação de utilizá-las na prática. É uma pesquisa formal, que tem em vista generalizações, princípios e leis. (MARCONI; LAKATOS, 2017). Para Prodanov e Freitas (2013) a pesquisa básica objetiva gera conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais.

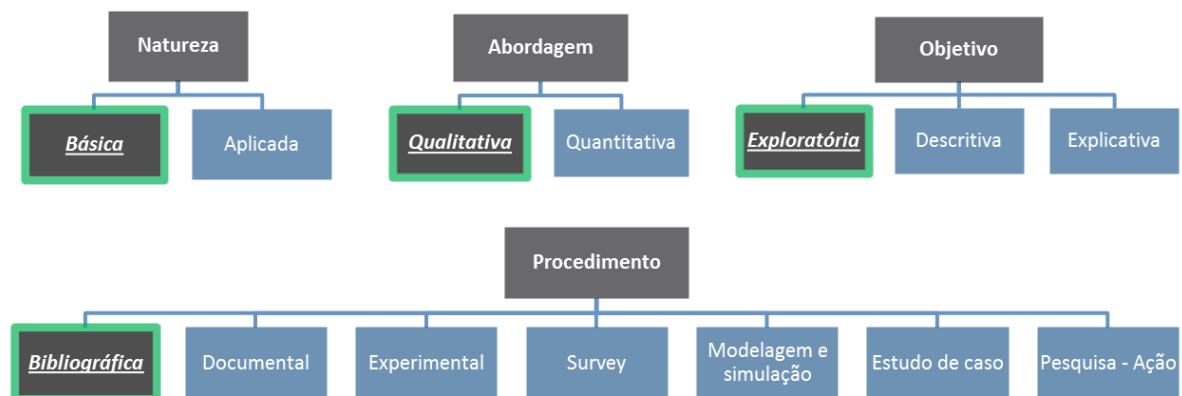
A abordagem da pesquisa é classificada como qualitativa, pois é onde o cientista é ao mesmo tempo o sujeito e o objeto de suas pesquisas. O desenvolvimento da pesquisa é imprevisível. O conhecimento do pesquisador é parcial e limitado. O objetivo da amostra é de produzir informações aprofundadas e ilustrativas: seja ela pequena ou grande, o que importa é que ela seja capaz de produzir novas informações (POUPART *et al.*, 1991).

Em relação ao objetivo, a pesquisa é classificada como exploratória, pois segundo Gil (2002) as pesquisas exploratórias têm como propósito proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Seu planejamento tende a ser bastante flexível, pois interessa considerar os mais variados aspectos relativos ao fato ou fenômeno estudado. A pesquisa exploratória visa proporcionar maiores informações sobre um assunto investigado, familiarizar-se com o fenômeno ou conseguir nova compreensão deste, a fim de poder formular um problema mais preciso de pesquisa ou criar

novas hipóteses. Pode ser também o passo inicial em um processo de pesquisa. Os estudos exploratórios conduzem apenas a hipóteses, não verificam, nem demonstram. (LEÃO, 2016).

O trabalho apresenta procedimento de ordem bibliográfica no seu desenvolvimento. A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (FONSECA, 2002). A pesquisa bibliográfica tanto pode ser um trabalho independente como constituir-se no passo inicial de outra pesquisa. Já que todo trabalho científico pressupõe uma pesquisa bibliográfica preliminar. (ANDRADE, 2010). Sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências seguidas de debates que tenham sido transcritas de alguma forma. Dessa forma, a pesquisa bibliográfica não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, visto que propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras. (MARCONI; LAKATOS, 2017).

Figura 11 - Classificação da pesquisa



Fonte: Elaboração do autor (2019).

4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Esta pesquisa bibliográfica surgiu a partir da constatação da necessidade de explorar processos produtivos em materiais compósitos, com o intuito de gerar conhecimento sobre o assunto e possibilitar um comparativo entre os processos abordados. Considerando que o problema da pesquisa é o desafio em estabelecer, dentro de uma empresa fabricante de artigos em materiais compósitos, processos produtivos que possibilitem o bem-estar dos funcionários e a lucratividade sem prejuízos para o meio ambiente, a implantação e o conhecimento de processos de infusão e transferência de resina podem contribuir significativamente para a solução do problema.

No entanto, a escolha correta do método de infusão e transferência de resina em materiais compósitos é de extrema importância para que as necessidades sejam supridas e os objetivos sejam atingidos. Cada processo do estudo possui vantagens, desvantagens, aplicações específicas e custos diferenciados. Através da ferramenta 5W1H será feito um plano de ação para os processos abordados no estudo.

4.1 FERRAMENTA 5W1H

Segundo Daniel e Murback (2014) o 5W1H surge como uma ferramenta estratégica de qualidade total, principalmente na área de produção, onde há necessidade de estabelecer um plano de ação tático em um curto espaço de tempo quando algo não está saindo conforme o planejado. De acordo com César (2011) o 5W1H é um documento capaz de identificar ações e responsabilidades sobre execução de um projeto através de um breve questionamento. Oliveira (1995) diz que o 5W1H deve ser estruturado para permitir uma rápida identificação dos elementos necessários à implantação do projeto.

A ferramenta 5W1H é estruturada pelas seguintes perguntas:

- What? – O que será feito?
- Why? – Porque será feito?
- Where? – Onde será executado?
- Who? – Quem realizará a tarefa?
- When? – Quando será feito?
- How? – Como será realizado?

4.2 ANÁLISE DOS PROCESSOS

Sabe-se que cada processo do estudo em questão é indicado para situações específicas, estas relacionadas aos aspectos técnicos da peça a ser produzida, à quantidade a ser fabricada, aos custos de investimento do processo e operacionais. Levando em consideração este fato, nesta seção será realizada uma análise os processos abordados.

4.2.1 RTM

As peças construídas pelo processo RTM são de alta qualidade, pois o método permite um alto controle de tolerância e geometria do componente. A implantação deste processo é vantajosa quando existe um alto volume de produção, caso contrário seu investimento não é justificado. Isso acontece porque existe um alto investimento em máquinas e moldes principalmente.

As máquinas utilizadas no processo em questão possuem certa complexidade, elas são responsáveis por realizar diversos procedimentos ao longo do processo. Estas máquinas realizam automaticamente a mistura entre resina e catalisador em proporções exatas, além disso, são responsáveis pela injeção de resina dentro do molde. A injeção da resina ocorre em alta pressão quando comparado aos outros processos do estudo.

Os moldes fazem parte dos componentes do processo responsáveis por gerar um custo maior, ao mesmo tempo em que auxiliam na construção de peças de alta qualidade. Os moldes no processo RTM devem ser robustos para suportar a pressão de injeção que ocorre. Geralmente os moldes utilizados são fabricados em aço e com superfícies muito bem acabadas, mas caso os moldes sejam fabricados em compósitos deve existir uma estrutura metálica rígida capaz de manter o molde intacto, evitando possíveis deformações e ou rupturas nas cavidades. De qualquer forma as cavidades terão custo maior do que em outros processos por transferência de resina.

É sabido da importância da escolha do processo produtivo, e esta poderá gerar diversos impactos, positivos ou negativos. Segundo Peterhans (2013) quem considera a utilização de moldagem de compósitos em moldes fechados, o RTM pode ser uma boa alternativa, além de ser um processo limpo. O Quadro 9 tem o intuito de facilitar e mapear este processo de decisão.

Quadro 9 - Ferramenta 5W1H

FERRAMENTA 5W1H	
O que?	Utilizar o RTM como processo produtivo
Por quê?	Para aumentar a produtividade, produzir médios e grandes volumes de componentes de alta qualidade, diminuir as emissões de estireno e obter um ambiente de trabalho mais limpo.
Onde?	Na planta de fabricação.
Quem?	Engenheiros de desenvolvimento de produto, engenheiros de processo.
Quando?	Quando houver necessidade de maior volume de produção, automatização do processo, de obter componentes de alta qualidade de acabamento em ambos os lados, e de tornar o ambiente de trabalho limpo e organizado.
Como?	Elaborando um plano para implantação de um novo processo na fábrica.

Fonte: Elaboração do autor (2019).

O plano de ação realizado mostra que o RTM permite o aumento produtivo de uma fábrica de compósitos para a fabricação de peças de alta qualidade com acabamento em ambos os lados. Além disso, é um método que proporciona uma maior facilidade na automatização do processo. A limpeza e organização do ambiente de trabalho é um fator inerente à implantação do método, esta que deve ser realizada com o auxílio de engenheiros que detenham o conhecimento do processo.

4.2.2 RTM Light

O RTM Light é uma variação do processo RTM convencional. Os princípios básicos são os mesmos e os resultados finais podem ser muito próximos quando o processo possui um controle de qualidade e é executado com os parâmetros corretos. Entre as principais diferenças entre estes processos “irmãos”, podemos citar um custo menor de implantação assim como a produtividade. Existem também diferenças técnicas relacionadas ao processo de transferência de resina.

Segundo Garay (2010) a pressão de injeção de resina no processo RTM Light é bastante inferior ao RTM convencional, sendo no máximo 1 bar. Um diferencial importante é que aqui ocorre a utilização de vácuo, que auxilia na condução do excesso de ar e resina para fora das cavidades do molde.

Devido a estas variações técnicas do processo, o investimento em moldes é também inferior, pois estes podem ser construídos em materiais compósitos, não necessitando a mesma robustez exigida no RTM convencional. Inclusive uma das cavidades pode ser

translúcida para um melhor acompanhamento do fluxo de resina. No entanto a durabilidade dos moldes é menor, logo a tiragem de peças de cada molde também é menor, e por este motivo o RTM Light é indicado para médios volumes de produção. No Quadro 10 podemos ver os volumes aproximados de produtividade em ambos os processos. É importante ressaltar que para estes volumes as peças são produzidas com resina poliéster, onde a cura ocorre mais rapidamente. No entanto podemos ter uma noção no que se refere à produtividade de cada processo.

Quadro 10 - Comparativo aproximado de produtividade de cada RTM

Processo	Nº de moldes	Nº de pessoas/turno	Peças/dia	Peças/mês	Peças/ano
RTM Light	3	4	18	378	4500
RTM Convencional	3	4	30	630	7500

Fonte: PETERHANS, 2013. p. 184)

No Quadro 11, novamente a ferramenta 5W1H propõe um plano de ação, e permite uma verificação se método é ou não adequado para atender as necessidades relacionadas de uma fábrica de produtos em materiais compósitos.

Quadro 11 - Ferramenta 5W1H: planta de processamento de compósitos

FERRAMENTA 5W1H	
O que?	Utilizar o RTM Light como processo produtivo
Por quê?	Para aumentar a produtividade, produzir médios volumes de componentes de qualidade média à alta, diminuir as emissões de estireno e obter um ambiente de trabalho mais limpo.
Onde?	Na planta de fabricação.
Quem?	Engenheiros de desenvolvimento de produto, engenheiros de processo.
Quando?	Quando existir a necessidade de aumentar o volume de produção, de obter componentes de média e alta qualidade de acabamento em ambos os lados, e de tornar o ambiente de trabalho mais limpo e organizado.
Como?	Elaborando um plano para implantação de um novo processo na fábrica

Fonte: Elaboração do autor (2019).

O RTM Light é um processo que permite o aumento do volume produtivo para volumes médios de produção de acordo com o segmento de compósitos. É um processo que proporciona um ambiente de trabalho mais limpo e organizado, além de reduzir consideravelmente as emissões de estireno. Assim como no RTM, a implantação deste

processo exige o auxílio de engenheiros detentores do conhecimento no campo do RTM e RTM Light. As peças produzidas também possuem acabamento externo em ambos os lados e são de alta qualidade.

4.2.3 VARTM

O VARTM é um processo construtivo de peças em materiais compósitos, bastante acessível e que gera resultados superiores quando comparado aos processos manuais de laminação. É possível produzir peças grandes com geometrias relativamente complexas que possuem baixo teor de vazios e um maior teor de fibras. O VARTM é muito utilizado em peças grandes, como embarcações, aeronaves e pás eólicas.

Neste processo o equipamento para injeção de resina é desnecessário, pois ela é transferida através do molde com o auxílio de uma bomba de vácuo e pressão atmosférica. No VARTM não existe o contramolde, apenas o molde, uma vez que a parte superior é vedada com filmes plásticos e fitas selantes específicas, geralmente chamadas de “*tacky tapes*”. Entre o filme plástico e os reforços fibrosos é comum a utilização de alguns componentes que facilitam a transferência da resina e o posterior acabamento da parte interna.

Como facilitador para a passagem da resina são utilizados espirais de PVC, chamados “*spiraduto*”, estes direcionam o fluxo de resina ao longo da cavidade. A tela chamada de “*flow media*” tem a mesma função que os espirais. Já para facilitar o acabamento da parte interna do compósito, que não esteve em contato com a cavidade do molde e por isso possui textura e superfícies diferentes, é utilizado um tecido sintético chamado de “*peel ply*”. Este tecido, com propriedades antiaderentes, proporciona uma superfície lisa para o lado oposto da cavidade, fator este que contribuirá de forma significativa para o processo de lixa e acabamento da peça. Além disso, temos também a presença de um tecido absorvente chamado “*breather*”, este por sua vez tem a função de absorver o excesso de resina dentro do sistema.

De acordo com Nasseh (2007) o VARTM também proporciona um ambiente de trabalho mais limpo e organizado e reduz as emissões de estireno. Dependendo do tamanho e complexidade geométrica da peça que se deseja construir, o VARTM também vai de encontro às soluções dos problemas, presentes em muitas fábricas que processam materiais compósitos. O quadro 12 permite uma verificação das necessidades corretas e possíveis melhorias na implantação do processo em questão.

Quadro 12 - Ferramenta 5W1H: possíveis melhorias na implantação

FERRAMENTA 5W1H	
O que?	Utilizar o VARTM como processo produtivo
Por quê?	Para produzir peças grandes, resistentes e com alto teor de fibras. Também quando se deseja diminuir as emissões de estireno e obter um ambiente de trabalho mais limpo.
Onde?	Na planta de fabricação.
Quem?	Engenheiros de desenvolvimento de produto, engenheiros de processo.
Quando?	Quando houver a necessidade de produzir peças grandes, ocas, leves e resistentes, assim como tornar o processo produtivo mais limpo e sustentável.
Como?	Elaborando um plano para implantação de um novo processo na fábrica.

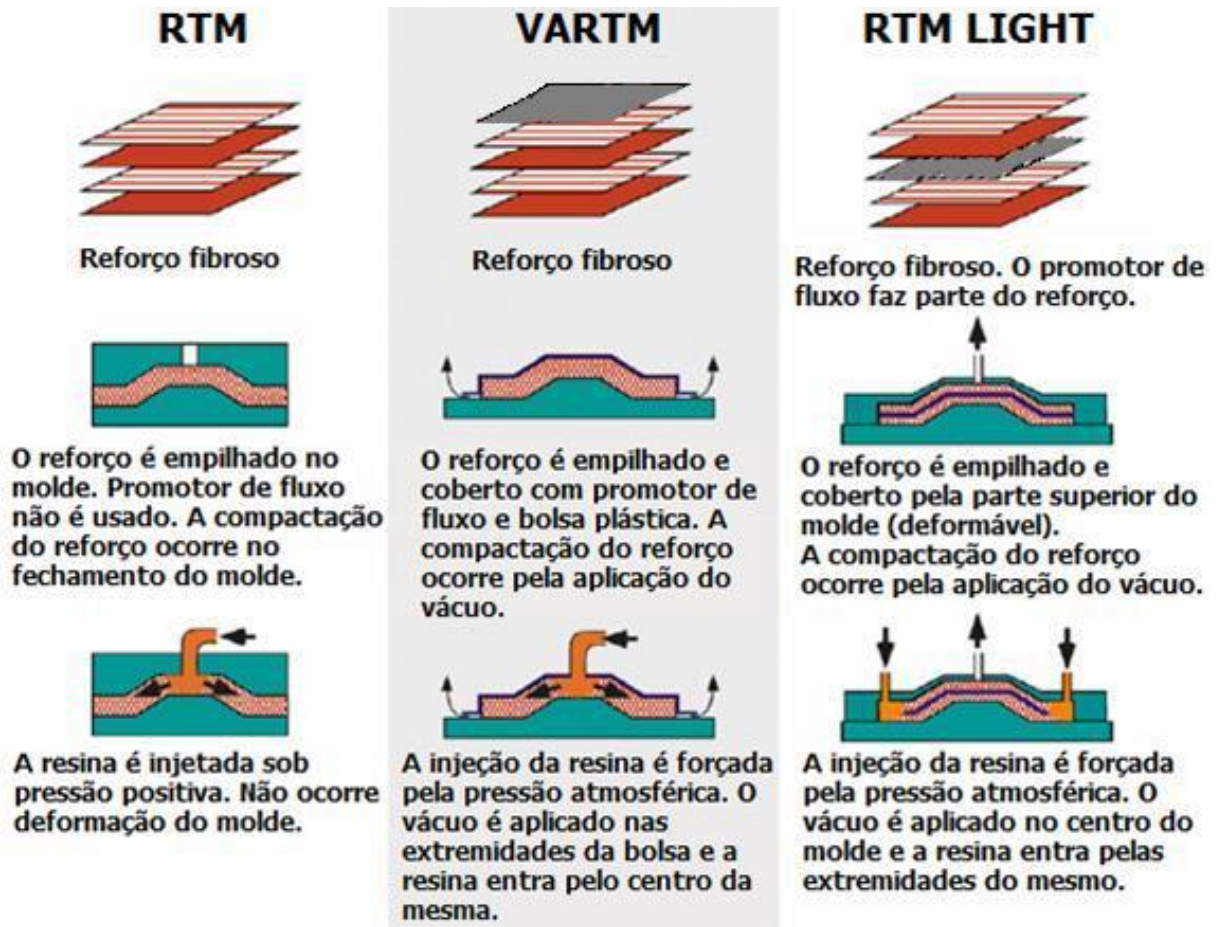
Fonte: Elaboração do autor (2019).

Conforme mostra o plano de ação realizado com o auxílio da ferramenta 5W1H, o VARTM também é um processo que permite uma maior limpeza e organização do setor produtivo e reduz as emissões de estireno, o que traz mais sustentabilidade para o processo. No entanto o VARTM não é indicado para o aumento do volume de produção, mas sim para a fabricação de componentes grandes e leves. É importante saber que para implantação deste processo deve ser elaborado um plano por profissionais que detenham o conhecimento técnico necessário.

4.3 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS

A decisão sobre qual processo implantar em uma fábrica de processamento de compósitos deve ser sempre muito bem analisada. Sabe-se que cada processo possui finalidades específicas, exigência de conhecimentos técnicos distintos, custos operacionais e de implantação diferentes. A partir da análise e de toda a pesquisa realizada, foi construído um quadro comparativo entre os processos do estudo. Este quadro visa facilitar o processo de decisão para qual caminho seguir no momento em que ocorrer a necessidade da implantação de um processo de transferência e infusão de resina em uma planta de processamento de materiais compósitos. A figura 12 mostra de forma clara e objetiva as principais diferenças técnicas entre os processos deste estudo.

Figura 12 - Esquema comparativo dos processos RTM, RTM Light e VARTM



Fonte: (SIMACEK; ADVANI, 2007).

O Quadro 13 realiza um comparativo entre os processos do estudo, com dados generalistas e aproximados da indústria de materiais compósitos. No entanto, cada indústria possui suas particularidades, custos e operações de acordo com as peças que produzem. A matéria prima, máquinas e componentes utilizados no processo podem interferir diretamente nos custos operacionais e nas propriedades do produto final, por este motivo, ao definir o processo a ser implantado, deve-se também levar em consideração os requisitos do produto e do cliente, para que então o processo adequado seja escolhido.

Quadro 13 - Comparativo entre os processos do estudo

Processo	Tamanho do componente	Volume de produção	Investimento inicial	Custo Operacional
RTM	Peças pequenas e médias	Alto	Alto	Baixo
RTM Light	Peças pequenas e médias	Médio	Médio	Baixo à médio
VARTM	Peças médias e grandes	Baixo	Baixo	Médio à alto

Fonte: Elaboração do autor (2019).

Utilizando o quadro 13, uma empresa que deseja implantar algum processo de infusão e transferência de resina em compósitos, irá facilitar ainda mais o processo de decisão e escolha do método adequado.

A partir das necessidades comerciais, técnicas e produtivas, a empresa deverá ligar os atributos de cada método, no que se refere ao volume produtivo, custo de implantação, custo de operação e requisitos técnicos da peça a ser produzida, e a partir destes itens mapeados, definir o processo a ser implantado.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso, foi realizado um estudo dos principais métodos construtivos em compósitos que utilizam infusão e transferência de resina. Através de uma pesquisa bibliográfica com objetivo exploratório, foram estudados os métodos mais utilizados pela indústria. Observou-se a importância do conhecimento das diferenças entre os métodos do estudo, uma vez que cada um deles deve ser aplicado em situações distintas.

Foi possível verificar que as diferenças entre os processos estudados são muitas, mesmo que o princípio de aplicação seja parecido. Eles se diferenciam em parâmetros técnicos, como pressão de injeção, insumos, moldes, acabamento e outros, como também nos custos de implantação e operação. O volume de produção é outro fator de extrema importância na tomada de decisão pela escolha do processo, pois pode existir uma situação onde o método é incapaz, tecnicamente, de fornecer o volume produtivo necessário, ou pode acontecer uma situação oposta, onde o método pode produzir um alto volume, mas a indústria não possui a demanda necessária para implantação daquele processo.

Ao verificar a importância da escolha do processo adequado, os métodos do estudo foram analisados, e através da utilização da ferramenta 5W1H foram realizados os planos de ação para os processos. Os quadros foram capazes de segmentar a aplicação de cada método do estudo, definindo as situações onde cada um deve ser utilizado, para qual objetivo, como fazê-lo e os responsáveis. O estudo em questão ainda permitiu uma posterior síntese de informações, que de forma objetiva, gerou um comparativo entre os processos de infusão e transferência de resina estudados, ajudando a otimizar o resultado daquele que for aplicá-lo.

Devido às suas propriedades diferenciadas, muitas vezes superiores aos materiais tradicionais, os materiais compósitos ganham cada vez mais espaço na indústria. Por este motivo, é de extrema importância que tenhamos conhecimento sobre os processamentos destes materiais e a forma como são aplicados. Para que o trabalho com compósitos seja mais produtivo, limpo, organizado e sustentável, é imprescindível entender a importância dos processos que utilizam os métodos de infusão e transferência de resina, e que naturalmente se sobressaem em relação aos processos manuais.

5.1 SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS

Os materiais compósitos e suas formas de processamentos possuem um amplo campo de pesquisa e aplicações. Os benefícios proporcionados pelos processos por infusão e transferência de resina, quando comparados com os processos de moldagem manuais, são diversos.

Os gases nocivos à saúde e ao meio ambiente, emitido pelos compósitos poliméricos, foi abordado no estudo de forma rasa. Como sugestão de pesquisa é indicada a medição e ou realização experimentos reais, para que as vantagens dos processos de infusão e transferência de resina no que se refere à emissão destes gases sejam efetivamente medidas e quantificadas.

Por fim sugere-se também a incorporação de um comparativo entre os processos do estudo referindo-se às emissões dos gases nocivos em cada método.

REFERÊNCIAS

- ALMACO. **Segmentação compositórios de poliéster 2013**. [S. l.]: TM, 2013. Disponível em: http://www.tecnologiademateriais.com.br/portal/noticias/composites/2014/marco/setor_compositos.html. Acesso em 03 abr. 2019.
- ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**: elaboração de trabalhos na graduação. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- ASM INTERNATIONAL. **Engineered materials handbook**: composites. 4th ed. United States of America: ASM, 1993. v. 1.
- BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia científica**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2007.
- BETAEQ. **Estrutura de materiais compósitos com alguns dos possíveis arranjos das fibras**. Rio de Janeiro: BEQ, 2017. Disponível em: <https://i0.wp.com/betaeq.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Picture15.png>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- BRUNI, G. K. **Setor de compósitos registra segundo ano consecutivo de crescimento**. São Paulo: ALMACO, 2018. Disponível em: <http://almaco.org.br/2018/12/>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**: an introduction. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CÉSAR, F. I. G. **Ferramentas básicas de qualidade**. São Paulo: Biblioteca 24horas, 2011.
- CHANDA, M.; ROY, S. K. **Industrial polymers, specialty polymers, and their applications**. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2008.
- DANIEL, E. A.; MURBACK, F. G. R. Levantamento de dados bibliográficos do uso das ferramentas da qualidade. **Gestão e Conhecimento**, Poços de Caldas, 2014. Disponível em: https://www.pucpcaldas.br/graduacao/administracao/revista/artigos/v2014/Artigo16_2014.pdf. Acesso em 03. abr. 2019.
- DUPONT. **Materiais para artigos esportivos**. São Paulo: Dupont, [2019]. Disponível em: <http://www.dupont.com.br/produtos-e-servicos/sporting-goods.html>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GARAY, A. C. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM Light**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Minas, Metalúrgica e de Materiais)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HAMANN, R. **Fibra de carbono**: como é feito e como funciona este material incrível. *In*: TECMUNDO. [São Paulo: ANZ], 2017. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>. Acesso em: 30 mar. 2019.

HARPER, A. **RTM**: passado, presente e futuro. Inglaterra: Materials Today, 2009. Disponível em: <https://www.materialstoday.com/composite-processing/features/rtm-past-present-and-future/>. Acesso em: 30 abr. 2019.

HOLLAWAY, L.; BRITISH PLASTICS FEDERATION (EDS.). **Handbook of polymer composites for engineers**. Cambridge: Woodhead, 1994.

HOLMES, M. Carbon fibre reinforced plastics market continues growth path. **Reinforced Plastics**, Inglaterra, v. 57, n. 6, p. 24–29, nov. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361713701863>. Acesso em: 03 abr. 2019.

KAVERMAN, R. D. Reinforced Plastics and Composites. *In*: BERINS, M. L.; SOCIETY OF THE PLASTICS INDUSTRY. **SPI plastics engineering handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc.** 5th ed. Boston; New York: Kluwer Academic Publishers; Van Nostrand Reinhold, 1991.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. USA: CRC Press, 1997.

LEÃO, L. M. **Metodologia do estudo e pesquisa**: facilitando a vida dos estudantes, professores e pesquisadores. Petrópolis: Vozes, 2016.

LEE, H.; NEVILLE, K. **Handbook of epoxy resins**. New York: McGraw-Hill, 1967.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**: ciência e tecnologia. São Paulo: Blucher, 2006.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MAY, C. A. **Epoxy resins chemistry and technology**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1988.

MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. 2. ed. **Materiais compósitos**: materiais, fabrico e comportamento mecânico. São Paulo: Publindústria, 2009.

NASSEH, J. **Métodos avançados de construção de barcos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2007.

OLIVEIRA, S. T. **Ferramentas para o aprimoramento da qualidade**. São Paulo: Pioneira, 1995.

PETERHANS, H. **RTM: resin transfer moulding**. 2. ed. Blumenau: Nova Letra, 2013.

POUPART, J. *et al.* **Pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos**. Petrópolis: Vozes, 1991.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PUCKETT, M. PETERVARY, M. Materials. *In*: KRUCKENBERG, T.; PATON, R. (ed.). **Resin transfer moulding for aerospace structures**. Dordrecht: Springer, 1998. p. 42-81.

RÄCKERS, B. Introduction to resin transfer moulding. *In*: KRUCKENBERG, T.; PATON, R. (ed.). **Resin transfer moulding for aerospace structures**. Dordrecht: Springer, 1998. p.1-24.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, São Carlos, v. 10, n. 2, p. e4-e10, jun. 2000. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282000000200003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 30 abr. 2019.

SANTOS, Z. I. G. **Tecnologia dos materiais não metálicos: classificação, estrutura, propriedades, processos de fabricação e aplicações**. São Paulo: Erica, 2014.

SCHMIDT, T. M. *et al.* Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28, n. 23, p. 2839–2850, dez. 2009.

SHELDON, R. P. **Composite polymeric materials**. London: Applied Science, 1982.

SILAEX. **Estrutura química de poliéster insaturado com adição de monômero e passando pelo processo de cura**. São Paulo: Silaex, [2019a]. Disponível em: <https://silaex.ind.br/resina-poliester>. Acesso em: 25 maio 2019.

SILAEX. **Estruturas químicas de resinas poliésteres de acordo com seus ácidos**. São Paulo: Silaex, [2019b]. Disponível em: <https://silaex.ind.br/resina-poliester>. Acesso em: 25 maio 2019.

SIMACEK, P.; ADVANI, S. G. Modeling resin flow and fiber tow saturation induced by distribution media collapse in VARTM. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 13, p. 2757–2769, out. 2007.

TECNOLOGIA DE MATERIAIS. **Fácil na teoria, o RTM Light exige anos de prática**. [S. l.]: TM, [2019]. Disponível em: http://www.tecnologiademateriais.com.br/consultas_tm/processos/facil_02.html. Acesso em: 20 maio 2019.