



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

BRENO BESSA SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LAMINADOS
DE COMPÓSITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

FORTALEZA

2017

BRENO BESSA SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
LAMINADOS DE COMPÓSITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. RICARDO EMILIO

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S233e Santos, Breno Bessa.

Estudo da influência do tipo de processo de fabricação de laminados de compósito nas propriedades mecânicas / Breno Bessa Santos. – 2017.

61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Arquitetura e Urbanismo, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira.

1. Compositos. 2. Ensaio de tração. 3. Resina. 4. Fibra. I. Título.

CDD 720

BRENO BESSA SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
LAMINADOS DE COMPÓSITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Mestre Milene Muniz Eloy da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Mestre Mauro Andres Cerra Flórez
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe e meus avós, Renata, Zeneida e
Osmar com todo amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo;

Ao meu orientador, Prof ª Ricardo Emilio por todo o apoio e desenvolvimento deste trabalho;

A minha família Renata Viana Bessa, Zeneida Viana Bessa, Francisco Osmar Bessa que sempre me apoiou independentemente da situação estava sempre ao meu lado me dando todo o suporte emocional necessário.

Aos meus amigos de curso Patrick Melo, Dario Arrais, Aldenor Pinheiro, Caio Italo, Renardir Maciel, Hugo Diogenes que trilharam todo o caminho do curso de graduação comigo e que me ajudaram nos momentos difíceis como as provas e nos momentos fáceis como as noites virando estudando.

Aos meus amigos que trabalham comigo, Rodrigo Cristo, Raissa Furtado, Diego Bessa, Vinicius Moreira, Ligia Costa, Gustavo Lopes, por todo o apoio e compreensão enquanto eu terminava esse trabalho.

A empresa Aeris energy por ter cedido todo o material e o laboratório utilizados para a fabricação dos corpos de provas desse trabalho.

A universidade 7 de Setembro por ter cedido o seu laboratório de ensaios mecânicos,

A Universidade Federal do Ceará que foi a Instituição que estudei por durante esse período de 6 anos.

RESUMO

Para a indústria de geração de energia eólica, os materiais compósitos são considerados materiais estratégicos, pois permitem a redução de peso estrutural do rotor, mantendo o desempenho mecânico exigido para suportar as diversas situações de carregamento. A fim de otimizar e adicionar confiabilidade ao projeto, ensaios mecânicos são comumente utilizados na determinação das propriedades do produto final. Sendo estas completamente dependentes dos reforços e da forma como são arranjados durante a fabricação dos laminados. Este estudo apresenta conceitos de fabricação de compósitos, levando em conta a influência dos processos de fabricação. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar a influência dos métodos de fabricação e do seu grau de cura frente às características finais de compósitos estruturais. Definidos os processos de fabricação, os laminados tridimensionais são fabricados por processo de Hand Lay-Up e de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (Infusão). Dada sua ampla aplicação, para a fabricação dos painéis compósitos foram selecionados os tecidos de fibra TLX1190/05C02. Para o processo de laminação Hand Lay-Up foi utilizado a resina EPIKOTE™ Resin MGSTM LR 135 com endurecedor EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135. Para o processo de infusão, foi utilizado o mesmo tecido junto de uma resina apropriada para o referido processo do fornecedor DOW, sendo selecionada a resina AIRSTONE 780E Epoxy Resin, com o endurecedor AIRSTONE 786H Hardener. Os corpos de provas obtidos nas dimensões de 500 mm x 500 mm foram caracterizados por análise térmica e ensaios mecânicos (Dureza Barcol e ensaios de tração). A análise térmica evidencia que os materiais que passaram pelo processo de pós-cura obtiveram Tg suficiente que evidencie o grau de cura do laminado, enquanto que os que não passaram por tal processo estavam com seu Tg abaixo do aceitável pela norma. Os ensaios mecânicos comprovaram que, quanto mais curado o laminado, melhor a resistência do mesmo. Entretanto, para fins de processo, os laminados que foram fabricados por Infusão ou Hand Lay-Up e foram pós-curados tiveram o mesmo nível de resistência mecânica, apresentando-se indiferente para o processo.

Palavras-chave: Compósitos; Hand Lay-Up; Processo de Fabricação.

ABSTRACT

For the wind energy generation industry, composite materials are considered strategic materials, as they allow the structural weight reduction of the rotor while maintaining the mechanical performance required to withstand the various loading situations. In order to optimize and add reliability to the design, mechanical tests are commonly used in determining the properties of the final product. These are completely dependent on the reinforcements and the way they are arranged during the manufacture of the laminates. This study presents composite manufacturing concepts, taking into account the influence of manufacturing processes. Thus, the objective of this work is to study the influence of the manufacturing methods and their degree of cure against the final characteristics of structural composites. Once the manufacturing processes are defined, the three-dimensional laminates are manufactured by Hand Lay-Up and vacuum-assisted resin transfer molding (Infusion). Due to their wide application, TLX1190 / 05C02 fiber fabrics were selected for the fabrication of the composite panels. For the Hand Lay-Up lamination process, EPIKOTE™ resin Resin MGS™ LR 135 with EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135 hardener was used. For the infusion process, the same fabric was used together with a resin suitable for said DOW supplier process, AIRSTONE 780E Epoxy Resin resin is selected with AIRSTONE 786H Hardener hardener. The test bodies obtained in the dimensions of 500 mm x 500 mm were characterized by thermal analysis and mechanical tests (Barcol hardness and tensile tests). The thermal analysis showed that the materials that passed through the post-curing process obtained sufficient Tg to show the degree of curing of the laminate, whereas those that did not undergo such a process had their Tg below the standard acceptable. The mechanical tests proved that the more cured the laminate, the better the resistance of the laminate. However, for process purposes, the laminates that were manufactured by Infusion or Hand Lay-Up and were post-cured had the same level of mechanical resistance, being indifferent to the process.

Keywords: Composites, Hand Lay up, Manufacturing Process;

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Famílias de materiais compósitos	16
Figura 3.2 – Desempenho mecânico das resinas termorrígidas mais utilizadas em função da temperatura de serviço.....	21
Figura 3.3 - Variação do volume específico de um polímero com a temperatura.....	22
Figura 3.4 - Evolução do módulo de elasticidade em função da temperatura: a) termoplástico amorfó; b) Termoendurecível; c) termoplástico semicristalino	23
Figura 3.5 – Tipos de tecido (a) plain weave, (b) twill, (c) HS weave.....	26
Figura 3.6 – Formas de distribuição do reforço na matriz polimérica	26
Figura 3.7 – Principais tipos de orientação de fibras em reforços estruturais; (a) unidirecional, (b) bidirecional, (c) quadriaxial.....	27
Figura 3.8 – Propriedades dos materiais compósitos frente aos materiais convencionais (....	27
Figura 3.9 - Empilhamento de camadas de fibras com orientação definida.....	28
Figura 3.10 – produtividade e performance	30
Figura 3.11 – Processo de Infusão.....	30
Figura 3.12 – Representação esquemática do processo de Infusão VARTM	31
Figura 3.13 – Representação esquemática do processo de laminação “HAND LAY UP”.....	32
Figura 3.14- Curva de ensaio de tração	33
Figura 3.15 - Modos de falhas típicos – ensaios de Resistencia a Tração ASTM (D3039)....	34
Figura 3.17 – Analise DSC.....	35
Figura 3.17- Durómetro de Barcol	36
Figura 4.1 – Fluxograma de metodologia empregada neste trabalho	37
Figura 4.2 – Corte dos tecidos	40
Figura 4.3 – Vista lateral da preparação dos tecidos	40
Figura 4.4 – Tecidos laminados	40
Figura 4.5 – Laminação dos tecidos com Vácuo	41
Figura 4.6 – Infusão sem membrana	42
Figura 4.7 – Infusão sem membrana	42
Figura 4.8 – Laminados feitos pelo processo de Infusão	43
Figura 4.9 – Laminados feitos pelo processo de Hand Lay-Up	43
Figura 4.10 – Durômetro Barcol 934/1	44
Figura 4.11 – Ensaio de dureza Barcol	44
Figura 4.12 – Amostra para caracterização.....	45
Figura 4.13 – Aquecimento do laminado.....	45
Figura 4.14 – Reforço após aquecimento do laminado	46
Figura 4.15 – Preparação da amostra para medição de Tg	46
Figura 4.16 – Prensagem do cadiño.....	47
Figura 5.1 – Analise de grau de Cura da amostra 3	50
Figura 5.2 – Tração a 45°.....	50
Figura 5.3 – Tração a 90°.....	51
Figura 5.4 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 1	51
Figura 5.5 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 2	52
Figura 5.6 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 3	53
Figura 5.7 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 4	54
Figura 5.8 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 5	55
Figura 5.9 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 6	55
Figura 5.10 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 7	56
Figura 5.11 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 8.....	56
Figura 5.12 – Corpos de prova após ensaio de tração	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Valores típicos de resistência mecânica, características e aplicações de resinas termorrígidas.....	20
Tabela 3.2 – Comparativo de propriedades entre as fibras mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos.....	25
Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos estruturais.....	28
Tabela 4.1 – Construção do tecido não tramaado	38
Tabela 4.2 – Propriedades da Resina de hand lay-up (EPIKOTE™ Resin MGS™ LR 135) 38	
Tabela 4.3 – Propriedades do Endurecedor da resina de hand lay-up (EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135)	38
Tabela 4.4 – Mix de cura resina e endurecedor do processo de hand lay-up;	38
Tabela 4.5 – Propriedades da Resina de Infusão (AIRSTONE 780E Epoxy Resin)	39
Tabela 4.6 – Propriedades da Resina de Infusão (AIRSTONE 786H Hardener)	39
Tabela 4.7 – Mix de cura resina e endurecedor do processo de hand lay	39
Tabela 4.8 – Lista de materiais do Primeiro plano de Infusão.....	42
Tabela 4.9 – Lista de materiais do Segundo plano de Infusão.....	42
Tabela 4.10 Amostras avaliadas.....	44
Tabela 5.1 - Comparaçao entre relação fibra-resina processo Hand Lay Up	48
Tabela 5.2 - Comparaçao entre relação fibra-resina processo de Infusão	48
Tabela 5.3 – Grau de cura dos corpos de provas fabricados pelo processo de Hand lay up....	49
Tabela 5.4 – Grau de cura dos corpos de provas fabricados pelo processo de Hand Infusão ..	49
Tabela 5.5 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 1	51
Tabela 5.6 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 2.....	52
Tabela 5.7 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 3	52
Tabela 5.8 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 4.....	53
Tabela 5.9 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 5	54
Tabela 5.10 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 6.....	55
Tabela 5.11 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 7	56
Tabela 5.12 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 8.....	56
Tabela 5.13 – Tabela de dados de ensaio de dureza de todas as amostras	57
Tabela 5.14 – Tabela de dados de espessura das amostras	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Compósitos	15
3.2 Matriz	17
3.2.1 Temperatura de Transição Vitrea (T_g)	22
3.3 Reforços	23
3.4 Propriedades dos Compósitos	27
3.5 Processamento dos Compósitos	28
3.6 Caracterização mecânica	32
3.7 Analise térmica	34
3.8 Ensaio de dureza Barcol	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 Materiais.....	37
4.2 Laminação pelo processo de Hand Lay-up	40
4.3 Laminação pelo processo de Infusão.	41
4.4 Amostras.....	43
4.5 Ensaio de Dureza Barcol.....	44
4.6 Caracterização da composição das amostras.....	46
4.7 Avaliação da temperatura de transição vítreia	47
4.8 Determinação das propriedades mecânicas	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1 Determinação da relação de fibra resina dos corpos de prova.....	48
5.2 Determinação do grau de cura dos laminados.....	50
5.3 Ensaios de tração	50
5.4 Ensaios de Dureza Barcol	57
5.5 Espessura dos corpos de provas	58
6 CONCLUSÕES.....	59
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de redução de custos, aliada à necessidade de propriedades mecânicas mais elevadas, tem incentivado empresas, de um modo geral, a aperfeiçoar seus processos e buscar alternativas para a produção de novos produtos. Na indústria aeronáutica e na indústria eólica, em especial, a busca por produtos estruturais mais leves e resistentes mecânica e termicamente, produzidos por processos de manufatura com repetibilidade e produtividade, capazes de atender aos níveis de resistência mecânicos requeridos, fez com que a utilização dos compósitos se tornasse um diferencial competitivo.

Atualmente, as indústrias, que tradicionalmente utilizam ligas metálicas, voltaram-se para a pesquisa e o desenvolvimento de compósitos poliméricos, os quais apresentam vantagens, quando comparados aos metais, como maiores resistências à corrosão e à fadiga, além de elevado desempenho mecânico associado a baixo peso. Esse conjunto de propriedades confere a essa classe de materiais aplicações atuais e futuras. Neste contexto, o processo de moldagem por transferência de resina (RTM) é considerado promissor, pois apresenta custo competitivo para a fabricação de estruturas aeronáuticas em materiais compósitos (LAURENZI, 2013; LAURENZE E MARCHETTI, 2012; KURCKENBERG E PATON, 1998).

Atualmente, os materiais compósitos com propriedades específicas permitem produzir componentes estruturais de peso reduzido com elevados valores de rigidez mecânica (MCLLHAGGER; BROWN; HILL,2000; CANDIDO; REZENDE; ALMEIDA,200; HULL; CLYNE,1996; DILANDRO; BIEBENEDETTO; GROEGER,1988),

promovendo uma considerável economia de energia em comparação ao processamento do componente metálico. Estes fatores são essências para atender as especificações de projetos e para reduzir o custo operacional.

Acompanhando a evolução desses materiais, é natural que os processos de manufatura dos compósitos também tenham sido modificados, promovendo a otimização de suas propriedades. Os processos evoluíram desde a laminação manual até os automatizados e modernos como RTM , sendo as propriedades dos compósitos fortemente influenciadas pelo processo de manufatura utilizado (STRONG, 1989).

Atualmente, a produção de compósitos avançados no Brasil baseia-se na técnica de autoclave. No entanto, estudos já foram realizados nas áreas de infusão de resina com Infusão , buscando inovações para aplicação desses materiais na área de engenharia (REZENDE; BOTELHO,2000).

O conceito de compósito nos remete a relatos bíblicos, mas o uso destes como novos materiais só começou a ser efetivamente implementado, com finalidade estrutural, em aplicações militares, durante a Segunda Grande Guerra Mundial.

Inicialmente, pela facilidade de se obter peças de geometria complexas em relação aos materiais metálicos, os materiais compósitos poliméricos eram utilizados em estruturas secundárias, carenagens e peças de baixa responsabilidade estrutural. A primeira aplicação para peças primárias de alta responsabilidade estrutural começaram a ocorrer em meados de 1980, com a fabricação de lemes e algumas superfícies de controle das asas.

O amortecimento em compósitos considera uma variedade de mecanismos de dissipação de energia que dependem dos parâmetros de vibração como a frequência, amplitude, estado de tensão, e condições ambientais, como temperatura e umidade (GUAN E GIBSON, 2001).

O conhecimento de propriedades dinâmicas dos materiais também é importante para o engenheiro durante o projeto de um componente, no sentido de controle de vibração do comportem, de modo a evitar que uma estrutura falhe sob excessivos níveis de vibração e ruído, causando até mesmo falha ou mau funcionamento de outros componentes.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de laminados compósitos estruturais processados com matriz epóxi monocomponente, visando sua aplicação na fabricação de estruturas de pá eólica e, assim, promovendo a redução de seu peso e assegurando seu desempenho mecânico

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos

O termo compósito significa a combinação de dois ou mais materiais naturalmente diferentes, combinados em escala macroscópica e com o intuito de atuar como uma unidade, resultando em componentes com performances e propriedades estruturais superiores, não apresentados por nenhum dos materiais quando sozinhos. Segundo Mazumdar (2001), de forma direta, materiais compósitos são formados por uma matriz que envolve um reforço. As matrizes podem ser materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, enquanto os reforços são geralmente fibras, partículas ou whiskers.

A aplicação de compósitos varia desde utensílios de uso diário, materiais esportivos e automóveis até a utilização em componentes avançados para a indústria aeroespacial. Embora sejam mais comumente aplicados na indústria moderna, os compósitos não são atuais, pois pode ser observada a aplicação desses materiais na construção civil de civilizações antigas (compósito de barro e palha vegetal).

Os materiais compósitos são classificados de acordo com o tipo de matriz, com o tipo de reforço, com a forma da orientação e distribuição do reforço, com as propriedades mecânicas obtidas e também com a forma como são processados (Bower, 1992). Logo, uma vasta gama de materiais pode ser obtida.

Uma classificação mais genérica e abrangente pode ser definida pelo tipo de matriz, assim sendo os compósitos podem ser divididos em:

CMC – Compósitos de Matriz Cerâmica

MMC – Compósitos de Matriz Metálica

PMC – Compósitos de Matriz Polimérica

CMC demonstram boas propriedades à alta temperatura (1500°C) e são mais leves se comparados aos de matriz metálica. As matrizes cerâmicas podem ser de carbono, carbeto de silício e cerâmicas vítreas, obtidas a partir de óxidos metálicos (Buckleu e Edie, 1993). Os reforços mais utilizados são as fibras de carbono e as fibras cerâmicas, tendo como exemplo o SiC e o Al₂O₃. Desta classe de materiais, as matrizes de carbono reforçadas por fibras de carbono (CRFC), são muito utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, principalmente em freios aeronáuticos e gargantas de tubeiras de foguetes (Pardini, 2000).

Os MMC podem ser utilizados em pistões de motores automotivos, componentes de turbinas aeronáuticas, mísseis militares, reatores de fusão, entre

outros. As matrizes dos MMC) podem ser de alumínio, magnésio, titânio, cobre, níquel e outras ligas metálicas. Os reforços podem ser de fibras cerâmicas ou até mesmo fibras metálicas. A grande vantagem dos compósitos de matriz metálica é a possibilidade de operar em altas temperaturas ($\sim 800^{\circ}\text{C}$), entretanto existem dificuldades de processamento e o custo é consideravelmente maior, quando comparado aos PMC (Askeland, 1996).

Embora apresente limitações em relação à temperatura, o uso de compósitos com matriz polimérica tem sido mais comum na indústria. Além disso, considerando as exigências estruturais de aeronaves, os PMC são materiais mais comumente utilizados, dado à versatilidade e flexibilidade de processamento de suas matrizes.

Figura 3.1 – Famílias de materiais compósitos.



Fonte: CALLISTER, 1985.

Os polímeros estruturais reforçados são basicamente caracterizados por um elemento de reforço normalmente fibroso e um elemento polimérico que fundidos caracterizam um terceiro material com propriedades físico-químicas mistas destes dois constituintes. Os esforços são transferidos pela matriz e suportados pelo reforço, sendo que a sinergia entre os materiais é normalmente garantida pelos elementos de ligação presentes no tratamento superficial das fibras.

O projeto de componentes em compósitos reforçados é marcado pela característica anisotrópica, ou seja, propriedades distintas em diferentes direções, o que dificulta a previsão dos modos de falha, implicando no uso de elevados coeficientes de segurança, subutilizando as potencialidades do material (TITA, CARVALHO E LIRANI, 2003).

É importante ressaltar que, dentro da classe de compósitos estruturais, a presença das estruturas do tipo sanduíche, com núcleos porosos como madeiras, espumas e estruturas do tipo colmeia, que conferem alta rigidez flexional aliada a baixas densidades e consequentemente baixo peso estrutural.

Os representantes dos elementos fibrosos mais relevantes são as fibras de carbono, aramida e vidro.

A matriz polimérica pode ser constituída basicamente por qualquer classe de polímeros termorrígidos ou termoplásticos, sendo as termofixas as mais comuns para uso estrutural por apresentarem características finais particularmente interessantes. Embora as fibras de reforço mais importantes sejam as de carbono, aramida e vidro, muitos estudos vêm sendo conduzidos para a utilização de fibras vegetais, porém sua aplicação ainda não está suficientemente desenvolvida para concorrer em projetos estruturais com as fibras tradicionais, restringindo sua aplicação basicamente a itens de baixa solicitação mecânica.

Conhecer as características e propriedades de cada componente, a interação entre elas e as particularidades do processo são fundamentais para o sucesso de qualquer técnica de processamento. Para a matriz é importante ter o conhecimento de suas propriedades térmicas, físicas e mecânicas. O estudo desse conjunto de propriedades norteia a definição de parâmetros de processamento, como as temperaturas de injeção e de cura, tempo máximo de injeção, além de proporcionar uma ideia do desempenho mecânico (CANEVAROLO, 2004). O reforço é geralmente definido quanto ao seu desempenho mecânico, considerando a relação custo-benefício. Para isso, são levados em conta a qualidade e o desempenho das fibras, bem como o tipo de trama do tecido. A construção do tecido deve satisfazer as necessidades específicas de cada projeto, além de ser compatível com a técnica de processamento.

A escolha da resina e do reforço é uma etapa importante e requer uma análise previa para que seja adequada a fabricação por RTM. As otimizações desses dois fatores são fundamentais na obtenção de produtos econômicos e de alta qualidade (LAWRENCE, 2002).

3.2 Matriz

A matriz, fase contínua do compósito, é a responsável pela união das fibras e definição do formato da peça final, distribuição das tensões aplicadas no compósito, além de ser a fase que determina os parâmetros de processamento (VASILIEV; MOROZOV, 2001).

A matriz tem a função de proteger os reforços contra o ataque químico e ambiental, de transmitir as cargas mecânicas para os reforços, e mantê-los em seu devido lugar, dando forma ao material compósito final (WANBERG, 2009).

Como citado anteriormente, as matrizes podem ser poliméricas, metálicas ou cerâmicas. Durante sua seleção devem ser considerados fatores químicos, térmicos, elétricos, ambientais, desempenho mecânico, custo, inflamabilidade e requisitos de manufatura (WANBERG, 2009; MAZUMDAR, 2001).

Embora todos os materiais para matrizes tenham seu campo de aplicação, a maior parte dos compósitos estruturais produzidos é de matriz polimérica. Isto ocorre devido principalmente as suas propriedades a temperatura ambiente, baixo custo e facilidade de fabricação (REZENDE; BOTELHO,2000).

A matriz perfeita deve ser capaz de redistribuir constantemente a carga aplicada, ou seja, se uma fibra se romper, a carga anteriormente suportada por ela deve ser imediatamente transferida para as fibras adjacentes. Portanto, é de suma importância que a matriz possua uma boa tenacidade e dureza suficientemente baixa para evitar que a capacidade de distribuição de carga seja prejudicada (VASILIEV; MOROZOV, 2001).

Os PMC podem ser divididos em duas classes: matrizes termoplásticas e matrizes termorrígidas. À princípio, esses dois tipos diferem basicamente pela processabilidade e propriedades mecânicas. As matrizes termoplásticas podem ser reprocessadas, permitindo reciclagem. Entretanto, quando na presença de altas temperaturas, reduzem o modulo elástico drasticamente. As matrizes termorrígidas têm aplicações predominantes no setor aeronáutico. As matrizes termorrígidas são de baixo custo e apresentam propriedades elásticas superiores aos compósitos obtidos com matrizes termoplásticas. Os compósitos de matriz termorrígida são o foco de estudo no presente de trabalho.

As matrizes poliméricas, especialmente as termorrígidas são as mais usadas na fabricação de materiais avançados. No entanto, essa opção deve vir acompanhada pelo cuidadoso estudo térmico das matrizes, visto que a temperatura de operação da peça fabricada será limitada pela matriz. Nos termorrígidos, o aquecimento além do limite de estabilidade térmica promove sua degradação, com a perda de suas propriedades mecânicas (VASILIEV; MOROZOV, 2001).

As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicações não-estruturais e semi-estruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em compósitos avançados de alta resistência, os epóxis, as bismaleimidas e as poliamidas são as referências mais comuns.

As resinas de epóxis apresentam grande variedade de formulações químicas, a maior parte baseadas no diglicidil éter de bisfenos A (DGEBA). O esquema de cura destas resinas passa pela adição de um agente endurecedor apropriado, como aminas alifáticas, aromáticas ou algumas poliamidas. O custo destas resinas é cerca de quatro vezes o preço das resinas de poliéster e cerca de duas vezes o custo das resinas de vinilester. Como vantagens principais citam-se a elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos), boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, grande estabilidade e temperaturas de funcionamento tipicamente entre 100 e 220°C. Apresentam boa processabilidade, embora inferior à apresentada pelas resinas

de poliéster, face às maiores viscosidades iniciais e aos tempos de cura longos. Por outro lado, as formulações de base são algo frágil, mas esta deficiência é facilmente colmatada através de aditivos de alta tenacidade, tais como alguns termoplásticos como o ABS e borrachas CTBN.

Segundo Baker, Dutton e Kelly (2004), as resinas epóxi são as mais utilizadas para a produção de compósitos estruturais para a indústria aeronáutica. Elas apresentam excelentes propriedades químicas e físicas, baixa contração e boa aderência a quase todos os tipos de fibras. Outra característica da resina epóxi é que ela atinge baixa viscosidade durante o processamento, o que viabiliza os processos de fabricação por infusão. As temperaturas de cura das resinas epóxi são de 120°C e 180°C e suas temperaturas de trabalho de até 130°C e 150°C, respectivamente (BARKER; DUTTON; KELLY, 2004)

As resinas bismaleimida, por exemplo, são utilizadas em estruturas submetidas à alta temperatura (~250°C) e alta resistência. Durante o processo de cura das resinas termorrígidas, ocorre à formação de cadeias tridimensionais (ligações cruzadas). Devido ao entrecruzamento de ligações, o produto final se torna mais rígido e mais estável termicamente tornando essas resinas atrativas para aplicações estruturais. As resinas termorrígidas são fáceis de processar, principalmente porque apresentam compatibilidade com os reforços fibrosos. Os valores típicos de massa específica e resistência mecânica, as aplicações e características das resinas termorrígidas mais utilizadas são mostradas na [Tabela 3.1](#).

Tabela 3.1 Valores típicos de resistência mecânica, características e aplicações de resinas termorrígidas.

Resina	Massa Esp. [g/m ³]	Resistência à Tração [MPa]	Módulo em Tração [GPa]	Aplicações e Características
Epóxi	1,2-1,4	60-100	3,0-4,5	Peças estruturais
				Apresenta diversas formulações
				Baixa retração volumétrica na cura
Fenólica	1,2-1,4	50-60	3,0 - 4,0	Peças de interiores
				Formulação auto-extinguível
				Baixa toxidez quando em chama
Bismaleimida	1,1-1,3	75-105	3,0 - 5,0	Alta resistência à temperatura
				Boas propriedades mecânicas
				Boas propriedades elétricas
				Baixa emissão de fumaça
				Alta resistência à temperatura

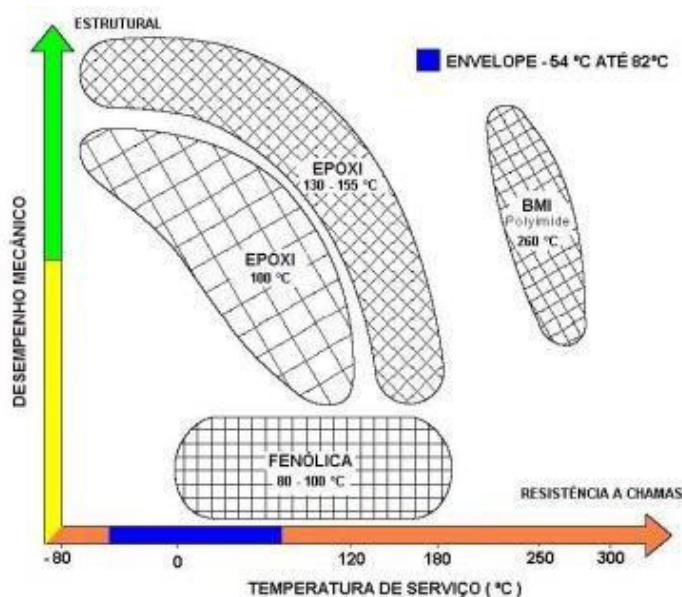
Fonte: (MAZUMDAR,2002).

As resinas termorrígidas podem ser formuladas com grande flexibilidade para atender a diferentes processos e aplicações. As resinas epóxi, por exemplo, apresentam formulações que possibilitam processar o material (temperatura de cura) a 121°C, utilizando endurecedores como a cianoguanidina, e outras formulações para processamento a 177°C, utilizando endurecedores como o difenildiaminometileno (DDM). Quanto maior a temperatura de processamento, melhor serão as propriedades mecânicas e térmicas do compósito final.

É importante determinar por meio de ensaios térmicos as temperaturas limites de trabalho que, por questões de segurança, não devem exceder a Temperatura de transição vítreia (T_g), a partir da qual as propriedades mecânicas do polímero sofrem redução acentuada.

Em geral, a temperatura de serviço é limitada em função da T_g da matriz polimérica. O MIL HDBK 17F (2002) recomenda como requisito de segurança, que a T_g do polímero utilizado como matriz na manufatura de compósitos seja no mínimo 28°C acima da temperatura máxima do envelope. A [Figura 3.2](#) apresenta comparativamente o desempenho mecânico em função da temperatura para as resinas mais utilizadas em compósitos aeronáuticos.

Figura 3.2 – Desempenho mecânico das resinas termorrígidas mais utilizadas em função da temperatura de serviço.



Fonte: (HEXCEL COMPOSITES, 1997).

Foram desenvolvidos sistemas epóxides específicos para o processo RTM, onde foram consideradas as características e os parâmetros do processo. Elas são resinas com viscosidades reduzidas para permitir a impregnação da pré-forma. Com aplicação de temperatura há um aumento da viscosidade e a cura do polímero. Os sistemas epóxi para RTM podem ser mono ou bicomponente, os mono componentes são aqueles em que o polímero e o agente de cura coexistem, de maneira pré-estabelecida, desde a síntese da resina, o que exige refrigeração constante para prolongar sua vida útil. Os bicomponentes são aqueles em que o agente de cura é adicionado ao polímero no momento da injeção da resina.

Mesmo que a matriz seja próxima do ideal (com relação linear entre tensão e deformação e elevado módulo de elasticidade) e tenha ótima compatibilidade com as fibras escolhidas, suas propriedades não serão demonstradas se a adesão entre essas fases não for boa o suficiente. A adesão promove a integridade necessária para o elevado desempenho do compósito (VASILIEV, MOROZOV, 2001).

As condições para uma boa interface são:

- Baixa viscosidade da matriz para o preenchimento adequado do tecido, inclusive os cabos de fibras;
- Boa molhabilidade da superfície do tecido;
- Fibras de carbono com alta energia superficial para que a resina se mantenha na superfície no tecido já impregnado;

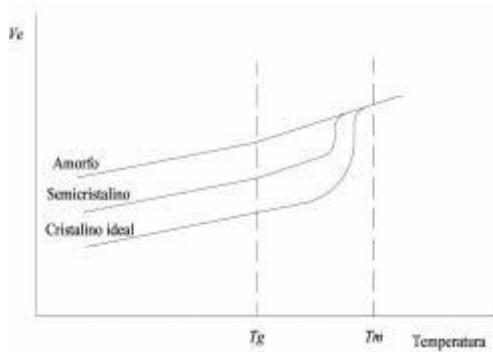
- Parâmetros de processamento bem definidos em função das características da matriz.

Ainda de acordo com Vasiliev e Morozov (2001), bons métodos de processamento RTM não requerem altas temperaturas e pressão de injeção.

- 3.3.1 Temperatura de transição vítreia (T_g)

No aquecimento ou no arrefecimento de um polímero são apresentadas fases que estão associadas a temperatura de transição, as quais podem ser observadas na [Figura 3.3](#), representativa do andamento do volume específico de polímeros termoplásticos em função da temperatura. Os polímeros total ou parcialmente amorfos são caracterizados pela sua temperatura de transição vítreia. Esta temperatura marca a mudança de um comportamento rígido para um comportamento caracterizado pelo amolecimento. Acima da temperatura de transição vítreia, o módulo reduz-se consideravelmente e os polímeros são dúcteis e facilmente deformáveis. Continuando a aumentar a temperatura, atinge-se o estado de líquido viscoso a uma temperatura designada por temperatura de fusão. Idealmente, um polímero totalmente cristalino não apresenta temperatura de transição vítreia. Quando se aproxima da temperatura de fusão, a sua estrutura sofre um colapso catastrófico passando-se a um estado de líquido viscoso, com o consequente aumento brusco do seu volume específico.

Figura 3.3 - Variação do volume específico de um polímero com a temperatura

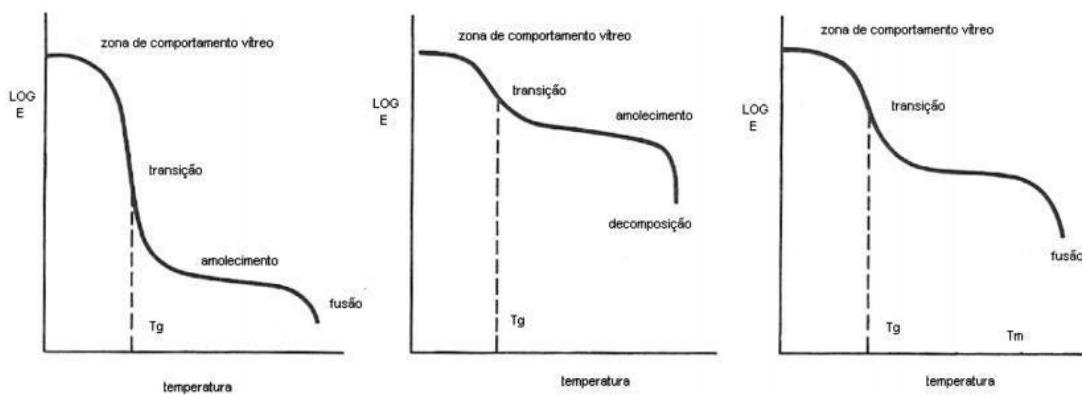


Fonte:

Os polímeros termoendurecíveis não apresentam fusão. À temperaturas elevadas degradam-se de forma irreversível. A sua temperatura de transição vítreia é controlada pelo grau de reticulação da estrutura e, normalmente, as alterações são muito menos acentuadas do que nos termoplásticos. A medição da temperatura de transição vítreia em polímeros é realizada recorrendo a métodos como a calorimetria diferencial de varredura (DSC) ou análise térmica diferencial (DTA).

Os efeitos de transição vítreo e da fusão no comportamento mecânico dos polímeros são facilmente perceptíveis pela análise da evolução do módulo de elasticidade com a temperatura, como demonstrado na [Figura 3.4](#). Um termoplástico amorfóso apresenta uma considerável alteração das propriedades mecânicas para a temperatura de transição vítreo. Assim, a temperatura máxima de utilização de um termoplástico amorfóso deve ser inferior a um polímero termoendurecível que sofre alterações muito menos pronunciadas a esta temperatura, devido ao elevado grau de reticulação. Contudo a temperatura máxima de utilização não deve exceder, para evitar fenômenos de fluência e relaxação acentuados. Os polímeros semicristalinos apresentam igualmente pequenas variações de propriedades à temperatura de transição vítreo, devido à presença das regiões cristalinas da matriz. Neste caso é corrente a utilização a temperaturas compreendidas entre 70 e 100°C, pois abaixo de 70 °C os polímeros semicristalinos são geralmente bastante frágeis.

Figura 3.4 - Evolução do módulo de elasticidade em função da temperatura: a) termoplástico amorfóso; b) Termoendurecível; c) termoplástico semicristalino



3.4 Reforços

Os reforços podem ser formados por diferentes tipos de fibras, bem como diferentes arranjos (REZENDE; BOTELHO,2000).

As fibras de vidro foram às primeiras utilizadas para reforçar compósitos avançados. No entanto, o padrão requerido pela indústria aeronáutica no que diz respeito a fabricação de componentes estruturais só foi atingido com o desenvolvimento das fibras de carbono, um importante passo para o aumento de rigidez dos compósitos (VASILIEV; MOROZOV,2001; REZENDE; BOTELHO,2000).

As principais funções do reforço em um compósito estrutural são suportar a carga mecânica aplicada, prover rigidez e estabilidade ao sistema (MORGAN, 2005). Os principais reforços utilizados para a fabricação de compósitos estruturais são as fibras de carbono, de vidro e aramida. Dentre estas se destaca a fibra de carbono devido às propriedades, como baixa massa específica (1,7 a 2,2 g/cm³), ampla faixa de módulos (230 – 966 GPa), boa estabilidade e condutividade térmica, além de baixo coeficiente de expansão térmica e baixa resistividade elétrica (MORGAN, 2005).

As fibras podem ser classificadas quanto ao tipo de precursor, propriedades mecânicas (resistência e modulo), e temperatura de tratamento final. Uma classificação comercial bastante utilizada diz respeito às propriedades de resistência e módulo, podendo então ser classificadas como fibras de alta resistência, ultra-alta resistência, baixo modulo, modulo intermediário, alto modulo e ultra-alto modulo (CHUNG, 1994).

As fibras de carbono são utilizadas como reforço em peças aeronáuticas que precisam suportar grandes cargas, como as superfícies de comando, empenagens vertical e horizontal, portas de trem de pouso, capôs de motores, fuselagens entre outras. Também são consideradas como alternativa o uso de fibras de vidro, principalmente quando a necessidade de redução de peso sobrepõe-se aos custos, mesmo em peças que não requerem elevadas propriedades mecânicas como é o caso de carenagens, de painéis de piso entre outras.

As fibras de carbono são manufaturadas por pirolise controlada de precursores em forma de fibras. Uma grande variedade de fibras precursoras pode ser utilizada para produzir a fibra de carbono, sendo as mais comuns a fibra de celulose, a poliacrilonitrila (PAN), o piche de petróleo e o alcatrão de hulha (CAMPBELL; LEVY; PARDINI, 2006).

As fibras de vidro são de menor custo e de propriedades inferiores se comparadas as fibras de carbono, portanto tem grande aceitação na fabricação de carenagens e peças de baixo requisito estrutural. Porem as fibras de vidro vem perdendo bastante espaço no mercado aeronáutico, uma vez que o preço da fibra de carbono (US\$12,00 -15,00/Kg) tem decaído acentuadamente nos últimos anos em função da alta demanda e das virtudes que lhe é peculiar (WARREN, 2003).

As fibras de aramida também têm substituído as fibras de vidro em diversas aplicações, principalmente pela baixa massa específica frente as fibras de vidro. Quando submetidas a esforço de tração, as fibras de aramida são comparáveis às fibras de carbono, possuindo também ótima resistência ao impacto. Porém, por ser uma fibra polimérica, apresenta baixos valores de resistência a compressão e cisalhamento interlaminar, além de dificultar a usinabilidade do compósito. A Tabela 3.2 mostra comparativamente as propriedades das fibras de carbono, vidro e aramida.

Tabela 3.2 – Comparativo de propriedades entre as fibras mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos.

Tipo de Fibra	Massa Esp. [g/m³]	Resistência à Tração [MPa]	Módulo em Tração [GPa]
Carbono Alto Módulo	1,8-1,9	1500-3500	300-500
Carbono Alta Resistência	1,7-1,8	>3000	200-280
Vidro Tipo E	2,54	2400	70
Vidro Tipo S	2,5	3450	85
Aramida Kevlar 49	1,45	2800	140

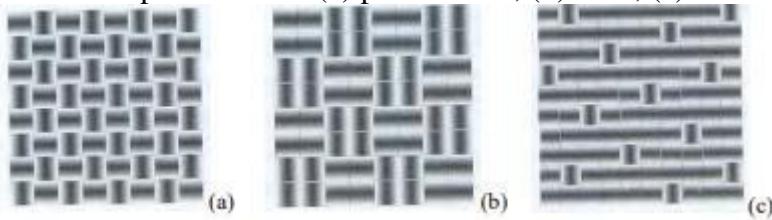
A superfície das fibras, em sua maioria, é tratada para garantir a adesão com a matriz. O tratamento é feito no decorrer do processo de fabricação por meio de modificadores da sua superfície por plasma, ácido ou recobrimento com material metálico ou cerâmico (VASILIEV; MOROZOV,2001).

Para compósitos processados por RTM, o reforço é aplicado pré-formado, ou seja, no formato do produto final como um esqueleto da peça a ser processada. Quando devidamente tramados, os tecidos de carbono podem atingir resistência e tenacidade de um material metálico com significativa redução de peso (HEXCEL COMPOSITES, 2010).

As propriedades mecânicas dos compósitos são diretamente influenciadas pelo formato, dimensões e arquitetura dos reforços. As fibras de carbono como reforço estrutural podem apresentar-se de diversas formas, sendo as mais comuns em forma de roving, tapes, mantas, pré-formas e tecidos 2D e 3D. Para a produção de compósitos poliméricos estruturais, o mais empregado atualmente são os tecidos que podem ser encontrados em uma vasta gama de materiais, tipos de trama de tecido utilizados na produção de compósitos estruturais. A [Figura 3.5](#) apresenta os principais tipos de trama de tecido utilizados na produção de compósitos estruturais.

Os tecidos são extensivamente utilizados em processos de moldagem líquida, como RTM, pois podem ser obtidas melhores propriedades mecânicas através da orientação das fibras, visto que a ondulação interfere na permeabilidade, sendo maior tecido do tipo plain weave (PARNAS,2000).

Figura 3.5 – Tipos de tecido (a) plain weave, (b) twill, (c) HS weave.



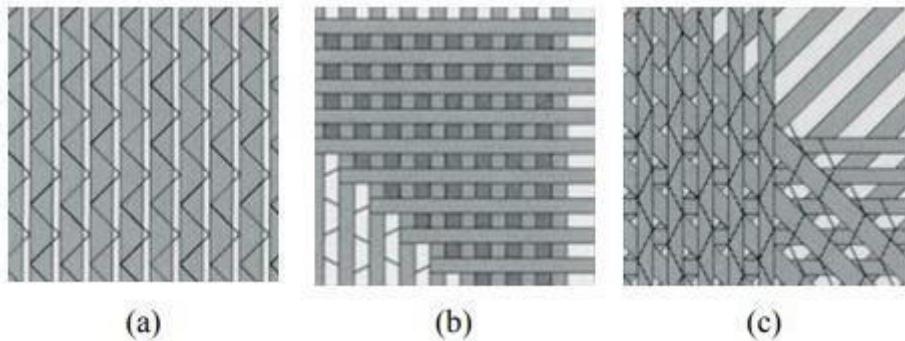
Quanto a forma pelas quais os reforços são dispostos na matriz polimérica, os compósitos podem ser classificados em particulados, fibras curtas ou descontínuas (alinhas ou desalinhadas) e fibras longas ou continuas (na forma de fitas ou tecidos) conforme mostra a [Figura 3.6](#).

Figura 3.6 – Formas de distribuição do reforço na matriz polimérica.



A orientação das fibras nos compósitos é um ponto crucial, pois a fibra alcançará suas melhores propriedades na direção do seu comprimento e não da sua secção transversa. A orientação das fibras também apresenta uma elevada importância na concepção de materiais anisotrópicos, que por sua vez, apresentam propriedades diferentes de acordo com a direção em que as fibras são observadas ou medidas. A orientação da fibra no compósito pode ser determinada na etapa de projeto (o chamado lay-up) (HABERKERN,2006). A [Figura 3.7](#) ilustra os principais tipos de orientação de fibras empregados em reforços estruturais.

Figura 3.7 – Principais tipos de orientação de fibras em reforços estruturais; (a) unidirecional, (b) bidirecional, (c) quadriaxial.



3.5 Propriedades dos Compósitos

Os materiais compósitos além de apresentar boas propriedades mecânicas aliadas a sua baixa massa específica eles apresentam vantagens sobre outros materiais isotrópicos convencionais (metais, cerâmicos e polímeros). A [Figura 3.8](#) mostra propriedades e o espectro no qual cada material compósito se inserem. Pode-se verificar que a resistência de compósitos pode variar de 100 a 1500 MPa, enquanto o modulo elástico pode variar de 6 até 200 GPa.

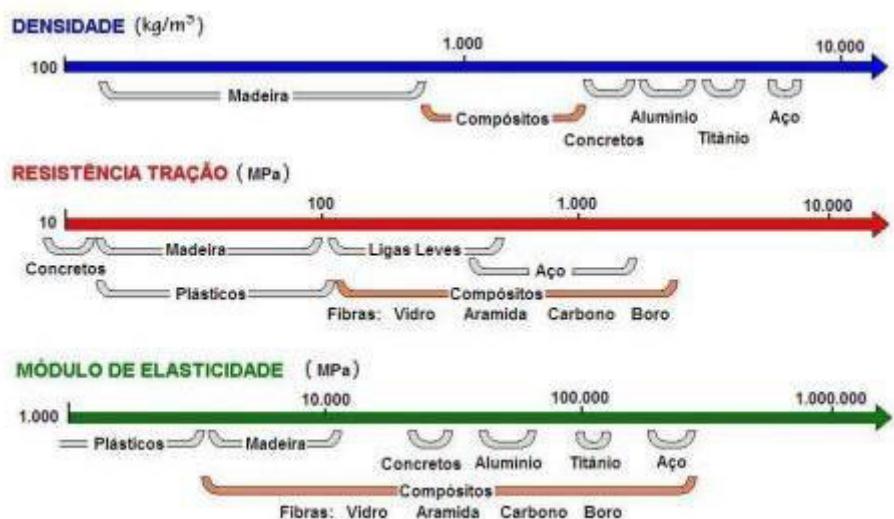


Figura 3.8 – Propriedades dos materiais compósitos frente aos materiais convencionais (Hexcel composites,1997).

A [Tabela 3.3](#) mostra algumas vantagens e desvantagens dos materiais compósitos estruturais.

Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos estruturais.

Vantagens	Desvantagens
Redução de peso	Alto custo da matéria-prima e fabricação
Melhor performance estrutural	Fratura catastrófica
Flexibilidade para ser projetado	Análise mecânica do material é difícil
Necessidade de usinagem posterior reduzida	Limitação da temperatura de trabalho
Potencial para baixo custo	Usinabilidade limitada
Resistência à corrosão	Pouca resistência ao impacto
Vida longa em fadiga	Necessitam de proteção contra raio
Redução de custos de manufatura devido a integração de componentes	Comportamento do material com defeitos é desconhecido

Fonte:

Os materiais compósitos podem ser processados de várias maneiras. Em geral, os compósitos de uso aeronáutico são manufaturados pelo empilhamento de laminas sucessivas, conforme demonstra a [Figura 3.9](#). O número de camadas, a orientação e a sequência de empilhamento das camadas de uma peça estrutural são determinadas em função do carregamento a que será submetida. Em geral, os laminados são simétricos e balanceados para evitar problemas de manufatura, como por exemplo, o empenamento da peça (Daniel, 1994; Peters, 1998).

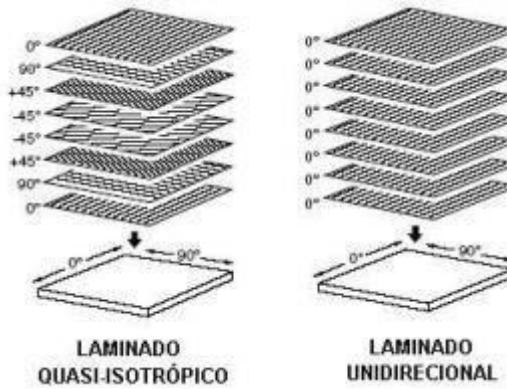


Figura 3.9 - Empilhamento de camadas de fibras com orientação definida.

3.5 Processamento de compósitos

Uma das características do processamento dos materiais compósitos é que as peças são obtidas praticamente na geometria desejada e há, portanto, uma mínima necessidade de serem

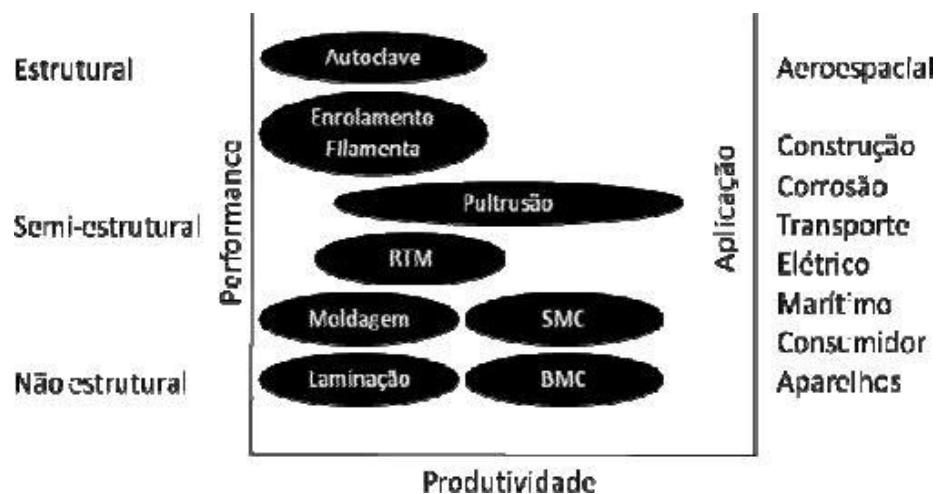
usinadas ou desbastadas. A redução da utilização de matéria-prima é um dos fatores a ser considerado quando da definição do processo de fabricação de uma determinada peça.

Atualmente existe uma vasta gama de opções de matérias-primas e métodos para a fabricação de materiais compósitos estruturais. Os métodos de produção podem ser manuais e automatizados e a moldagem pode ser efetuada em molde aberto ou fechado. Os moldes abertos podem ser do tipo macho ou fêmea e os fechados incorporam simultaneamente as características dos moldes tipo macho e fêmea (CAMPBELL, 2006).

O processo de manufatura de materiais compósitos pode ser classificado em função do tipo de tecnologia da matéria-prima utilizada. Por exemplo, pode-se utilizar a tecnologia de pré-impregnados (fibras previamente impregnadas com sistemas de resina) para processo como laminação manual e laminação automática, ou processos em que as fibras são impregnadas durante o processo de obtenção da peça como o RTM e suas variações, enrolamento filamentar, pultrusão etc... (PETERS, 1998; MAZUMDAR, 2002, VERREY2006).

A produtividade ainda é uma das barreiras para o desenvolvimento dos materiais compósitos A [Figura 3.10](#) demonstra alguns dos processos produtivos em um cenário de desempenho, onde é possível observar que os modelos de autoclave e enrolamento filamentar, que apresentam alto desempenho estrutural, são limitados em termos de produtividade (100 a 1 mil peças por ano) se comparados por exemplo a um processo de pultrusão que pode entregar cerca de 100 mil peças por ano. É conveniente fazer esse tipo de comparação devido ao alto custo atualmente atribuído a manufatura de componentes em compósitos, especialmente para mercados de altos volumes, como os automotivos e de bens de consumo, com volumes de produção da ordem de 1 milhão de unidades por ano. Os processos produtivos mais importantes em compósitos em termos estruturais são os de autoclave, enrolamento filamentar, pultrusão e *resin transfer molding* (RTM). Na [Figura 3.10](#) são apresentados ainda os processos de moldagem por contato, laminação manual, *sheet moulding compound* (SMC) e *bulk moulding compound* (BMC).

Figura 3.10 – produtividade e performance (AZOM,2001)



De acordo com Mazumdar (2001), os materiais e métodos para a fabricação de componentes devem ser selecionados levando-se em consideração: a taxa de produção esperada, custo, tamanho e forma da peça, condições ambientais e esforços a serem aplicados na peça, dentre outros. Dentre as diversas técnicas para a fabricação de compósitos poliméricos estruturais, destacam-se os processos de resina, a moldagem manual com cura em autoclave.

Figura 3.11 – Processo de Infusão



O processo que tem maior maturidade na indústria é sem dúvida o processo de laminação (“hand lay-up”) onde se utiliza como matéria-prima os materiais pré-impregnados e a cura se processam em autoclave. Neste processo são obtidas peças de alta qualidade, alta fração volumétrica de fibras (acima de 55%), com volume de vazios menor que 2%. (Abraham,1998).

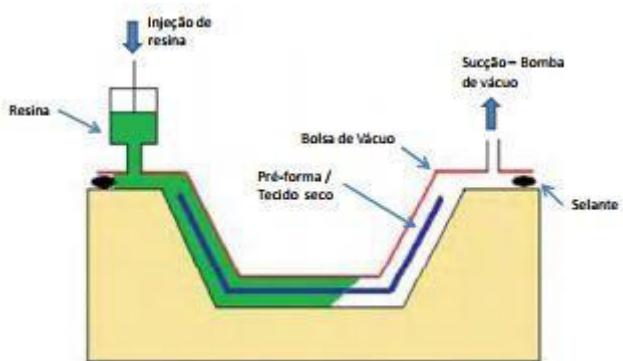
Se a moldagem é realizada em molde rígido fechado (bi-partido macho/fêmea) e a infusão de resina é realizada pela aplicação de pressão de injeção positiva, este processo é mais conhecido pela sigla RTM – *Resin Transfer Molding*. Por outro lado, se a injeção ocorrer em molde rígido fechado por bolsa de vácuo e sem a aplicação de pressão positiva, mas

somente utilizando vácuo para auxiliar a infusão, este processo é comumente conhecido pela sigla VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (CAMPBELL, 2006).

O VARTM é um processo de infusão em molde fechado, utilizado na manufatura de compósitos, no qual apenas um dos lados do molde é rígido. Consiste basicamente em posicionar camadas de tecidos reforçadores secos sobre o molde rígido e envolver estas camadas de tecido com uma bolsa de vácuo, então injetar a resina por uma extremidade da peça e simultaneamente aplicar vácuo na outra extremidade. Neste processo o vácuo tem a função de direcionar a frente de resina, além de eliminar as possíveis porosidades causadas pelo ar e voláteis liberados na reação de cura (GOVINGNON, 2008)

A cura da resina injetada ocorre à temperatura ambiente ou através de uma fonte de aquecimento externa, após a cura a peça é então desmoldada. A [Figura 3.12](#) mostra uma típica montagem de bolsa de vácuo para infusão utilizando processo VARTM.

Figura 3.12 – Representação esquemática do processo de Infusão VARTM



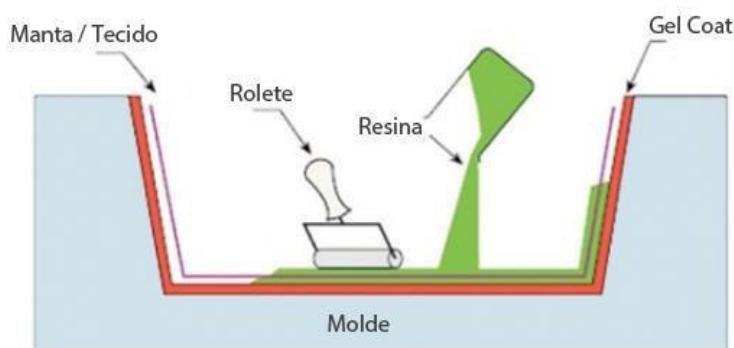
A produção de compósitos por VARTM contendo reforço de fibras secas faz com que seja necessária a utilização de uma matriz polimérica de baixa viscosidade para que haja uma impregnação completa deste reforço pela matriz (JONHSON, PITCHUMANI, 2006).

As Vantagens da técnica do processo VARTM frente aos demais processos de fabricação compósitos como: (a) baixa emissão de voláteis;(b) baixo percentual de porosidade e vazios nas peças fabricadas; (c) potencial para fabricação de peças de grandes dimensões contendo um grande teor de reforços (75 -80% em massa de fibra pré-formada) (GRUJICIC; CHITTAJALLU; SHAWN,2005).

O processo de laminação manual inicia com a deposição de um agente desmoldante sobre o molde. Além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, este produto evita a aderência da peça no molde, contribuindo para um melhor acabamento da superfície do laminado. Os tipos principais são ceras e filmes e sua aplicação deve ser feita sobre molde

limpo e seco. Após são colocadas sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas pela matriz (carvalho (1992) comenta que tanto os reforços quanto a resina são colocados manualmente sobre o molde, com rolos de pintos ou pinceis. Após a adição do iniciador a resina permanece líquida durante algum tempo antes da etapa de vitrificação as fibras de vidro são assentadas no molde e as bolhas de ar são removidas com roletes compactadores, enquanto a resina ainda se encontra em estado líquido. (ABMANCO,2009; MARINUCCI,2001).

Figura 3.13 – Representação esquemática do processo de lamination “HAND LAY UP”.



3.3 Caracterização mecânica

A realização de ensaios mecânicos nos compósitos poliméricos estruturais permite conhecer as propriedades dos materiais produzidos por determinado processo de fabricação utilizado. Segundo Costa (2001), as imperfeições (vazios, trincas, descontinuidades, delaminações, dentre outras) geradas no processo de fabricação dos compósitos estruturais podem influenciar drasticamente as propriedades causando perda da resistência, rigidez e redução da vida dos compósitos, muitas vezes podendo resultar em falhas catastróficas.

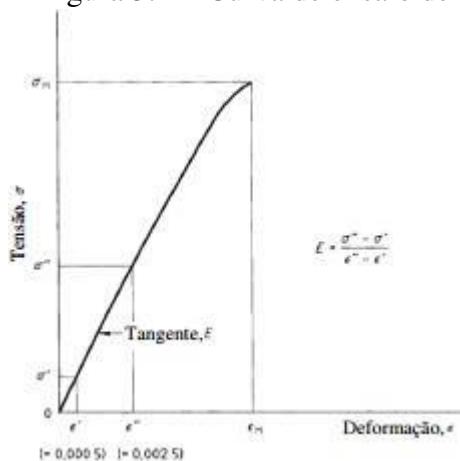
O ensaio de resistência tração é um dos ensaios mecânicos mais utilizados para a caracterização de materiais, pois embora o material seja testado em condições em algumas vezes diferentes das quais será submetido, a relação entre os resultados obtidos e os custos versus a complexidade do ensaio é muito boa (TEWFIC; SARHADI,2000).

O ensaio mecânico de Tração tem como objetivo específico determinar a tensão de ruptura do material e o módulo de elasticidade (E). Essas duas informações são muito utilizadas no projeto de componentes visando a prevenção de falhas catastróficas. Quando conduzido sob condições controladas, o teste pode fornecer informações sobre o comportamento do material sob tensão, como delaminação e cisão, bem como a maneira que

as falhas se iniciam (HODGKINSON,2000).

Os ensaios de tração são normalmente baseados na norma ASTM D3039, que é especialmente designada para a avaliação das propriedades de compósitos de matrizes poliméricas, reforçados com fibras de elevada resistência. Tal como padroniza desde as dimensões dos corpos de prova a serem testados até a avaliação dos resultados obtidos. Nos ensaios de resistência à tração, as propriedades testadas são predominantemente propriedades dos reforços.

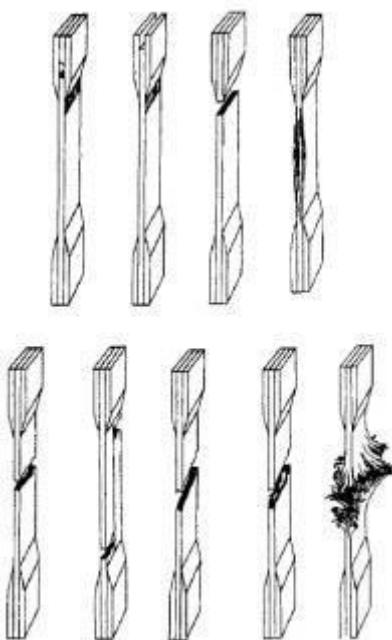
Figura 3.14- Curva de ensaio de tração



Alguns fatores têm influência direta sobre os resultados obtidos em um ensaio de tração, dentre eles pode-se citar a preparação, as condições e dimensões dos corpos de prova, a velocidade do teste, o alinhamento do sistema e a fixação dos corpos de prova na máquina (ASTM D3039).

Os modos de falhas típicos obtidos nos ensaios de resistência à tração em compósitos, segundo a ASTM D3039 são apresentados na [Figura 3.15](#).

Figura 3.15 - Modos de falhas típicos – ensaios de Resistencia a Tração ASTM (D3039).



3.4 Analise térmica

Analise térmica é um termo definido como um grupo de técnicas que mensura a mudança de propriedades químicas ou físicas em função da temperatura. Entre as diversas analises pode-se mencionar a determinação de decomposição, grau de pureza, entalpia de reação, pureza, oxidação, temperatura de transição vítreia, calor específico, temperatura de fusão condutividade térmica, entre outras.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância, da qual se deseja extrais as propriedades, e o material de referência é medida enquanto ambos são submetidos a uma programação controlada de temperatura (IONASHIRO, 2004).

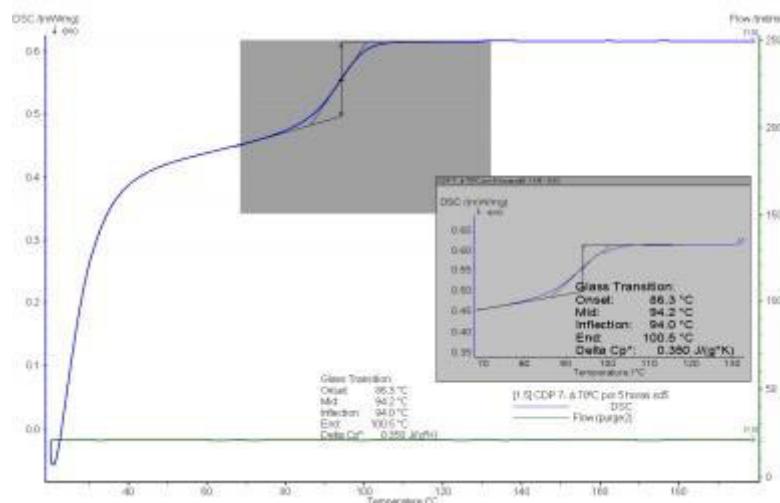
Os equipamentos para a realização das análises de DSC podem ser divididos em dois grupos: DSC de fluxo de calor e DSC de compensação de potência. No DSC de fluxo de calor, tanto o material em estudo quanto o material de referencia, são posicionados em um mesmo módulo de aquecimento e a diferença de temperatura entre as amostras são registradas por termopares (MENCZEL; PRIME, 2009).

Uma vez que a variação da temperatura, em um dado momento é proporcional à variação da entalpia, à capacidade calorifica e a resistência térmica total ao fluxo calórico,

estas propriedades são geradas indiretamente (CANEVAROLO, 2003). Os dados gerados pela realização da técnica DSC são expressos de forma gráfica, sendo que no eixo das abcissas relata-se a temperatura ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$) e no eixo das ordenadas o fluxo de calor (W). Esta técnica permite detectar pontos como transição vítreo (T_g) temperatura de cristalização (T_c), temperatura de fusão (T_m) e medidas de calor específico (C_p) e calor de fusão (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001).

Na [Figura 3.16](#) é possível observar informações obtidas da medição DSC onde as mesmas são de 1°Tg (primeira deflexão da curva), 2°Tg (ponto médio entre o 1° e o 3°Tg) 3°Tg (segunda deflexão) para o primeiro aquecimento, que reflete a condição das amostras recebidas e do segundo aquecimento, que mensura o potencial de cura da amostra (Tg máximo).

. Figura 3.16 – Analise DSC



3.5 Ensaio de dureza Barcol

O ensaio de dureza Barcol tem como objetivo medir a dureza superficial de resinas e Gel Coats comprovando o grau de cura dos Mesmos. Normalmente os valores são fornecidos pelos fabricantes e estão entre 30 e 50 Barcol. O método de barcol é uma forma de avaliar a dureza de um material através da medida da resistência a penetração de uma ponta de aço forçada por uma mola. No instrumento de medição, chamado de durometro de Barcol,e nele há uma escala entre 0 e 100.

O método de Barcol é um método de medição que é usado para obter a dureza de ligas de alumínio, metais de baixa dureza, como chumbo e latão, polímeros, borrachas e couro. Além disso, é usado para medir o nível de cura de resinas. Este ensaio é normatizado pela ASTM D2583 e (Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means

of a Barcol Impressor) e pela ASTM B648 (Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Barcol Impressor).

Figura 3.17- Durómetro de Barcol



[934-1 Operation Video](#)

Typical Barcol hardness value of common aluminum alloy materials

Aluminum Alloy	1100-O	3003-O	3003-H14	2024-O	5052-O	5062-H14	6061-T6	2024-T3
Barcol Hardness Value	35	42	56	60	62	75	80	85

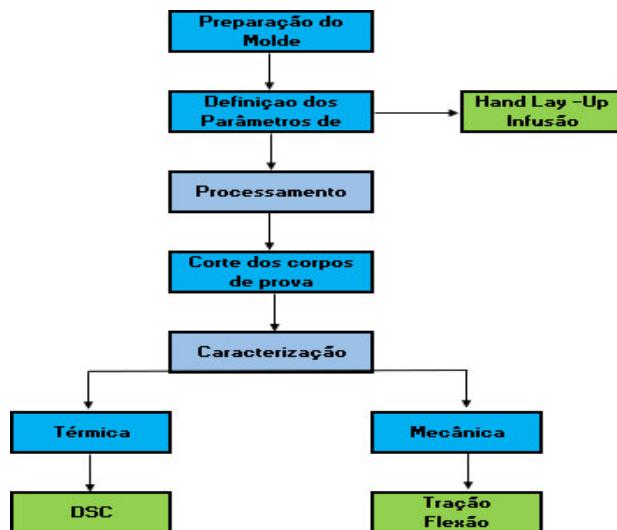
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Todos os materiais que foram utilizados para a fabricação dos corpos de provas foram cedidos pela empresa AerisEnergy, junto dos ensaios de DSC e análise de composição Fibra-Resina. O ensaio de tração foi feito no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade 7 de Setembro.

O fluxograma da Figura 4.1 descreve de maneira geral todas as etapas de obtenção e caracterização do material desenvolvido.

Figura 4.1 – Fluxograma de metodologia empregada neste trabalho



Dada sua ampla aplicação, para a fabricação dos painéis compósitos foram selecionados os tecidos de fibra **TLX1190/05C02**. Para o processo de laminação “Hand Lay-Up” foi utilizado a resina EPIKOTE™ Resin MGSTM LR 135 com endurecedor EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135. Para o processo de infusão foi utilizado o mesmo tecido junto de uma resina apropriada para o processo de infusão do fornecedor DOW onde a resina selecionada foi a AIRSTONE 780E Epoxy Resin, com o endurecedor AIRSTONE 786H Hardener.

A Tabela 4.1 mostra as características do tecido utilizado nesse trabalho conforme o

data sheet do fornecedor Owens Corning (OCV)

Tabela 4.1 – Construção do tecido não trama

Nome da camada	1	2	2	3	3	4
Direção da fibra	(0°)	(+45°)	(+45°)	(-45°)	(-45°)	Fio de costura
Calculada G/M ²	567 +/- 28,4	100 +/- 5	200 +/- 10	100 +/- 5	200 +/- 10	≤10
Fios / cm	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	1,97
Peso do fio (TEX)	2400	300	600	300	600	7,5
Material	Advantex® Glass Fibers	PES Sizing free				
Fabricante	OC_RC	OC_RC	OC_RC	OC_RC	OC_RC	RC_01
Diâmetro de Filamento	17 µ	16-17 µ	16-17 µ	16-17 µ	16-17 µ	NA
Compatibilidade do Sizi	EP	EP	EP	EP	EP	NA
Tipo do Sizing	SE1500	SE1500	SE1500	SE1500	SE1500	NA

A Tabela 4.2 mostra as propriedades da resina (EPIKOTE™ Resin MGS™ LR 135) utilizada no processo de laminação a “Hand Lay-Up”, enquanto que a Tabela 4.3 mostra as propriedades do endurecedor (EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135) que foi utilizado para a mesma resina.

Tabela 4.2 – Propriedades da Resina de hand lay-up (EPIKOTE™ Resin MGS™ LR 135)

		Laminating resin LR135
Density ¹⁾	[g/cm ³]	1,14 – 1,18
Viscosity ¹⁾	[mPa·s]	2.300 – 2.900
Refractory index ¹⁾		1,558 – 1,562

Tabela 4.3 – Propriedades do Endurecedor da resina de hand lay-up (EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 135)

		Curing agent		
		LH133	LH134	LH135
Density ¹⁾	[g/cm ³]	1,04 – 1,08	1,03 – 1,07	0,98 – 1,02
Viscosity ¹⁾	[mPa·s]	400 – 650	150 – 300	50 – 150
Refractory index ¹⁾		1,555 – 1,565	1,564 – 1,570	1,509 – 1,513
Potlife ²⁾	[min]	app. 15 min.	app. 15 min.	app. 30 min.
T _g _{pot}	[°C]	80 – 90 °C unconditioned 65 – 75°C conditioned ³⁾		

A mistura de endurecedores foi selecionada com base na ficha técnica do produto para um tempo de Gel time de 30 min a temperatura ambiente conforme Tabela 4.4, tempo suficiente para a laminação das 5 camadas de TLX1190/05C02.

Tabela 4.4 – Mix de cura resina e endurecedor do processo de hand lay-up;

MIXING RATIOS

	LR135 : All curing agents
Parts by weight	100 : 35 ± 2
Parts by volume	100 : 41 ± 2

A Tabela 4.5 mostra as propriedades da resina (AIRSTONE 780E Epoxy Resin) utilizada no processo de Infusão, enquanto que a Tabela 4.6 mostra as propriedades do endurecedor (AIRSTONE 786H Hardener.) que foi utilizado para a mesma resina.

Tabela 4.5 – Propriedades da Resina de Infusão (AIRSTONE 780E Epoxy Resin)

Property⁽¹⁾	AIRSTONE Epoxy Resin 780E
Viscosity @ 25°C (mPa•s) ASTM D-445	1400
Density @ 25°C (g/cc) ASTM D-4052	1.151
Shelf Life (Months) ⁽²⁾	24

Tabela 4.6 – Propriedades da Resina de Infusão (AIRSTONE 786H Hardener)

Property⁽¹⁾	AIRSTONE Hardeners 785H
Viscosity @ 25°C (mPa•s) ASTM D-445	13
Density @ 25°C (g/cc) ASTM D-4052	0.942
Shelf Life (Months) ⁽²⁾	24

A mistura de endurecedores foi selecionada com base na ficha técnica do produto para um tempo de Gel time de 433 min a temperatura ambiente conforme Tabela 4.7, tempo suficiente para a Infusão das 5 camadas de TLX1190/05C02.

Tabela 4.7 – Mix de cura resina e endurecedor do processo de hand lay-up;

	AIRSTONE™ 780E Epoxy Resin	AIRSTONE™ Hardeners 782H, 783H, 784H, 785H, 786H
Parts by Weight	100	31
Parts by Volume	100	37

4.2 Laminação pelo processo de Hand Lay-up

Primeiramente foram fabricados 2 tipos de laminados pelo processo de “hand lay-up”, no primeiro foram cortados 5 camadas de TLX1190/05C02 no tamanho de 500x500 mm conforme Figura 4.2. Preparou-se a mesa de laminação passando uma película de desmoldante na mesma. Foram impregnadas as 5 camadas de TLX1190/05C02 com o mix de resina mais endurecedor “Hand Lay Up” e depois as colocou na mesa de laminação e esperou o laminado curar conforme Figura 4.4.

Figura 4.2 – Corte dos tecidos

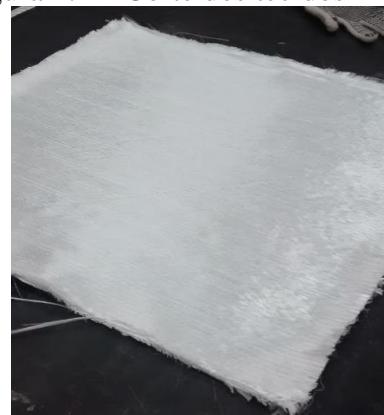


Figura 4.3 – Vista lateral da preparação dos tecidos

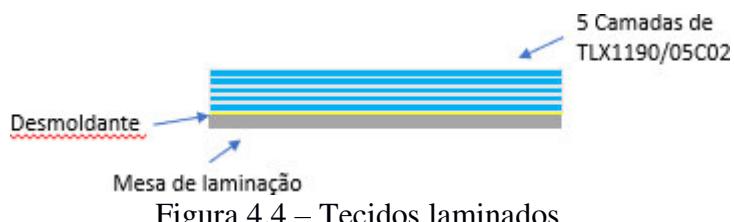


Figura 4.4 – Tecidos laminados



Na fabricação do segundo laminado cortou-se 5 camadas de TLX1190/05C02 no tamanho de 500x500 mm conforme Figura 4.2. Preparou-se a mesa de lamination passando uma película de desmoldante conforme feito no processo do primeiro laminado. Impregnou-se as 5 camadas de TLX1190/05C02 com o mix de resina mais endurecedor “Hand Lay Up” e depois as colocou na mesa de lamination. Colocou-se um plástico perfurado em cima dos laminados foram vedados com um plástico de vácuo e puxou-se o vácuo, afim de diminuir a quantidade de bolhas e diminuir a espessura do laminado conforme Figura 4.6.

Figura 4.5 – Vista lateral e superior da preparação dos tecidos

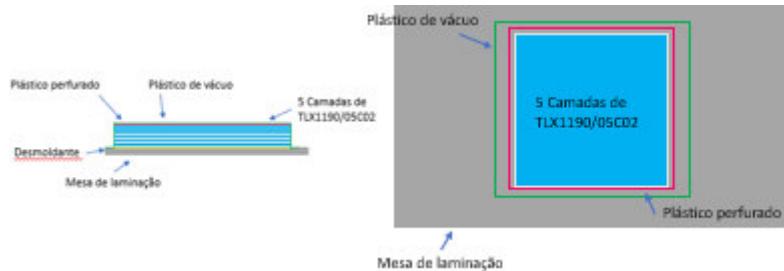


Figura 4.6 – Lamination dos tecidos com Vácuo.



4.3 Lamination pelo processo de Infusão.

Para a fabricação dos corpos de prova por Infusão foram cortadas 10 camadas de TLX1190/05C02 no tamanho de 500x500 mm conforme Figura 4.2. Preparou-se a mesa de lamination passando uma película de desmoldante na mesma. Dividiu-se a mesa de lamination na metade e foram posicionadas 5 camadas de TLX1190/05C02 e uma metade e mais 5 camadas de TLX1190/05C02 na outra metade, onde em cada metade foi feito um plano de infusão diferente. Para a fabricação da peça foi criado 2 diferentes tipos plano de infusão para impregnar todos os tecidos de forma homogenica . Para a fabricação dos planos de infusão Figura 4.6 e 4.7 foi utilizado os seguintes materiais conforme as tabelas Tabela 4.8, Tabela 4.9

Para a sucção do vácuo e ajudar no fluxo de resina foi utilizado uma bomba de vácuo do modelo Vix 1 Estagio bivolt.

Tabela 4.8 – Lista de materiais do Primeiro plano de Infusão

Materiais	Finalidade
Bambam	Fixar o plastico de vácuo e veda-lo
Conector-T	Facilitar a entrada de Resina no sistema
Fibra de coco	Ajudar na sucção do Ar do sistema
Mangueiras aço mola	Ajudar na injeção de resina no sistema
Papel toalha	Ajudar na sucção do Ar do sistema
Plastico de vácuo	Garantir que o vácuo do sistema
Plastico Perfurado	Ajudar na sucção do Ar do sistema e na retirada dos consumiveis do plano de infusão
Transfer	Facilitar o fluxo de resina

Tabela 4.9 – Lista de materiais do Segundo plano de Infusão

Materiais	Finalidade
Bambam	Fixar o plastico de vácuo e veda-lo
Conector-T	Facilitar a entrada de Resina no sistema
Mangueiras aço mola	Ajudar na injeção de resina no sistema
Membrana Vap	Ajudar na remoção de bolhas da resina
Plastico de vácuo	Garantir que o vácuo do sistema
Plastico Perfurado	Ajudar na sucção do Ar do sistema e na retirada dos consumiveis do plano de infusão
Transfer	Facilitar o fluxo de resina

Figura 4.6 – Infusão sem membrana.

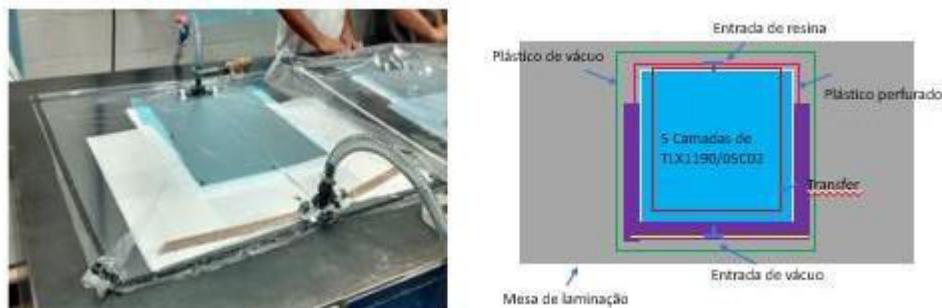


Figura 4.7 – Infusão sem membrana

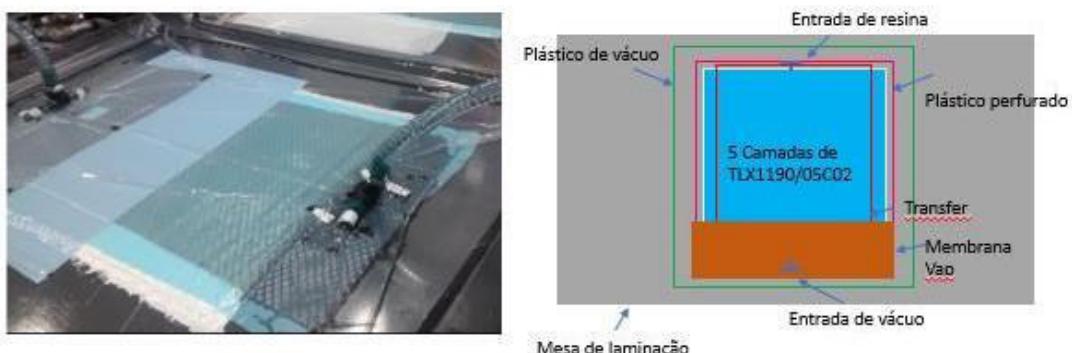


Figura 4.7 – Infusão sem membrana.

4.4 Amostras.

Após a fabricação dos 4 laminados, 2 feitos pelo processo de hand lay-up e 2 produzidos pelo processo de infusão foram cortados os laminados ao meio conforme Figura 4.7 e Figura 4.8. Em uma metade foi feito o processo de pós-cura e na outra metade foi deixado como estava. O processo de Pós-cura consiste em colocar uma manta térmica em cima do laminado e aquece-la por um tempo de 5 horas em uma temperatura de 70°C.

Figura 4.8 – Laminados feitos pelo processo de Infusão.

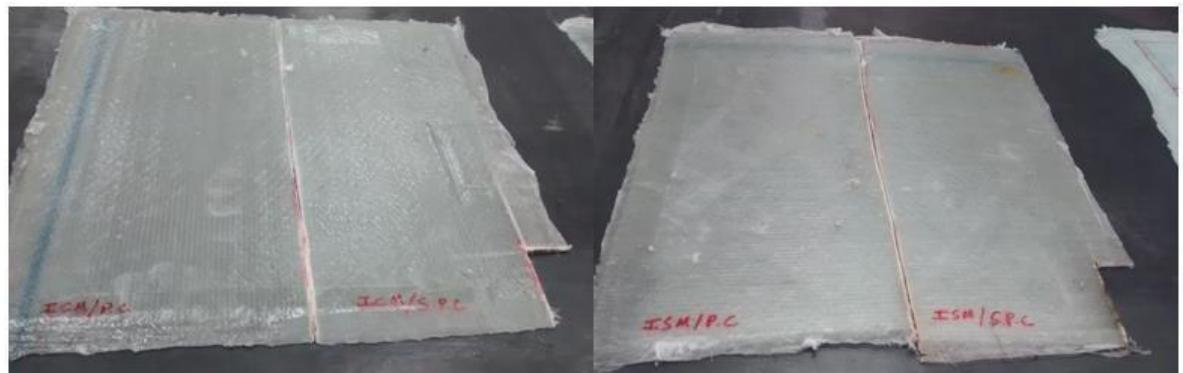
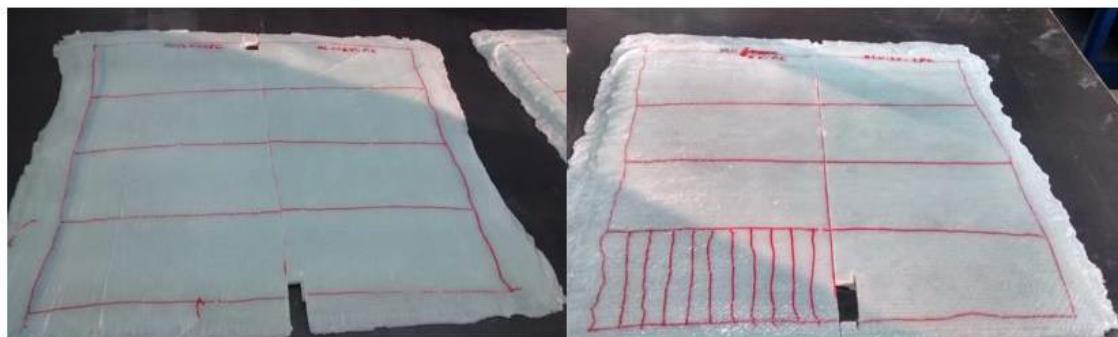


Figura 4.9 – Laminados feitos pelo processo de hand lay-up.



Após o corte foram separados os corpos de provas conforme o processo que ele foi submetido conforme mostrado na Tabela 4.2

Tabela 4.10 Amostras avaliadas.

Amostra	Processo	Pós curado
1	Hand Lay up	Não
2	Hand Lay up + Vacuo	Não
3	Hand Lay up	Sim
4	Hand Lay up + Vacuo	Sim
5	Infusão	Não
6	Infusão + Membrana Vap	Não
7	Infusão	Sim
8	Infusão + Membrana Vap	Sim

4.5 Ensaio de Dureza Barcol

Depois de realizado o corte foi feito o ensaio de dureza Barcol (Figura 4.10), utilizam o Durômetro Barcol 934/1 (Figura 4.11) para tirar as medidas de dureza dos laminados e com esses dados avaliar o grau de cura dos mesmos.

Figura 4.10 – Durômetro Barcol 934/1



Figura 4.11 – Ensaio de dureza Barcol



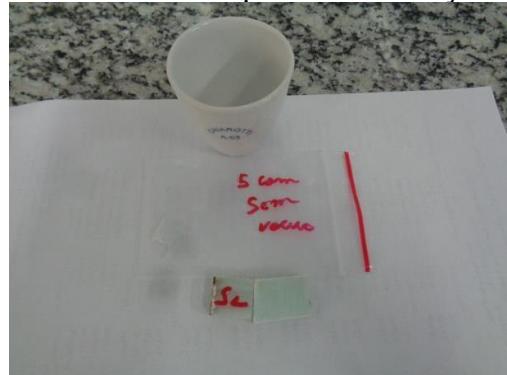
4.6 Caracterização da composição das amostras

Como sabido da regra das misturas, é fundamental que se conheça a fração de fibra do laminado para que as propriedades mecânicas sejam normalizadas para um teor de fibra padrão.

Devido a isto se foram caracterizadas os 4 laminados que foram fabricados, (sendo 2 por processo de “Hand Lay-Up” e 2 por processo de Infusão), para verificar a eficiência de cada processo em impregnar as fibras e a influência da composição de fibra resina nos ensaios de tração.

Para caracterizar as amostras, primeiramente foi cortado um pedaço de cada laminado conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 – Amostra para caracterização

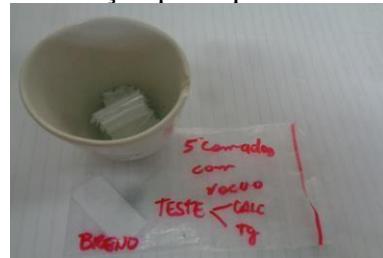


Foram pesadas todas as amostras com uma balança de precisão, colocaram-se as amostras num cadinho e o mesmo foi levado a um forno Mufla numa temperatura de 625°C por um período de 4 horas, conforme Figura 4.13 com a finalidade de evaporar toda a resina do laminado e fazer a separação do reforço conforme Figura 4.14.

Figura 4.13 – Aquecimento do laminado



Figura 4.14 – Reforço após aquecimento do laminado



Pesou-se a amostra e calculou-se a relação de fibra resina dos corpos de provas baseado no peso do laminado e do peso do reforço conforme Equação 4.1.

$$\% \text{ do reforço} = \text{Peso do reforço} / \text{Peso do laminado}$$

$$\% \text{ da resina} = (1 - \% \text{ do reforço}).$$

Equação 4.1 – Calculo da relação de Fibra-Resina.

4.7 Avaliação da temperatura de transição vítreia

A análise do Tg foi realizada no equipamento de DSC-60 Plus da SHIMADZU (Differential Scanning Calorimetry) por uma técnica termo analítica, porém poderia também ser avaliada através de análise em equipamento DMA (Dynamic Mechanical Analysis). O método DSC foi utilizado por uma questão de disponibilidade do recurso.

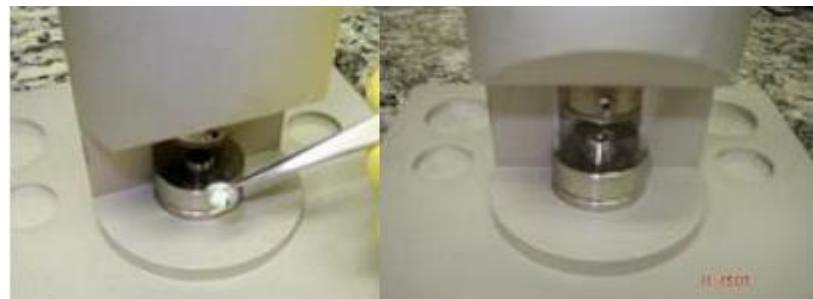
Deve-se observar a calibração da máquina dos equipamentos que serão utilizados; avaliar os utensílios que serão utilizados; separar 2 g de cada laminado e os mesmos deve estar livre de qualquer tipo de contaminante; preparar as amostras conforme Figura 4.15;

Figura 4.15 – Preparação da amostra para medição de Tg



Prensar o cadiño para finalização da amostra, conforme Figura 4.16; preparar o sistema; colocar as amostras no equipamento (Figura 4.16); programar o sistema para o teste e avaliar os resultados.

Figura 4.16 – Prensagem do cadiño



4.8 Determinação das propriedades mecânicas

Para comparação das propriedades mecânicas dos laminados serão realizados ensaios mecânicos de tração, utilizando procedimento normalizados descritos nas normas ISSO 527-4:1997 para tração, ASTM D2584:2008 para determinação de fração de fibra. Os ensaios foram realizados em triplicata.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, primeiramente iremos analisar a relação fibra resina, o ensaio de DSC para a determinação das condições de cura e posteriormente o resultado dos ensaios mecânicos.

5.1 Determinação da relação de fibra resina dos corpos de prova

Foi determinada a relação de fibra-resina de todos os corpos de prova onde os resultados são demonstrados na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2, onde na Tabela 5.1 estaremos comparando os resultados obtidos com o processo de Hand Lay-up e na Tabela 5.2 faremos uma comparação entre os resultados obtidos com o processo de Infusão.

Tabela 5.1 - Comparaçao entre relação fibra-resina processo Hand Lay Up

Amostra	Processo	Pós-Curado	%Fibra	% Resina
1	Hand Lay UP	Não	52%	48%
2	Hand Lay Up + Vácuo	Não	49%	51%
3	Hand Lay UP	Sim	52%	48%
4	Hand Lay Up + Vácuo	Sim	49%	51%

Tabela 5.2 - Comparaçao entre relação fibra-resina processo de Infusão

Amostra	Processo	Pós-Curado	%Fibra	% Resina
5	Infusão	Não	72%	28%
6	Infusão+ Membrana Vap	Não	74%	27%
7	Infusão	Sim	72%	28%
8	Infusão+ Membrana Vap	Sim	74%	27%

Na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 podemos observar a relação de fibra-resina em todos os corpos de prova, onde é possível perceber que no processo de infusão a relação de fibra-resina é maior que no processo de Hand - Lay up e isso ocorre porque no processo de infusão somente é injetada a quantidade de resina necessária para molhar as fibras e com isso ocorre uma economia de resina. Pode-se perceber que no processo de hand lay up a influência do vácuo na relação de fibra resina não é significativa. É possível perceber que a influência da membrana na relação de fibra resina do processo de infusão é mínima.

5.2 Determinação do grau de cura dos laminados

No ensaio de DSC foi analisado o grau de Cura dos corpos de prova. A Tabela 5.3 mostra o grau de cura dos laminados que foram fabricados pelo processo de Hand lay up, enquanto que a Tabela 5.4 mostra o grau de cura dos laminados que foram fabricados pelo processo de Infusão.

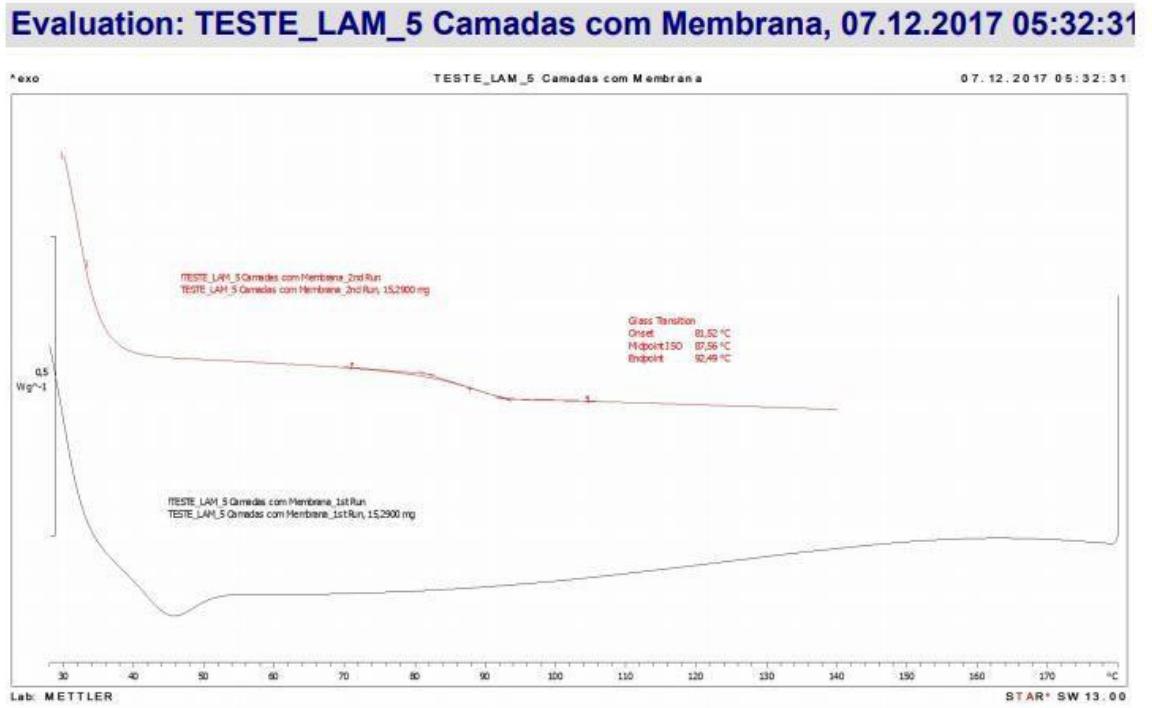
Tabela 5.3 – Grau de cura dos corpos de provas fabricados pelo processo de Hand lay up

Amostra	Processo	Pós-Curado	Tg (C°) 1º Run	Tg (C°) 2º Run
1	Hand Lay UP	Não	51	75
2	Hand Lay Up + Vácuo	Não	50	74
3	Hand Lay UP	Sim	69	75
4	Hand Lay Up + Vácuo	Sim	71	77

Tabela 5.4 – Grau de cura dos corpos de provas fabricados pelo processo de Infusão

Amostra	Processo	Pós-Curado	Tg (C°) 1º Run	Tg (C°) 2º Run
5	Infusão	Não	47	82
6	Infusão+ Membrana Vap	Não	51	82
7	Infusão	Sim	79	85
8	Infusão+ Membrana Vap	Sim	75	85

Figura 5.1 – Analise de grau de Cura da amostra 3.



5.3 Ensaios de tração

Como já foi mencionado, foi realizada uma serie de ensaios de tração nos laminados para se comparar a tensão que cada laminado suporta antes de romper suas fibras.

A relação entre as fibras de reforço para o ensaio está definida conforme esquemas das figuras 5.2 e 5.3, sendo que a direção da fibra será de 45° e 90° dado ao fato dos painéis terem sido construídos com tecidos tridimensionais e a direção do laminado ter sido tomada como referência para o eixo local.

Figura 5.2 – Tração a 45°

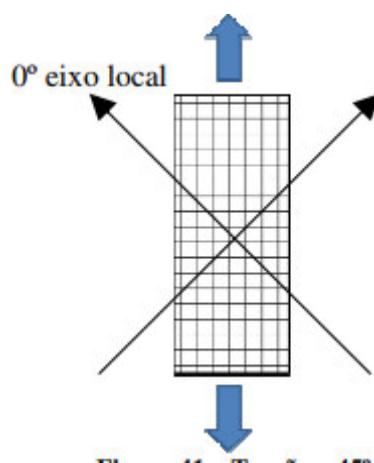
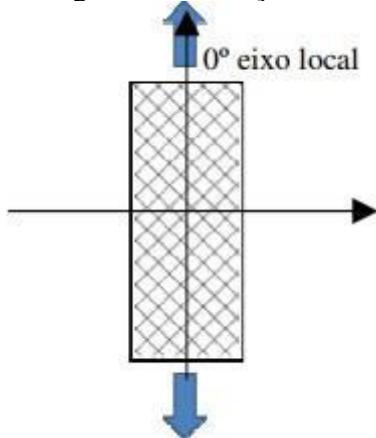


Figura 5.3 – Tração a 90°



Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de provas fabricados por Hand lay up estão consolidados nas tabelas abaixo (Tabela 5.5; Tabela 5.6; Tabela 5.7; Tabela 5.8) e nas figuras (Figura 5.4; Figura 5.5; Figura 5.6; Figura 5.7) que estão localizadas logo abaixo das tabelas.

Tabela 5.5 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 1

Amostra	Tensão (N)	Límite de resistencia (Mpa)	Límite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
1	1451,41	10,08	9,53	7,33	145,84	52%	51

Figura 5.4 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 1

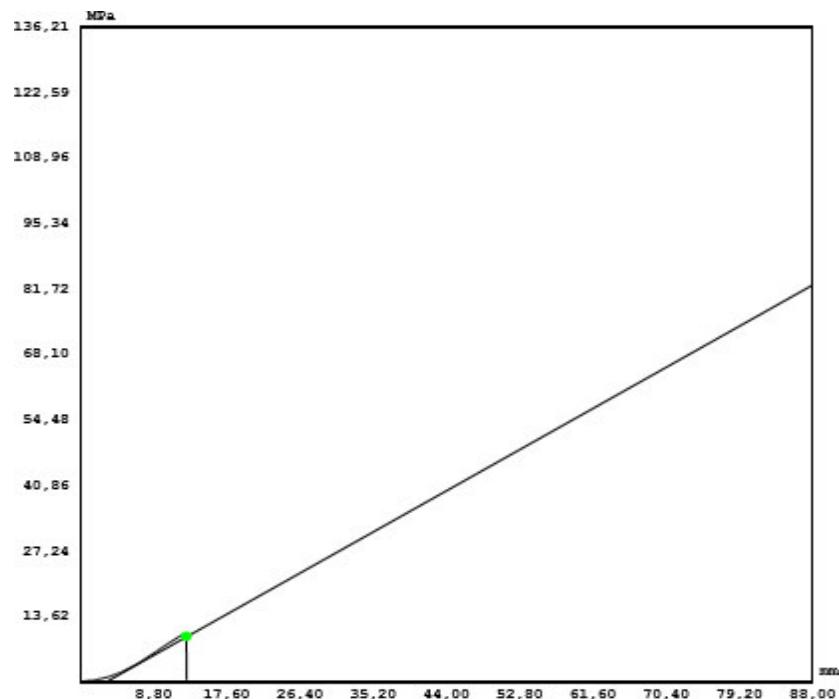


Tabela 5.6 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 2

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
2	1549,48	10,76	9,53	12	113,13	49%	50

Figura 5.5 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 2

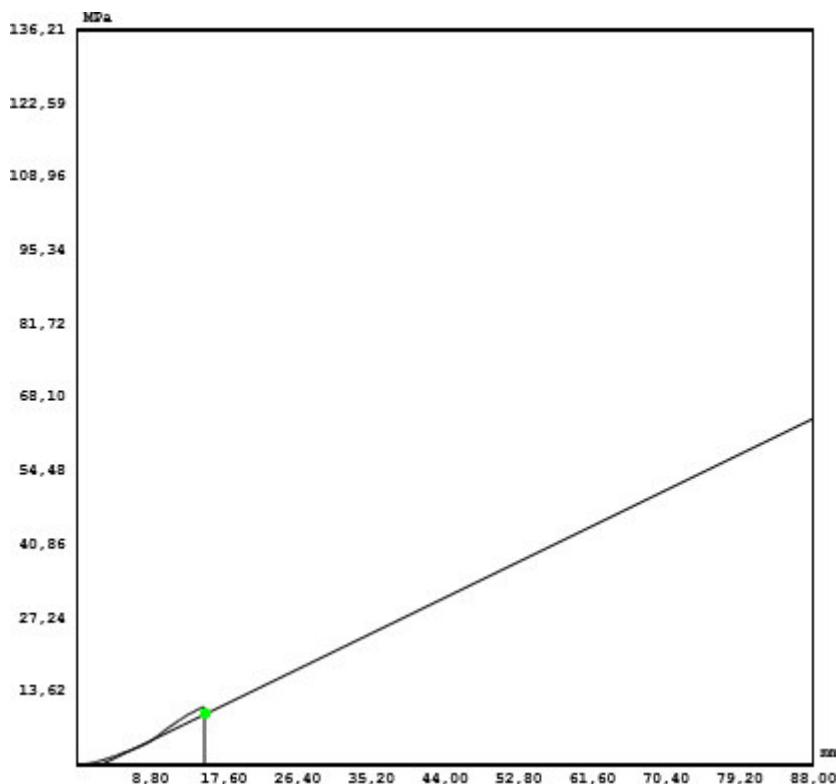
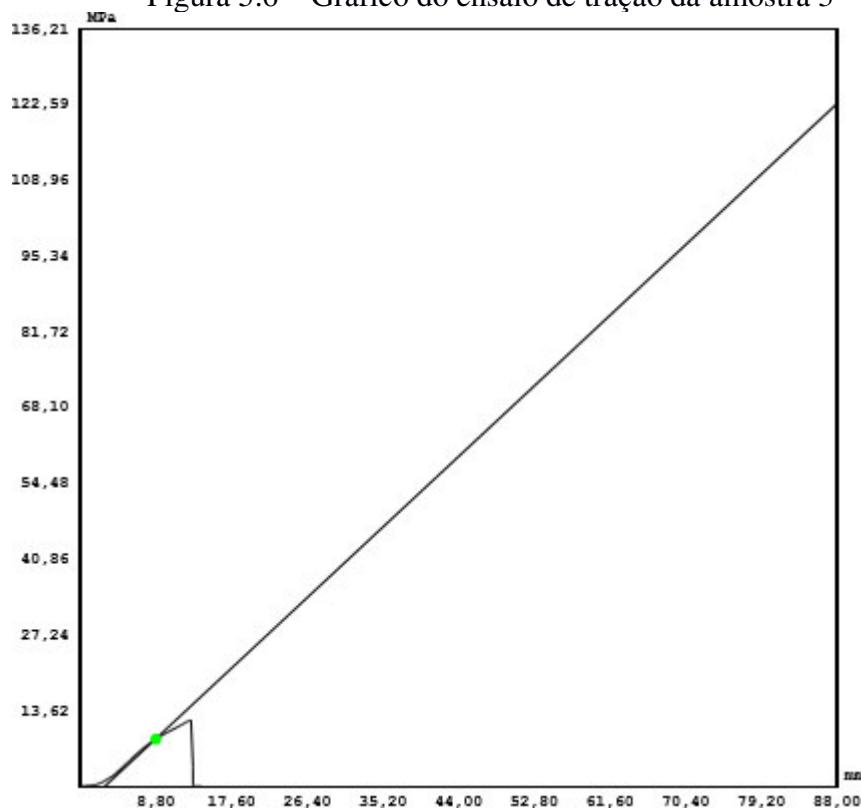


Tabela 5.7 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 3

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
3	1716,19	11,92	8,51	8,67	216,25	52%	69

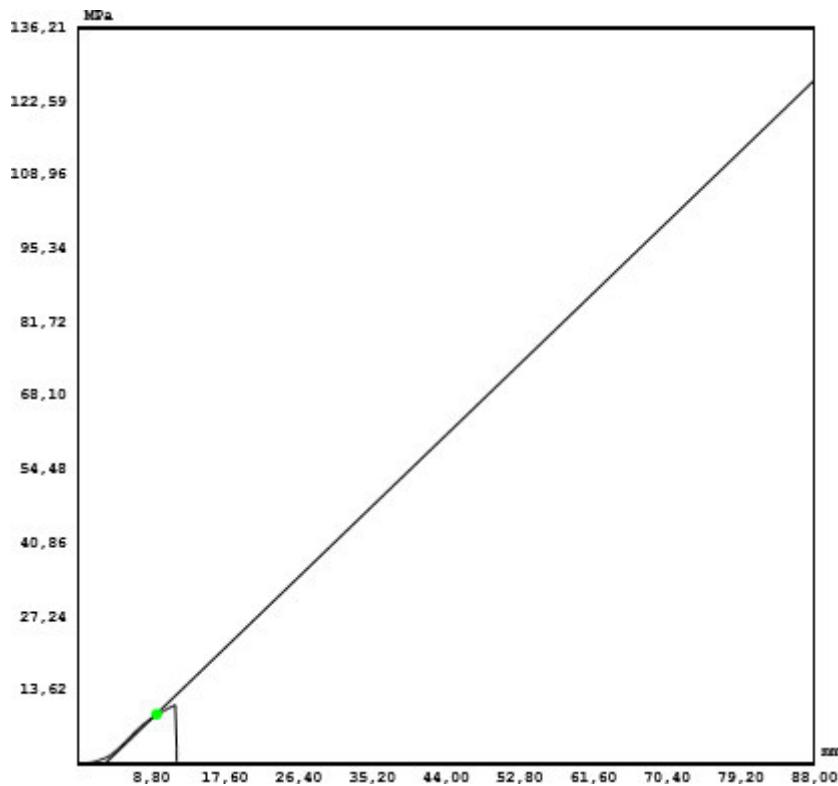
Figura 5.6 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 3



amostra 4

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
4	1569,09	10,9	9,19	13,33	223,9	49%	71

Figura 5.7 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 4



Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de provas fabricados por Infusão estão consolidados nas tabelas abaixo (Tabela 5.9; Tabela 5.10; Tabela 5.11; Tabela 5.12) e nas figuras (Figura 5.8; Figura 5.9; Figura 5.10; Figura 5.11) que estão localizadas logo abaixo das tabelas.

Tabela 5.9 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 5

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TG° 1° Run
5	1343	9,33	8,51	7,33	169,3	72%	47

Figura 5.7 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 5

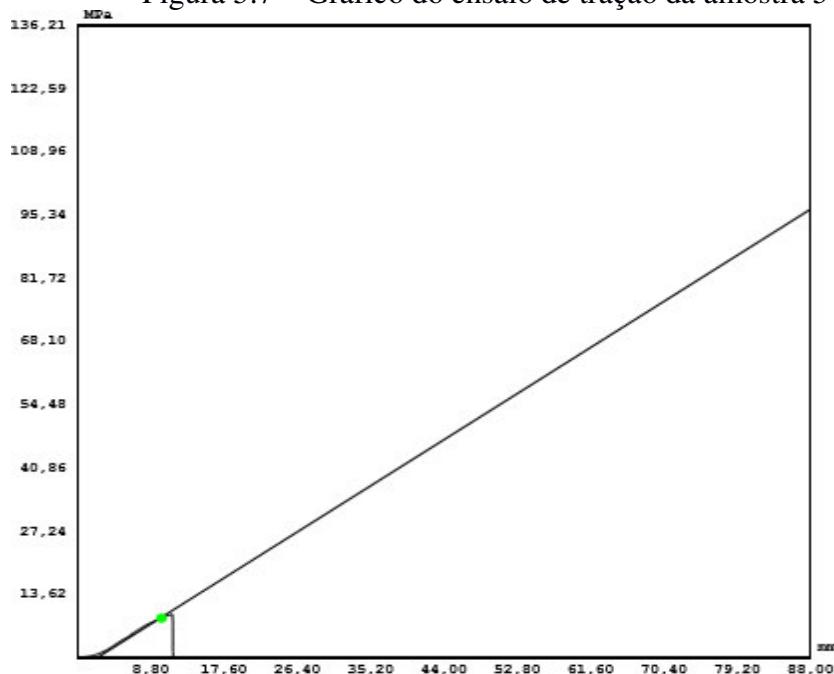


Tabela 5.10 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 6

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
6	1647,54	11,44	8,51	10	157,93	74%	51

Figura 5.9 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 6

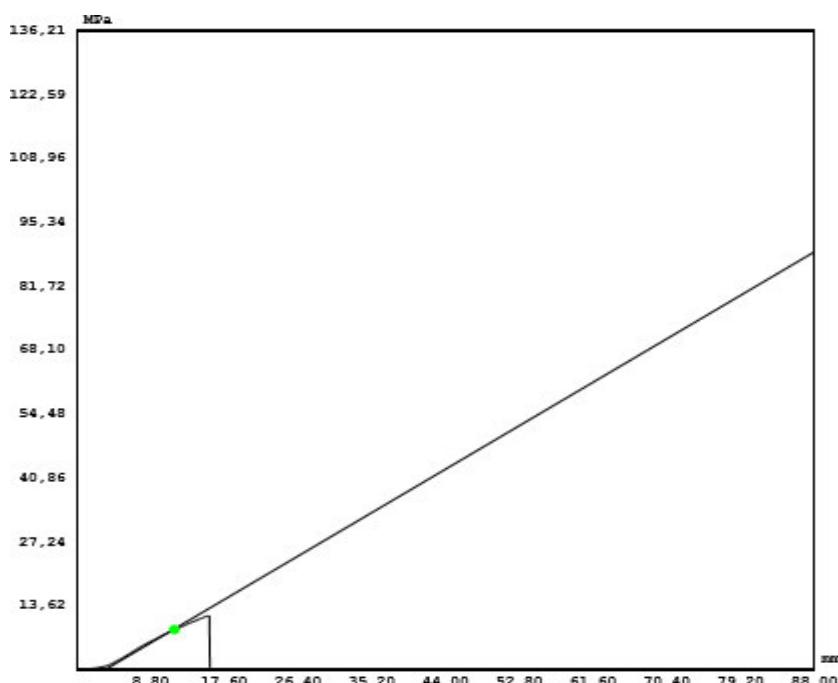


Tabela 5.11 – Tabela de dados de resistência mecânica da amostra 7

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
7	1657,35	11,51	8,17	12	164,94	72%	79

Figura 5.10 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 7

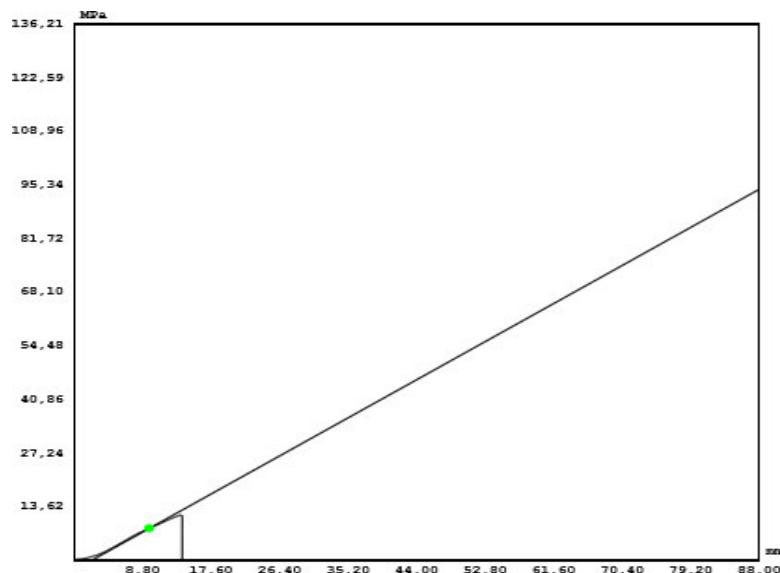


Tabela 5.12 – Tabela de dados de resistência mecânica da

amostra 8.

Amostra	Tensão (N)	Limite de resistencia (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Deformação (%)	Modulo de elasticidade (MPa)	Fração de Fibra	TGº 1º Run
8	2010,4	13,96	11,58	14,67	222	74%	75

Figura 5.11 – Gráfico do ensaio de tração da amostra 8

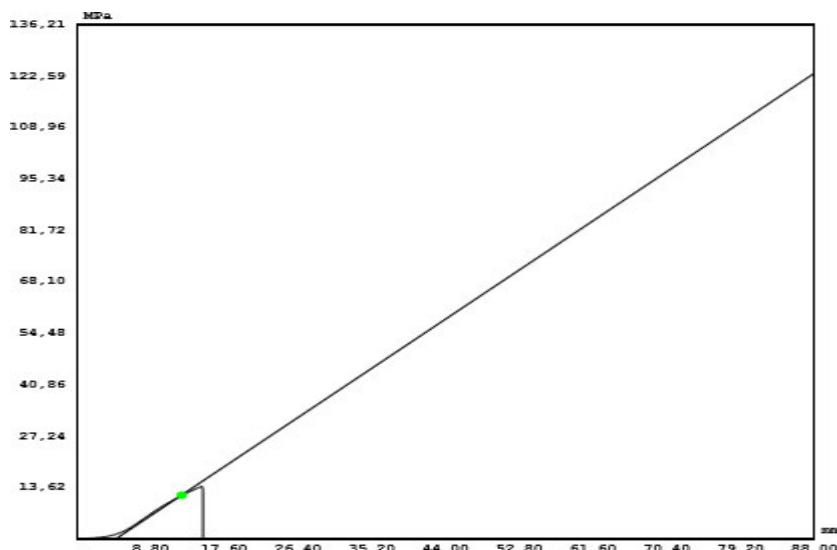


Figura 5.12 – Corpos de prova após ensaio de tração



5.4 Ensaios de Dureza Barcol

Foram tiradas 3 medidas do ensaio de dureza Barcol e retirado a media das durezas para saber qual a dureza evidenciada em cada amostra conforme mostrado na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Tabela de dados de ensaio de dureza de todas as amostras

Amostra	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio	Media
1	44	46	47	45,67
2	48	50	42	46,67
3	44	52	50	48,67
4	49	56	52	52,33
5	67	70	70	69,00
6	65	66	71	67,33
7	73	72	72	72,33
8	73	75	74	74,00

5.5 Espessura dos corpos de provas

Foram tiradas 3 medidas de espessura de cada laminado e retirado a média das espessuras dos laminados para efeito de comparação entre os processos de Hand Lay up e Infusão. Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Tabela de dados de espessura das amostras

Amostra	1º espessura (mm)	2º espessura (mm)	3º espessura (mm)	Media (mm)
1	7,73	7,52	7,85	7,70
2	7,42	7,57	7,09	7,36
3	7,58	7,55	7,83	7,65
4	7,88	7,5	7,85	7,74
5	4,42	4,47	4,33	4,41
6	4,54	4,37	4,27	4,39
7	4,26	4,47	4,39	4,37
8	4,26	4,05	4,38	4,23

6 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste estudo é possível afirmar que os métodos de fabricação dos compósitos exercem bastante influência nas propriedades mecânicas dos mesmos, principalmente na relação fibra-resina e nos aspectos de tração.

É evidente que muitos cuidados básicos além do processo de cura devem ser tomados quando se está projetando utilizando compósitos. Entre eles podem-se citar as inúmeras variações de processos com influências conhecidas como a do correto posicionamento e alinhamento das fibras, correto tensionamento dos filamentos, nível controlado de poros, garantia do nível correto de impregnação, correta seleção da matriz e reforço entre outros.

O impacto mais significante observado foi a diferença entre os módulos de tração dos laminados pós curados e os curados ocorreu um aumento de até 50% no modulo de elasticidade do material pós curados, quando comparado com o material curado. Um fator bastante interessante foi o fato de o modulo de elasticidade dos materiais fabricados por Hand Lay-up e que foram pós curados são bastante semelhantes aos materiais que foram feitos pelo processo de Infusão e também pós curados. Quando se comparam os mesmos antes de serem pós curado o laminado feito por infusão é 44% maior que o laminado fabricado pelo processo de hand lay up.

É conveniente frisar que o intuito deste trabalho é justificar a necessidade de uma avaliação completa do processo produtivo nas características da peça final e reforçar a importância de se considerar na fase de projeto as características que será obtida pelo processo produtivo em questão. Também, é imprescindível a importância de se analisar criticamente a modificação dos parâmetros produtivos de acordo com as características de cada processo.

Foi possível observar que tanto o tipo de processo de fabricação quanto o grau de cura têm influencia direta na dureza Barcol dos laminados, onde que quanto maior o Tg do laminado maior será a dureza do laminado e que os laminados fabricados pelo processo de Infusão têm a dureza mais elevada que os laminados fabricados pelo processo de Hand Lay Up.

Neste trabalho foi possível observar que o processo de fabricação influencia diretamente na espessura do compósito fabricado. Foi possível observar que no processo de fabricação por Infusão existe um ganho de até 50% em diminuição da espessura do laminado, que é muito importante na fabricação de componentes de pá eólica que precisam ter a menor espessura possível para não afetar o perfil aerodinâmico.

Neste trabalho não foram consideradas características fundamentais como a de fadiga, compressão, e flexão onde possivelmente seria possível justificar, por exemplo, a redução da vida útil de uma pá de um gerador eólico após milhares de ciclos de rotação

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analise da Influência de Cura na resistência química e mecânica dos laminados fabricados por processo de Hand lay up.
- Analise da Influência de Cura na resistência química e mecânica dos laminados fabricados por processo de VARTM.
- Analise do efeito dos defeitos de fabricação de compósitos na resistência mecânica.
- Analise por ultrassom na porosidade dos laminados fabricados pelo processo de VARTM.
- Estudo da comparação da influência de tecido seco e ponto branco na resistência mecânica dos laminados de compósitos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2344: Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. United States, 2006
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. United States, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3171: Constituent Content of Composite Materials. United States, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7028: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). United States, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. United States, 2010.
- BAKER, A., DUTTON, S., KELLY, D. Composite Materials for Aircraft Structures. Second Edition, AIAA, 2004
- BEIER, V., FISCHER, F., SANDLER, J.K.W., ALSTÄDT, V., WEIMER, C., BUCHS, W. Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched performs. Composites part A, v. 38, p 1655-1663, 200
- CIOFFI, M. O. H., VOORWALD, H. J. C., CAMARGO, J. A. M., REZENDE, M. C., ORTIZ, E. C., AMBROSIO, L. Fractography analysis and fatigue strength of carbon fiber/RTM6 laminates. Materials Science and Engineering: A, v. 527(15), p3609- 3614, 2010.
- CANEVAROLO, S. V. Técnica de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Artliber Editora, p 209-283, 2004.
- CANDIDO, G. M., REZENDE, M. C., ALMEIDA, S. F. M. Hygrothermal Effects on the Tensile Strength od Carbon/Epoxy Laminates with Molded Edges. Materials Research, v. 3(2), p 11-17, 2000.
- FANGUEIRO, R., NUNES, P., SOUTINHO, F., ARAÚJO, M. Development of fibrous preform for FRP pipe connections. Composites Science and Technology, v.69, p 1412-1416, 2009.
- HEXCEL COMPOSITES. Disponível em: <http://www.hexcel.com/Products/Fabrics/Carbon/> - acessado em 23.03.2010.
- HULL, D.; CLYNE, T. W. An Introduction to Composite Materials. Editora

Cambrigde University, 1996.

KAWAI, M.; TANIGUCHI, T. Off-axis fatigue behavior of plain weave carbon/epoxy fabric laminates at room and high temperatures and its mechanical modeling. Composites: Part A, v. 37, p 243-256, 2006.

LUCAS, E. F.; SOARES, B.G.; MONTEIRO, E. Caracterização de Polímeros Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Editora E-Papers, p 217-323, 2001.

PARNAS, R.S. Liquid Composite Molding. Editora Hanser, p 75-84, 2000 REZENDE, M. C., BOTELHO, E. C. O. Uso de Compósitos estruturais na indústria aeroespacial. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, p e4-e10, 2000.

SAÉZ, S. S., BARBERO, E., NAVARRO, C. Analysis of the dynamic flexural behavior of composite beams at low temperature. Composites Science and Technology, v. 67, p 2616 – 2632, 2007.

STRONG, A. B., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications. Editora SME, p 107-158, 1989.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. Sears and Zemansky's University Physics: with modern physics. Editora Pearson, 12a. edição, San Francisco, 2008.