



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
ENGENHARIA MECÂNICA

MARIANA HELLEN DE FREITAS FONSECA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM LAMINADO DE
FIBRAS DE CARBONO E RESINA EPÓXI COM DIFERENTES PARÂMETROS
DE CURA**

MOSSORÓ – RN

2017

MARIANA HELLEN DE FREITAS FONSECA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM LAMINADO DE
FIBRAS DE CARBONO E RESINA EPÓXI COM DIFERENTES PARÂMETROS
DE CURA**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Centro de Engenharias para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Zoroastro Torres Villar

MOSSORÓ – RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº

9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F673a Fonseca, Mariana Hellen de Freitas. Avaliação das propriedades mecânicas de um laminado de fibras de carbono e resina epóxi com diferentes parâmetros de cura / Mariana Hellen de Freitas Fonseca. - 2017.
69 f. : il.

Orientador: Zoroastro Torres Vilar.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica, 2017.

1. Materiais compósitos. 2. Fibra de carbono.
3. Ensaios mecânicos. 4. Propriedades relativas.
I. Vilar, Zoroastro Torres , orient. II. Título.

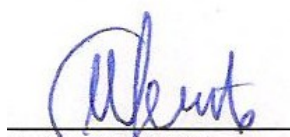
**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM LAMINADO DE
FIBRAS DE CARBONO E RESINA EPÓXI COM DIFERENTES PARÂMETROS
DE CURA**

MARIANA HELLEN DE FREITAS FONSECA

Monografia aprovada em 19 de maio de 2017 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar
(Orientador)
UFERSA



Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante
(Membro 1)
UFERSA



Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo
(Membro 2)
UFC

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por ter me concedido a graça de chegar à fase final do projeto de um sonho antigo com saúde, me protegendo diariamente e me fazendo entender com amor que quando nossas vontades não coincidem, a Sua deve prevalecer.

Aos meus pais, Maria José de Freitas e Edmilson de Moraes Fonseca, por abrirem mãos dos seus sonhos e das suas vontades para que o meu se tornasse realidade. Por me protegerem, por pensarem primeiramente em mim em todas as situações. Não tem como descrever a gratidão pela entrega de vocês. Tudo seria mais difícil sem vocês.

À minha família, por me amarem tanto, por me entenderem, por estarem comigo em todas situações e principalmente, por entenderem a minha ausência quando esta se fez necessário. E foram muitas vezes. Sou muito feliz e grata por ter vocês.

Agradeço especialmente à Maria do Rosário por me estender a mão em todas as dificuldades e por ser tão presente na minha vida, contribuindo sempre para o meu crescimento. Não posso esquecer de todas as vezes que eu precisei e nunca ouvi um ‘não’ seu. Sua contribuição foi essencial.

Ao professor Dr. Zoroastro Torres Vilar, por me orientar, por sua compreensão e principalmente por sua disponibilidade em compartilhar seu conhecimento comigo, contribuindo muitíssimo para esta pesquisa e para o meu desempenho acadêmico.

Às equipes Pegazuls Aerodesign e Cactus Baja e seus integrantes, bem como aos técnicos dos Laboratórios de Engenharia Mecânica e ao amigo Marcos Paulo pela disponibilidade e auxílio na parte experimental deste trabalho.

Aos meus amigos, Alyne, Liliane, Jakson, João e Galego por estarem comigo em todos os momentos e contribuírem não só para a realização das atividades acadêmicas como para o meu crescimento pessoal. Tudo foi melhor e mais feliz porque vocês estiveram comigo.

Ao homem que o agrada, Deus dá sabedoria,
conhecimento e felicidade.

Eclesiastes 2:26

RESUMO

A pesquisa intensa à cerca dos parâmetros envolvidos nos materiais compósitos cresce a cada dia em função da utilização destes em áreas como automobilística, militar e aeronáutica. A utilização de materiais compósitos se dá justamente em função de conseguir conjugar propriedades desejáveis com a união de metais, cerâmicas e/ou polímeros. A fibra de carbono possui a flexibilidade de ser processada de diversas maneiras e dependendo destas pode apresentar excelentes propriedades. Com isso, passa a ser considerada um dos principais reforços em materiais compósitos. Se combinada com resina epóxi, torna-se bastante atraente em aplicações que tem propriedades relativas como ponto fundamental. Então, o objetivo deste trabalho foi avaliar as diversas condições de aprimoramento do processo de fabricação e cura do compósito de fibra de carbono e resina epóxi verificando se as diferenças são significativas com as variações de fração volumétrica de resina e processo de cura. Para isso, a cura se deu em função da ação do vácuo, com o auxílio da prensa hidráulica à uma pressão de 1tnf e sem nenhuma pressão, todas por 5 horas. Para cada tipo de processo de cura foi variada a fração volumétrica da resina em 15%, 25%, 35% e 45%. Em seguida, realizou-se ensaios mecânicos de tração, flexão e DMA e com seus resultados avaliou-se a obtenção das melhores propriedades relativas do compósito em análise.

Palavras-chave: materiais compósitos, fibra de carbono, ensaios mecânicos, propriedades relativas.

ABSTRACT

The intensive research about the parameters involved in composites materials is growing every day for the use of these in areas such as automotive, military and aeronautics. The use of composites materials is rightly gives according to get desirable properties combine with the joining of metals, ceramics and/or polymers. The carbon fiber has the flexibility to be processed in different ways and dependent on these may have excellent properties. Thus, it is now considered one of the main reinforcements in composite materials. If combined with epoxy resin, it is very attractive in applications that have properties on a fundamental point. Therefore, the objective of this work was to evaluate the various conditions of improvement of the manufacturing process and curing the carbon fiber and epoxy resin checking if differences are significant with changes in volume fraction of resin and curing process. For this, the curing will occurred due to the action of the vacuum, with the aid of the hydraulic press at a pressure of 1 tnf and without any pressure, all for the 5 hours. For each type of curing process was varied the volumetric fraction of the resin in 15%, 25%, 35% e 45%. Then, mechanical tensile, flexural and DMA was carried out and their results was evaluated to obtain the best relatives properties of the composite under analysis.

Keywords: composites materials, carbon fiber, mechanical tests, relatives properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da classificação dos compósitos.....	16
Figura 2 - Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras orientadas formando um compósito laminado	16
Figura 3 - Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos parâmetros. (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço.....	17
Figura 4 - Esquema da classificação de reforços em compósitos.....	18
Figura 5 - Tecido de reforço com trama plana	19
Figura 6 - Fibra de carbono	21
Figura 7 - Classificação da fibra de carbono	23
Figura 8 - Uso de CFRP em aeronave	23
Figura 9 - Aplicações do CFRP.....	24
Figura 10 - Representação esquemática de estrutura molecular com ligação cruzada e em rede	26
Figura 11 - Relação tensão-deformação	28
Figura 12 - Comparação de módulo de elasticidade em 3 tipos de resina.....	30
Figura 13 - Relação absorção de água por tempo para várias resinas	31
Figura 14 - Comparação de resistência à tração com 3 resinas	31
Figura 15 - Esquema do processo de laminação à vácuo	33
Figura 16 - Corpo de prova para ensaio de tração	46
Figura 17 - Corpo de prova fraturado após ensaio de tração.....	46
Figura 18 - Corpos de prova para ensaios de flexão.....	47
Figura 19 - Ensaio de flexão.....	47
Figura 20 - Corpo de prova para DMA	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas na prensa	49
Gráfico 2 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas em vácuo	51
Gráfico 3 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas sem pressão	52
Gráfico 4 - Curva tensão-deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas na prensa	54
Gráfico 5 - Curva tensão deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas no vácuo	55
Gráfico 6 - Curva tensão deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas sem pressão	56
Gráfico 7 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas na prensa.....	57
Gráfico 8 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas no vácuo.....	58
Gráfico 9 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas sem pressão	59
Gráfico 10 - Módulo de elasticidade inicial em função do processo de cura.....	60
Gráfico 11 - Módulo de elasticidade em função das amostras	60
Gráfico 12 - Temperatura de transição vítrea em função do processo de cura	61
Gráfico 13 - Temperatura de transição vítrea em função do processo de cura	62
Gráfico 14 - Temperatura de transição vítrea em função das amostras.....	62
Gráfico 15 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas na prensa.....	64
Gráfico 16 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas no vácuo.....	64
Gráfico 17 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas sem pressão.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova para cada tipo de ensaio.....	41
Tabela 2 - Simbologia das amostras de acordo com suas variações	42
Tabela 3 - Propriedades das amostras curadas na prensa	43
Tabela 4 - Propriedades das amostras curadas no vácuo	44
Tabela 5 - Propriedades das amostras curadas sem pressão	45
Tabela 6 - Dados requeridos para análise de DMA	48
Tabela 7 - Propriedades mecânicas para as amostras curadas na prensa em ensaios de tração	49
Tabela 8 – Propriedades mecânicas para as amostras curadas no vácuo em ensaios de tração	51
Tabela 9 - Propriedades mecânicas para as amostras curadas sem pressão em ensaios de tração	52
Tabela 10 - Propriedades mecânicas para amostras curadas na prensa em ensaios de flexão	54
Tabela 11 - Propriedades mecânicas para amostras curadas no vácuo em ensaios de flexão	55
Tabela 12 - Propriedades mecânicas para amostras curadas sem pressão em ensaio de flexão	56
Tabela 13 - Módulos de elasticidade para todas as amostras de acordo com o processo de cura	61
Tabela 14 - Valores das temperaturas de transição vítrea para todas as amostras	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Materiais compósitos	15
3.2 Reforço	17
3.2.1 Fibra de carbono	20
3.3 Matriz.....	24
3.3.1 Resina epóxi	27
3.4 Processo de fabricação.....	32
3.4.1 Laminação manual.....	32
3.5 Ensaio	35
3.6 Análise dinâmica mecânica (DMA).....	35
3.7 Relações matemáticas relevantes.....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1 Caracterização dos constituintes	40
4.2 Projeto das amostras	41
4.3 Preparação dos compósitos	41
4.4 Características dos ensaios.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Ensaio mecânico de tração	49
5.2 Ensaio mecânico de flexão.....	53
5.3 Ensaio de DMA	57
6. CONCLUSÃO	66
7. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

Áreas como aeronáutica, automobilística e militar buscam intensamente materiais que apresentem propriedades relativas. Segundo Callister (2013), as combinações e as faixas de propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo, ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida a melhor combinação dessas propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos. É comum afirmar que os materiais compósitos apresentam então, o “melhor dos dois mundos” em termos de propriedades.

O material utilizado no reforço é o responsável por atenuar as propriedades mecânicas e químicas no geral. Maior dureza, tenacidade, rigidez e resistência à tração são funções basicamente da geometria do material de reforço, ou seja, da forma, tamanho, distribuição e orientação das fibras. Para Newell (2010), as propriedades finais da fibra de carbono dependem diretamente da seleção e do processamento dos materiais precursores, da formação da fibra e do seu processamento seguinte. Dependendo de como são processadas, as fibras de carbono podem apresentar uma larga faixa de propriedades físicas, químicas, elétricas e térmicas. Dentre as diversas funções da matriz, destaca-se o fato de ser por meio dela que uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras. A utilização da resina epóxi combinada às fibras de carbono é bem comum quando se requer uma relação de boas propriedades mecânicas por baixo peso.

Tão importante quanto as combinações entre os materiais são os métodos de fabricação possíveis, uma vez que estes implicam em um rigoroso controle do processo produtivo e consequentemente, a qualidade final das peças fabricadas. A laminação é, sem dúvidas, um método muito difundido na fabricação de materiais compósitos. Entretanto, as propriedades que os laminados finais apresentam podem diferir em função de variações de parâmetros de cura, como a variação da pressão de compactação e a fração volumétrica da resina. Essas propriedades podem ser obtidas através de ensaios mecânicos a fim de determinar o conjunto ideal de parâmetros desse processo com o qual se obtém os valores mais altos de propriedades relativas, garantindo assim, uma maior qualidade do compósito laminado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades mecânicas de um laminado de fibras de carbono com resina epóxi com diferentes parâmetros de cura.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Conhecer mais sobre os materiais compósitos (reforço de fibra de carbono e matriz de resina epóxi) e os processos de cura;
- ✓ Definir os parâmetros variáveis a serem utilizados para obtenção das amostras de compósito (frações volumétricas de resina e processos de cura)
- ✓ Realizar ensaios de tração, flexão e DMA;
- ✓ Encontrar o conjunto de parâmetros ideais para atingir as propriedades mecânicas de compósitos, através do tratamento dos dados fornecidos pelos testes;
- ✓ Avaliação dos resultados obtidos com os ensaios de tração, flexão e DMA das amostras de compósitos;
- ✓ Análise das propriedades mecânicas relativas das amostras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais compósitos

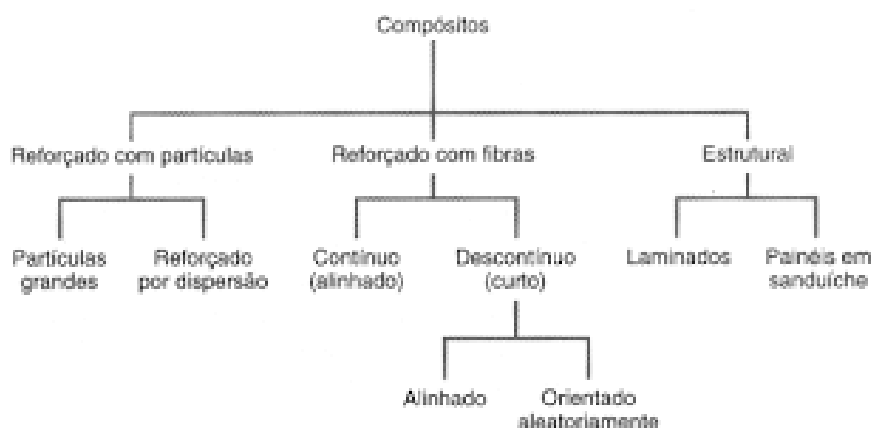
Material compósito é o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos em suas propriedades físicas. Trata-se, portanto, de uma classe de um meio heterogêneo cujo objetivo é a obtenção de um material que, combinando as características de seus componentes de maneira adequada, apresente um desempenho estrutural melhor do que estes, sob condições específicas de utilização. A estrutura a ser obtida deverá constituir-se de um novo material com características homogêneas, ao ser analisado macroscopicamente. O objetivo é obter-se um material final com propriedades mecânicas superiores a de seus constituintes, para determinadas solicitações. (Puc–Rio, 2014)

Os compósitos surgiram nas primeiras sociedades e foram esquecidos por um bom tempo. O uso de compósitos leves em diversas soluções diárias (aplicações elétricas inicialmente) caracterizou seu reaparecimento. Seu uso no desempenho de veículos espaciais e aviões militares tornou-se comum nas décadas de 80 e 90. Com o avanço da tecnologia, o interesse pelas propriedades que os materiais compósitos poderiam apresentar foi crescendo cada vez mais e atualmente, seu mercado se encontra bem difundido, sendo transportes, construção civil, marinha, elétrica, produtos de consumo, equipamentos comerciais e mercado aeronáutico, respectivamente os mais beneficiados. De acordo com Barbero (1999, apud VILAR, 2009, p. 23) os principais fatores que dirigem o uso de materiais compósitos são redução de peso, resistência à corrosão, isolamento térmica e acústica, baixa expansão térmica, condutividade térmica alta ou baixa, dentre outras.

Apesar de os materiais compósitos misturarem dois ou mais materiais distintos, eles se diferem das ligas, uma vez que os materiais iniciais continuam a existir separadamente como fases distintas. Assim, Callister (2013) afirma que um material compósito é basicamente o produto da combinação de um reforço (em geral, fibras) com uma fase ligante (matriz) sobre uma superfície de um molde que define sua forma. A fase ligante é responsável pela união dos constituintes, tendo a função de transmitir o esforço entre as fibras, além de mantê-las protegidas do meio. Já as fibras têm a função de melhorar o desempenho mecânico da matriz.

Mostra-se na Figura 1 como a classificação dos materiais compósitos é abrangente.

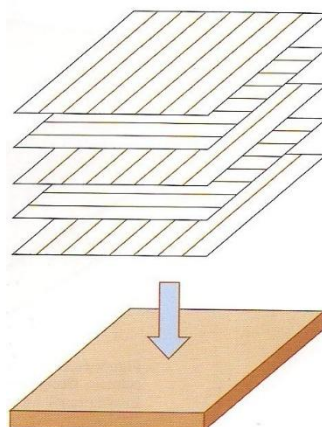
Figura 1 - Esquema da classificação dos compósitos



FONTE: Callister, 2013

Os compósitos que constituem a classe dos laminados é o foco desta análise. Mais detalhadamente Callister (2013) define um compósito laminado como um material composto por lâminas ou painéis bidimensionais com direção preferencial de alta resistência. As camadas são empilhadas e subsequentemente unidas umas às outras, de tal modo que a orientação da direção de alta resistência varie com cada camada sucessiva. Os laminados também podem ser construídos empregando-se materiais na forma de tecidos, como fibras trançadas em uma matriz. Dessa forma, um compósito laminado apresenta resistência relativamente alta em várias direções no plano bidimensional; no entanto, a resistência em qualquer direção específica é, obviamente, menor do que seria se todas as fibras estivessem orientadas naquela direção. A Figura 2 apresenta um empilhamento de camadas de fibras formando um compósito laminado.

Figura 2 - Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras orientadas formando um compósito laminado



FONTE: Callister, 2013

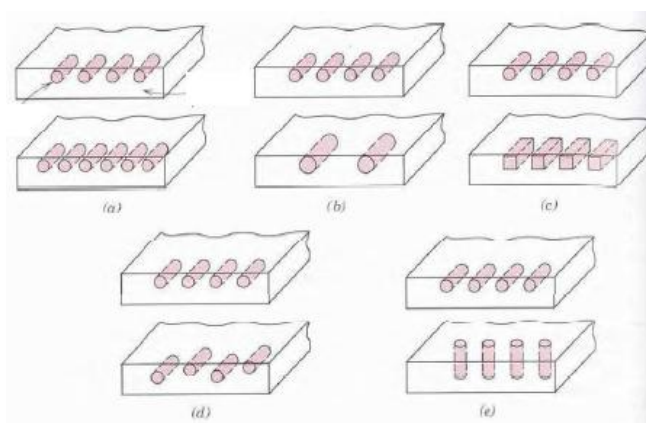
As propriedades dos materiais compósitos dependem da composição de cada fase e de condições externas, tais como temperatura, taxa de deformação, presença de descontinuidades geométricas, tipo de carga, meio ambiente e por parâmetros micro estruturais, que incluem estrutura cristalina, grau de cristalinidade, estrutura macromolecular ou regiões de deformação externa e interna. (Pracella et al., 2006 apud PAULA, 2011, p. 22)

3.2 Reforço

O material utilizado no reforço é o responsável por atenuar as propriedades mecânicas e químicas no geral. Maior dureza, tenacidade, rigidez e resistência à tração são funções basicamente da geometria do material de reforço, ou seja, da forma, tamanho, distribuição e orientação das fibras. De acordo com Nasseh (2011), para laminados de alta performance, isto é, aqueles projetados para serem leves e resistentes, a forma mais eficiente de reforço são os tecidos, porque permitem fabricar um laminado com alto teor de fibras e também muito fino, permitindo dimensionar exatamente as propriedades de resistência necessárias para aquela estrutura.

Os compósitos são diferenciados de acordo com as características do reforço presente, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos parâmetros. (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço



FONTE: Barros, 2010

Essa classificação envolve os parâmetros concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação do reforço. A classificação do reforço pode também ocorrer de acordo com a sua disposição na matriz, conforme a Figura 4. (Barros, 2010)

- particulados: alta rigidez, baixa resistência, baixa tenacidade
- fibras curtas (descontínuas): alta rigidez, baixa resistência, baixa tenacidade

- fibras longas (contínuas): alta rigidez, alta resistência, alta tenacidade

Figura 4 - Esquema da classificação de reforços em compósitos



FONTE: Barros, 2010

De acordo com Hristov et al. (2004, apud PAULA, 2011, p. 22) durante a fabricação dos materiais compósitos fibrosos, a geometria da fase descontínua é um dos principais parâmetros a ser considerado, visto que as propriedades mecânicas destes materiais dependem da forma e das dimensões de reforço.

Nasseh (2008) afirma que na estrutura do material compósito, as fibras são responsáveis pela transferência das tensões através da matriz de resina. O tipo de filamento, a interação da sua superfície com a matriz de resina, a quantidade de resina e, finalmente, a orientação do reforço são características das fibras que irão governar o desempenho final do laminado. O grau de interação superficial da fibra com a resina é que controla as características de adesão entre elas e que 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 possibilidade de reduzir a quantidade de resina dentro do laminado e gerar maiores propriedades mecânicas. Então, o alinhamento das fibras é importante para reduzir os espaços vazios a serem preenchidos pela resina.

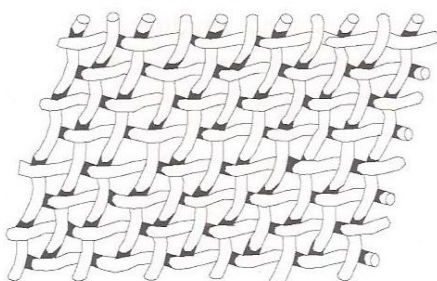
Por terem os filamentos arranjados em direções precisas, os tecidos apresentam uma resistência superior, quando comparados com as mantas de direção aleatória. Eles são compostos de cabos correndo em duas direções, usualmente em ângulos de 90°, uma com a outra. A direção principal é chamada urdume e a direção secundária, normalmente a transversal ao rolo, é chamada de trama. A forma mais comum de construção dos tecidos é

a balanceada, onde cada direção do tecido tem o mesmo número de fios. A forma balanceada proporciona uma resistência equilibrada em ambas as direções, entretanto, deve ser lembrado que mesmo esse equilíbrio das fibras não permite que se tenham propriedades iguais em todas as direções. (Nasseh, 2008)

O tipo de trama é um ponto relevante a ser destacado, uma vez que sua variedade acarreta diferentes características. Para Nasseh (2008), o tipo de trama afeta a facilidade com que o tecido é impregnado e com a qual ele faz curvas.

É possível também variar a quantidade de fios em cada direção e fabricar tecidos que tenham propriedades mecânicas direcionais. Normalmente, o máximo que se faz comercialmente são tecidos com diferenças na quantidade de fios de 30% a 70% entre as direções. A trama mais comum nos tecidos disponíveis no mercado é a plana, onde cada cabo passa sobre o outro alternadamente. Nesta trama os cabos podem ser planos ou retorcidos nas duas direções ou mesmo plano em uma delas e retorcido na outra. A abertura entre os cabos é essencial para o resultado final da laminação. Tecidos muito frouxos tendem a abrir buracos durante a laminação, oferecendo ao laminado áreas ricas em resinas (porosidade). (Nasseh, 2011). A Figura 5 exibe um tecido de reforço com trama plana.

Figura 5 - Tecido de reforço com trama plana



FONTE: Nasseh, 2011

Segundo Shackelford (2008), quando tanto a alta resistência quanto a habilidade de suportar cargas em diversas direções são necessárias, tecidos bi e tridimensionais são usados. Com os tecidos, as fibras podem ser alinhadas em diversas direções e as cargas aplicadas sempre serão perpendiculares a uma parcela das fibras. Entretanto, quanto mais complicada for a tecedura, mais complicado e caro será o processo de fabricação.

Nasseh (2008) diz que como esses tecidos têm um espaço bem pequeno entre os cabos, a quantidade de resina de que ele precisa é bem menor comparado aos outros tecidos. O peso de um laminado biaxial comparado com um de woven roving (A trama do woven roving é bem simples e consiste em um cabo cruzando outro na direção ortogonal) apresenta

redução de até 25%. Esses tecidos são fabricados em direções ortogonais [0/90] ou oblíquas [45/-45].

O diâmetro das fibras também é um parâmetro importante no geral. Callister (2013) afirma que uma fibra de pequeno diâmetro é muito mais resistente que o material volumétrico. Então a probabilidade da presença de um defeito superficial crítico, capaz de levar à fratura, diminui com a redução do volume da amostra, e essa característica é empregada de forma vantajosa em alguns compósitos.

Shackelford (2008) diz que todas as fibras de reforço compartilham a necessidade de ter alta resistência mecânica, mas outras considerações, incluindo custo e massa específica, exercem fortes influências sobre a seleção. A resistência específica (σ_{es}) de uma fibra é definida como a razão entre a resistência à tração (σ_s) e a massa específica da fibra (ρ_f), conforme a Equação 1.

$$\sigma_{es} = \frac{\sigma_s}{\rho_f} \quad \text{Eq. 1}$$

O uso da resistência específica permite que a razão resistência/peso seja considerada em decisões industriais importantes.

3.2.1 Fibra de carbono

Vilar (2009) diz que a fibra de carbono é um material fabricado em diâmetros extremamente pequenos, na faixa de aproximadamente 0,005 a 0,010 milímetros, sendo composta essencialmente por átomos de carbono. A IUPAC considera ainda que a esse tipo de fibra é constituída de cerca de 92% de carbono (fração em massa).

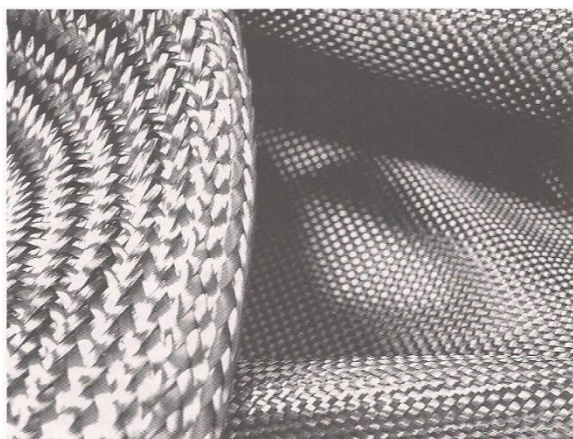
As fibras de carbono estão no mercado há um tempo considerável já e em função de sua característica de resistência, principalmente, está se tornando cada vez mais essencial em ramos como o aeronáutico. Segundo Lubin (1969, apud LEBRÃO, 2008, p. 2) Thomas Edison foi o primeiro a produzir intencionalmente filamentos de carbono pela pirólise do algodão para filamentos de lâmpadas incandescentes em 1878. Mais de 80 anos depois, o excelente desempenho de suas propriedades mecânicas foi demonstrada pelo crescimento de whiskers de grafite com resistência à tração de 2,0 GPa e módulo de rigidez de 800 GPa.

Conforme Wiebeck (2005, apud LEBRÃO, 2008 p. 1) em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras

de carbono utilizando-se poliacrilonitrila (PAN). Durante as últimas décadas, o processo tem sido melhorado em sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo, resistência à manipulação e diminuir deformações e falhas. Nasseh (2011) afirma que as fibras de carbono são produzidas atualmente, tendo variação em suas propriedades mecânicas e em seu sistema de produção. O grande crescimento dessas fibras no mercado talvez explique o motivo do custo desse material ter decrescido vertiginosamente, apesar de ainda ser considerada uma fibra muito cara.

A maioria das fibras de carbono é produzida a partir de um componente básico conhecido como PAN (poliacrilonitrila) já citado anteriormente. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica, que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono em diversas configurações de resistência. Algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A sua cor natural é preta. (Nasseh, 2011) A Figura 6 exibe a fibra de carbono.

Figura 6 - Fibra de carbono



FONTE: Nasseh, 2011

É relevante saber que as fibras de carbono se apresentam de duas formas – descontínuas e contínuas. Segundo Pina (2000, apud VILAR, 2009, p. 29), as fibras de carbono contínuas são armazenadas na forma de bobinas. Estas fibras são desbobinadas na preparação de fitas unidirecionais, usualmente com 5 a 100 cm de largura que se destinam ao preparo de lâminas de pré-impregnados com matrizes poliméricas. Estas fibras contínuas podem também ser utilizadas para a tecelagem de modo a obter tecidos com orientação bidimensional. Os tecidos são uma forma comum de filamentos entrelaçados muito utilizados na fabricação de compósitos estruturais e são caracterizados pelo espaçamento

entre mechas adjacentes, tamanho da mecha, porcentagem de fios em cada direção, eficiência de empacotamento da mecha e pela complexidade do entrelaçamento dos fios.

No processo de determinação de uma fibra de reforço, propriedades como resistência, rigidez, compressão, resistência ao impacto, compatibilidade das fibras com a resina, além de custo são importantes fatores a ser investigados.

A densidade do carbono varia entre todos os seus tipos, mas na maior parte das vezes está localizada entre o vidro e o Kevlar. A resistência à tração é compatível com os vidros R e S e é superior a qualquer outro tipo de fibra quando é necessária a rigidez, ou seja, o módulo de tração e flexão. São as fibras mais caras de todas as disponíveis no mercado. O custo básico por peso é de 10 a 20 vezes maior que o vidro E. (Nasseh, 2011)

De acordo com Callister (2007, apud LEBRÃO, 2008, p. 1) as fibras de carbono são referidas normalmente como fibras de grafite, entretanto, somente fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade com estrutura de grafite tridimensional podem ser denominadas propriamente fibras de grafite. Em virtude de as fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa. As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade, em relação às outras fibras de reforço, tais como aramida e vidro S, e exceder os metais em resistência à tração. Quando se utilizam materiais compósitos de fibras de carbono, sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, quanto à oxidação.

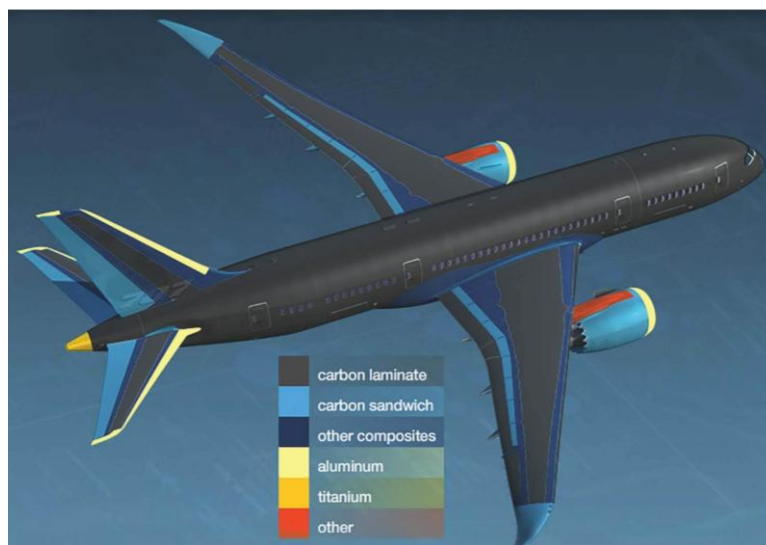
Nasseh (2011) classifica as fibras de carbono de acordo com suas propriedades em: Alta Resistência (HS – High Strength), Módulo Intermediário (IM – Intermediary Modulus), Alta Rigidez ou Módulo (HM – High Modulus) e Superior Rigidez ou Módulo (UHM – Ultra High Modulus). Nessas últimas, as superfícies dos filamentos são ligeiramente oxidadas para melhorar a adesão entre a fibra e a resina. A Figura 7 apresenta algumas propriedades da fibra de carbono de acordo com a classificação citada.

Figura 7 - Classificação da fibra de carbono

	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade Específico
Carbono HS	3500	160 - 270	1,8	90 - 150
Carbono IM	5300	270 - 325	1,8	150 - 180
Carbono HM	3500	325 - 440	1,8	180 - 240
Carbono UHM	2000	400+	2,0	240+

FONTE: Nasseh, 2011

Quando a relação resistência-peso é de grande relevância os compósitos são reforçados com fibras de carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers). As aplicações desse compósito abrangem as mais diversas áreas – setor automotivo (chassis), setor aeronáutico (fuselagem), setor de transportes no geral (motocicletas e bicicletas), setor esportivo (hastes de pesca e raquetes) e setor de bens de consumo (notebooks, cordas de guitarras e tripés). A Figura 8 apresenta a grande aplicação dos CFRP's no ramo aeronáutico.

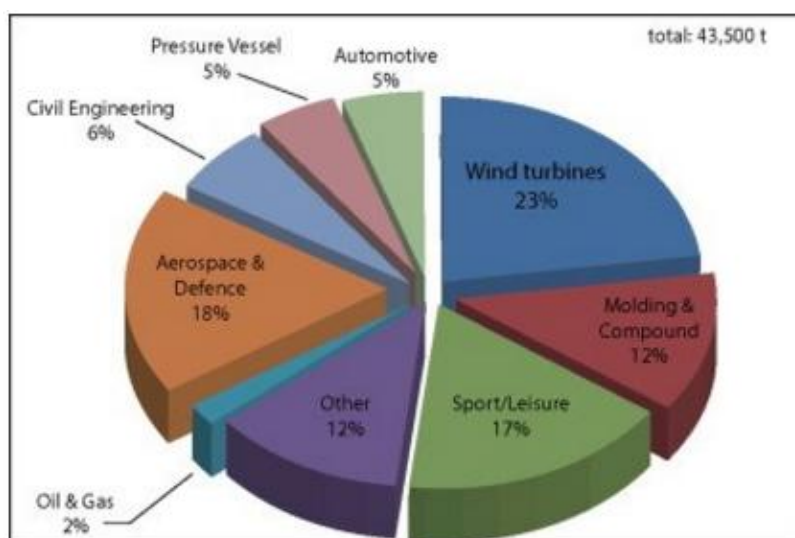
Figura 8 - Uso de CFRP em aeronave**Disponível em:**

<<https://www.google.com.br/search?q=fuselagem+aeron%C3%A1utica+feita+de+fibra+de+carbono&espv=2&biw=1366&bih=623&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiEhI3P7aPNAhWGjJAKHWngB1kQAUIBigB#imgsrc=w6AR9RK2pbZkVM%3A>>, acessado em 02/06/2016.

Na indústria pode ser empregado tanto para adaptar e reforçar uma estrutura existente, constituindo-se numa espécie de reparo ou como uma alternativa de reforço substituindo o aço, no início de um projeto. A capacidade de ser usado como agente de reparo tornou o seu uso cada vez mais dominante na engenharia civil, e as aplicações nessa área incluem o aumento da capacidade de cargas de estruturas antigas que foram projetadas para

tolerar determinada carga de serviço mais baixa do que são hoje. O reparo é popular em muitos casos porque o custo para substituir a estrutura deficiente pode exceder aquele da utilização em reforço em CFRP. Devido à sua elevada rigidez, o CFRP pode ser usado debaixo das extensões de pontes para ajudar a impedir deflexões excessivas. As vantagens do CFRP sobre o aço são principalmente a boa resistência à corrosão e baixo peso. O CFRP é um material de custo mais elevado do que seus concorrentes igualmente usados na indústria da construção civil, como os plásticos reforçados com fibras de vidro (GFRP – mesma nomenclatura dos compósitos reforçados com fibra de carbono) e os plásticos reforçados com fibra de aramida (AFRP). No entanto, o CFRP é considerado geralmente como tendo propriedades superiores. (Vilar, 2009) A Figura 9 exhibe a abrangência das aplicações do CFRP, publicado na Reinforced Plastics em 2012.

Figura 9 - Aplicações do CFRP



Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>>, acessado em 02/06/2016.

3.3 Matriz

A fase matriz dos compósitos fibrosos pode ser de metal, polímero ou cerâmica. Em geral, metais e polímeros são empregados como matrizes, pois alguma ductilidade é desejável. Nos compósitos reforçados com fibras, a fase matriz tem várias funções. Em primeiro lugar, ela liga as fibras umas às outras e atua como meio pelo qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras; apenas uma proporção muito pequena de uma carga aplicada é suportada pela fase matriz. Além disso, o material da matriz deve ser dúctil. O módulo de elasticidade da fibra deve ser muito maior do que o da matriz.

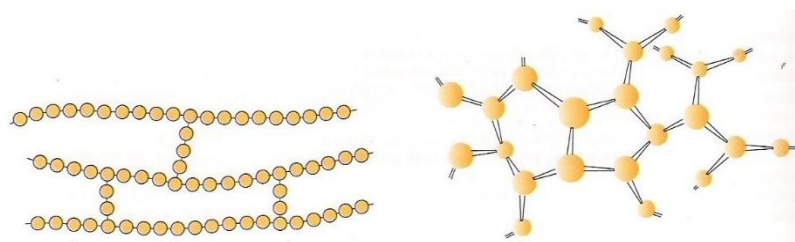
A segunda função da matriz é proteger as fibras individuais contra danos superficiais decorrentes de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir defeitos superficiais capazes de formar trincas, que podem levar a falhas sob baixos níveis de tensão de tração. Finalmente, a matriz separa as fibras umas das outras e, em virtude de sua baixa dureza e plasticidade relativa, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que poderia resultar em uma falha catastrófica; em outras palavras, a fase matriz serve como barreira à propagação de trincas. Além disso, com frequência é a matriz que determina a temperatura máxima de serviço, uma vez que ela normalmente amolece, funde ou degrada em uma temperatura muito mais baixa que a fibra de reforço. (Callister, 2013)

Cunha et al. (2006) diz que os compósitos com matriz polimérica (“PMC – *Polymer-Matrix Composites*” constituídos com fibras como meio de reforço e resina polimérica como fase matriz), quando submetidos a condições de serviço, são expostos também a uma variedade de condições ambientais e diversos tipos de carregamentos mecânicos. Os principais agentes atmosféricos causadores dos ataques ambientais são a temperatura; a umidade relativa do ar; efeitos de radiação ultravioleta; ataques de partículas do espaço; exposição química; água salina; combustível; gases e fluidos hidráulicos. Já as tensões mecânicas são originadas dos esforços que atuam na estrutura, como por exemplo: tração, compressão e cisalhamento. Estas exposições ao meio ambiente combinadas com as deformações e tensões mecânicas que atuam nas estruturas são as condições em que os compósitos poliméricos termorrígidos devem atuar.

Segundo Callister (2013), a resposta de um polímero à forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante. Os polímeros termoplásticos e os polímeros termorrígidos (ou termofixos) são as duas subdivisões. Os termoplásticos amolecem (e eventualmente se liquefazem) quando são aquecidos, e endurecem quando são resfriados – processos totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Uma degradação irreversível ocorre quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido for aumentada excessivamente. Quanto aos termorrígidos, são polímeros em rede. Eles tornam-se permanentemente rígidos durante sua formação e não amolecem sob aquecimento. Os polímeros em rede apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações prendem as cadeias umas às outras para resistir aos movimentos de vibração e de rotação da cadeia em temperaturas elevadas. Dessa forma, os materiais não amolecem quando são

aquecidos. A densidade de ligações cruzadas é geralmente elevada, tal que entre 10% e 50% das unidades repetidas na cadeia têm ligações cruzadas. Apenas um aquecimento até temperaturas excessivas causará o rompimento dessas ligações cruzadas e a degradação do polímero. Os polímeros termofixos são, em geral, mais duros e mais resistentes que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. A maioria dos polímeros com ligações cruzadas e em rede, como os epóxis, são termofixos. A Figura 10 exibe estruturas moleculares com ligações cruzadas e em rede.

Figura 10 - Representação esquemática de estrutura molecular com ligação cruzada e em rede



FONTE: Callister, 2013

Então, de forma geral, é relevante ressaltar que é necessário que as forças de ligações adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, para minimizar o arrancamento das fibras, o que implica que a resistência máxima do compósito depende em grande parte da magnitude dessa relação.

De acordo com Canevarolo (2004, apud BROCKS, 2011, p. 5), para a matriz é importante que se conheça suas propriedades térmicas, físicas e mecânicas. O estudo desse conjunto de propriedades norteia a definição de parâmetros de processamento, como as temperatura de injeção e cura, tempo máximo de injeção, além de proporcionar uma ideia do desempenho mecânico.

Segundo Rezende, Botelho (2000, apud BROCKS, 2011, p. 6), para a indústria aeronáutica, o bom desempenho das funções da matriz é tão importante quanto a baixa densidade, isso motiva o uso de matrizes poliméricas na fabricação de materiais compósitos que, quando reforçados com fibras de vidro e carbono, por exemplo, apresentam boas características para aplicação estrutural e baixo peso.

Para Cunha et al. (2006), a polaridade da matriz tem grande influência na absorção de água pelo compósito. Quanto maior for a polaridade da matriz maior será sua capacidade de absorção de água. As matrizes epóxis, por exemplo, que curam por meio de grupos hidroxilas e amínicos, possuem em sua estrutura tridimensional de grupos fortemente polares

(OH) que podem facilmente se ligar a moléculas de água por meio de ligações de hidrogênio. Além das interações polares entre as moléculas de água e a resina, a configuração espacial da molécula de resina, utilizada como matriz polimérica, também tem influência no processo de absorção de umidade pelo material. Logo, o efeito do aumento da umidade é muito similar ao aumento da temperatura, reproduzindo falhas características de estruturas submetidas ao calor/umidade.

Os efeitos ambientais causados pela temperatura e umidade relativa do ar podem ser reversíveis quando o período de exposição é de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre em ciclos prolongados, onde a combinação da umidade com mudança de temperatura está presente, os efeitos produzidos podem ser irreversíveis devido à afinidade da água por grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar. Nesse caso, geralmente ocorrem alterações destrutivas na interface reforço/matriz polimérica, devido à degradação das prováveis interações físico-químicas existentes entre a resina e a fibra. Em consequência, ocorre o descolamento da fibra, provocando a delaminação do compósito, provocando a delaminação do compósito com a consequente redução das propriedades mecânicas e termofísicas do material compósito. (Cunha et al., 2006)

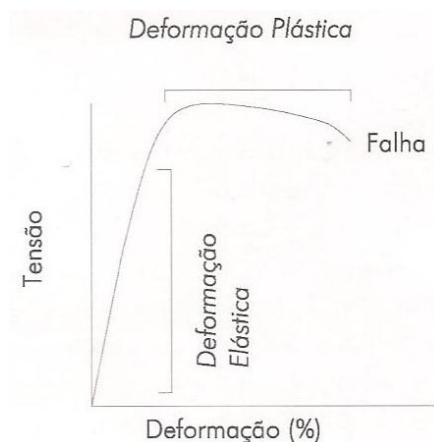
3.3.1 Resina epóxi

Por volta de 1920, iniciou-se o desenvolvimento das resinas epóxi, mas seu uso na escala industrial se deu apenas em meados de 1960. A definição de resina epóxi pode ser dada por resina em que as ligações químicas ocorrem através de grupos radicais epóxi, os quais são o centro da reação.

Conforme Nasseh (2011), a escolha da resina depende dos requerimentos estruturais do laminado, do custo total da resina no preço final da peça, das facilidades para manuseio e cura, tipo do ambiente onde será utilizado o laminado, temperatura de operação e tempo de vida para que foi projetada a estrutura. Todas as resinas utilizadas na laminação de estruturas em material composto são a combinação de vários tipos de resinas e aditivos. Há mais de uma centena de aditivos para fazer esse trabalho e milhares de combinações possíveis que o químico tem a sua disposição para formular a resina antes do construtor estar pronto para colocar o acelerador e o catalisador. A consequência óbvia é que o construtor deve entender o mínimo sobre o produto que está utilizando e principalmente nunca tentar modificá-lo.

Nasseh (2011) afirma ainda que, no que se refere às propriedades mecânicas, a resina ideal deveria ser bem flexível e ao mesmo tempo ter uma elevada resistência à tração. Entretanto, essas duas propriedades são difíceis de serem conjugadas. Uma alta resistência significa ter uma resina quebradiça, enquanto uma de boa elongação significa ter uma resina de baixa resistência à tração, baixa resistência à temperatura (HDT – temperatura até a qual se espera que as propriedades das resinas se mantenham constantes) e baixa resistência à absorção de água. A Figura 11 ilustra a relação tensão-deformação.

Figura 11 - Relação tensão-deformação



FONTE: Nasseh, 2011

No caso de matriz constituída de resina termofixa, o entendimento do mecanismo e o conhecimento da taxa de cura da mesma são necessários, para que seja compreendida a relação existente entre o processamento, a morfologia, as propriedades e a durabilidade do termorrígido puro e, por consequência, do compósito final. Essas mudanças ocorrem irreversivelmente, por intermédio de reação química, usualmente acompanhada pela ação de calor e sob condições variadas de pressão e vácuo. A gelificação e vitrificação são os dois fenômenos macroscópicos mais importantes que ocorrem durante a cura de sistemas termorrígidos. A gelificação corresponde a formação incipiente de uma rede de peso molecular infinito, onde a viscosidade à taxa de cisalhamento tendendo a zero também torna-se infinita, dando origem ao comportamento viscoelástico do fluido. O sistema passa de um líquido viscoso a um gel elástico. Após a gelificação, o processo de cura continua mais lentamente, porque a molhabilidade do sistema fica mais restrita devido ao aumento da densidade de ligações cruzadas. Esse aumento de ligações cruzadas provoca um acréscimo na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas do material. Já a vitrificação é a formação de um sólido vítreo a partir de um monômero, ou seja, é o processo no qual a

reação química é resfriada durante o ciclo de cura, sendo que a resina não atinge o estado de cura total. (Costa et al., 1999)

Conforme Nasseh (2008), uma resina estável e corretamente catalisada tem a tendência de proporcionar um laminado mais estável. A temperatura ambiente também ajuda a acelerar a cura. Quanto mais quente, mais rápido o laminado tende a chegar nas propriedades finais dele.

Para Costa et al. (2006), a reação de cura por ser uma reação exotérmica, tem um comportamento inicialmente caracterizado pelo predomínio de uma queda na viscosidade, devido ao aumento da temperatura interna da formulação. Logo após, tem início o crescimento do seu peso molecular, ou seja, inicia-se a reticulação, provocando um aumento na viscosidade.

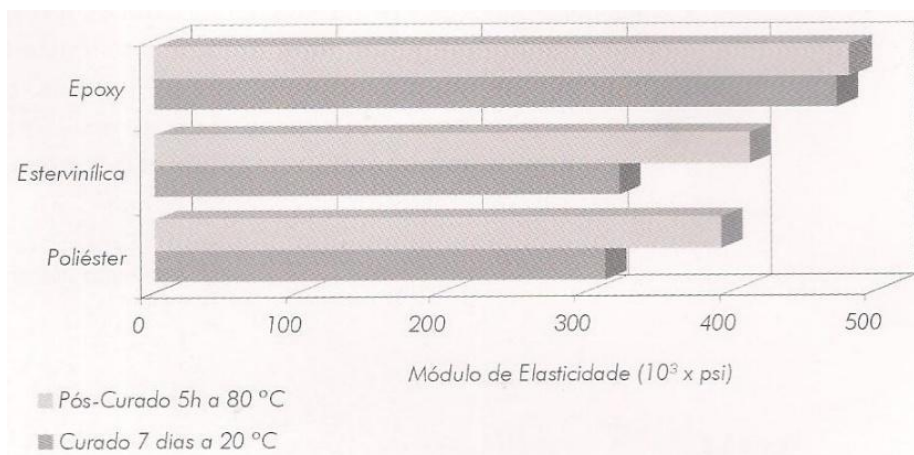
A utilização de agentes de cura (endurecedores) no processamento de resinas epóxi torna esta temperatura com um arranjo tridimensional das cadeias, que confere ao material propriedades como estabilidade, insolubilidade e infusibilidade. A escolha do tipo e da produção de endurecedor está ligada aos parâmetros de processamento do produto, que, por sua vez, está relacionada ao tempo de trabalho da matriz. Os parâmetros de mistura são normalmente definidos pelo fabricante, visando as melhores propriedades do material final. Caso as proporções mais adequadas de resina:endurecedor não sejam consideradas, não se pode garantir a cura completa da resina e, conseqüentemente, as melhores propriedades finais do produto. (BARROS, 2010)

O aumento da viscosidade da resina no processamento de um material compósito está diretamente relacionado com o tipo e a quantidade de endurecedor adicionado. Os tipos de endurecedores são classificados como rápidos e lentos, de acordo com o tipo de cura desejada. (BARROS, 2010)

Nasseh (2011) chama o processo de auxílio da cura através do aumento de temperatura de pós-cura. O mesmo permite promover um relaxamento molecular da resina a uma temperatura elevada e conseqüentemente, melhorar a cura da matriz de resina. Algumas resinas necessitam de pós-cura para atingir os valores mínimos de resistência dentro do laminado. Para um laminado de alta performance o melhor resultado é obtido quando ele pode ser pós-curado em temperatura elevada, normalmente acima de 70°C. Deixar a peça curar utilizando raios solares não proporciona pós-cura, pois nunca se obterá uma temperatura acima da temperatura de distorção térmica da resina. Criar uma temperatura superficial, mesmo que acima dos 45°C, não irá proporcionar o efeito desejado de cura. A

pós-cura deve ser feita sobre toda a superfície e espessura da peça laminada. A Figura 12 mostra valores de módulo de elasticidade para três tipos de resina em duas diferentes condições de cura.

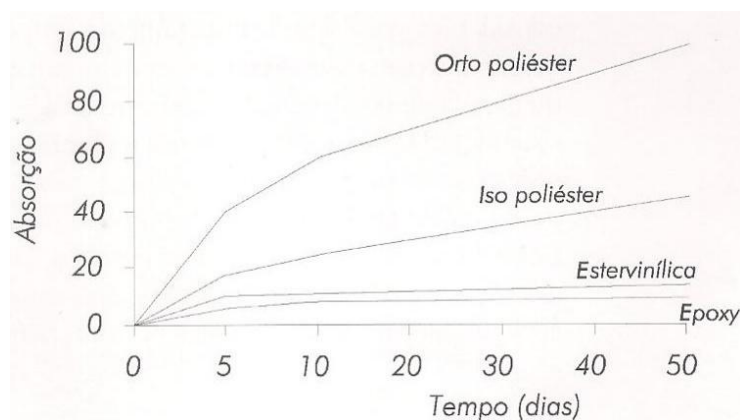
Figura 12 - Comparação de módulo de elasticidade em 3 tipos de resina



FONTE: Nasseh, 2011

O setor náutico é um dos ramos de aplicações usuais das resinas poliméricas. Nesse meio, solucionar problemas com absorção de água e umidade é relevante. Para Cunha et al. (2006), a umidade absorvida nos compósitos pode reduzir a resistência e a rigidez do laminado devido à plasticização da matriz com o enfraquecimento da interface fibra/resina. Essas reduções são particularmente significativas em temperaturas elevadas. Os compósitos poliméricos com a superfície de fibras expostas são citadas como evidências do enfraquecimento da interface fibra/resina devido ao ambiente úmido. Assim, a presença da umidade no compósito pode causar mudanças marcantes nas características físicas e químicas da resina. Em uma resina epóxi, decréscimos no módulo de elasticidade e redução na temperatura de transição vítrea são evidências do fenômeno de plasticização da matriz. Nesse caso, quando se deseja utilizar as propriedades do material por um longo período de tempo, torna-se necessário considerar a ação desse mecanismo de degradação da matriz polimérica. A Figura 13 compara a absorção de água em função do tempo da resina epóxi e outras resinas.

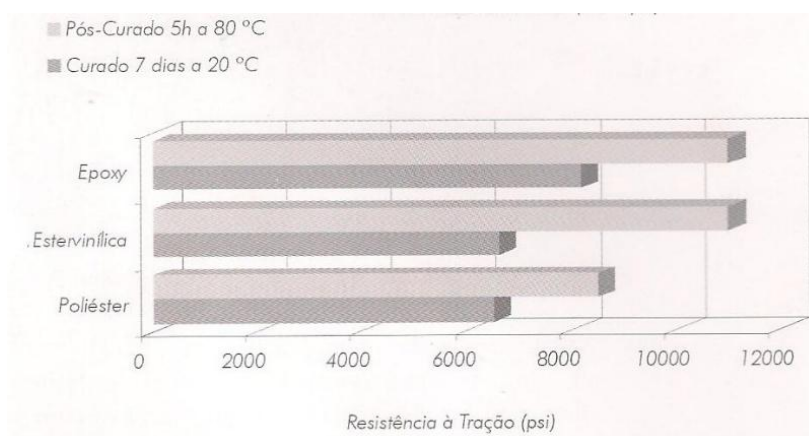
Figura 13 - Relação absorção de água por tempo para várias resinas



FONTE: Nasseh, 2011

Não se deve deixar em esquecimento a função principal da resina, que é molhar as fibras rapidamente. Então, a viscosidade da resina é um fator que afeta diretamente a impregnação das fibras. Nasseh (2011) afirma que, a viscosidade típica para as resinas de laminação manual está na faixa de 300 a 800 cps, mas deve ser lembrado que a viscosidade da resina também é função da temperatura. Durante as estações mais quentes, a viscosidade da resina tende a diminuir, enquanto que no inverno o efeito é o contrário. O ajuste da viscosidade é importante quando se trabalha em regime de produção seriada, a fim de evitar problemas de impregnação e economizar tempo de laminação. Resinas com baixa viscosidade são fáceis de trabalhar, mas frequentemente podem apresentar problemas de escorrimento em superfícies verticais. No aspecto molhabilidade, nenhum outro sistema supera as resinas epóxi. Elas aderem com maior facilidade todas as fibras e transmitem as tensões através do laminado. A Figura 14 exibe a resina epóxi como a melhor resina em relação à resistência à tração.

Figura 14 - Comparação de resistência à tração com 3 resinas



FONTE: Nasseh, 2011

Para Nasseh (2008), a resina necessita possuir propriedades tixotrópicas para que não escorra. O nome tixotropia se refere à propriedade de certos materiais que quando adicionados à resina faz com que não haja escorrimento em superfícies verticais. Quanto maior o valor da tixotropia, maior a propriedade que evita o escorrimento. A adição desse agente também aumentará a viscosidade da resina. O produto responsável por fornecer tixotropia à resina normalmente é uma sílica (Aerosil ou Cabosil). Dependendo do tipo de laminação, uma quantidade adicional de sílica pode ser adicionada à resina, entretanto, sua diluição é complicada sem um equipamento correto. Então, uma das opções é preparar uma pasta bem fluida, uma mistura de resina e sílica e depois bater todo esse material dentro da quantidade que vai ser utilizada para a laminação.

A maior resistência das resinas epóxi quando comparadas com as poliéster e as estervinílicas ocorre devido à baixa contração das resinas epóxi, o que reduz as tensões internas dentro do laminado. A questão do alongamento é outra vantagem das resinas epóxi, fazendo com que a matriz seja capaz de transmitir às fibras todas as solicitações.

Callister (2013) diz que os epóxios são mais caros e, além de aplicações comerciais, também são empregados extensivamente em aplicações aeroespaciais em função de suas excelentes propriedades mecânicas e por desempenhar eficientemente as funções que uma matriz necessita.

3.4 Processo de fabricação

3.4.1 Laminação manual

Tão importante quanto as combinações entre os materiais são os métodos de fabricação possíveis, uma vez que estes implicam em um rigoroso controle do processo produtivo e conseqüentemente, a qualidade final das peças fabricadas. A laminação manual (hand-layup) é, sem dúvidas, um método considerado ultraconvencional no que se refere a construção de compósitos.

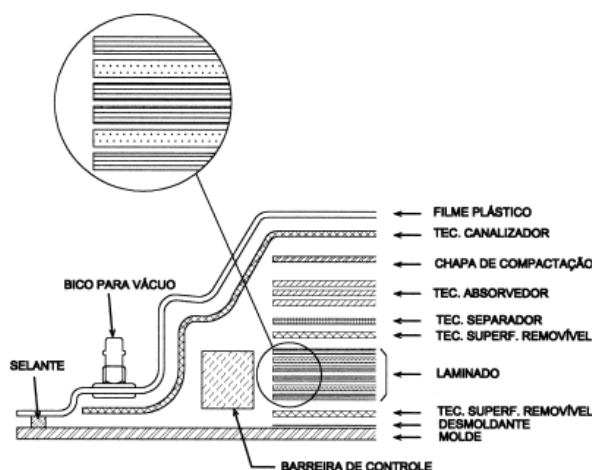
É certo que em termos de custo, velocidade de construção (incluindo cura), consistência, eficiência e resistência, a laminação manual não consegue competir com métodos como a laminação à vácuo (vacuum lamination). Esta consiste no mesmo passo-a-passo da laminação manual contando com a adição da ação do vácuo. Logo, o conhecimento acerca da laminação manual é importante, uma vez que ela é a base para o conhecimento dos processos mais complexos.

Tudo se inicia como no processo de laminação manual. A primeira etapa é preparar o molde onde serão adicionados as fibras, a resina e os tecidos que auxiliarão na retirada do excesso da resina. Nasseh (2008) afirma ser importante essa primeira etapa, uma vez que laminar qualquer coisa sobre um molde de baixa qualidade é esperar que se tenha um longo caminho de acabamento pela frente. Então, se o molde for novo, vai ser necessário um tratamento maior com desmoldantes, até que a peça retenha quantidade suficiente de produto, que não permitirá que ele cole no molde. Se o molde for usado, ele vai precisar ser limpo e se contiver excesso de cera, que também colabora para colar a peça no molde, ela terá de ser removida com solvente para depois se iniciar a aplicação de desmoldante.

O filme desmoldante é utilizado nos moldes também com o objetivo de atuar na tentativa de retirar a peça do molde de forma eficiente ao final do processo. Para Nasseh (2008), o uso de álcool polivinílico, também conhecido como filme desmoldante de PVA, é uma garantia de que o laminado vai sair do molde de qualquer maneira. Se o molde já tiver algumas camadas de cera, é possível aplicar diretamente o álcool polivinílico sobre ele e em seguida, iniciar a laminação. Um dos segredos é usar uma esponja retangular de forma contínua e gradativamente percorrer de um lado ao outro do molde até que toda a superfície tenha sido coberta.

Segundo Cândido et al. (2000), os principais materiais necessários para o processo de laminação são: tecido separador, tecido absorvedor do excesso de resina, tecido canalizador para remoção do ar, chapa de compactação e tecido superficial removível. A Figura 15 ilustra o esquema de laminação à vácuo, considerando que para esta houve apenas a adição da bolsa de vácuo diferenciando-a da laminação manual.

Figura 15 - Esquema do processo de laminação à vácuo



FONTE: Cândido et al. (2000)

O tecido separador (também conhecido como skin coat) é um desmoldante que fica posicionado sobre a última camada do laminado, para evitar que o tecido absorvedor do excesso de resina adira ao tecido superficial removível ou à superfície não acabada do produto. Este tecido é feito de fibra de vidro impregnada com silicone ou teflon e de malha porosa para permitir que o excesso de resina e os voláteis removidos dos laminados fluam livremente através dele. A camada de tecido superficial removível é moldada sobre a superfície do laminado para proporcionar uma superfície quimicamente limpa para a colagem, quando este é removido. (Cândido et al., 2000)

As camadas de tecido absorvedor são posicionadas cobrindo toda a área do laminado, de modo que a absorção do excesso de resina seja uniforme. Sobre essas camadas pode ser colocada uma chapa fina metálica com alguns furos de 1,0mm de diâmetro, distribuídos regularmente. Esta chapa auxilia na compactação uniforme e melhora o acabamento superficial do lado do laminado que não está em contato com o ferramental de moldagem. Para cobrir completamente esta montagem, é colocada uma camada de tecido canalizador, visando uma remoção do ar e de gases resultantes da cura. A característica principal deste tecido é assegurar que o fluxo dos gases ocorra normalmente, mesmo sob a ação da pressão aplicada durante a cura. (Cândido et al., 2000)

Um bom planejamento antes de iniciar o processo implica em não deixar a laminação de uma camada pela metade. Nasseh (2008) afirma que a resina deve ser catalisada aos poucos, sempre com quantidade suficiente para trabalhar durante um período de 10 a 15 min. Se a quantidade de catalisador for ajustada e conferida pelo teste de geltime, para um tempo de gel de 30 min, o ideal é que toda a resina dentro deste pote seja colocada na peça em 10 min. O teste de geltime para determinação do tempo de gelificação da resina, da temperatura de reação e pico de temperatura é sempre feito com 100g de resina. Então, a resina confinada em um pote com quantidade acima de 100g tende a ter um tempo de gelificação menor. Do mesmo modo que o tempo de gel diminui quando a quantidade de resina é maior dentro do vasilhame ou bandeja plástica, ele aumenta quando a resina catalisada é colocada sobre a peça e em seguida laminada.

A aplicação de vácuo nos laminados é uma operação necessária para se obter a compactação uniforme das camadas e simultaneamente extrair voláteis, solvente e umidade, evitando a formação de porosidades ou vazios e remover o excesso de resina para evitar a presença de bolsas de resina pura. Em razão disto, é necessário confeccionar uma bolsa de filme plástico flexível, cujo tipo de material escolhido seja compatível com a temperatura e

o tempo de cura dos laminados e a espessura do filme seja resistente à pressão. Ao final da preparação da bolsa plástica, uma fita selante é colocada no contorno da borda do ferramental de moldagem, de modo a fechar o filme plástico e formar finalmente a bolsa. (Cândido et al., 2000)

Uma vez acionada a bomba de vácuo, o ar que está dentro da bolsa é retirado, o que faz com que a pressão no interior da bolsa seja menor que a atmosférica normal. Tal fato compacta a peça e com a ajuda dos filmes absorvedores extraem o máximo de excesso de resina possível, aumentando a eficiência do laminado final, no que diz respeito à propriedades mecânicas relativas.

Com isso, ressaltam-se vantagens da utilização do processo de laminação à vácuo na construção de compósitos como simplicidade, baixo investimento em moldes, nenhuma restrição ao tamanho das peças, flexibilidade de projeto entre outros, ficando como limitações a alta incidência de mão de obra e o possível acabamento não tão bom quanto o desejado, já que trata-se de um processo que depende da habilidade humana.

3.5 Ensaios

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 ações controladas, o teste pode fornecer informações sobre o comportamento do material sob tensão, como delaminação, bem como a maneira como as falhas se iniciam. (HODGKINSON, 2000 apud BROCKS, 2011, p. 13)

O ensaio de flexão avalia propriedades do laminado e também da matriz. O teste de flexão, relativamente simples e de baixo custo, determina a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, podendo ser empregado para análise da tenacidade à fratura interlaminar. (HODGKINSON, 2000 apud BROCKS, 2011, p. 13)

3.6 Análise dinâmica mecânica (DMA)

A análise dinâmica mecânica (DMA) ou a análise termomecânica dinâmica (DMTA) – termo também empregado por alguns autores – é uma técnica utilizada para o estudo e caracterização de materiais sendo muito útil para observar a sua natureza viscoelástica. Esse método foi desenvolvido para a caracterização do comportamento mecânico de um material quando este é submetido à forças dinâmicas (frequência – carga oscilante) e a um programa

controlado de temperatura. Dessa forma, a DMA é uma técnica na qual as respostas elástica e mecânica de uma amostra sob carga oscilante são monitoradas em relação à temperatura, tempo e frequência. Essa técnica permite a determinação quantitativa das propriedades mecânicas da amostra ao submetê-la a uma carga oscilante, em uma dada frequência, temperatura e tempo determinado. (ORNAGHUI JUNIOR, 2009 apud VILAR, 2013, p. 29)

O comportamento viscoelástico é uma consequência das interações moleculares e flexibilidade das cadeias poliméricas pelo que resulta numa técnica particularmente excelente para analisar o efeito da carga no compósito. (PAULA, 2011)

Rezende (2006) afirma que para que o compósito polimérico reparado atenda aos requisitos de serviço exigidos no setor aeronáutico, além das elevadas propriedades mecânicas (tração, compressão, cisalhamento etc.) é importante que seja verificada a sua temperatura máxima de serviço, baseando-se no conhecimento da temperatura de transição vítrea (T_g), que pode ser determinada por análise térmica dinâmica mecânica (DMTA). Em geral, a temperatura de transição vítrea (T_g) está relacionada à região de transição vítrea para uma ampla variedade de polímeros termoplásticos e termorrígidos. Nos últimos anos, a técnica de DMTA também tem despertado o interesse para a caracterização de pré-impregnados e compósitos estruturais de matrizes poliméricas aplicadas no setor aeronáutico. Uma das vantagens dessa técnica é a possibilidade de determinação da T_g diretamente em pequenas barras ou vigas do material a ser analisado.

A transição vítrea ocorre quando as cadeias moleculares de um polímero adquirem energia suficiente (geralmente de fonte térmica) para superar as barreiras de energia necessárias à rotação de ligações. Sob estas condições, o material passa do estado vítreo, caracterizado pela mobilidade limitada, para o estado de mobilidade, atingindo o equilíbrio termodinâmico. A diminuição do módulo de armazenamento (E') associado esta mudança consiste de cerca de três ordens de grandeza para um polímero amorfo. A região de transição vítrea também é caracterizada por aumento no módulo de perda (E'') e na tangente de perda ($\tan \delta = E''/E'$). (REZENDE, 2006)

Paula (2011) afirma que o valor de E (módulo de elasticidade), propriedade também obtida com as análises de DMA, está diretamente relacionado com a capacidade de o material suportar cargas mecânicas com a deformação recuperável sendo análogo ao módulo de flexão.

O amortecimento (damping) é um importante fator relatado no estudo do comportamento dinâmico dos compósitos reforçados com fibra e diferem totalmente dos

metais e ligas convencionais. As fontes de dissipação de energia em compósitos reforçados com fibra são:

- a) Natureza viscoelástica da matriz e/ou fibra: a maior contribuição para o amortecimento dos compósitos é devido à matriz;
- b) Amortecimento devido à interface: a interface possui uma espessura considerável e suas propriedades são diferentes da fibra embebida e da matriz. A natureza da interface (fraca, ideal ou forte) está de acordo com a respectiva propriedade mecânica ou amortecimento;
- c) Amortecimento devido ao dano: neste caso existem praticamente dois tipos – amortecimento friccional ou por atrito, deslizamento nas regiões de contorno entre a interface fibra/matriz ou delaminação e o amortecimento devido à dissipação de energia na área de fissuras da matriz, fibras quebradas entre outros. (VILAR, 2013)

3.7 Relações matemáticas relevantes

Além das propriedades da fibra e da resina serem importantes para um melhor resultado do compósito estrutural, a interface entre eles também deve ser levada em consideração. Considerando uma interface muito boa, tal que a deformação da matriz seja a mesma da fibra (situação de isodeformação), tem-se que a carga suportada pelo compósito é igual a soma das cargas suportadas pela matriz e pela fibra, conforme a Equação 2.

$$F_c = F_m + F_f \quad \text{Eq. 2}$$

Como, a força é a multiplicação da tensão pela área, tem-se a Equação 3, que pode ser substituída na Equação 2.

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad \text{Eq. 3}$$

Dividindo todos os termos pela área total de seção transversal do compósito, tem-se a Equação 4.

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo,

$$\frac{A_m}{A_c} = V_m \text{ (fração volumétrica da matriz)}$$

$$\frac{A_f}{A_c} = V_f \text{ (fração volumétrica da fibra)}$$

Logo, obtém-se a Equação 5.

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad \text{Eq. 5}$$

A Equação 6 mostra a relação para o estado de deformação.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m + \varepsilon_f \quad \text{Eq. 6}$$

Então, dividindo cada termo por sua respectiva deformação, obtém-se os módulos de elasticidade, conforme a Equação 7.

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f \quad \text{Eq. 7}$$

Com isso, tem-se de acordo com a Equação 8 a relação desejada entre os módulos de elasticidades e as frações volumétricas da matriz, fibra e compósito.

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad \text{Eq. 8}$$

Ou ainda, considerando que o compósito só compreende as fases matriz e fibra, tem-se que a soma das frações volumétricas da fibra e da matriz é igual a 1, conforme a Equação 9.

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad \text{Eq. 9}$$

Dessa forma, E_c é igual a média ponderada pela fração volumétrica dos módulos de elasticidade das fases fibra e matriz.

Outras relações importantes para essa análise são a Equação 10, que apresenta o cálculo da fração volumétrica da fibra de forma “superdimensionada”, a Equação 11 que mostra a fórmula da fração volumétrica da fibra de forma mais real, a Equação 12 que exhibe a relação matemática para a fração volumétrica da resina e a Equação 13 que apresenta a fração volumétrica para os vazios. Os parâmetros envolvidos nessas relações são massa do compósito (m_c), massa da fibra (m_f), densidade do compósito (ρ_c), densidade da fibra (ρ_f) e densidade da resina (ρ_r).

$$V_f = \frac{\rho_r m_f}{(\rho_r m_f) + (\rho_f m_r)} \quad \text{Eq. 10}$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{m_f}{m_c} \quad \text{Eq. 11}$$

$$V_r = \left[\frac{(m_c - m_f)}{m_c} \right] \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho_r} \right) \quad \text{Eq. 12}$$

$$V_v = 100 - (V_f - V_r) \quad \text{Eq. 13}$$

Rodrigues (2014) afirma que espaços vazios e porosidade podem agir como concentradores de tensão que levam à falha de amostras de materiais compósitos. Na medida em que o conteúdo de vazios em compósitos se torna cada vez mais importante, as técnicas de fabricação, ainda não totalmente desenvolvidas, e a origem natural das fibras necessariamente induzem à variações nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Como a densidade da fibra foi definida pelo fabricante da mesma ($\rho_f = 1,8 \text{ g/cm}^3$), as Equações 14 e 15 mostram as relações (divisão de massa por volume) para se obter as densidades da resina e do compósito, respectivamente.

$$\rho_r = \frac{m_r}{v_r} \quad \text{Eq. 14}$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} \quad \text{Eq. 15}$$

Para gerar os gráficos tensão-deformação dos ensaios de flexão dos compósitos, as relações apresentadas nas Equações 16 (tensão de flexão) e 17 (deformação) foram utilizadas. Os parâmetros envolvidos nessas relações são a carga aplicada no corpo de prova (P), comprimento útil ou entre os apoios (L), largura (b), espessura (d) e deformação (D).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad \text{Eq. 17}$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de pesquisa avalia o comportamento do compósito estrutural de fibra de carbono e resina epóxi mediante variações de frações volumétricas de resina de 15%, 25%, 35% e 45%, bem como variações nos processos de cura, utilizando-se da ação do vácuo, da prensa hidráulica com uma pressão de 1tnf e sem pressão nenhuma agindo sobre o mesmo. Dois fatores são comuns aos 3 processos: a laminação manual foi o ponto inicial e em todos os compósitos foram utilizadas 4 camadas de reforço. Além disso, o processo de cura se deu para todos os laminados em um período de 5 horas, sugerido pelo fabricante da resina epóxi, a qual indica sua cura entre 4 e 6 horas.

Assim, foram obtidos 12 laminados distintos e a partir de cada um desses foram obtidos 5 corpos de prova para serem submetidos a ensaios de tração, 5 para ensaios de flexão e 1 para análise de DMA, totalizando 60 amostras para os ensaios de tração, 60 amostras para ensaios de flexão e 12 para análises de DMA, completando 132 corpos de prova no total.

Todos os processos de fabricação, os ensaios de tração e flexão foram realizados nos Laboratórios de Usinagem, Soldagem e Ensaios Mecânicos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Já as análises de DMA foram realizadas no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UAEM/CCT/UFCG). Foram utilizados equipamentos relevantes à esta pesquisa, como Bomba de Vácuo, Prensa Hidráulica, Máquina de Ensaios Mecânicos Universal (EMIC CCE 100KN), Equipamento DMA Q 800 (TA Instruments) e Mini Retífica.

4.1 Caracterização dos constituintes

As matérias-primas principais para utilização neste trabalho de pesquisa foram a fibra de carbono e a resina epóxi. A fibra é do tipo tecido bidirecional 200g/m². A resina é do tipo epóxi ES260, própria para laminações manuais, e seu catalisador é do tipo E35.

Antes de dar início ao processo de fabricação, foi obtida a massa da fibra que seria utilizada em cada laminado e após o processo, a massa de cada compósito. A densidade da fibra foi obtida de acordo com o fabricante ($\rho_f = 1,8 \text{ g/cm}^3$) e a densidade da resina foi obtida experimentalmente através da massa e do volume de um corpo de prova apenas da própria resina fabricada com este fim ($\rho_r = 1,2 \text{ g/cm}^3$).

Além disso, foram utilizados peel ply e acrílon como tecidos absorvedores de resina e desmoldante líquido. Para auxílio dos processos de fabricação foram utilizados pincéis, seringas, rolo de espuma, recipiente para mistura da resina e lixa. Os EPI's foram luvas, jaleco, óculos de proteção, máscara e protetor auricular tipo concha.

4.2 Projeto das amostras

As amostras submetidas aos ensaios desta pesquisa tiveram suas dimensões determinadas em função das normas ASTM D3039 para ensaios de tração em materiais compósitos e ASTM D7264 para ensaios de flexão em materiais compósitos. As amostras para as análises de DMA se basearam nas características do próprio equipamento, já que não existe uma norma para tal.

A Tabela 1 apresenta as dimensões dos corpos de prova para cada ensaio, considerando que as espessuras variaram em função do processo de fabricação, mas que em todos se fez uso de 4 camadas de fibra intercaladas por 4 camadas de resina.

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova para cada tipo de ensaio

Dimensões - amostras		
Tipo de ensaio	Comprimento (mm)	Largura (mm)
Tração	70	15
Flexão	120	13
DMA	40	5

Para os ensaio de tração, a norma recomenda que se use 'tabs' de cerca de 20 mm para tentar reduzir a dificuldade de fixar o corpo de prova nas garras da máquina de ensaios.

4.3 Preparação dos compósitos

Os compósitos em análise neste trabalho foram obtidos levando em consideração 3 processos de cura. Para os casos de cura sem pressão e com ação do vácuo foi utilizado um molde retangular, no qual o laminado foi apoiado e uma bolsa plástica para envolver o mesmo. Já para o caso em que a cura se deu por ação da prensa hidráulica foram utilizados pratos metálicos, normalmente usados em ensaios de compressão. Nos 3 casos, antes de dar início ao processo, o desmoldante foi usado 3 vezes intercalados por um período de secagem de cerca de 30 minutos a fim de facilitar o desmolde do laminado do molde ou dos pratos.

Inicialmente, foi feita laminação manual e a cura ocorreu sob pressão de 1 tnf determinada na prensa hidráulica. No processo seguinte, a cura se deu sob a ação do vácuo com o auxílio da bomba de vácuo. E por fim, a cura ocorreu naturalmente à pressão ambiente. A Tabela 2 mostra detalhadamente a simbologia de cada amostra de acordo com a variação da fração volumétrica de resina e do processo de cura.

Tabela 2 - Simbologia das amostras de acordo com suas variações

Descrição de amostras segundo suas variações		
Amostra	Fração vol.de resina (%)	Processo de cura
A1	15	Prensa hidráulica
A2	25	
A3	35	
A4	45	
A5	15	Vácuo
A6	25	
A7	35	
A8	45	
A9	15	Sem pressão
A10	25	
A11	35	
A12	45	

Para uma melhor caracterização das amostras, as Tabelas 3, 4 e 5 exibem as propriedades relevantes para cada tipo de processo de cura e fração volumétrica de resina.

Tabela 3 - Propriedades das amostras curadas na prensa

Amostra A1		Amostra A2	
Massa da fibra (g)	33,48	Massa da fibra (g)	34,57
Massa do compósito (g)	39,33	Massa do compósito (g)	45,46
Volume do compósito (cm ³)	33,63	Volume do compósito (cm ³)	38,32
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,17	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,19
Volume de resina (ml)	7,8 (5,2 + 2,6)	Volume de resina (ml)	18 (12 + 6)
Fração volumétrica de fibra (%)	55,3	Fração volumétrica de fibra (%)	50
Fração volumétrica de resina (%)	15	Fração volumétrica de resina (%)	25
Fração volumétrica de vazios (%)	29,7	Fração volumétrica de vazios (%)	25
Amostra A3		Amostra A4	
Massa da fibra (g)	32,43	Massa da fibra (g)	24,59
Massa do compósito (g)	50,08	Massa do compósito (g)	38,74
Volume do compósito (cm ³)	44,07	Volume do compósito (cm ³)	32
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,13	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,21
Volume de resina (ml)	24 (16 + 8)	Volume de resina (ml)	24 (16 + 8)
Fração volumétrica de fibra (%)	41	Fração volumétrica de fibra (%)	42,6
Fração volumétrica de resina (%)	35	Fração volumétrica de resina (%)	45
Fração volumétrica de vazios (%)	24	Fração volumétrica de vazios (%)	12,4

Tabela 4 - Propriedades das amostras curadas no vácuo

Amostra A5		Amostra A6	
Massa da fibra (g)	45,28	Massa da fibra (g)	45,92
Massa do compósito (g)	53,84	Massa do compósito (g)	60,42
Volume do compósito (cm ³)	44,1	Volume do compósito (cm ³)	49,01
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,22	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,23
Volume de resina (ml)	10,5 (7 + 3,5)	Volume de resina (ml)	22,5 (15 + 7,5)
Fração volumétrica de fibra (%)	57	Fração volumétrica de fibra (%)	52
Fração volumétrica de resina (%)	15	Fração volumétrica de resina (%)	25
Fração volumétrica de vazios (%)	28	Fração volumétrica de vazios (%)	23
Amostra A7		Amostra A8	
Massa da fibra (g)	43,08	Massa da fibra (g)	44,55
Massa do compósito (g)	63,2	Massa do compósito (g)	66,57
Volume do compósito (cm ³)	50,18	Volume do compósito (cm ³)	47,4
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,26	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,4
Volume de resina (ml)	30 (20 + 10)	Volume de resina (ml)	60 (40 + 20)
Fração volumétrica de fibra (%)	48	Fração volumétrica de fibra (%)	52
Fração volumétrica de resina (%)	35	Fração volumétrica de resina (%)	45
Fração volumétrica de vazios (%)	17	Fração volumétrica de vazios (%)	3

Tabela 5 - Propriedades das amostras curadas sem pressão

Amostra A9		Amostra A10	
Massa da fibra (g)	29,31	Massa da fibra (g)	29,38
Massa do compósito (g)	36,08	Massa do compósito (g)	42,37
Volume do compósito (cm ³)	29,36	Volume do compósito (cm ³)	37,55
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,23	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,13
Volume de resina (ml)	8,1 (5,4 + 2,7)	Volume de resina (ml)	15 (10 + 5)
Fração volumétrica de fibra (%)	55,5	Fração volumétrica de fibra (%)	43,5
Fração volumétrica de resina (%)	15	Fração volumétrica de resina (%)	25
Fração volumétrica de vazios (%)	29,5	Fração volumétrica de vazios (%)	31,5
Amostra A11		Amostra A12	
Massa da fibra (g)	26,83	Massa da fibra (g)	27,02
Massa do compósito (g)	40,36	Massa do compósito (g)	45,26
Volume do compósito (cm ³)	37,02	Volume do compósito (cm ³)	36,63
Densidade do compósito (g/cm ³)	1,09	Densidade do compósito (g/cm ³)	1,24
Volume de resina (ml)	16,2 (10,8 + 5,4)	Volume de resina (ml)	20,1 (13,4 + 6,7)
Fração volumétrica de fibra (%)	40,3	Fração volumétrica de fibra (%)	41
Fração volumétrica de resina (%)	35	Fração volumétrica de resina (%)	45
Fração volumétrica de vazios (%)	24,7	Fração volumétrica de vazios (%)	14

A partir dos 12 tipos de laminados, foram obtidas as amostras para os ensaios de tração, flexão e DMA de acordo com as dimensões apresentadas anteriormente, com o auxílio da mini retífica.

4.4 Características dos ensaios

Para os ensaios de tração foram então analisados 60 corpos de prova, uma vez que a norma ASTM D3039 sugere um espaço amostral de 5 em cada tipo, para que haja uma maior confiabilidade nos resultados e uma maior facilidade na comparação quando os gráficos tensão-deformação forem gerados. A velocidade de ensaio requerida pela máquina de ensaios foi de 2 mm/min, valor sugerido pela norma. O software utilizado para a obtenção desses gráficos foi o Excel e os inputs foram o comprimento total do corpo de prova (mm) e a área de seção transversal (mm²), além da força (N) e da deformação (mm) fornecidos pela máquina de ensaios. As Figuras 16 e 17 mostram o corpo de prova submetido ao ensaio de tração.

Figura 16 - Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Autoria Própria

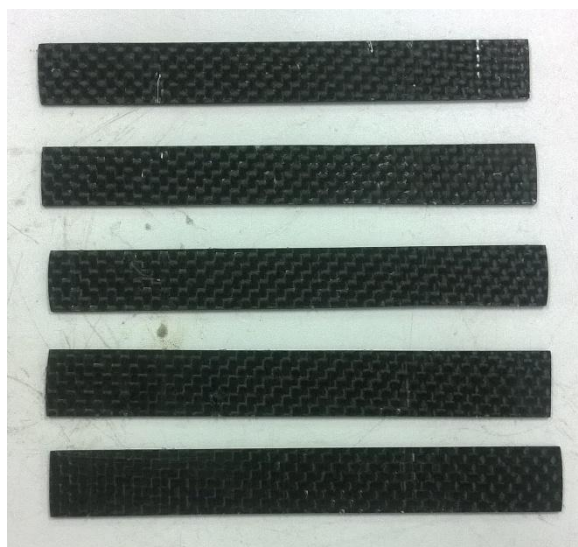
Figura 17 - Corpo de prova fraturado após ensaio de tração



Fonte: Autoria Própria

Para os ensaios de flexão foram utilizados também 60 corpos de prova por recomendação da norma ASTM D7264. A velocidade de ensaio utilizada foi de 1 mm/min. Os gráficos tensão-deformação também foram gerados no Excel e os inputs nesse caso, foram o comprimento útil do corpo de prova (mm), o comprimento (mm), a largura (mm) e a espessura (mm), bem como a deformação (mm) e a força (N) apresentados pela máquina de ensaios. As Figuras 18 e 19 apresentam os corpos de prova para ensaios de flexão e um corpo de prova submetido ao ensaio.

Figura 18 - Corpos de prova para ensaios de flexão



Fonte: Autoria Própria

Figura 19 - Ensaio de flexão



Fonte: Autoria Própria

Já para as análises de DMA, os corpos de prova têm dimensões menores em função do próprio equipamento. O equipamento é constituído de um forno dentro do qual estão cabeçotes móveis que podem ser combinados para diferentes tipos de análise, a depender das propriedades de cada amostra a ser analisada. Em materiais poliméricos, além da temperatura de transição vítrea, pode-se avaliar o comportamento mecânico em função da

temperatura. É especialmente utilizado para monitoramento das propriedades mecânicas como resistência mecânica, queda do módulo, tensão de ruptura etc, em materiais que sejam submetidos à variações de temperatura em suas aplicações.

Para este ensaio foram utilizados 12 corpos de prova, um para cada tipo de laminado, uma vez que a confiabilidade do teste dispensa um espaço amostral maior. Alguns dados são requeridos para este tipo de análise. Estes estão apresentados na Tabela 6. A Figura 20 mostra os corpos de prova para análise de DMA. Os dados obtidos através desse ensaio e analisados nesse trabalho são os módulos elásticos, os quais se relacionam diretamente com a resistência à deformação e as temperaturas de transição vítrea (T_g), de transição vítrea inicial (T_{g-i}) e de transição vítrea final (T_{g-f}). Pode-se obter também os módulos de amortecimento, mas estes não entrarão nesta análise.

Tabela 6 - Dados requeridos para análise de DMA

Parâmetros - análise de DMA	
Amplitude (μm)	15
Frequência (Hz)	2
Taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	5

Figura 20 - Corpo de prova para DMA



Fonte: Autoria Própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio mecânico de tração

O número de amostras deste ensaio apresenta confiabilidade abrangendo justamente perdas por falhas no processo de fabricação e/ou falhas no ensaio devido aos escorregamentos provenientes da dificuldade de adesão entre a garra da máquina e o corpo de prova. Então, o Gráfico 1 é a representação das amostras A1, A2, A3 e A4, as quais possuem 15%, 25%, 35% e 45% de resina e sua cura se deu com o auxílio da prensa hidráulica sob uma pressão de 1tnf. Deles podem ser extraídos o módulo de elasticidade, a tensão de ruptura, o limite de resistência à tração e a deformação máxima do material, apresentados na Tabela 7.

Gráfico 1 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas na prensa

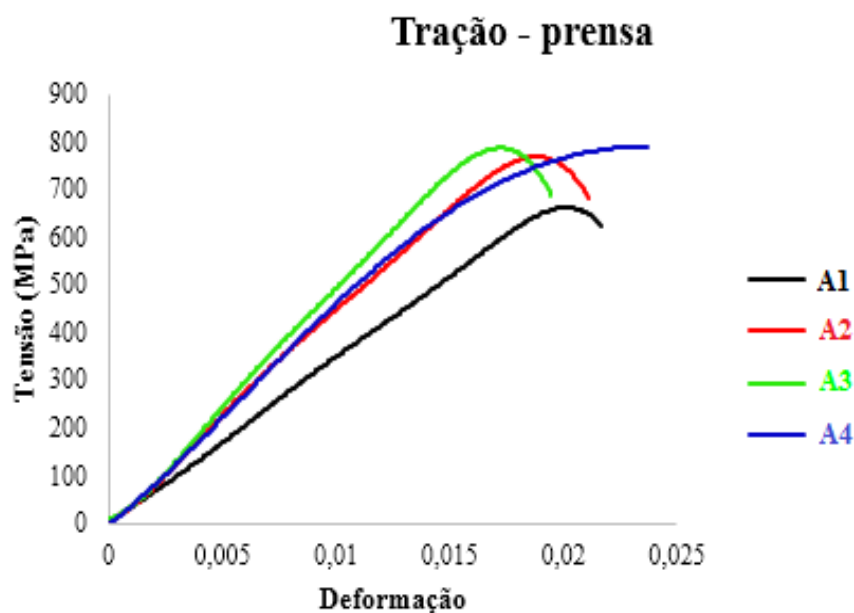


Tabela 7 - Propriedades mecânicas para as amostras curadas na prensa em ensaios de tração

Propriedades - Prensa hidráulica				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Deformação
A1	36,64	648,82	688,97	0,02167
A2	45,79	674,48	808,7	0,02112
A3	47,66	698,59	840,69	0,01945
A4	48,98	801	842,44	0,02635

Os módulos elásticos foram obtidos segundo a Lei de Hooke, baseando-se nos valores de tensão e deformação. Pode-se observar que os módulos de elasticidade – medida da rigidez na região elástica – tem seus valores em ordem crescente à medida que se aumenta a fração volumétrica de resina no processo em que a cura se deu através da prensa hidráulica sob uma pressão de 1tnf. Quando o módulo elástico aumenta significa que maior é a resistência do material à deformação, ou seja, maior é a sua facilidade de retorno ao estado inicial se a carga que está sendo aplicada for removida. Logo, com este processo de cura a amostra que apresentou maior módulo de elasticidade foi a A4, a qual possui 45% de resina.

O limite de resistência à tração é o valor máximo de carga que o material pode suportar. Até esse limite a deformação é algo uniforme e se essa força for mantida o que ocorrerá é a fratura do material em um valor de carga um pouco menor, que é a tensão de ruptura. Quanto às tensões de ruptura e aos limites de resistência à tração também percebe-se um crescimento em função do aumento da fração volumétrica de resina. Os maiores valores se apresentam na amostra A4, que é a que possui maior quantidade de resina. Entretanto, em aplicações aeronáuticas é relevante observar o aumento das propriedades mecânicas em relação ao peso do componente – propriedades relativas. Deve-se avaliar a relevância, nesse caso por exemplo, de se obter um aumento de cerca de 2 MPa em resistência à tração em função de aumento de 10% de fração volumétrica de resina entre as amostras A3 e A4. Assim, ficam as amostras A3 e A4 como sendo as que apresentam melhores valores de limite de resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente com 35% e 45% de resina.

O Gráfico 2 exibe as curvas tensão-deformação das amostras A5, A6, A7 e A8, que possuem 15%, 25%, 35% e 45% de resina, respectivamente e a cura ocorreu sob a ação do vácuo, com o auxílio da bomba de vácuo. As propriedades destes ensaios são exibidas na Tabela 8.

Gráfico 2 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas em vácuo

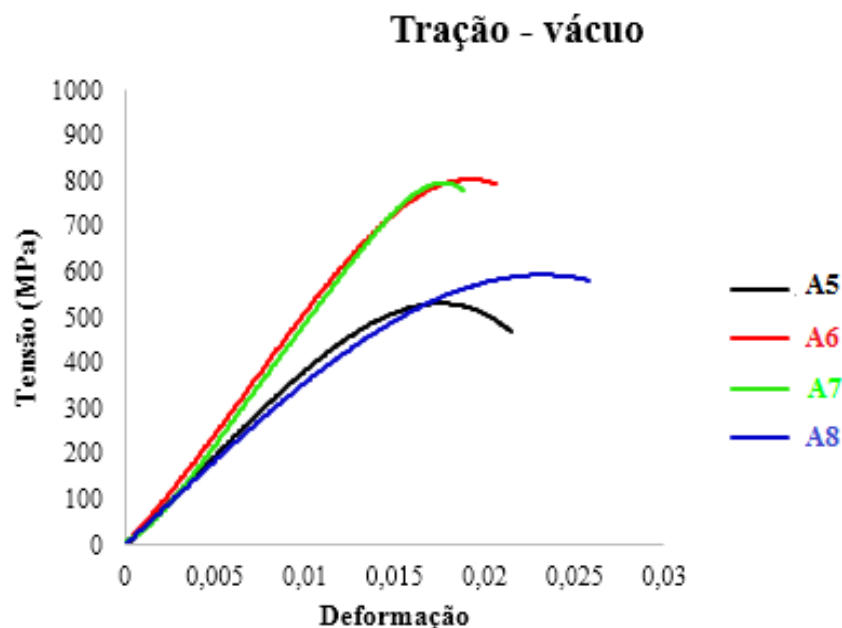


Tabela 8 – Propriedades mecânicas para as amostras curadas no vácuo em ensaios de tração

Propriedades – Vácuo				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Deformação
A5	35,76	472,97	560,16	0,02145
A6	49,21	799,16	864,9	0,02061
A7	48,36	778,72	855,36	0,01889
A8	33,62	576,93	640,38	0,02579

No processo em que a cura ocorreu sob ação do vácuo, com o auxílio de uma bomba de vácuo, tem-se os melhores valores tanto de módulo de elasticidade quanto de limite de resistência à tração nas amostras A6 e A7, as quais possuem 25% e 35% de fração volumétrica de resina.

Em relação ao processo anterior (prensa hidráulica) percebe-se vantagem tanto nos valores das propriedades quanto no possível peso do compósito, uma vez que as amostras curadas no vácuo que apresentam valores ainda um pouco superiores aos melhores valores das amostras curadas na prensa hidráulica. Isto é, a amostra A6 (25% de resina e cura no vácuo) apresenta melhores propriedades em relação a amostra A4 (45% de resina e cura na prensa hidráulica), se compararmos o melhor de cada processo. A resina apesar de suas funções essenciais para o bom desempenho do compósito estrutural é o componente que agrega peso ao compósito final. Logo, deve-se analisar se é relevante um certo ganho de

propriedade mecânica em relação ao ganho de peso agregado pela resina. Nesse caso, há vantagem das propriedades e do peso da amostra A6, curada no vácuo, e da amostra A5, curada na prensa.

No que diz respeito às amostras curadas no vácuo, pode-se afirmar que nem sempre o aumento de resina vai acarretar um ganho de propriedades mecânicas. Nesse caso, observa-se que aumentar a resina em 35% ou 45% não traz vantagens, ou seja, o valor de 25% já é suficiente para que o compósito possua propriedades mecânicas elevadas e superiores ao processo de cura anterior.

O Gráfico 3 exibe as curvas tensão-deformação das amostras A9, A10, A11 e A12, que possuem 15%, 25%, 35% e 45% de resina, respectivamente e a cura ocorreu sob pressão ambiente. As propriedades destes ensaios são exibidas na Tabela 9.

Gráfico 3 - Curva tensão-deformação para ensaio de tração nas amostras curadas sem pressão

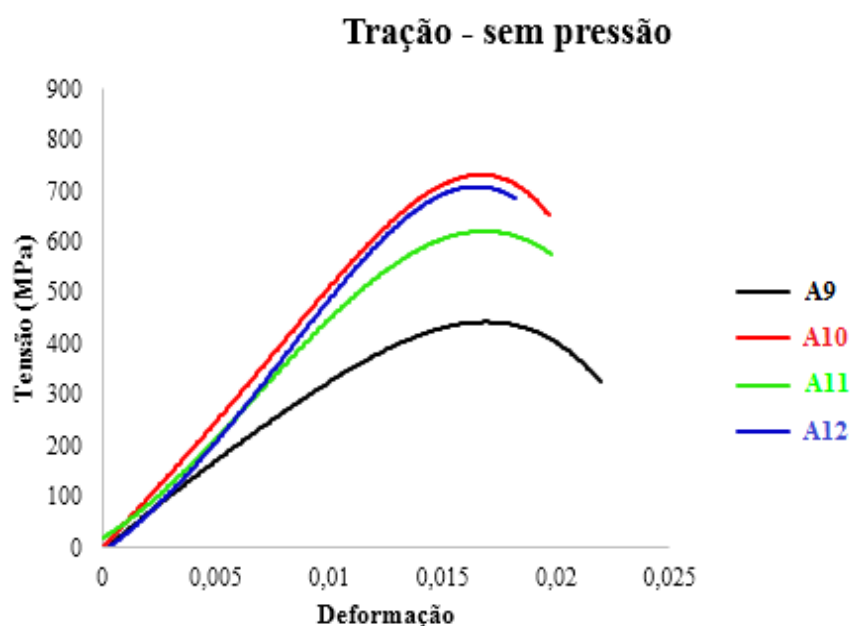


Tabela 9 - Propriedades mecânicas para as amostras curadas sem pressão em ensaios de tração

Propriedades - Sem pressão				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Deformação
A9	31,7	325,83	447,67	0,02191
A10	48,12	653,12	773,95	0,01968
A11	41,99	575,74	679,15	0,01975
A12	47,58	681,81	791,37	0,01817

No processo em que a cura se deu naturalmente à pressão ambiente, percebe-se os maiores valores de propriedades mecânicas nas amostras A10 (25% de resina) e A12 (45% de resina). Esses valores são bem próximos tanto para o módulo de elasticidade quanto para o limite de resistência à tração. Então mais uma vez, em função dessa proximidade dos valores e da diferença da fração volumétrica de resina de 20% entre as duas amostras, pode-se considerar relevante a escolha da amostra A10, apesar da amostra A12 apresentar limite de resistência à tração ainda um pouco superior. Nesse caso, está sendo levado em consideração as propriedades relativas do compósito.

É relevante afirmar que os ensaios para as amostras do tipo A11 (35% de resina) podem não ter apresentado valores um pouco acima dos apresentados em função e não ter seguido a lógica de nenhum dos processos anteriores por alguma falha da máquina, a qual já possui defeitos em seus componentes, dificultando assim, a fixação do corpo de prova nas garras e diminuindo os valores das propriedades mecânicas.

Em uma comparação entre os três processos de cura, percebe-se que com a cura na prensa e à pressão ambiente, os melhores resultados se apresentaram com 45% de resina e com a cura no vácuo, os melhores resultados são exibidos nas amostras com 25% de resina. Logo, para ensaios de tração, a amostra A6 (25% de resina e cura em vácuo) é a melhor opção em termos de propriedades mecânicas relativas.

5.2 Ensaio mecânico de flexão

O número de amostras utilizado neste ensaio, assim como nos ensaios de tração, também é recomendado pela norma ASTM. O Gráfico 4 apresenta as curvas tensão-deformação para as amostras A1, A2, A3 e A4, com 15%, 25%, 35% e 45% de fração volumétrica de resina, respectivamente, com cura na prensa hidráulica e os resultados extraídos são apresentados na Tabela 10.

Gráfico 4 - Curva tensão-deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas na prensa

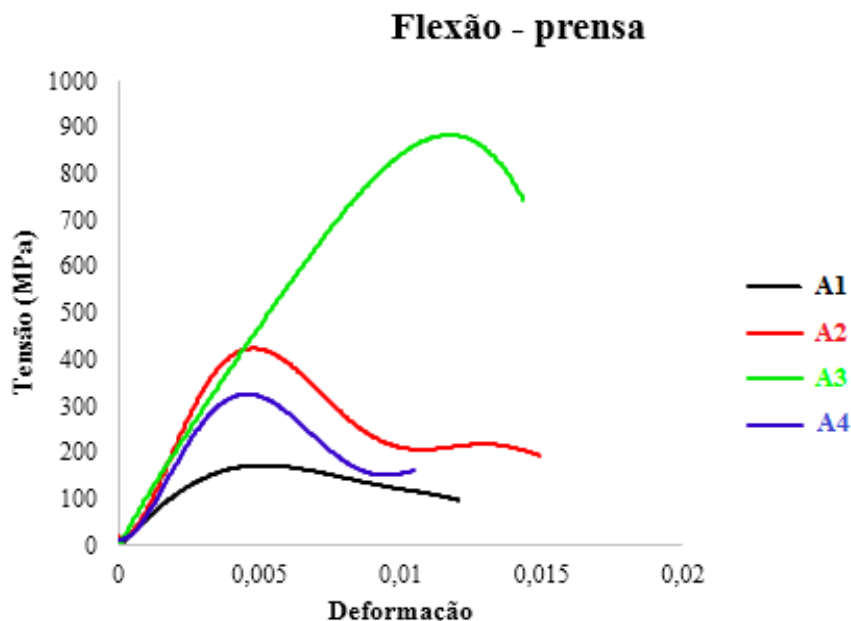


Tabela 10 - Propriedades mecânicas para amostras curadas na prensa em ensaios de flexão

Propriedades - Prensa hidráulica				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Deformação
A1	42,92	95,95	178,74	0,01206
A2	92,88	150,77	493,97	0,01494
A3	77,79	753,92	891	0,01434
A4	79,88	150,78	383,81	0,01046

Nos ensaios de flexão com cura na prensa hidráulica, os melhores resultados de tensão máxima de flexão, ou seja, o máximo de carga que o corpo de prova consegue suportar antes de romper, são exibidos para amostras do tipo A3, a qual possui 35% de resina. Pelos resultados da Tabela 10, pode-se afirmar que quantidades de resina acima de 35% oferecem ao corpo de prova mais desvantagens do que vantagens, como o peso, por exemplo.

Em relação aos módulos de elasticidade, a amostra A2 (25% de resina) apresenta o melhor valor, ou seja, este tipo de amostra teve uma maior resistência à deformação, uma maior rigidez elástica. Entretanto, o valor de tensão máxima à flexão apresentado pela amostra A3 supera em vantagem os valores das outras amostras.

O Gráfico 5 apresentam as curvas referentes às amostras A5, A6, A7 e A8, com 15%, 25%, 35% e 45% e cura no vácuo. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

Gráfico 5 - Curva tensão deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas no vácuo

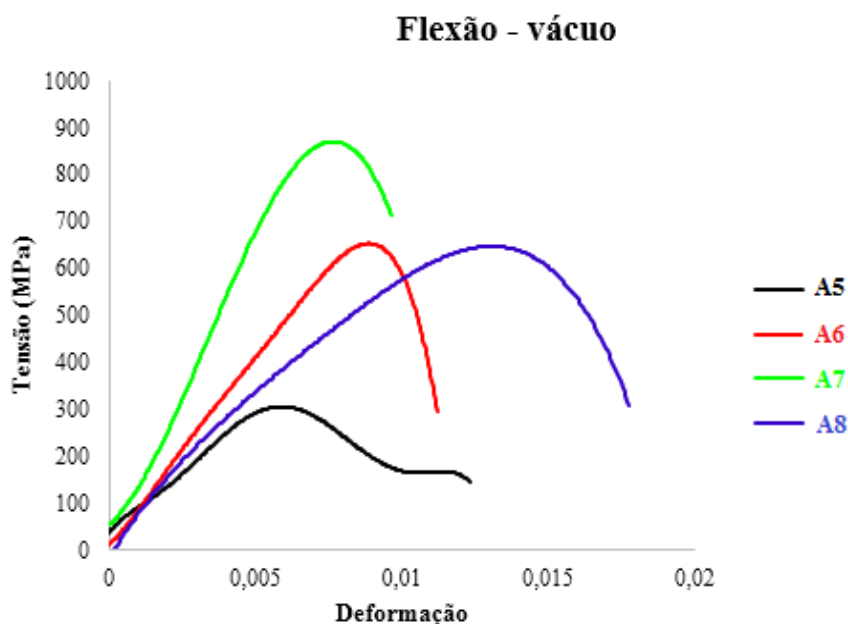


Tabela 11 - Propriedades mecânicas para amostras curadas no vácuo em ensaios de flexão

Propriedades – Vácuo				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Deformação
A5	49,44	178,19	328,99	0,01234
A6	77,11	278,33	695,85	0,01121
A7	116,45	695,75	927,79	0,009633
A8	44,98	301,57	630,54	0,01777

Ao observar os valores obtidos com os ensaios de flexão para as amostras com as quatro quantidades de resina e cura sob a ação do vácuo, tem-se um comportamento semelhante ao que ocorreu no processo anterior. O maior valor de tensão máxima de flexão se apresenta na amostra A7, que possui 35% de resina e novamente o valor do ensaio para amostra com essa fração volumétrica supera as outras propriedades das outras amostras. Nesse caso, também ocorreu que a deformação do corpo de prova para a carga submetida foi o menor.

O segundo melhor valor tanto no que se refere à tensão máxima de flexão quanto ao módulo de elasticidade foi obtido com a amostra A6, entretanto, os valores são bem menores em relação aos da amostra A7.

Comparando o melhor de cada processo, assim como ocorreu nos ensaios de tração, o vácuo se apresenta mais eficiente do que a cura na prensa.

O Gráfico 6 mostra as curvas tensão-deformação para as amostras A9, A10, A11 e A12, com 15%, 25%, 35% e 45% e cura à pressão ambiente. Seus resultados estão apresentados na Tabela 12.

Gráfico 6 - Curva tensão deformação para ensaio de flexão nas amostras curadas sem pressão

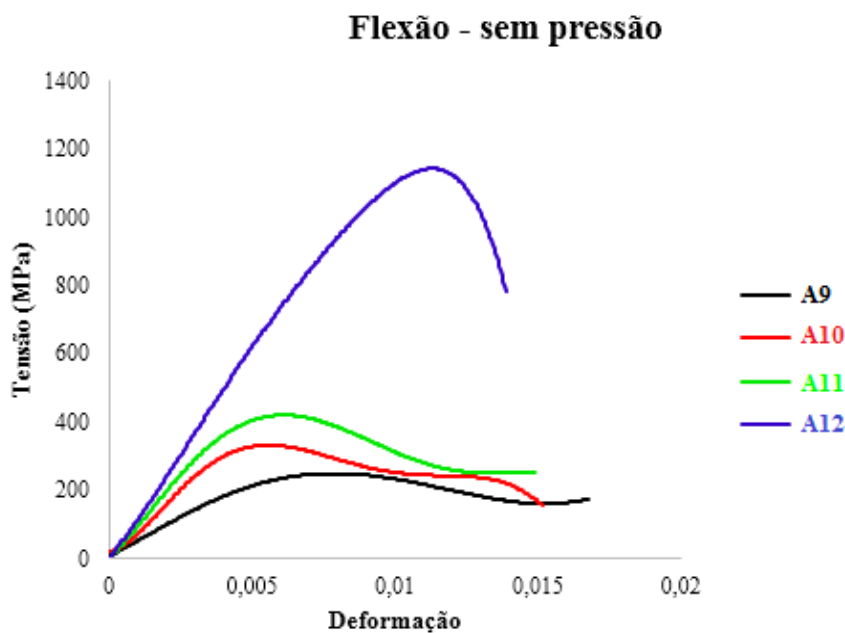


Tabela 12 - Propriedades mecânicas para amostras curadas sem pressão em ensaio de flexão

Propriedades - Sem pressão				
Amostra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Deformação
A9	42,01	178,19	246,73	0,01679
A10	61,27	150,77	370,11	0,01514
A11	75,14	246,73	452,35	0,01488
A12	98,17	795,04	1178,85	0,01389

Os ensaios de flexão para as amostras que curaram à pressão ambiente apresentaram um comportamento diferente dos processos anteriores. Nesse caso, com o aumento da fração volumétrica de resina cresce também o valor da tensão máxima de flexão. O mesmo ocorre com o módulo de elasticidade. O comportamento da deformação é inversamente

proporcional. Logo, a amostra A12, 45% de resina e cura à pressão ambiente, apresenta os maiores valores para tensão máxima de flexão e módulo de elasticidade e menor deformação.

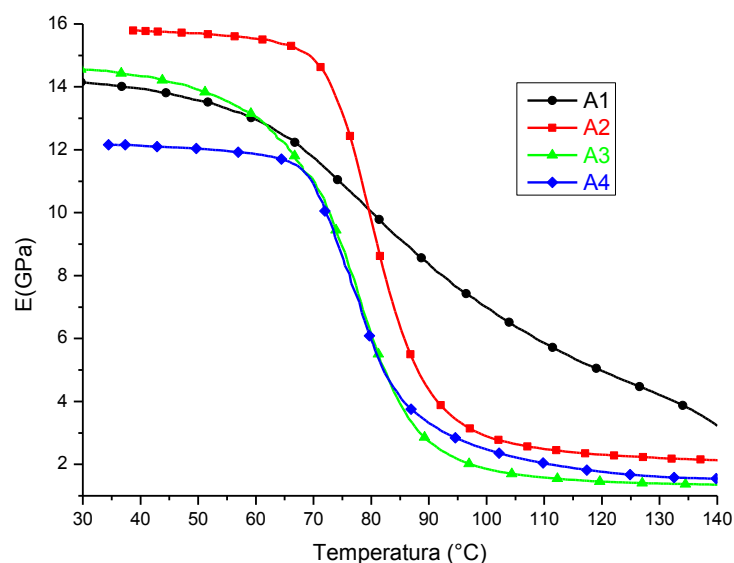
Comparando com os melhores resultados dos processos de cura na prensa e no vácuo, tem-se em ordem crescente de tensão máxima de flexão, cura na prensa, cura no vácuo e cura à pressão ambiente. A escolha da amostra vai depender da aplicação do compósito, visto que nos dois primeiros processos os melhores resultados estavam nas amostras com 35% de resina e no último caso, que supera os valores das outras amostras, é a amostra que apresenta 45% de resina. Então, deve-se analisar qual a principal necessidade, entre propriedade mecânica e baixo peso antes de escolher o tipo de processo e fração volumétrica mais adequada.

5.3 Ensaio de DMA

O ensaios de DMA foram realizados em 12 amostras, 1 para cada tipo de laminado e destes foram extraídos dados relevantes como módulo elástico inicial (E_i), módulo elástico (E), temperatura de transição vítrea inicial (T_{gi}), temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de transição vítrea final (T_{gf}) e módulo de amortecimento ($\tan \delta$).

Dos Gráficos 7, 8 e 9 são obtidos os módulos elásticos e as temperaturas de transição vítrea inicial, média e final. Estas são determinadas no software em que os Gráficos foram gerados pelo método das tangentes. O Gráfico 7 exibe as curvas do módulo de elasticidade em função da temperatura para as amostras A1, A2, A3 e A4, com 15%, 25%, 35% e 45% de resina e cura na prensa hidráulica.

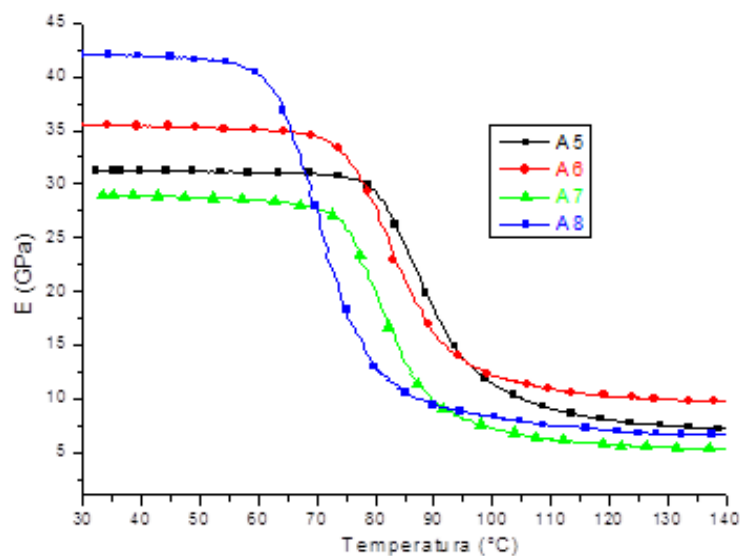
Gráfico 7 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas na prensa



No Gráfico 7, as curvas das amostras A2 (25% de resina), A3 (35% de resina) e A4 (45% de resina) apresentam o mesmo estilo de comportamento. Já a curva que se refere à amostra A1 apresenta um comportamento atípico e não deve entrar em análise. A justificativa para este comportamento é não cura total do corpo de prova. Em relação aos módulos de elasticidade, a amostra A2 (25% de resina) apresentou melhor resultado tanto em relação ao seu valor propriamente dito (15,78 GPa) como em relação a maior estabilidade térmica da amostra. A amostra A4 (45% de resina) apresentou menor valor de módulo elástico e a amostra A3 foi a que apresentou menor estabilidade térmica das propriedades. Logo, neste grupo de amostras, a amostra A2 é a que apresenta melhores propriedades.

O Gráfico 8 mostra as curvas do módulo de elasticidade em função da temperatura para as amostras A5, A6, A7 e A8, com 15%, 25%, 35% e 45% de resina e curadas em vácuo.

Gráfico 8 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas no vácuo

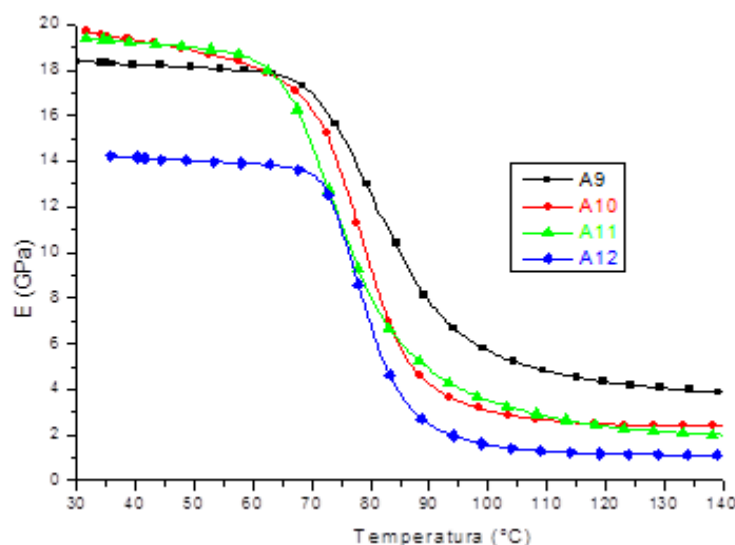


Nesse caso, não houve comportamento atípico de nenhuma amostra, logo, todas podem ser analisadas igualmente. A amostra A8 (45% de resina) apresenta maior valor de módulo elástico, entretanto, tem a pior estabilidade térmica. A amostra A5 (15% de resina) é a que se apresenta maior estabilidade térmica. A amostra A6 (25% de resina) é considerada interessante pelo olhar da análise térmica, uma vez que possui o segundo maior módulo elástico e também apresenta uma boa estabilidade das suas propriedades térmicas, bem próxima da amostra A5.

Comparando os processos de cura na prensa e no vácuo, percebe-se a influência do processo do valores dos módulos de elasticidade. No vácuo, esses valores são bem superiores aos valores obtidos na prensa.

O Gráfico 9 mostra as curvas do módulo de elasticidade em função da temperatura para as amostras A9, A10, A11 e A12, com 15%, 25%, 35% e 45% e cura sem pressão.

Gráfico 9 - Módulo de elasticidade em função da temperatura para amostras curadas sem pressão

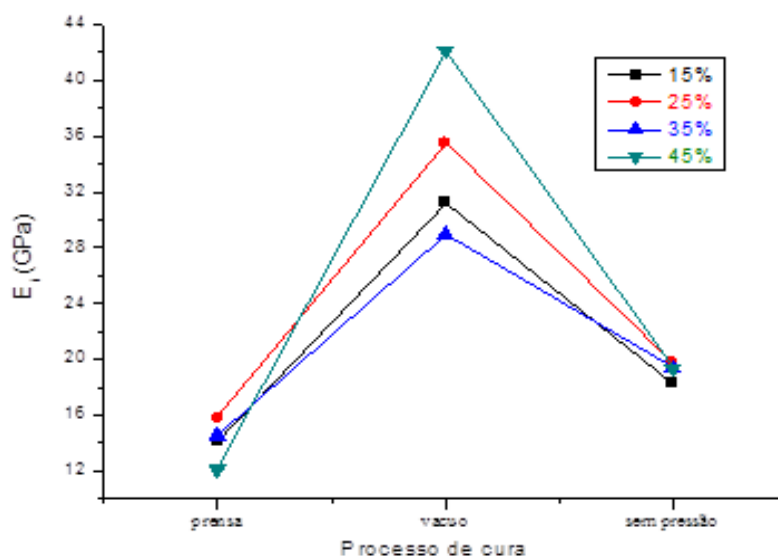


Nas curvas do Gráfico 9 tem-se uma proximidade nos valores dos módulos de elasticidade das amostras A9, A10 e A11. Entretanto, a amostra A9 apresenta também a maior estabilidade térmica. A faixa de valores apresentados para os módulos de elasticidade para este processo de cura à pressão ambiente se encontram entre os valores do processo de cura na prensa hidráulica e os valores do processo de cura no vácuo.

Dessa forma, tem-se que a cura no vácuo é mais indicada quando se necessita de maior módulo elástico e maior estabilidade térmica das amostras analisadas. É relevante ressaltar também, que uma propriedade não substitui a outra. O interessante é que haja uma compatibilidade das mesmas.

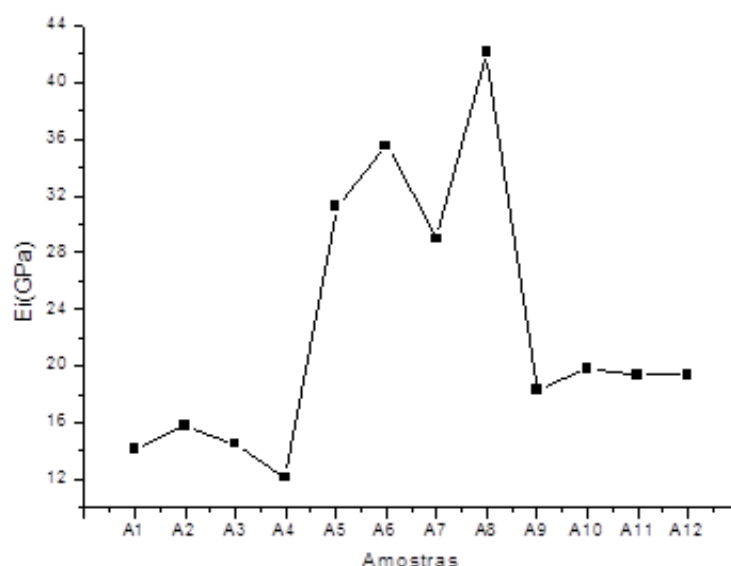
O Gráfico 10 mostra as curvas dos módulos de elasticidade iniciais em função dos processos de cura. Pode-se observar que a cura no vácuo é o processo que apresenta maiores módulos de elasticidade para todas as frações volumétricas de resina. A cura na prensa é o caso que apresenta os menores valores também para todas as frações de resina. No processo de cura no vácuo, a amostra com 45% de resina é a que exibe maior valor de módulo elástico.

Gráfico 10 - Módulo de elasticidade inicial em função do processo de cura



O Gráfico 11 mostra os valores dos módulos de elasticidade iniciais em função das amostras descritas no eixo x. As quatro primeiras amostras são referentes à cura na prensa, apresentando os valores mais baixos, as quatro seguintes são referentes à cura no vácuo e as quatro últimas são referentes ao processo de cura à pressão ambiente. O Gráfico mostra então a amostra A8 (45% de resina e cura no vácuo) com as melhores propriedades, confirmando o comportamento apresentado no Gráfico 10.

Gráfico 11 - Módulo de elasticidade em função das amostras



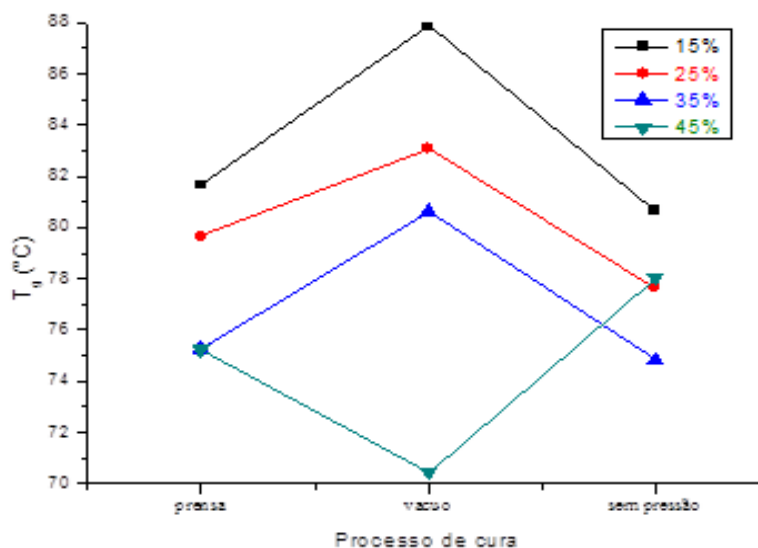
Os valores dos módulos elásticos das 12 amostras são exibidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Módulos de elasticidade para todas as amostras de acordo com o processo de cura

Módulo elástico		
Amostra	E (GPa)	Processo de cura
A1	14,13	Prensa hidráulica
A2	15,78	
A3	14,53	
A4	12,12	
A5	31,22	Vácuo
A6	35,52	
A7	28,95	
A8	42,09	
A9	18,29	Sem pressão
A10	19,76	
A11	19,36	
A12	14,18	

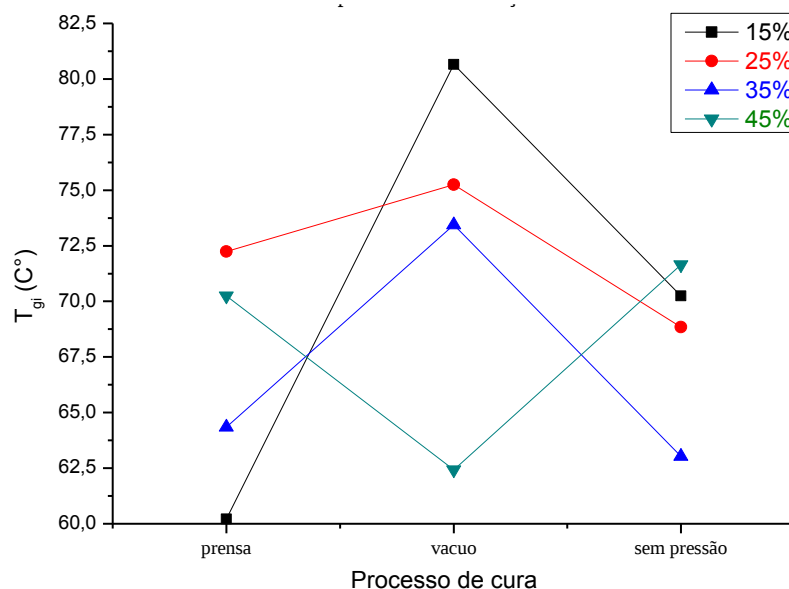
O Gráfico 12 mostra a temperatura de transição vítrea em função do processo de cura. Os valores que compõem o eixo y foram obtidos dos Gráficos 7, 8 e 9. A curva que representa as amostras com 45% de resina apresenta um comportamento atípico, provavelmente em função de algum erro de processamento ou na fabricação ou no próprio ensaio. As curvas para as amostras com 15%, 25% e 35% apresentam o comportamento esperado. Analisando-as, percebe-se mais uma vez o vácuo como melhor processo de cura e além disso, que quanto menor a quantidade de resina maior o valor da temperatura de transição vítrea, exemplificado pela amostra A5.

Gráfico 12 - Temperatura de transição vítrea em função do processo de cura



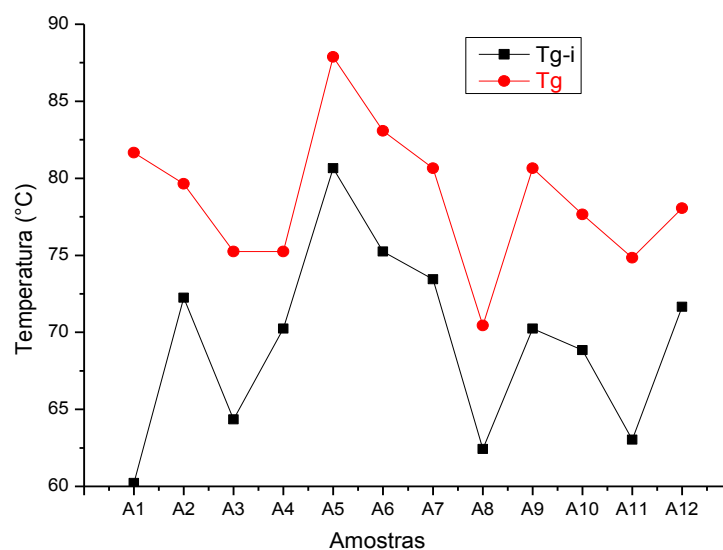
O Gráfico 13 mostra as curvas da temperatura de transição vítrea inicial em função dos processos de cura. O comportamento é semelhante ao que ocorre no Gráfico 12, os valores mais altos para o processo de cura no vácuo e a amostra com menor quantidade de resina (A5) com a maior temperatura de transição vítrea inicial.

Gráfico 13 - Temperatura de transição vítrea em função do processo de cura



As curvas exibidas no Gráfico 14 são das temperatura de transição vítrea e temperatura de transição vítrea inicial em função das amostras. Mais uma vez a amostra A5 (15% de resina e cura no vácuo) apresenta os maiores valores de temperatura de transição vítrea.

Gráfico 14 - Temperatura de transição vítrea em função das amostras



Os valores das temperaturas de transição vítrea inicial, temperaturas de transição vítrea e temperatura de transição vítrea final são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores das temperaturas de transição vítrea para todas as amostras

Amostra	Tg-i (°C)	Amostra	Tg (°C)	Amostra	Tg-f (°C)
A1	60,22	A1	81,66	A1	101,98
A2	72,24	A2	79,64	A2	90,26
A3	64,34	A3	75,25	A3	88,86
A4	70,24	A4	75,25	A4	86,77
A5	80,65	A5	87,87	A5	86,88
A6	75,25	A6	83,07	A6	92,17
A7	73,44	A7	80,65	A7	89,07
A8	62,43	A8	70,45	A8	80,06
A9	70,24	A9	80,65	A9	94,08
A10	68,84	A10	77,65	A10	88,26
A11	63,03	A11	74,84	A11	86,86
A12	71,65	A12	78,06	A12	78,06

O amortecimento ou tan delta representa o fator de perda mecânica que se traduz na capacidade de amortecimento do material. Esse amortecimento está associado ao equilíbrio entre a fase elástica e a fase viscosa em uma estrutura polimérica, no caso a matriz dos compósitos. As fibras suportam parcialmente a tensão aplicada sobre o compósito e permitem que somente parte desta tensão possa deformar a interface fibra/matriz. Assim, a dissipação de energia fica restrita à matriz e à interface, sendo que, quanto mais resistente for a interface menor a dissipação de energia. (PAULA, 2011)

O Gráfico 15 apresenta as curvas do módulo de amortecimento (tan delta) em função da temperatura para as amostras curadas na prensa A1, A2, A3 e A4. O comportamento da amostra A1 é atípico e não deve ser incluído na análise. O mais relevante das curvas de módulo de amortecimento é o início delas e nesse caso, os valores são tão próximos que nenhuma amostra está em destaque. Pelo pico das curvas também seria possível determinar as temperaturas de transição vítrea, de transição vítrea inicial e de transição vítrea final. Entretanto, é mais confiável obtê-las pelo método das tangentes nas curvas do módulo de elasticidade, como foi feito nesta análise. O Gráfico 16 apresenta as curvas do módulo de amortecimento para as amostras curadas no vácuo e o Gráfico 17 mostra as curvas do módulo de amortecimento para as amostras curadas sem pressão. Ambos apresentam comportamento

semelhante ao primeiro, exibindo valores bem próximos no início e com a transição vítrea iniciando na faixa de 60 e 70°C.

Gráfico 15 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas na prensa

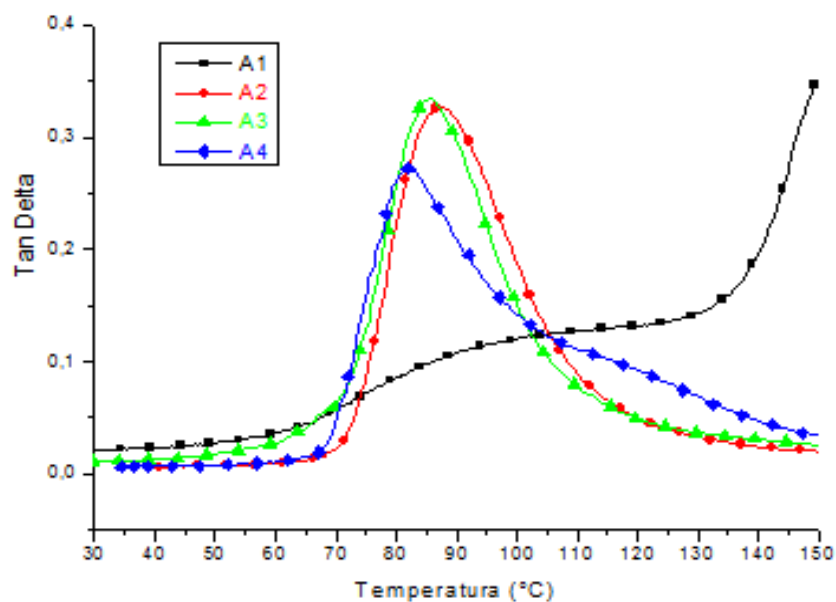


Gráfico 16 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas no vácuo

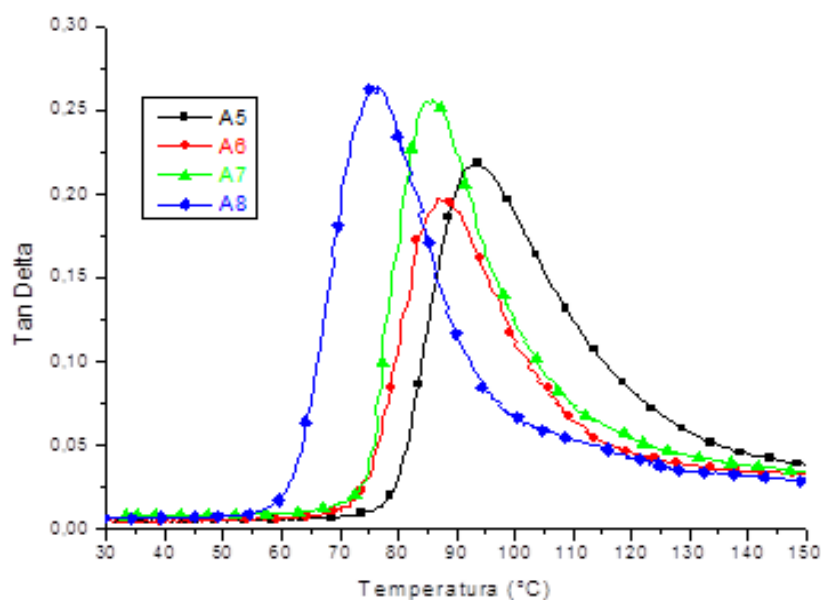
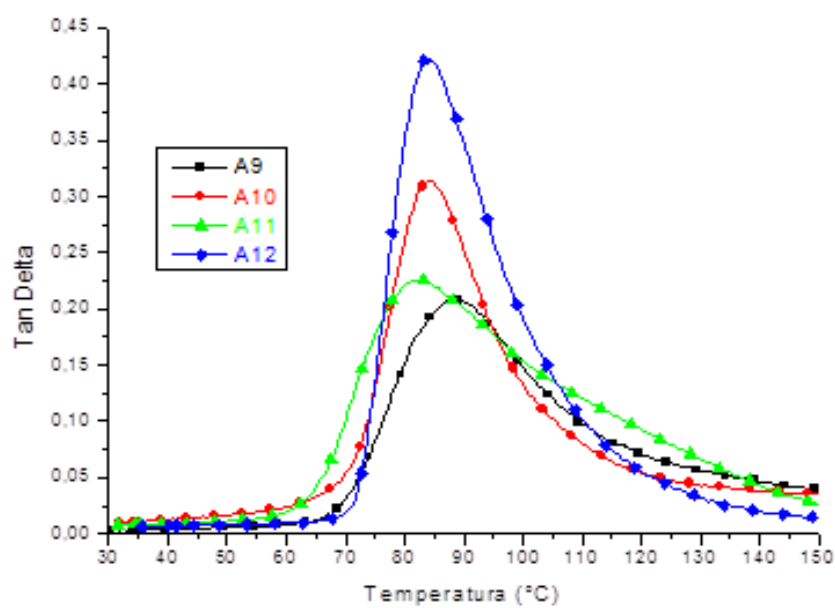


Gráfico 17 - Módulo de amortecimento em função da temperatura para amostras curadas sem pressão



6. CONCLUSÃO

Com um grupo de 5 amostras em cada tipo de laminado para os ensaios de tração e de flexão e 1 amostra para cada tipo de laminado para ensaios de DMA, pode-se afirmar a confiabilidade dos resultados apresentados nesta pesquisa, já que este número é recomendado pelas normas ASTM e abrangem perdas por falhas no processo de fabricação e/ou no ensaio. Ambas as falhas ocorreram ao longo do experimental, entretanto, os valores considerados válidos foram suficientes para comparação e escolha do mais adequado para apresentação. Dentro de cada grupo de amostras os valores foram, em sua maioria, coerentes. Para os ensaios de tração e flexão, todas as dimensões dos corpos de prova e parâmetros de ensaio foram determinados de acordo com as normas ASTM 3039 e 7264. Para os ensaios de DMA, esses valores foram determinados de acordo com as limitações do próprio equipamento e com base na experiência no operador.

Nos ensaios de tração, os resultados apresentaram o vácuo e a fração volumétrica de 25% de resina como parâmetros ideais, características da amostra A6. Para os outros processos de cura, a fração volumétrica de resina mais adequada foi 45%. Então, a amostra A6 apresentou vantagem dupla, no que diz respeito ao maior valor de limite de resistência à tração e menor peso agregado pela resina. O maior módulo de elasticidade também se encontra com a amostra A6.

Nos ensaios de flexão, o processo de cura sem pressão e a fração volumétrica de 45%, características da amostra A12, apresentou o maior valor de tensão máxima de flexão. Os outros dois processos apresentaram valores muito bons e um pouco inferiores, em relação ao processo de cura sem pressão, de tensão máxima de flexão com uma fração volumétrica de 35%. O maior módulo de elasticidade se encontra na amostra A7 (35% de resina e cura no vácuo). Então, nessa análise deve-se avaliar qual a principal necessidade – uma maior tensão máxima de flexão ou um menor peso – antes de escolher qual dos processos e frações volumétricas de resina é mais adequada ao projeto em questão. Lembrando que em projetos aeronáuticos, as propriedades relativas são ponto fundamental.

Para as análises de DMA, tem-se os resultados dos módulos de elasticidade, temperatura de transição vítrea e módulo de amortecimento. Na avaliação dos módulos de elasticidade não se considerar apenas os maiores valores, mas também seu crescimento horizontal para a direita que caracteriza a estabilidade térmica das suas propriedades. Então, o vácuo foi o processo de cura que melhor apresentou a junção desses dois parâmetros para as amostras no geral. A influência do processo de cura é visível nos valores dos módulos de

elasticidade. Alguns Gráficos mostram que a fração volumétrica de resina de 45% foi a mais influente no valor do módulo de elasticidade. Na avaliação da temperatura de transição vítrea, vários Gráficos apresentaram que o vácuo também é o melhor processo de cura e que quanto menor a quantidade de resina maior é o valor da temperatura de transição vítrea, seja ela inicial, média ou final. Logo, a amostra A5 (15% de resina e cura no vácuo) apresenta em todos os Gráficos os maiores valores de temperatura de transição vítrea. Por fim, na análise do módulo de amortecimento, o que se pode afirmar é que não há como enfatizar um processo de cura e/ou uma fração volumétrica de resina, pois seus valores são muito próximos para todas as amostras e todos apresentam uma faixa bem próxima da região de transição vítrea.

Com os resultados aqui exibidos, é possível selecionar um processo de cura e uma fração volumétrica de resina para o reforço e a matriz em questão, de acordo com a principal necessidade do projeto.

7. REFERÊNCIAS

- BARROS, André Santiago. **Estudo do Desalinhamento das Fibras nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturais de Pás Eólicas**. 2010. 182 fls. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologias Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- BROCKS, Thatiane. **Compósito Estrutural Carbono/Epóxi Via RTM para Aplicação Aeronáutica: Processamento e Caracterização**. 2011. 111 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- CALLISTER, William Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 817 p.
- CÂNDIDO, Geraldo M.; ALMEIDA, Sérgio F. M.; REZENDE, Mirabel C. Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 10, n. 1, p. 31-41, 2000.
- COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C.; PARDINI, Luiz C. Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. abr/jun 1999.
- COSTA, Michelle L.; DE PAIVA, Jane M. F.; BOTELHO, Edson C.; REZENDE, Mirabel C. Avaliação Térmica e Reológica do Ciclo de Cura do Pré-Impregnado de Carbono/Epóxi. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 13, n. 3, p. 188-197, 2006.
- CUNHA, José Antônio P.; COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C. Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi Modificada. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 16, n. 3, p. 193-201, 2006.
- LEBRÃO, Guilherme Wolf. Fibra de carbono. **Plástico Sul**. out 2008.
- NASSEH, Jorge. **Técnica e prática de laminação em composites**. Rio de Janeiro, 2008. 349 p.
- NASSEH, Jorge. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2011.
- NEWELL, James. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- PAULA, Paula Gomes de. **Formulação e Caracterização de Compósitos com Fibras Vegetais e Matriz Termoplástica**. 2011. 102 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- Puc-Rio. **Materiais Compósitos**. Rio de Janeiro, 2014.

REZENDE, Mirabel C. et al. Avaliação da Temperatura de Transição Vítrea de Compósitos Poliméricos Reparados de Uso Aeronáutico. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 16, n. 1, p. 79-87, 2006.

RODRIGUES, Jean da Silva. **Estudo da Técnica de Infusão de Resina Aplicada à Fabricação de Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Naturais da Amazônia**. 2014. 177 fls. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Instituto Tecnológico da Universidade Federal do Paraná, Belém, 2014.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VILAR, Zoroastro Torres. **Comportamento Elétrico-termomecânico de um Compósito Ativo de CFRP com Fios Ni-Ti Embebidos**. 2009. 125 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

VILAR, Zoroastro Torres. **Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP) Incorporando Fios Atuadores de NiTi com Memória de Forma: Caracterização Termomecânica Usando Análise Mecânica Dinâmica (DMA)**. 2013. 176 fls. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.