



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS**

KELLEN DE ALMEIDA FOSCHIERA

JOINVILLE, SC
2018

KELLEN DE ALMEIDA FOSCHIERA

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE, SC

2018

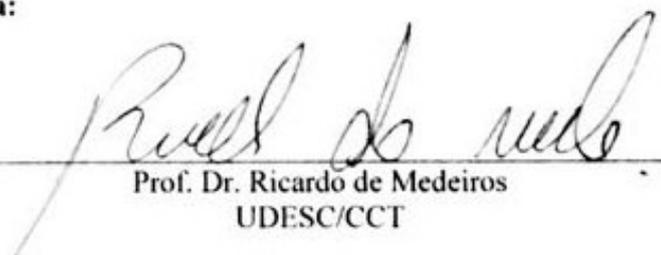
KELLEN DE ALMEIDA FOSCHIERA

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC0001) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

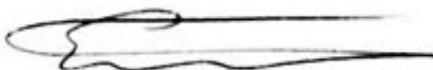
Banca Examinadora:

Orientador:

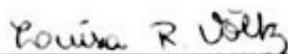


Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Membros:



Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso
UDESC/CCT



Eng.ª Luisa Rosenstock Völtz
UDESC/CCT

Joinville, 03 de julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

É difícil escrever o tamanho da gratidão que tenho por todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este momento tão importante da minha carreira acadêmica se concretizasse.

Inicialmente, quero agradecer à Deus, por sempre me guiar e proteger. Agradeço por escutar minhas preces e atendê-las no momento certo.

À minha família, a palavra obrigada parece ser muito pouco para agradecer tudo que vocês fazem por mim. Meus pais, Mauro e Vitória, sempre apoiaram as minhas escolhas e não mediram esforços para me ajudar a torná-las realidade; são meus maiores exemplos, mostram-me como ser uma pessoa melhor e, ainda, são a prova de que trabalhar para atingir o que deseja é só questão de querer. Minhas irmãs, Kivian e Kenya, que mesmo com a longa distância sempre me incentivaram e deram forças para continuar em frente. Vocês me influenciaram a vida toda e sempre de maneira positiva. Amo muito vocês!

Ao meu namorado Juliano, agradeço pelo carinho e apoio nos momentos difíceis. Além de parceiro da faculdade, você se tornou meu parceiro de vida. Obrigada por estar sempre ao meu lado.

Aos amigos que fiz durante o curso, agradeço por trazerem alegria nos finais de semestre e pelo companheirismo em tantos outros momentos. Fazer engenharia e morar em Joinville ficou muito mais fácil e divertido na companhia de vocês.

Aos professores da UDESC-CCT, pela dedicação e ensinamentos transmitidos durante a graduação que contribuíram para minha formação profissional. Em especial ao Prof. Dr. Ricardo de Medeiros, pela disposição em esclarecer minhas dúvidas e pela orientação para realização deste trabalho. Agradeço também pelos esforços para obter os equipamentos do laboratório.

Aos laboratórios de tratamento térmico (UDESC-CCT) e de caracterização mecânica (SENAI), pela disposição e auxílio para realizar os ensaios experimentais necessários neste trabalho.

A todos, meu muito obrigada!

RESUMO

A Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CCT) adquiriu equipamentos para construir um laboratório de compósitos, onde foi possível desenvolver um sistema de fabricação de placas de materiais compósitos através do processo de infusão à vácuo. A fim de realizar o estudo inicial desse sistema, para verificar as potencialidade e limitações, esse trabalho tem como intuito avaliar a qualidade do processo de fabricação a partir da determinação das propriedades mecânicas de forma analítica e experimental. Para isso, foi realizado o ensaio de tração para determinar as propriedades mecânicas de rigidez e resistência de maneira experimental. Ainda, foram definidas as propriedades mecânicas de forma analítica através da análise micromecânica, onde as frações volumétricas foram obtidas a partir do teste de queima e dados provenientes dos fabricantes dos constituintes. Apesar do ensaio de tração não ter apresentado resultados coerentes, foi importante para ressaltar a falta de adesão entre os constituintes e a necessidade de utilizar *tabs* nos futuros ensaios. Por sua vez, os resultados analíticos, independentemente do método utilizado, apresentaram uniformidade das constantes de engenharia no material e comprovaram a fraca interface entre reforço-matriz. Por fim, pode-se dizer que o sistema desenvolvido para fabricação está apto para utilização, mas é necessários cuidados na quantidade de resina aplicada e no controle de umidade presente nos materiais utilizados.

Palavras-Chave: Materiais compósitos. Infusão à vácuo. Ensaio de tração. Teste de queima. Análise micromecânica.

ABSTRACT

The University of the State of Santa Catarina (UDESC-CCT) acquired equipment to build a composite laboratory, where it was possible to develop a manufacturing system of composite plate through the vacuum infusion process. In order to perform the initial study of this system, to verify the potentialities and limitations, this work aims to evaluate the quality of the manufacturing process from the determination of the mechanical properties analytically and experimentally. For this, the tensile test was carried out to determine the mechanical properties of stiffness and resistance in an experimental manner. Furthermore, the mechanical properties were defined analytically through the micromechanical analysis, where the volumetric fractions were obtained from the burning test and data from the manufacturers of the constituents. Although the traction test did not present consistent results, it was important to highlight the lack of adhesion between the constituents and the need to use tabs in future trials. In turn, the analytical results, regardless of the method used, presented uniformity of the engineering constants in the material and proved the weak interface between reinforcement and matrix. Finally, it can be said that the system developed for manufacture is suitable for use, but care is required in the amount of resin applied and in the humidity control present in the materials used.

Keywords: Composite materials. Vacuum infusion. Tensile test. Burn test. Micromechanical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação	22
Figura 2 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.....	23
Figura 3 – Tipos de lâminas: (a) lâmina com fibras unidirecionais; (b) lâmina com fibras tecidas; (c) laminado composto por várias lâminas em diferentes direções.....	24
Figura 4 – Comportamento mecânico de vários materiais	24
Figura 5 – Direções principais de propriedades mecânicas em uma lâmina.....	27
Figura 6 – Tensões e deformações normais nas direções 1 e 2	28
Figura 7 – Tensão e deformação cisalhante	29
Figura 8 – Elemento representativo de volume com carregamento na direção 1.....	31
Figura 9 – Elemento representativo de volume com carregamento na direção 2.....	32
Figura 10 – Elemento representativo de volume com carregamento na direção 1.....	33
Figura 11 – Elemento representativo de volume carregado em cisalhamento	34
Figura 12 – Processo VA-RTM.....	36
Figura 13 – Processo SCRIMP	36
Figura 14 – Esquemática do Sistema de Vácuo.....	37
Figura 15 – Curvas de tensão-deformação típicas.....	38
Figura 16 – Corpos de prova com e sem tabs.....	39
Figura 17 – Definição das amostras e dos eixos dos materiais	40
Figura 18 – Fluxograma dos processos realizados	43
Figura 19 – Esquema do processo de fabricação.....	46
Figura 20 – Sistema de molde e vedação, tem-se: a) saco de vácuo; b) molde; c) mangueira com reforço de arame; d) tubo espiral; e) união em “T”	47
Figura 21 – Ordem de camadas para posicionar no molde	47
Figura 22 – Material submetido ao vácuo	48
Figura 23 – Etapas da fabricação de uma placa de compósito.....	48
Figura 24 – Corte à disco diamantado.....	49
Figura 25 – Corpos de prova para ensaio de tração: A1, A2 e A3 são amostras do material com fibras a 0°/90° e B1, B2 e B3 são amostras do material com fibras a ±45°	50

Figura 26 – Equipamento para ensaio de tração	51
Figura 27 – Amostra tracionada no equipamento	51
Figura 28 – Corpos de prova: a) antes e b) após o teste de queima	52
Figura 29 – Amostras após o ensaio de tração: a) fibras com orientação a $0^{\circ}/90^{\circ}$ e b) fibras com orientação a $\pm 45^{\circ}$	55
Figura 30 – Delaminação da amostra A1	56
Figura 31 – Gráfico tensão \times deformação para amostra A2.....	57
Figura 32 – Gráfico tensão \times deformação para amostra B1	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais	25
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais	37
Tabela 3 – Recomendações de geometria das amostras para tração	39
Tabela 4 – Materiais utilizados no processo de fabricação	44
Tabela 5 – Módulo de elasticidade para amostras A1, A2 e A3.....	58
Tabela 6 – Dados aferidos dos corpos de prova para teste de queima	58
Tabela 7 – Valores obtidos para volume e densidade do compósito e para massa da matriz .	59
Tabela 8 – Propriedades da fibra de vidro	59
Tabela 9 – Propriedades da resina epóxi	59
Tabela 10 – Perda de ignição e desvio padrão estimado	60
Tabela 11 – Frações mássicas pelo método 1	60
Tabela 12 – Frações volumétricas pelo método 1	61
Tabela 13 – Propriedades do compósito pelo método 1	61
Tabela 14 – Espessura da camada e fração mássica da fibra pelo método 2.....	61
Tabela 15 – Frações volumétricas pelo método 2	62
Tabela 16 – Propriedades do compósito pelo método 2	62
Tabela 17 – Média aritmética e desvio médio das propriedades obtidas pelo método 1	63
Tabela 18 – Média aritmética e desvio médio das propriedades obtidas pelo método 2	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	21
2.1.1	Compósitos reforçados com fibras contínuas.....	23
2.1.2	Compósitos com matriz polimérica.....	25
2.2	ANÁLISE MICROMECAÂNICA	26
2.2.1	Propriedades mecânicas	26
2.2.2	Frações de massa e volume	29
2.2.3	Módulo de elasticidade	30
2.2.4	Coefficiente de Poisson	32
2.2.5	Módulo de elasticidade cisalhante	34
2.3	FABRICAÇÃO.....	35
2.3.1	Processo de infusão à vácuo	35
2.4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	37
2.4.1	Ensaio de tração	38
2.4.2	Teste de queima.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	FABRICAÇÃO.....	43
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	49
3.2.1	Ensaio de tração	50
3.2.2	Teste de queima.....	52
3.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	53
3.3.1	Ensaio de tração	53
3.3.2	Teste de queima.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	55
4.2	ANÁLISE ANALÍTICA.....	58
4.2.1	Método 1	60
4.2.2	Método 2	61

4.2.3	Comparação dos métodos	62
5	CONCLUSÃO	65
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

Materiais com propriedades singulares são necessários para um conjunto de aplicações de alta tecnologia, tais como as que são encontradas nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte. Além das propriedades exigentes, o mercado encontra-se numa maior competitividade onde a redução de custos em estruturas é necessária e, assim, adequa-se o uso de materiais compósitos (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

De acordo com Cândido e Almeida (2000), para um desenvolvimento ser bem-sucedido, é necessário que o elevado padrão da qualidade do produto esteja em equilíbrio com a eficácia e a redução de custo do método de fabricação. Dessa maneira, o estudo em materiais compósitos está cada vez mais avançado para atender essa diversidade de áreas de aplicações, tanto na busca por novos constituintes quanto o aperfeiçoamento e a inovação em processos de fabricação.

A fabricação de um componente através de materiais estruturais tradicionais, na maioria das vezes, significa manipular o material através de procedimentos como usinagem, moldagem ou soldagem. Com compósitos reforçados por fibra a situação é diferente, já que o componente e o material são normalmente fabricados simultaneamente. Por isso, para materiais compósitos, deve-se entender como as condições de processamento afetam as propriedades do produto final (GALLI, 2016).

Essa ascensão no uso dos materiais compósitos dentro do setor industrial desencadeou diversos estudos relacionados a esse seguimento, acarretando na necessidade de um laboratório para fabricação e análises desses materiais na UDESC. Através do Grupo de Vibrações e Estruturas da UDESC/CTT, foram obtidos os equipamentos e os materiais necessários para implementação de um laboratório para fabricação e análise de materiais compósitos. Dessa forma, surgiu a oportunidade de aprofundar os conhecimentos no assunto, ter experiências práticas do processo de fabricação e realizar o estudo inicial para validação do laboratório.

Esse estudo tem como objetivo avaliar a qualidade do processo de fabricação de um material compósito, constituído por tecido de fibra de vidro e uma matriz polimérica epóxi, através da sua caracterização de forma analítica e experimental. Pode-se acrescentar, como objetivos específicos:

- Fabricar placas de material compósito através do sistema desenvolvido com base no processo de infusão a vácuo;

- Determinar as propriedades mecânicas do material obtido de forma analítica a partir da regra das misturas e do teste de queima;
- Determinar as propriedades mecânicas do material obtido de forma experimental através do ensaio de tração;
- Comparar as propriedades determinadas a fim de validar a qualidade do método de fabricação utilizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos necessários para o embasamento e a realização desse estudo. De forma simplificada, apresenta-se subdividido nos seguintes conteúdos: materiais compósitos, análise micromecânica, fabricação e ensaios experimentais.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, que ao serem combinados em escala macroscópica para funcionarem como uma unidade, buscam alcançar um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta. Esse princípio de ação combinada dá liberdade ao engenheiro para obter materiais que ressaltam características desejadas e minimize as indesejadas (MENDONÇA, 2005).

Dentre as propriedades que podem ser manipuladas, destacam-se:

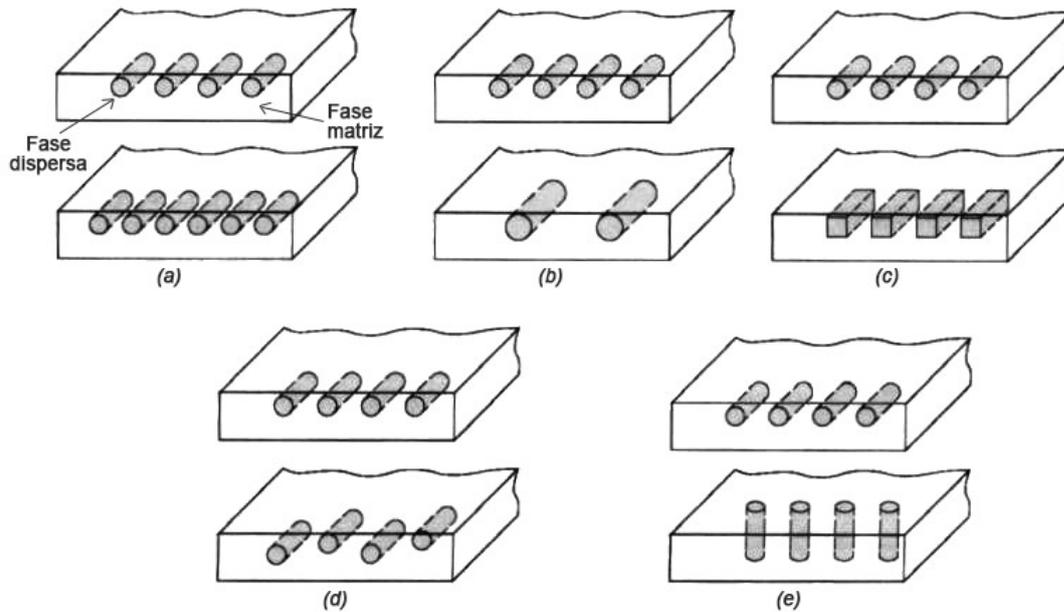
- Resistência estática e à fadiga;
- Rigidez;
- Resistência à corrosão e à abrasão;
- Redução de peso;
- Capacidade de trabalho a alta e baixa temperatura;
- Isolamento ou condutividade térmica, elétrica ou acústica;
- Dureza, ductilidade;
- Aparência estética.

De acordo com Callister e Rethwisch (2012), o compósito pode ser constituído por duas fases: uma fase contínua denominada matriz, a qual envolve a outra fase, chamada dispersa. A fase dispersa, também chamada de reforço, tem como missão suportar os esforços provenientes da matriz. Por sua vez, a matriz deve garantir o posicionamento e orientação do reforço para que os carregamentos aplicados sejam transmitidos aos mesmos. Além disso, a matriz evita danos devido ao manuseio e protege os reforços contra corrosão e abrasão.

Essas fases influenciam nas propriedades dos compósitos em função das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A Figura 1 ilustra algumas variações das

características da geometria da fase dispersa: forma, tamanho, distribuição e tamanho das partículas.

Figura 1 – Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação



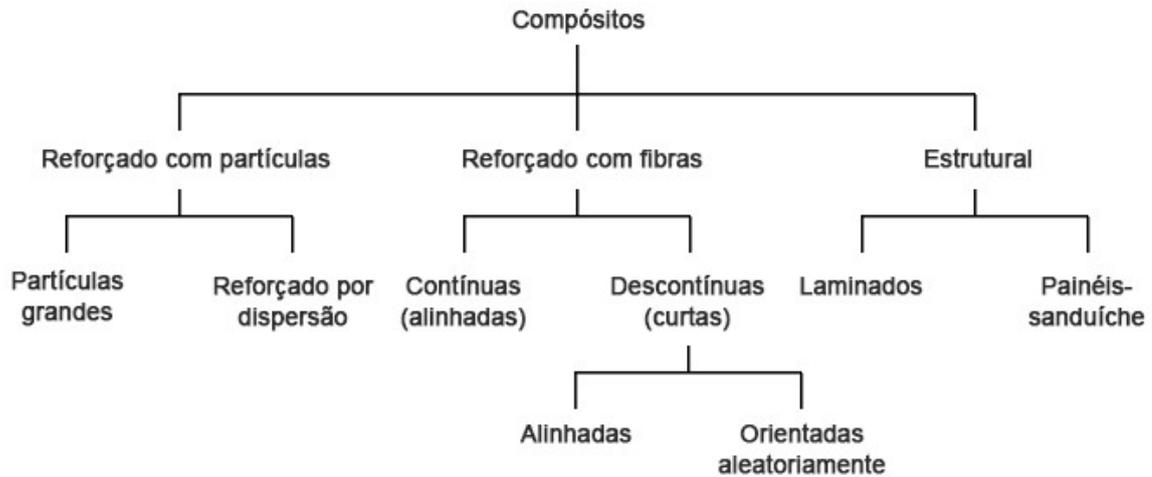
Fonte: CALLISTER & RETHWISCH, 2012.

Além dos dois elementos, pode-se dizer que há uma terceira fase que é a interface reforço-matriz, sendo produzida no momento em que o reforço interage com a matriz. Essa fase merece atenção, pois para que o compósito apresente desempenho satisfatório é necessária uma forte adesão entre os constituintes. Isso influencia na escolha dos materiais a serem empregados, pois a combinação de quaisquer fases nem sempre propiciará a interação mais adequada. Dessa forma, caso não exista a compatibilidade entre o reforço e a matriz para gerar uma “interface forte”, faz-se necessário um tratamento superficial do reforço (TITA, 2006).

De acordo com Callister e Rethwisch (2012), os compósitos podem ser classificados em três principais divisões: reforço com partículas, com fibras e estrutural. Essas divisões ainda são subdivididas em pelo menos duas partes, conforme esquematizado na Figura 2.

No compósito reforçado por partículas, tem-se a fase dispersa equiaxial, ou seja, a partícula apresenta aproximadamente a mesma dimensão em todas as direções. Os reforços com fibras apresentam uma grande razão entre o comprimento e diâmetro da fibra, devido sua geometria. Enquanto os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Figura 2 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos



Fonte: CALLISTER & RETHWISCH, 2012.

Neste trabalho, o objeto de estudo serão os compósitos reforçados com fibras contínuas e matriz polimérica.

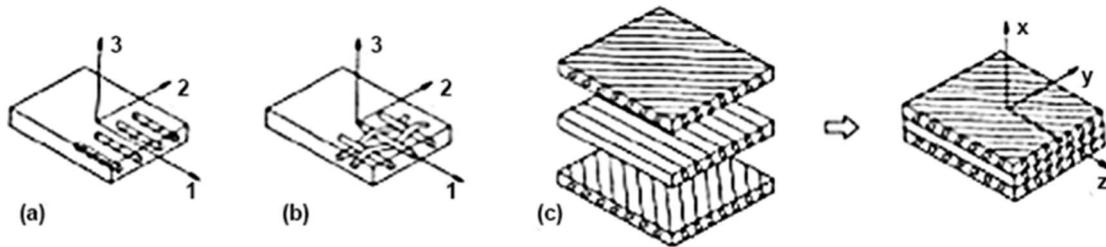
2.1.1 Compósitos reforçados com fibras contínuas

Mendonça (2005) afirma que um dos pretextos para a utilização de fibras como reforço, se deve ao fato de que a resistência e a rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de magnitude superiores aos valores obtidos para o mesmo material em bloco, fato este conhecido a partir de dados experimentais. Essa discrepância justifica-se pela presença de imperfeições ou falhas - provenientes do processo de fabricação - no bloco de um material, enquanto na fibra é difícil o desenvolvimento de trincas durante a fabricação devido ao seu diâmetro diminuto.

As fibras quando se apresentam contínuas, podem-se encontrar na forma de fio, que produz um reforço unidirecional (Figura 3a), ou como tecido ortogonal, que produz um reforço bidirecional (Figura 3b), (TITA, 2006).

Os reforços com fibras, por sua vez, podem ser dispostos em uma única lâmina ou como laminado. A lâmina é constituída por uma matriz - geralmente um plástico - reforçada por fibras de alto desempenho, como por exemplo as fibras de vidro, carbono e kevlar. O laminado é a combinação de lâminas com diferentes orientações das fibras ou até mesmo com variação de materiais (Figura 3c), (MENDONÇA, 2005; TITA, 2006).

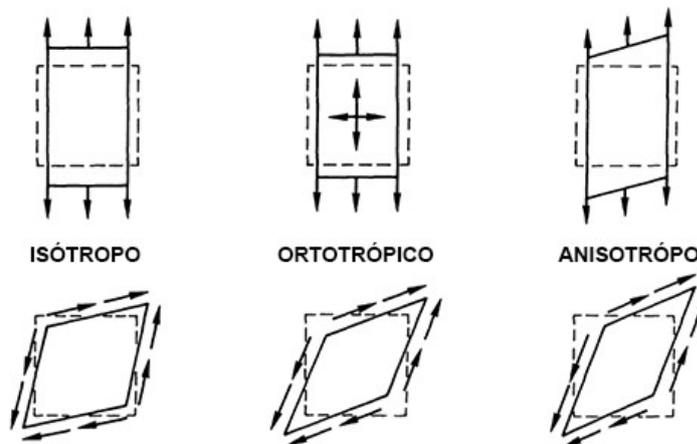
Figura 3 – Tipos de lâminas: (a) lâmina com fibras unidirecionais; (b) lâmina com fibras tecidas; (c) laminado composto por várias lâminas em diferentes direções



Fonte: MENDONÇA, 2005.

O arranjo unidirecional proporciona características ortotrópicas ao compósito final, isto é, o material possuirá três planos de simetria ortogonais entre si. Em contrapartida, o arranjo multidirecional apresenta características anisótropas ao compósito final, ou seja, o material não apresentará nenhum plano de simetria. Por fim, o arranjo aleatório concede características próximas a um material isótropo ao compósito final, resultando em um material de infinitos planos de simetria (TITA, 2006). Para melhor compreensão, a Figura 4 ilustra as três formas de comportamento mecânico que um material pode apresentar, conforme citadas anteriormente.

Figura 4 – Comportamento mecânico de vários materiais



Fonte: JONES, 1999.

Além da disposição, as fibras podem variar os comprimentos e isso influencia no comportamento do compósito. As fibras longas e contínuas apresentam facilidade de orientação na fabricação, baixo enrugamento, estabilidade dimensional e qualidade superficial. Por sua vez, as fibras curtas são mais fáceis de trabalhar mesmo que apresentem dificuldades de orientação, visto que necessitam menor tempo de cura e resultam em uma maior resistência, além de custo reduzido (GAMA, 2017).

2.1.2 Compósitos com matriz polimérica

Os polímeros, também conhecidos de forma usual como plásticos, são materiais sintéticos e geralmente de procedência orgânica. De acordo com Mendonça (2005), eles possuem características básicas que influenciam diretamente nas propriedades dos compósitos que os compõem, como exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais

VANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> a) Facilidade de fabricação; b) Baixo peso, baixa densidade; c) Resistência a ataques químicos; d) Isolamento térmico e elétrico; e) Auto lubrificação; f) Aparência decorativa; g) Transparência (foi a primeira classe de materiais transparentes descoberta após séculos); h) Amortecimento mecânico, usado para absorção de energia.
DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> a) Baixa resistência, mesmo considerando sua baixa densidade; b) Rigidez inferior à dos metais, cerâmicos e madeira; c) Mais frágil que muitos metais e madeiras; d) Dureza baixa, risca com facilidade; e) Expansão térmica superior à dos metais (5 a 10 vezes maior); f) Mais inflamáveis que os metais; g) Temperatura máxima de serviço baixa; h) São suscetíveis à deterioração pela exposição à radiação ultravioleta como a presente na luz natural; i) Muito suscetíveis à deformação de fluência; j) Baixa resistência a produtos químicos orgânicos.

Fonte: Elaborado pela autora, adaptação de MENDONÇA, 2005.

Do ponto de vista de estrutura e de seu comportamento quando aquecido, os plásticos são classificados em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos são polímeros que se fundem em um líquido viscoso capaz de sofrer grandes deformações para serem moldadas e solidificadas numa forma desejada. Esse processo é reversível e faz com que os polímeros possam ser reutilizados pelo uso de calor e pressão, porém de forma parcial, isto é, a cada

processo que ele é submetido o produto apresenta redução parcial de propriedades mecânicas. Dentre os termoplásticos, pode-se citar como exemplo: poliestireno, polietileno, náilon, policarbonato, etc. (MENDONÇA, 2005; TITA, 2006).

Por outro lado, os termofixos apresentam comportamento diferente, pois, uma vez que o material endurece, não pode ser fundido ou amolecido pelo calor. Se aquecidos acima do limite, esses plásticos simplesmente se decompõem. Alguns tipos de termofixos são: poliéster, epóxi, poliamidas, fenólicos, etc. (MENDONÇA, 2005).

De maneira geral, os termofixos são os mais utilizados como matriz, isso se dá não só por causa das propriedades mecânicas frequentemente superiores às dos termoplásticos, mas também por serem menos afetados pela variação de temperatura. Desta forma, peças e componentes podem ser completamente produzidos à temperatura ambiente, característica que demonstra vantagem sobre os termoplásticos (MENDONÇA, 2005).

2.2 ANÁLISE MICROMECAÂNICA

A abordagem micromecânica consiste em estimar a variação das propriedades da lâmina, com base nas proporções e propriedades de seus constituintes (matriz e reforço). Assim, na etapa de projeto essa análise é uma ferramenta de cálculo fundamental para estimar propriedades, uma vez que antes de fabricar o composto, os ensaios mecânicos são inviáveis (MENDONÇA, 2005).

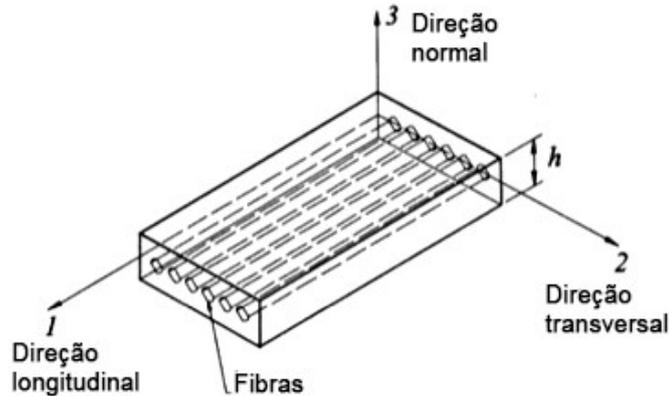
Algumas hipóteses são consideradas nas deduções das propriedades: a matriz como isotrópica, elástica, linear, homogênea e livre de defeitos; a fibra também tem essas considerações e, ainda, assume que estão perfeitamente alinhadas e regularmente espaçadas (JONES, 1999).

2.2.1 Propriedades mecânicas

Para identificar os valores das propriedades mecânicas de uma lâmina, o material é submetido a ensaios nos quais o estado de tensões aplicado seja simples, de preferência uniaxial, de maneira que a relação tensão-deformação também seja simples, envolvendo apenas um parâmetro, como ocorre numa relação linear (MENDONÇA, 2005).

A Figura 5 ilustra os elementos típicos de uma lâmina reforçada com fibras unidirecionais, conforme explanados anteriormente. Deve-se ressaltar que a referência adotada na imagem será mantida em toda dedução da micromecânica, onde se tem: direção longitudinal indicada pelo eixo 1; direção transversal indicada pelo eixo 2; direção normal indicada pelo eixo 3 (MENDONÇA, 2005).

Figura 5 – Direções principais de propriedades mecânicas em uma lâmina



Fonte: MENDONÇA, 2005.

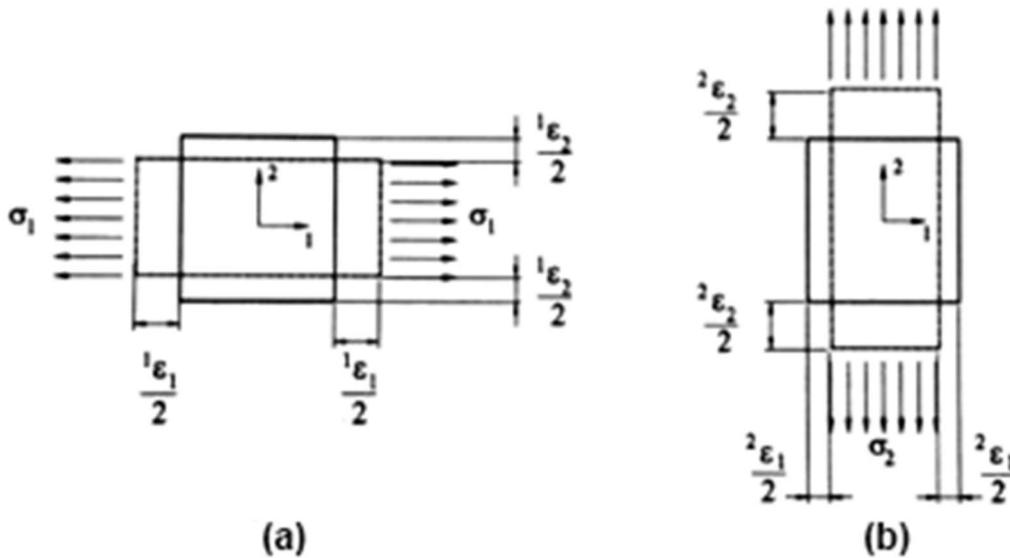
Inicialmente, considera-se um elemento diferencial da lâmina, a qual está submetida a tensão normal na direção longitudinal, σ_1 , e a tensões nulas nas outras direções. Na Figura 6(a), observa-se que σ_1 provoca duas componentes de deformação, nas direções 1 e 2, ε_1^1 e ε_2^1 , respectivamente. Nota-se que o índice superior de ε indica a direção do carregamento, e o índice inferior a direção de deformação. A deformação na direção transversal é proveniente do efeito de Poisson, que ao aplicar uma força axial de tração em um corpo deformável esse corpo se alonga e contrai lateralmente, já ao se aplicar uma força de contração o oposto ocorre. Assim, define-se:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1^1}, \quad (1)$$

$$\nu_{12} = - \frac{\varepsilon_2^1}{\varepsilon_1^1}, \quad (2)$$

onde E_1 é o módulo de elasticidade longitudinal na direção 1, e ν_{12} é o coeficiente de Poisson maior da lâmina quando a carga é aplicada na direção 1.

Figura 6 – Tensões e deformações normais nas direções 1 e 2



Fonte: MENDONÇA, 2005.

De maneira análoga, conforme a Figura 6(b), quando se aplica uma tensão na direção 2, σ_2 , tem-se o módulo de elasticidade na direção 2, E_2 , e o coeficiente de Poisson menor da lâmina quando a carga é aplicada na direção 2, ν_{21} . Define-se então,

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2^2}, \quad (3)$$

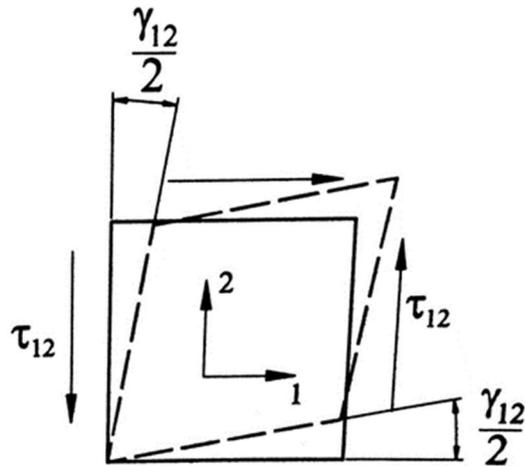
$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}. \quad (4)$$

A denominação “maior” e “menor” para o coeficiente de Poisson, deve-se ao fato que em geral nas lâminas reforçadas, $E_1 > E_2$, segue-se que $\nu_{12} > \nu_{21}$.

Conforme ilustrado na Figura 7, para obter o módulo de elasticidade cisalhante da lâmina em relação aos eixos principais do material, G_{12} , é necessário obter, primeiramente, em ensaios no corpo de prova: a tensão cisalhante aplicada nas direções principais τ_{12} e a deformação cisalhante γ_{12} . Para assim, obter,

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}. \quad (5)$$

Figura 7 – Tensão e deformação cisalhante



Fonte: MENDONÇA, 2005.

2.2.2 Frações de massa e volume

A proporção relativa entre fibra e resina é o principal parâmetro indicativo da constituição da lâmina. Para processos de fabricação, facilita o uso das massas relativas, enquanto os valores teóricos de propriedades utilizados no projeto, são determinados em termos de fração de volume (MENDONÇA, 2005).

Antes de aprofundar no assunto, vale ressaltar que sub índices c , f , m e v são para identificação de compósito, fibra, matriz e vazio, respectivamente. Inicialmente, pode-se citar as seguintes relações básicas para o volume e massa do compósito, respectivamente,

$$v_c = v_f + v_m + v_v \text{ e} \quad (6)$$

$$m_c = m_f + m_m . \quad (7)$$

Para determinar a fração volumétrica, serão abordados dois métodos: um baseado em Mendonça (2005) e outro baseado em Tita (2003). De acordo Mendonça (2005), definem-se V_f e V_m como frações volumétricas, e M_f e M_m como frações mássicas,

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, V_m = \frac{v_m}{v_c}, V_v = \frac{v_v}{v_c}, \quad (8)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}, M_m = \frac{m_m}{m_c}. \quad (9)$$

As frações de volume da fibra e da matriz podem ser reescritas em função das densidades e frações mássicas, assim,

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \text{ e } V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_m. \quad (10)$$

Dessa forma, tem-se,

$$V_f + V_m + V_v = 1 \text{ e } M_f + M_m = 1. \quad (11)$$

Por outro lado, Tita (2003) estima a fração mássica da fibra e a fração volumétrica da matriz de forma diferente. Sabendo a massa de fibra a seco por unidade de área, M_{fs} , e a espessura de uma camada do compósito, t_c , determinam-se,

$$M_f = \frac{M_{fs}}{\rho_c t_c}, \quad (12)$$

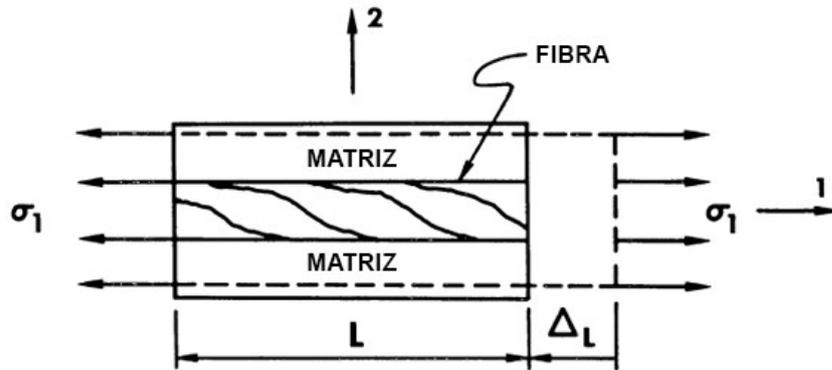
$$V_m = \frac{\rho_c - \rho_f V_f}{\rho_m}. \quad (13)$$

Por consequência, independente da forma de obtenção, tendo-se as frações de volume e massa, resta apenas conhecer as propriedades da fibra e da matriz para possibilitar a determinação das propriedades do compósito. Esse tipo de relação é chamado de regra de mistura, a qual é utilizada para se aproximar com maior ou menor precisão das propriedades da lâmina (MENDONÇA, 2005; TITA, 2006).

2.2.3 Módulo de elasticidade

Pode-se obter uma análise simplificada do comportamento do material a partir de uma região representativa da constituição do material. Observando a Figura 8, verifica-se que a deformação normal ε_1^1 é dada pela razão da variação do comprimento (ΔL) e comprimento inicial (L).

Figura 8 – Elemento representativo de volume com carregamento na direção 1



Fonte: JONES, 1999.

Devido as hipóteses de elasticidade dos constituintes, pode-se afirmar,

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1^1, \quad (14)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1^1, \quad (15)$$

onde, o sub índice f é para fibra e m é para matriz. Essas tensões, para um carregamento longitudinal, correspondem a molas em paralelo. A tensão normal, σ_1 , age na área transversal A do elemento representativo de volume, σ_f age na área da seção transversal das fibras A_f , e σ_m age na área da seção transversal da matriz A_m . Então, a força resultante do elemento representativo do material compósito é,

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (16)$$

tal que,

$$\sigma_1 = \sigma_f \frac{A_f}{A} + \sigma_m \frac{A_m}{A} = E_f \varepsilon_1^1 \frac{A_f}{A} + E_m \varepsilon_1^1 \frac{A_m}{A}. \quad (17)$$

Logo, dividindo a Equação 17 por ε_1^1 , tem-se,

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}, \quad (18)$$

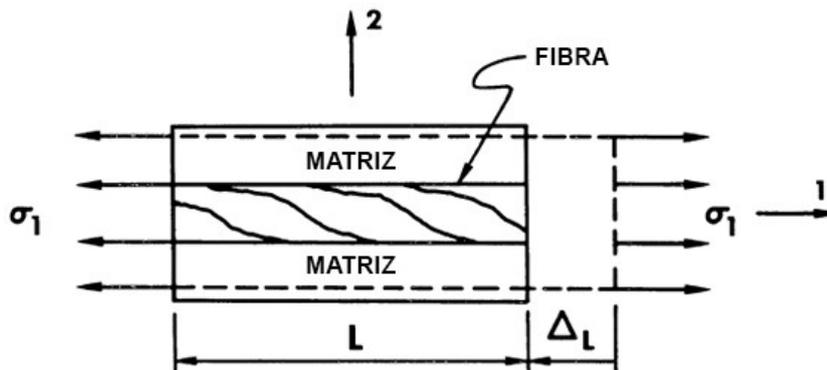
ou,

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m. \quad (19)$$

Dessa forma, para determinar o módulo de elasticidade longitudinal são necessários a fração de volume e o módulo de elasticidade de cada constituinte do compósito. Para um carregamento na direção principal 2, como apresentado na Figura 9, a determinação do módulo de elasticidade é análoga a apresentada anteriormente. A diferença consiste no comportamento das tensões dos constituintes, as quais correspondem a uma associação de molas em série. Sendo assim, mantendo o mesmo raciocínio, obtém-se o módulo de elasticidade transversal,

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_f + E_m V_m}. \quad (20)$$

Figura 9 – Elemento representativo de volume com carregamento na direção 2



Fonte: JONES, 1999.

Vale salientar que as hipóteses adotadas fazem com que essa forma de obter as propriedades seja uma solução aproximada, uma vez que não é considerado o efeito decorrente do coeficiente de Poisson de cada constituinte por apresentarem valores distintos.

2.2.4 Coeficiente de Poisson

Como visto nas propriedades mecânicas, o coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação elástica transversal e longitudinal. Analisando a Figura 10, sabe-se que a deformação transversal Δ_W é definida macroscopicamente,

2.2.5 Módulo de elasticidade cisalhante

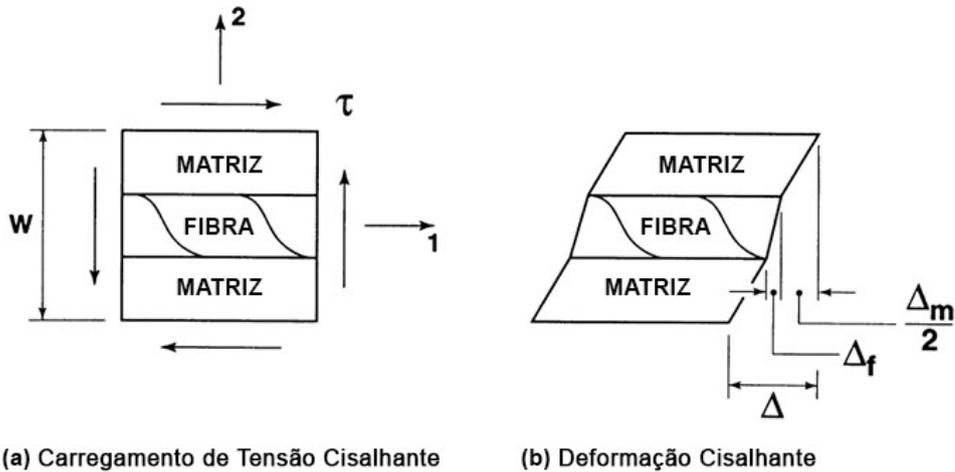
A determinação do módulo de elasticidade cisalhante, G_{12} , parte-se do pressuposto de que a tensão cisalhante na fibra e na matriz é a mesma, entretanto, as deformações não são iguais. Em virtude disso, tem-se,

$$\gamma_m = \frac{\tau_{12}}{G_m}, \quad (26)$$

$$\gamma_f = \frac{\tau_{12}}{G_f}. \quad (27)$$

O elemento de volume representativo, ilustrado na Figura 11(a), apresenta o comportamento da tensão cisalhante de forma linear. Em escala microscópica, Figura 11(b), as deformações são ilustradas e nota-se que matriz sofre maior deformação que a fibra devido ao menor módulo cisalhante.

Figura 11 – Elemento representativo de volume carregado em cisalhamento



Fonte: JONES, 1999.

Tem-se, assim, a deformação cisalhante total,

$$\Delta = \gamma_{12}W, \quad (28)$$

e, ainda, as parciais dos constituintes do compósito,

$$\Delta_m = V_m W \gamma_m , \quad (29)$$

$$\Delta_f = V_f W \gamma_f . \quad (30)$$

Sabendo que $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$, obtém-se,

$$\gamma_{12} = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f . \quad (31)$$

Substituindo a Equação 5 e organizando, consegue-se obter,

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} . \quad (32)$$

2.3 FABRICAÇÃO

Fabricar um componente através de materiais estruturais tradicionais, na maioria das vezes, significa manipular o material através de procedimentos como usinagem, moldagem ou soldagem. Com compósitos reforçados por fibra a situação é diferente, já que o componente e o material são normalmente fabricados simultaneamente. Por isso, para materiais compósitos, deve-se entender como as condições de processamento afetam as propriedades do produto final (GALLI, 2016).

De maneira geral, a fabricação de materiais compósitos consiste basicamente nas etapas de posicionamento das fibras em um molde, inserção da resina e adesão dos constituintes através do processo de cura. Dentre a diversidade de maneiras de realizar esse procedimento, será abordado somente sobre o processo de infusão à vácuo (*Vacuum Infusion Process - VIP*) pela relevância a este trabalho.

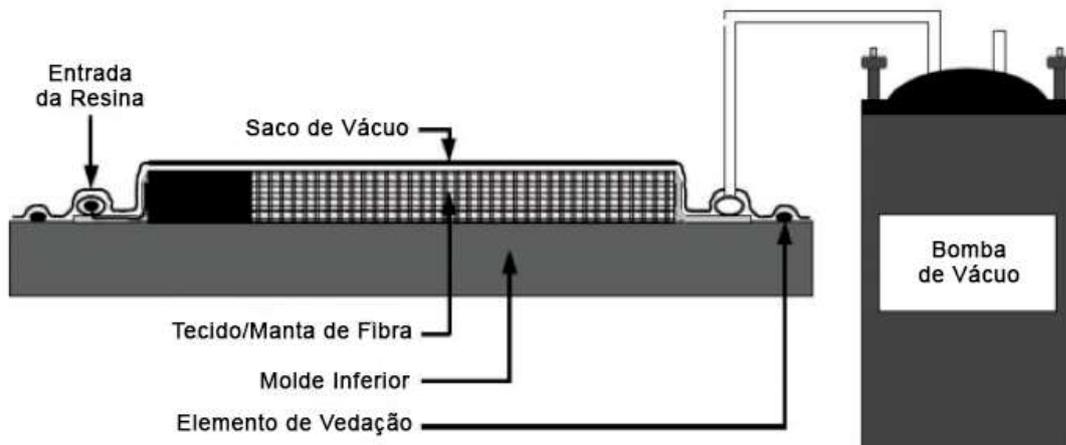
2.3.1 Processo de infusão à vácuo

O VIP viabiliza a obtenção de um laminado robusto e com elevada qualidade, mas como qualquer processo de fabricação de compósitos, é necessário o planejamento do seu

desenvolvimento e cuidados durante a manufatura para garantir o sucesso do processo (LOPES, 2009).

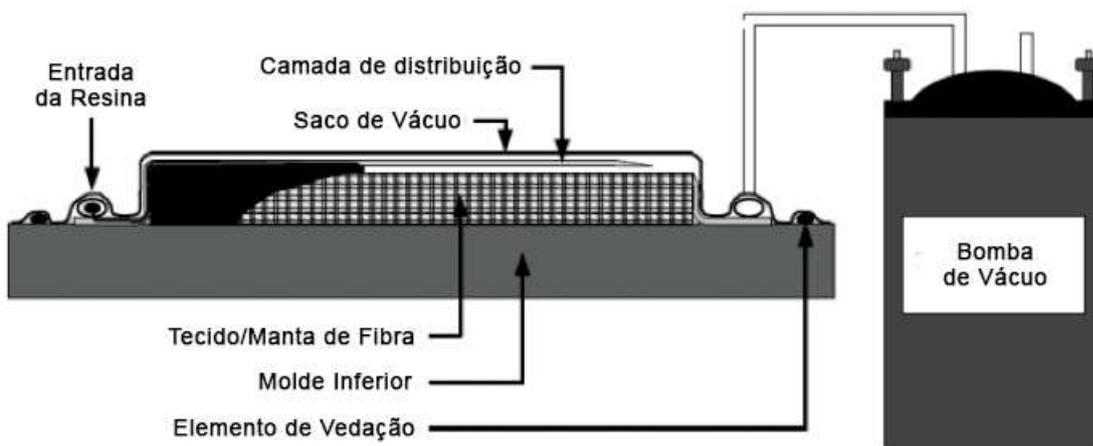
De acordo com Adams, Carlsson e Pipes (2014), processos como VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) e SCRIMP (*Seemann's Composite Resin Infusion Process*), ilustrados nas Figuras 12 e 13, respectivamente, são processos de moldagem de compósitos líquidos. Ambas pertencem à categoria VIP, onde a resina é puxada para o molde devido ao vácuo e, ainda, a compactação do tecido ocorre pela ação do mesmo.

Figura 12 – Processo VA-RTM



Fonte: SILVA, 2016.

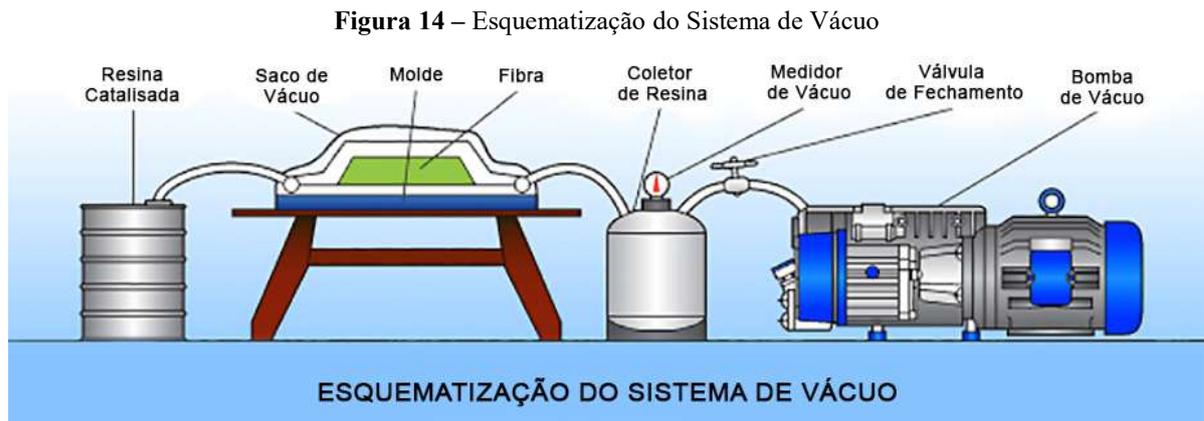
Figura 13 – Processo SCRIMP



Fonte: SILVA, 2016.

De acordo com Silva (2016), a única diferença entre os processos é que pelo SCRIMP existe a inserção de uma camada de material altamente permeável entre a superfície superior do tecido da fibra e o saco de vácuo. Esta camada permeável, conhecida como *flow mesh* ou "camada de distribuição", aumenta expressivamente a velocidade de infusão da resina.

Quando a bomba é ligada, a pressão no interior do saco começa a baixar e o fluxo é iniciado a partir do momento em que o diferencial de pressões - entre o interior e o exterior - vence as forças viscosas e inerciais da resina. Após a impregnação total do tecido fibroso, o fluxo continua até um coletor para evitar que a bomba aspire resina. E, para finalizar, a peça é mantida sob a compressão do vácuo por um determinado tempo para conclusão do processo de cura (SILVA, 2016). A Figura 14 ilustra com mais detalhes os componentes do processo.



Fonte: CARBON BY DESIGN, 2018.

Como todo método de fabricação, o processo de infusão à vácuo possui suas vantagens e desvantagens, algumas estão citadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> a) Boa qualidade superficial; b) Controle das tolerâncias dimensionais; c) Propriedades mecânicas uniformes; d) Razão volumétrica de fibra e matriz elevada; e) Processo econômico. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Cura demorada; b) Requer baixas viscosidades da resina; c) Consumíveis caros.

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de GAMA, 2017.

2.4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

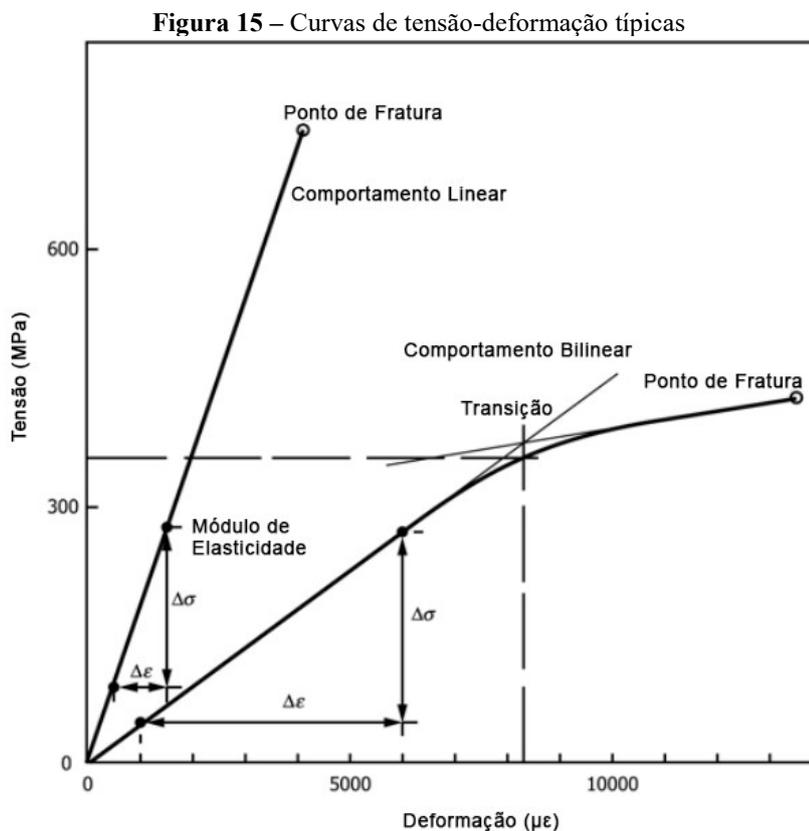
Para determinar as propriedades mecânicas do material compósito, serão realizados dois ensaios experimentais, os quais serão abordados nesta seção: ensaio de tração e teste de queima.

2.4.1 Ensaio de tração

Para caracterização de materiais, o ensaio de tração é o mais utilizado, devido sua simplicidade e possibilidade de determinar importantes propriedades do material. O ensaio consiste no esforço axial do corpo de prova, sendo possível avaliar o comportamento da deformação em relação a tensão aplicada.

Os materiais compósitos, por poderem ser constituídos de uma imensa gama de materiais distintos e com diferentes arranjos, não possuem uma norma rígida em termos de ensaio de tração. No entanto, a norma ASTM D3039 busca padronizar ao máximo este procedimento, de maneira a garantir também certa flexibilidade e adequação às necessidades de cada material (ASTM, 2017).

O compósito apresenta normalmente o comportamento linear de deformação, porém, quando há deformação de transição, o material se comporta de forma bilinear, conforme indicado na Figura 15.

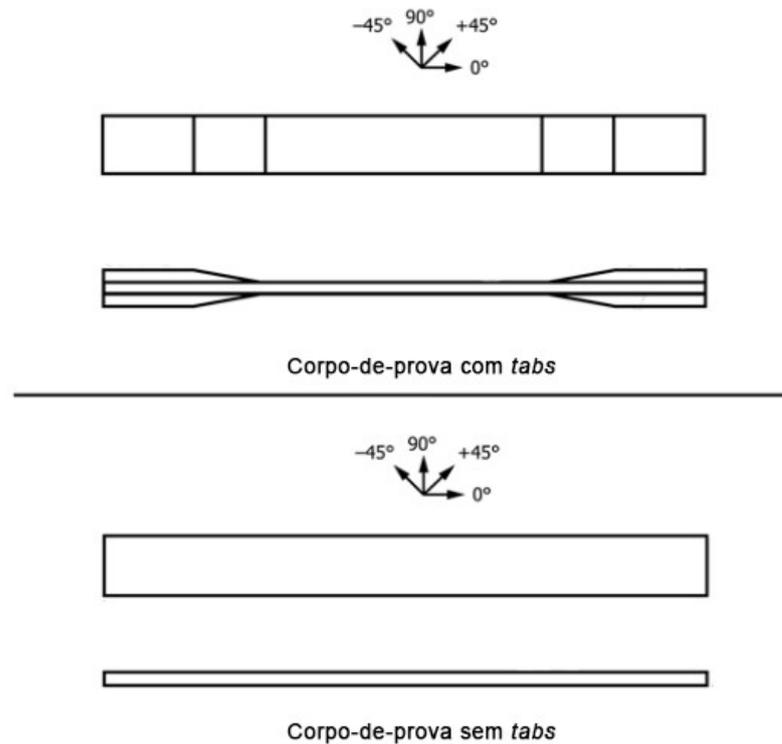


Fonte: ASTM INTERNATIONAL, 2017.

Conforme a norma, o corpo de prova deve ter seção transversal retangular constante. A Figura 16 ilustra como devem ser os corpos de provas e na Tabela 3 são apresentadas as

dimensões necessárias de acordo com a orientação da fibra (ASTM, 2017). Nota-se que é possível utilizar *tabs*, reforço na região de prensão no equipamento, para assim garantir a introdução da força na amostra e prevenir falhas prematuras. A norma diz que para determinar a necessidade de utilizá-los, basta observar o resultado final, se o modo e a localização da falha são aceitáveis.

Figura 16 – Corpos de prova com e sem tabs



Fonte: ASTM INTERNATIONAL, 2017.

Tabela 3 – Recomendações de geometria das amostras para tração

Orientação da Fibra	Largura, mm [in.]	Comprimento Total, mm [in.]	Espessura, mm [in.]	Comprimento da Tab, mm [in.]	Espessura da Tab, mm [in.]	Ângulo do Tab,
0° unidirecional	15 [0.5]	250 [10.0]	10 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 ou 90
90° unidirecional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
Equilibrado e simétrico	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	-	-	-
Aleatório-descontínuo	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	-	-	-

Fonte: Elaborada pela autora, adaptado de ASTM INTERNATIONAL, 2017.

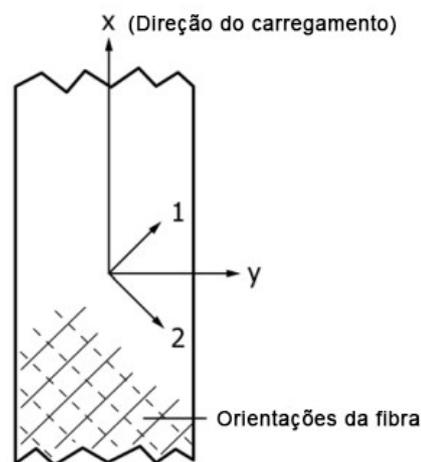
De acordo com Adams, Carlsson e Pipes (2014), após o ensaio é possível determinar os módulos elásticos e as razões de Poisson da seguinte maneira:

- E_1 : A inclinação inicial da curva tensão-deformação para o ensaio de tração 0°;

- ν_{12} : A relação negativa das deformações transversais para longitudinais para o ensaio de tração 0° ;
- E_2 : A inclinação inicial da curva de tensão-deformação para o ensaio de tração de 90° ;
- ν_{21} : A relação negativa das deformações transversais para longitudinais para o ensaio de tração de 90° .

O módulo de cisalhamento, por sua vez, é definido pelo ensaio de tração seguindo a norma ASTM D3518, onde as fibras estão orientadas em $\pm 45^\circ$ (Figura 17).

Figura 17 – Definição das amostras e dos eixos dos materiais



x e y representam o corpo de prova ou eixos de referência, enquanto 1 e 2 representam o material ou eixos locais

Fonte: ASTM INTERNATIONAL, 2013.

O ensaio de tração no laminado $\pm 45^\circ$ fornece uma medida indireta da resposta tensão-deformação de cisalhamento no plano das camadas no sistema de coordenadas do material. A tensão cisalhante, τ_{12} , é simplesmente,

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2}, \quad (33)$$

onde σ_x é a tensão normal (razão do esforço pela área aplicada). A deformação cisalhante, por sua vez, é

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad (34)$$

onde ε_x e ε_y são as deformações axial e transversal, respectivamente ($\varepsilon_y < 0$). Assim, o módulo de cisalhamento no plano G_{12} é prontamente determinado relacionando $\sigma_x / 2$ versus $(\varepsilon_x - \varepsilon_y)$ e estabelecendo a inclinação da porção inicial da curva.

2.4.2 Teste de queima

Uma forma de determinar a fração volumétrica da fibra no material compósito, com base na norma ASTM 2584, é realizando a queima do material, de forma em que extinga a matriz, restando somente fibra.

A norma indica que o teste seja realizado com no mínimo 3 amostras de aproximadamente 5g ou com dimensões máximas de 2,5 por 2,5 cm. O procedimento deste teste é descrito na norma da seguinte forma:

- Aquecer um cadinho entre 500 e 600°C por 10 min ou mais. Arrefece-lo até à temperatura ambiente num dessecador e pesa-lo com precisão de até 1,0 mg. O dessecador não é necessário se o teste for realizado apenas para examinar a arquitetura da fibra.
- Coloque a amostra no cadinho e pese com precisão até 1,0 mg. Aquecer o cadinho e a amostra na mufla a $565 \pm 28^\circ\text{C}$ até que toda matriz tenha desaparecido. Arrefecer o cadinho à temperatura ambiente em um dessecador e pese-o novamente com precisão de até 1,0 mg.

Dessa maneira, é possível calcular a perda de ignição da amostra em porcentagem de peso, assim

$$\text{Perda de ignição, peso \%} = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1}, \quad (35)$$

onde, W_1 é o peso da amostra e W_2 é o peso do resíduo.

Para avaliar a medida de dispersão dos valores obtidos, determina-se assim:

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n\bar{X}^2}{n - 1}}, \quad (36)$$

onde,

s = desvio padrão estimado;

X = valor de uma única observação;

\bar{X} = média aritmética do conjunto de observações;

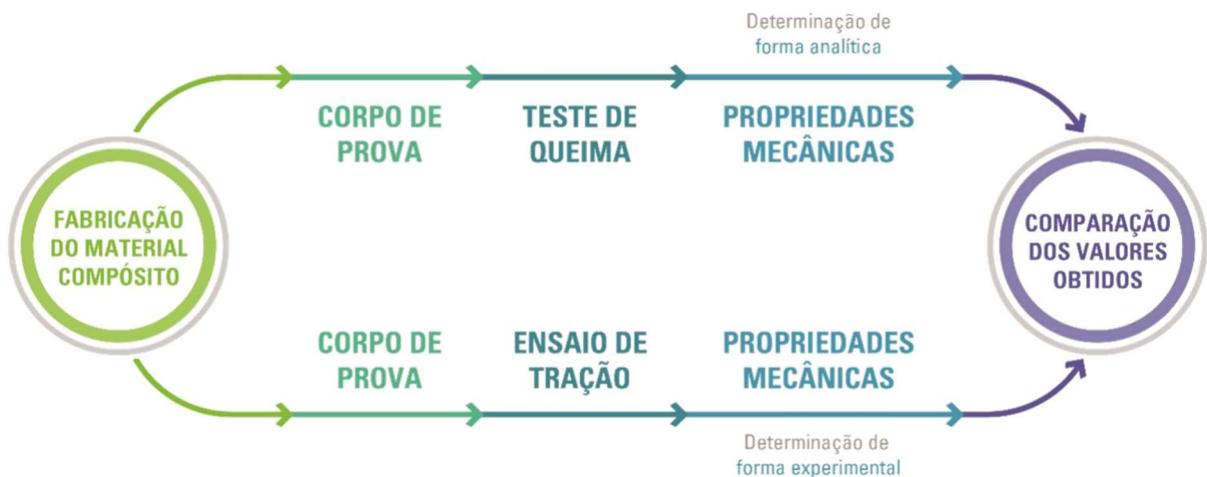
n = número de observações.

Por fim, para a determinação das propriedades mecânicas, realiza-se a análise micromecânica explanada na seção 2.2.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo irá explicar as etapas e os procedimentos necessários para fabricar e obter as propriedades de um material compósito, com base nas referências citadas no capítulo anterior. Para melhor compreensão, o fluxograma ilustrado na Figura 18 apresenta os processos realizados para atingir o objetivo deste trabalho.

Figura 18 – Fluxograma dos processos realizados



Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

3.1 FABRICAÇÃO

O processo de fabricação de placas de material compósito foi realizado de forma adaptada ao processo de infusão à vácuo, citado no capítulo 2. A principal diferença dentro do processo se encontra na ausência de um reservatório de resina, já que a mesma foi colocada diretamente no molde. Inicialmente, na Tabela 4, estão listados os materiais utilizados na montagem do aparato.

Tabela 4 – Materiais utilizados no processo de fabricação

MATERIAL	FUNÇÃO	IMAGEM
<i>Peel Ply</i>	Facilitar a desmoldagem da placa.	
<i>Flow Mesh</i>	Facilitar a infusão da resina no meio fibroso.	
Saco de vácuo	Isola a região da infusão do meio ambiente.	
Válvula manual	Controlar o vácuo no molde.	
União em “T”	Direcionar vácuo a dois moldes, simultaneamente.	

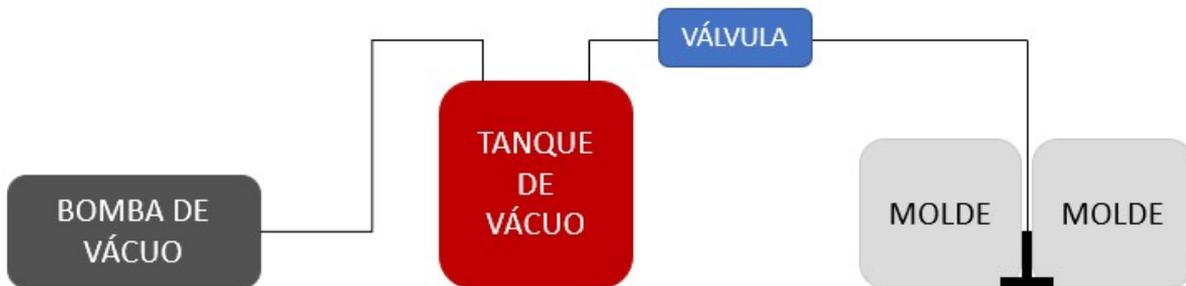
<p>Mangueira com reforço de arame</p>	<p>Transporte do ar extraído.</p>	
<p>Tubo espiral</p>	<p>Distribuição do vácuo na saída.</p>	
<p>Fita de vedação</p>	<p>Vedar a região da infusão.</p>	
<p>Vidro temperado</p>	<p>Molde.</p>	
<p>Cera de carnaúba</p>	<p>Evitar que a resina impregne no molde.</p>	
<p>Bomba de vácuo</p>	<p>Extrair ar do sistema.</p>	

Tanque de vácuo	Evita o transporte de resina à bomba.	
-----------------	---------------------------------------	---

Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

A bomba de vácuo foi conectada ao tanque de vácuo, o qual possui um dinamômetro para controle da pressão interna. Por sua vez, o tanque foi conectado à válvula de fechamento e em sequência aos moldes. Esse fluxograma está representado, esquematicamente, na Figura 19.

Figura 19 – Esquema do processo de fabricação



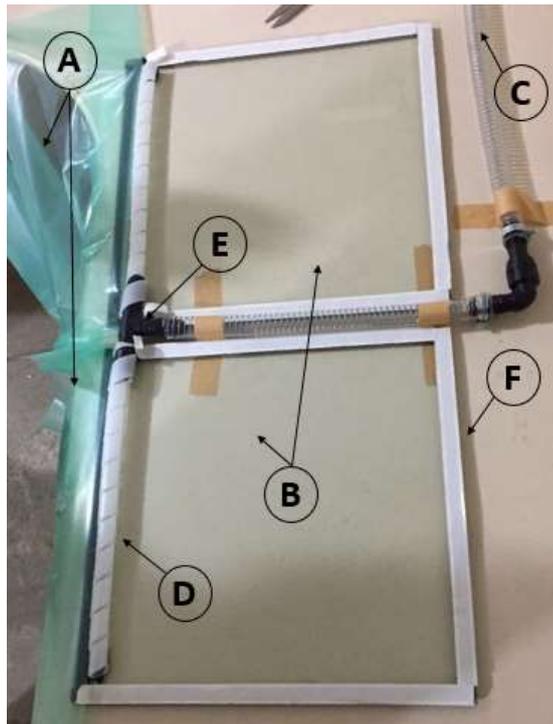
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Para conectar os componentes foi utilizada uma mangueira com reforço de arame e, para extrair simultaneamente o ar dos moldes, foi colocada uma união em “T”. Em cada lado dessa união, foram conectados tubos espirais com a finalidade de extrair o ar e o excesso de resina. Foram utilizados como molde duas placas de vidro temperado. Elas são quadradas, medindo 40 cm em cada um de seus lados, possuem 1 cm de espessura e foram posicionadas ao lado de cada saída do canal de vácuo. No entorno do molde foi aplicada a fita de vedação e colou-se o saco de vácuo em um dos lados para facilitar a vedação final. O aparato, conforme apresentado na Figura 20, está pronto para iniciar o processo de fabricação.

Com o sistema montado, é necessário organizar os materiais para fabricar o compósito. Inicialmente, foi cortado o tecido de fibra em quadrados de 30 cm e o *peel ply* e *flow mesh* em quadrados de 35 cm. Essas camadas foram organizadas, conforme ilustrada na Figura 21, para serem posteriormente posicionadas no molde.

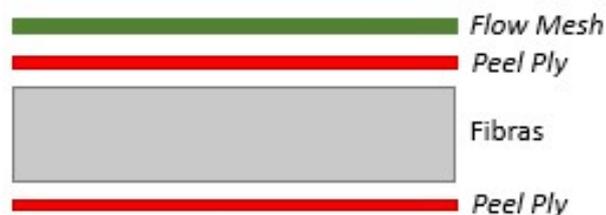
Com essas etapas realizadas, inicia-se a fabricação do material. O material compósito a ser estudado neste trabalho é formado por 12 camadas de tecido ortogonal de fibra de vidro e foi utilizada como matriz resina epóxi. A cera carnaúba foi aplicada sobre o molde e foi preparada a mistura de resina e endurecedor epóxi, respeitando a proporção em massa de 3 para 1, respectivamente. Vale ressaltar que o *gel time* da resina utilizada é de 50 minutos e foi utilizada inicialmente a proporção em massa de matriz-fibra de 3 para 1. Essa mistura foi espalhada com o auxílio de uma espátula, da extremidade oposta ao tubo espiral até o centro do molde, para assim ocorrer a infusão no material fibroso. Em seguida, as camadas organizadas anteriormente foram posicionadas cuidadosamente no molde, para que a resina não ultrapassasse a fita de vedação. Assim, o saco de vácuo pôde finalmente ser vedado completamente.

Figura 20 – Sistema de molde e vedação, tem-se: a) saco de vácuo; b) molde; c) mangueira com reforço de arame; d) tubo espiral; e) união em “T”



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Figura 21 – Ordem de camadas para posicionar no molde



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Figura 22 – Material submetido ao vácuo



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Para melhor visualização das etapas descritas, a Figura 23 demonstra o processo de fabricação realizado no mesmo aparato, porém para outro estudo o qual teve alterações na ordem de posicionamento do *peel ply* e aplicação da resina.

Figura 23 – Etapas da fabricação de uma placa de compósito.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Para dar início ao processo de infusão, a bomba de vácuo foi ligada e a válvula foi aberta. Nos primeiros instantes, verificou-se a vedação para que não houvesse fuga de ar no entorno do molde. Por conseguinte, o material ficou submetido ao vácuo por 5 horas (Figura 22) e deligou-se a bomba de vácuo. O compósito ficou em repouso por 24 horas em virtude do processo de cura.

Para obter os corpos de prova do material, foi montada uma “mesa de corte”, composta por um apoio para a placa e um espaço para o disco diamantado, que foi fixado no eixo de uma parafusadeira. A Figura 24 apresenta um dos momentos de corte.

Figura 24 – Corte à disco diamantado



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os procedimentos utilizados para caracterizar o material compósito foram: ensaio de tração e teste de queima. Os métodos aplicados nestes procedimentos serão explicados detalhadamente nesta seção.

3.2.1 Ensaios de tração

O ensaio de tração, conforme fundamentado na seção 2.4.1, foi realizado no laboratório de caracterização mecânica do SENAI – Joinville/SC. O ambiente estava controlado com temperatura de 21°C e com umidade de 79,3%.

Os corpos de prova apresentam dimensões, conforme Tabela 2, para orientação equilibrada e simétrica da fibra. Foram feitas 3 amostras do material com fibras a 0°/90° e 3 amostras do material com fibras a $\pm 45^\circ$, apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Corpos de prova para ensaio de tração: A1, A2 e A3 são amostras do material com fibras a 0°/90° e B1, B2 e B3 são amostras do material com fibras a $\pm 45^\circ$



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

O equipamento utilizado para realizar o ensaio de tração, ilustrado pela Figura 26, mede o deslocamento de forma ótica, por isso a necessidade de marcações na amostra, como apresentado na Figura 27.

Uma carga crescente é aplicada no material através do equipamento, até o momento de fratura. Simultaneamente, é traçado um gráfico computacional da força aplicada em função do deslocamento longitudinal. Entretanto, infelizmente, durante o ensaio não foi possível captar os dados de deslocamento transversal e os pontos nas curvas geradas.

Figura 26 – Equipamento para ensaio de tração



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Figura 27 – Amostra tracionada no equipamento



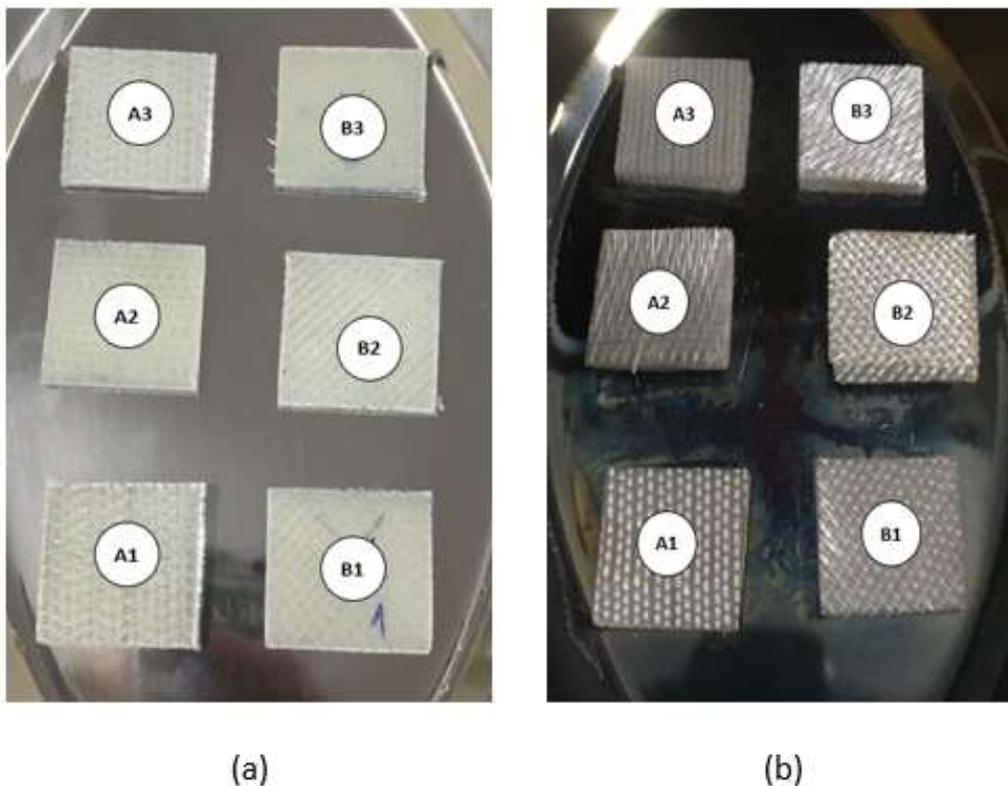
Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

3.2.2 Teste de queima

O teste de queima, conforme explanado na seção 2.4.2, foi realizado no laboratório de tratamentos térmicos da Universidade do Estado de Santa Catarina. Primeiramente, obtiveram-se os corpos de prova, quadrados de aproximadamente 2,5 cm, como apresentado na norma. Foram feitas 3 amostras do material com fibras a $0^\circ/90^\circ$ e 3 amostras do material com fibras a $\pm 45^\circ$. Essas estão apresentadas na Figura 28(a), onde A1, A2 e A3 são amostras do material com fibras a $0^\circ/90^\circ$ e B1, B2 e B3 são amostras do material com fibras a $\pm 45^\circ$.

As amostras foram pesadas em uma balança com precisão de 1 mg e posicionadas em um recipiente de aço inox para serem levadas ao forno. O forno foi programado para uma taxa de aquecimento de $25^\circ\text{C}/\text{min}$ até atingir a temperatura de 565°C . As amostras ficaram no forno por aproximadamente 1 hora, até evaporar toda a matriz polimérica, restando assim, somente as fibras (Figura 28(b)). Por fim, esses resíduos foram pesados na balança com precisão de 1 mg.

Figura 28 – Corpos de prova: a) antes e b) após o teste de queima



3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Na seção anterior, foram descritos os procedimentos adotados para determinar as propriedades. Através do ensaio de tração, é possível determinar as propriedades mecânicas do material de forma experimentais. Pelo teste de queima, é possível determinar as frações de massa e volume, para assim realizar a análise micromecânica e determinar as propriedades do compósito de forma analítica.

3.3.1 Ensaios de tração

O ensaio de tração tem como resultado os gráficos de força por deslocamento, os quais podem ser facilmente transformados para curvas de tensão em função da deformação. Para isso, basta dividir a força aplicada pela área da seção transversal do corpo de prova e o deslocamento pelo comprimento inicial.

Nas amostras com fibras de orientação $0^\circ/90^\circ$, a inclinação determina o módulo de elasticidade longitudinal, o qual é fornecido automaticamente pelo programa que gera os gráficos dos ensaios. Com as amostras com fibras a $\pm 45^\circ$, determinam-se os módulos de elasticidade cisalhante, conforme apresentado na seção 2.4.1.

3.3.2 Teste de queima

Como explicado na seção 3.2.2, os corpos de prova foram pesados antes e após a queima das amostras, para assim, obter a massa do compósito e da fibra. Aferiu-se também as dimensões de cada amostra, com auxílio de um paquímetro digital, para calcular o volume do compósito.

A densidade do compósito foi determinada pela razão de massa e volume do mesmo. Juntamente com a densidade da fibra e da matriz, pode-se determinar as frações mássicas e volumétricas dos constituintes do compósito. Essas frações foram determinadas por dois métodos, conforme explicado na seção 2.2.2.

Por fim, com os valores das frações volumétricas dos constituintes do compósito, é possível a determinação das propriedades mecânicas:

- Módulo de elasticidade longitudinal, igual ao transversal para o caso estudado, utilizando a Equação 19;

- Coeficiente de Poisson paralelo ao plano da lâmina, utilizando a Equação 25;
- Módulo de elasticidade cisalhante paralelo ao plano da lâmina, utilizando a Equação 32.

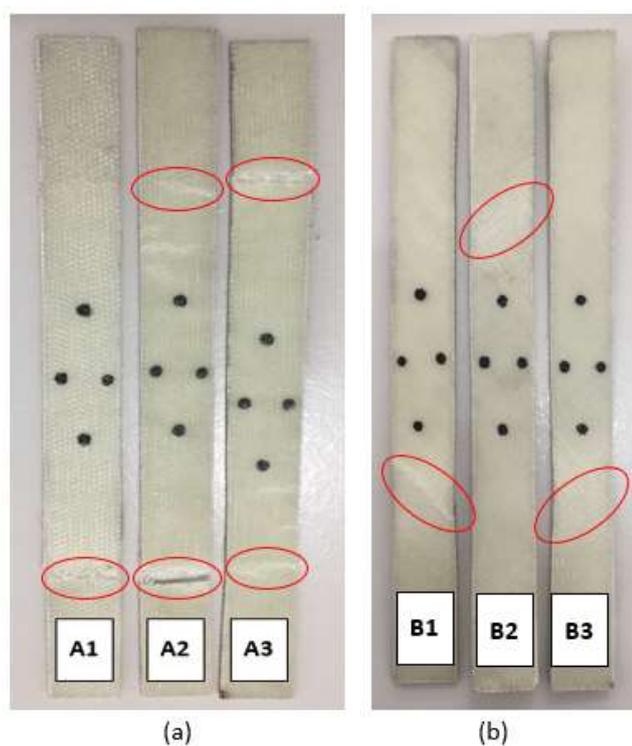
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O ensaio de tração foi realizado, conforme a seção 3.2.1, com algumas amostras até o momento de fratura e algumas até próximo a esse momento. Na Figura 29 está indicado em cada amostra os locais de falha e é perceptível que essas ocorrem de acordo com a orientação da fibra. Na Figura 29(a), as amostras possuem orientação de fibra a $0^\circ/90^\circ$ e obteve-se as fraturas transversais ao esforço aplicado. Enquanto na Figura 29(b), as amostras apresentam orientação de fibra a $\pm 45^\circ$ e as fraturas ocorreram na mesma direção.

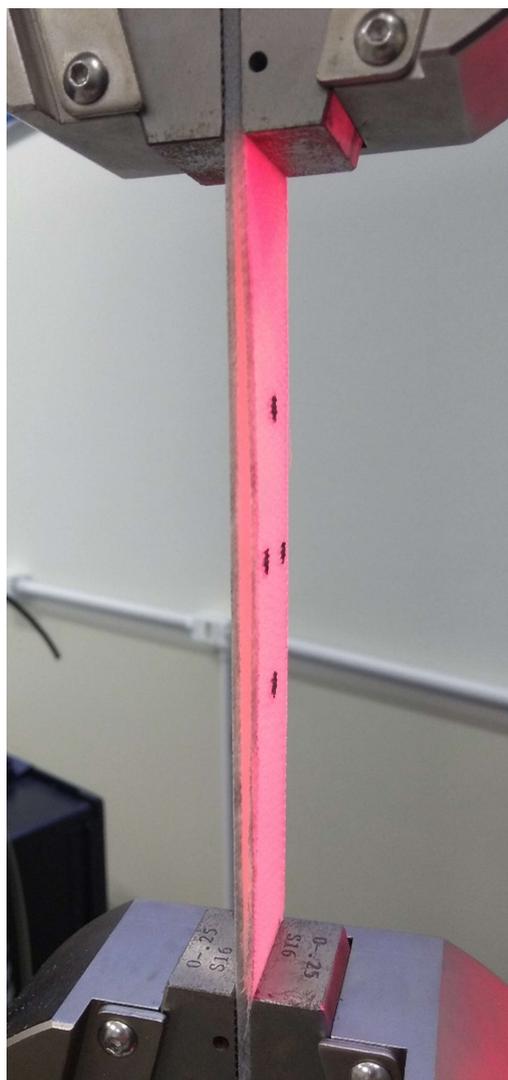
Além disso, é perceptível que as falhas, em ambos os casos, estão localizadas próximos da região de prensão ao equipamento. Infelizmente, não foi possível utilizar os *tabs* nos ensaios, os quais evitariam este problema. Esse fato ter ocorrido ressalta a importância de fazer o primeiro teste para avaliar a necessidade de usar o reforço, para assim garantir um resultado bem-sucedido.

Figura 29 – Amostras após o ensaio de tração: a) fibras com orientação a $0^\circ/90^\circ$ e b) fibras com orientação a $\pm 45^\circ$



Durante o ensaio da amostra A1, ocorreu a delaminação do material, conforme mostra a Figura 30. Fato importante de ser ressaltado, pois indica a falta de adesão entre a fibra e a matriz. Isso é justificado pela característica higroscópica da resina e pela umidade no ambiente e nos materiais utilizados no momento de fabricação, os quais deveriam ser postos em uma estufa, para amenizar este problema.

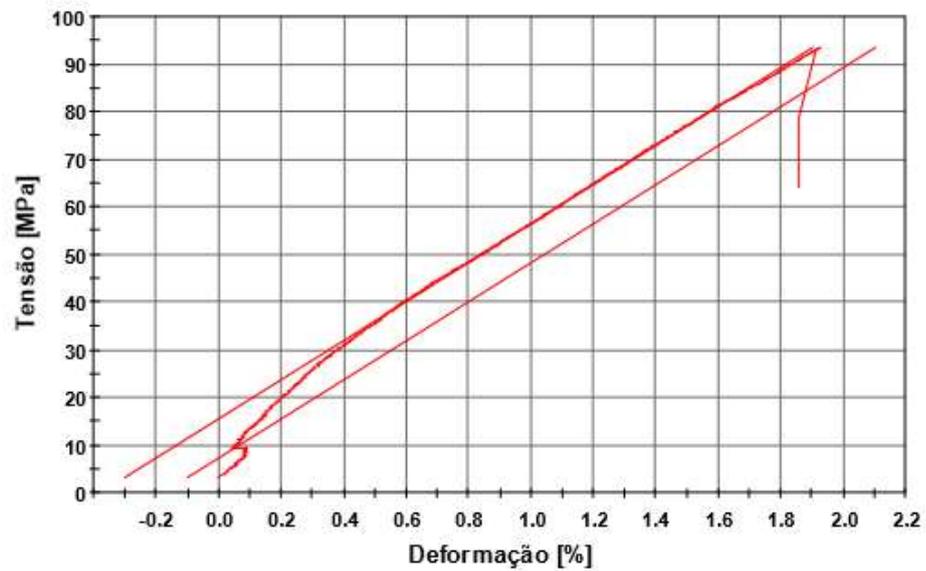
Figura 30 – Delaminação da amostra A1



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

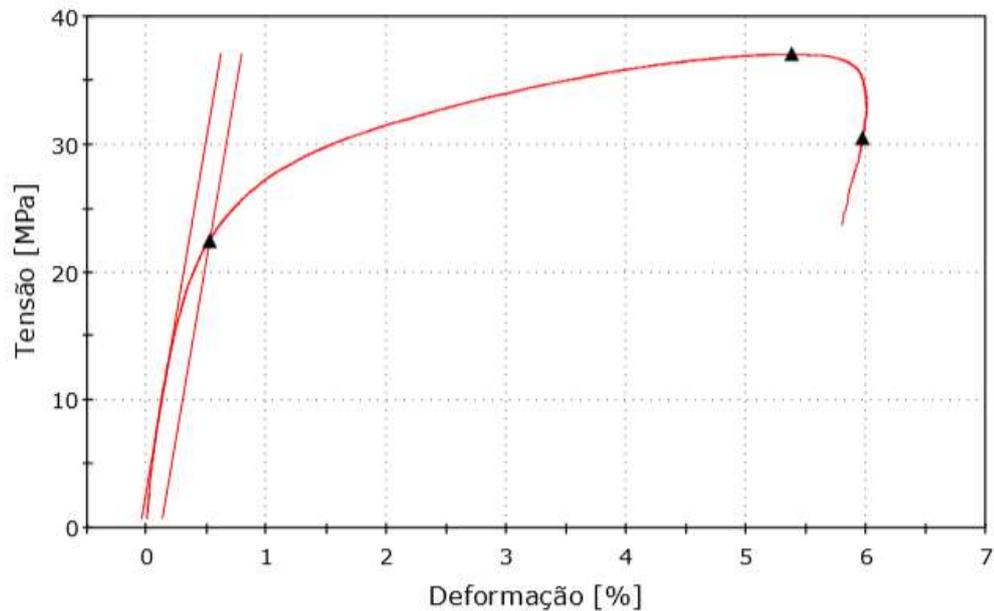
Os gráficos de tensão aplicada em função da deformação foram obtidos através do programa utilizado pelo equipamento. A Figura 31 demonstra a curva da amostra A2, a qual foi submetida à tração até o momento de fratura. Enquanto a Figura 32, demonstra a curva da amostra B1, a qual foi submetida à tração até o momento de estrição.

Figura 31 – Gráfico tensão x deformação para amostra A2



Fonte: SENAI, 2018.

Figura 32 – Gráfico tensão x deformação para amostra B1



Fonte: SENAI, 2018.

O material, quando submetido a uma força axial, apresentou comportamentos distintos para cada amostra devido a orientação da fibra. Pode-se visualizar no gráfico (Figura 30), que a amostra A2 apresentou comportamento linear e resistência máxima superior ao da amostra B1. Enquanto para amostra B1 (Figura 31), houve o comportamento bilinear já esperado.

Os relatórios dos ensaios realizados com as amostras que possuem orientação de fibra a $0^\circ/90^\circ$, apresentam os módulos de elasticidade longitudinal obtidos, os quais estão expostos na Tabela 5. Esses valores apresentados não foram coerentes com o esperado, isto pode ser explicado devido à ausência de *tabs* e à falta de controle da umidade ao fabricar o material.

Tabela 5 – Módulo de elasticidade para amostras A1, A2 e A3

Amostra	Módulo de elasticidade (MPa)
A1	4192
A2	4086
A3	3834

Fonte: Elaborado pela autora, 2018 – adaptado de SENAI, 2018.

Os ensaios do outro grupo de amostras, os quais apresentam orientação de fibra a $\pm 45^\circ$, deveriam ser utilizados para determinar o módulo de elasticidade cisalhante. Porém, devido à falta de captação dos deslocamentos transversais das amostras, impossibilitou a plotagem da curva $\sigma_x / 2$ em função de $(\epsilon_x - \epsilon_y)$.

4.2 ANÁLISE ANALÍTICA

Como descrito na seção 3.2.2, foi aferido a massa antes e depois da queima, ou seja, a massa do compósito e da fibra, respectivamente. Também foram aferidas as dimensões das amostras. Esses dados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados aferidos dos corpos de prova para teste de queima

	Fibras a $0^\circ/90^\circ$			Fibras a $\pm 45^\circ$		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Massa do compósito, m_c (g)	2,364	2,339	2,314	2,289	2,415	2,362
Massa da fibra, m_f (g)	1,742	1,75	1,737	1,745	1,837	1,795
Largura, L_1 (mm)	25,11	25,33	25,40	25,03	25,45	25,33
Largura, L_2 (mm)	25,60	25,25	25,12	25,68	26,53	26,00
Espessura, e (mm)	3,00	3,01	3,15	2,73	2,77	2,78

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Com esses parâmetros, é possível determinar: o volume do compósito, v_c , pelo produto de L_1 , L_2 e e ; a densidade do compósito, ρ_c , pela razão de m_c e v_c ; a massa da matriz, m_m , pela diferença de m_c e m_f . Todos esses foram calculados e estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos para volume e densidade do compósito e para massa da matriz

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Volume do compósito, v_c (m ³)	1,93E-06	1,93E-06	2,01E-06	1,75E-06	1,87E-06	1,83E-06
Densidade do compósito, ρ_c (kg/m ³)	1225,86	1214,97	1151,33	1304,45	1291,26	1290,11
Massa da matriz, m_m (g)	0,622	0,589	0,577	0,544	0,578	0,567

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Para análise micromecânica, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas dos constituintes do compósito. Essas foram baseadas em Daniel e Ishai (2006), exceto a densidade e o módulo de elasticidade longitudinal da fibra vidro, que foram utilizados os valores fornecidos pelo fabricante. As propriedades da fibra de vidro encontram-se na tabela 8 e da resina epóxi na tabela 9.

Tabela 8 – Propriedades da fibra de vidro

PROPRIEDADES	FIBRA DE VIDRO
Densidade, ρ_f	2550 kg/m ³
Módulo de elasticidade longitudinal, E_f	72 GPa
Módulo de elasticidade cisalhante, G_f	30 GPa
Coefficiente de Poisson, ν_f	0,23

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Tabela 9 – Propriedades da resina epóxi

PROPRIEDADES	RESINA EPÓXI
Densidade, ρ_m	1270 kg/m ³
Módulo de elasticidade longitudinal, E_m	4,3 GPa
Módulo de elasticidade cisalhante, G_m	1,6 GPa
Coefficiente de Poisson, ν_m	0,35

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Através das Equações 35 e 36, pôde-se estimar a perda de ignição e o desvio padrão estimado, expostos na Tabela 10. Como comentado na seção anterior, a perda de ignição do material com fibras a 0°/90° apresentou-se maior devido a quantidade superior de resina distribuída no molde, o que influi também apresentar maior desvio padrão estimado.

Tabela 10 – Perda de ignição e desvio padrão estimado

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Perda de ignição (%)	26,31	25,18	24,94	23,77	23,93	24,01
Desvio padrão estimado, s	0,7338			0,1228		

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Munido de todos os parâmetros apresentados, pôde-se determinar as frações volumétricas dos constituintes do compósito. Como descrito no capítulo anterior, será dividido em dois métodos: Método 1, baseado no Mendonça (2005) e Método 2, baseado no Tita (2003).

4.2.1 Método 1

Inicialmente, calculou-se as frações mássicas pela Equação 9, as quais foram utilizadas para determinar as frações volumétricas, através da Equação 10. Por sua vez, a fração volumétrica de vazios é estimada pela relação apresentada na Equação 11. Os valores obtidos encontram-se nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Frações mássicas pelo método 1

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fração de massa da fibra, M_f (%)	73,69	74,82	75,06	76,23	76,07	75,99
Fração de massa da matriz, M_m (%)	26,31	25,18	24,94	23,77	23,93	24,01

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Por conseguinte, pôde-se aplicar a regra da mistura para o módulo de elasticidade longitudinal (Equação 16), o módulo de elasticidade cisalhante (Equação 29) e o coeficiente de Poisson (Equação 22) – valores obtidos expostos na Tabela 13.

Tabela 12 – Frações volumétricas pelo método 1

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fração de volume da fibra, V_f (%)	35,42	35,65	33,89	39,00	38,52	38,45
Fração de volume da matriz, V_m (%)	25,40	24,09	22,61	24,41	24,33	24,39
Fração de volume de vazios, V_v (%)	39,18	40,26	43,50	36,59	37,15	37,17

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Tabela 13 – Propriedades do compósito pelo método 1

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Módulo de elasticidade longitudinal, E_1 (GPa)	26,60	26,70	25,37	29,13	28,78	28,73
Módulo de elasticidade cisalhante, G_{12} (GPa)	5,86	6,16	6,55	6,04	6,06	6,05
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0,17	0,17	0,16	0,18	0,17	0,17

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

4.2.2 Método 2

Neste método, não é necessário o procedimento de queima, pois a obtenção da fração de massa da fibra é determinada através da quantidade de massa da fibra a seco por unidade de área. Esse dado é fornecido pelo fabricante e apresenta o valor de 230 g/m². Assim, utilizou-se a Equação 12, onde t_c é obtido pela razão da espessura do compósito e da quantidade de camadas de fibras utilizadas, que no caso estudado foram 12. Os valores encontrados para t_c e M_f estão na tabela 14.

Tabela 14 – Espessura da camada e fração mássica da fibra pelo método 2

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Espessura da camada, t_c (m)	2,50E-04	2,51E-04	2,63E-04	2,28E-04	2,31E-04	2,32E-04
Fração de massa da fibra, M_f (%)	75,11	75,54	76,17	77,57	77,23	77,02

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Assim, calculou-se a fração volumétrica da fibra através da Equação 10 e a fração volumétrica da matriz através da Equação 13. Com essas frações, estimou-se a fração volumétrica de vazios a partir da relação demonstrada na Equação 11. Os valores obtidos para V_f , V_m e V_v estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Frações volumétricas pelo método 2

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fração de volume da fibra, V_f (%)	36,11	35,99	34,39	39,68	39,11	38,97
Fração de volume da matriz, V_m (%)	24,02	23,40	21,60	23,04	23,15	23,34
Fração de volume de vazios, V_v (%)	39,87	40,61	44,01	37,28	37,74	37,69

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Por conseguinte, como no método 1, pôde-se aplicar a regra da mistura para o módulo de elasticidade longitudinal (Equação 16), o módulo de elasticidade cisalhante (Equação 29) e o coeficiente de Poisson (Equação 22) – valores encontrados estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades do compósito pelo método 2

	Fibras a 0°/90°			Fibras a ±45°		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Módulo de elasticidade longitudinal, E_1 (GPa)	27,03	26,92	25,69	29,56	29,15	29,06
Módulo de elasticidade cisalhante, G_{12} (GPa)	6,17	6,32	6,83	6,36	6,34	6,29
Coeficiente de Poisson, ν_{12}	0,17	0,16	0,15	0,17	0,17	0,17

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

4.2.3 Comparação dos métodos

Para avaliação dos resultados obtidos em ambos os métodos, foi calculado a média aritmética de cada constante de engenharia estimada e o desvio médio. Para o cálculo desse utilizou-se a Equação 37, onde X é valor apresentado de cada amostra, \bar{X} é a média dos dados e n é o número de amostras. Os resultados do método 1 encontram-se na Tabela 17 e do método 2 na Tabela 18.

$$\text{Desvio médio} = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{n}. \quad (37)$$

Tabela 17 – Média aritmética e desvio médio das propriedades obtidas pelo método 1

	Fibras a 0°/90°		Fibras a ±45°	
	Média	Desvio médio	Média	Desvio médio
Módulo de elasticidade longitudinal, E_1	26,22 GPa	0,57	28,73 GPa	0,17
Módulo de elasticidade cisalhante, G_{12}	6,19 GPa	0,24	6,05 GPa	0,01
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0,16	0,01	0,17	0,0006

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Tabela 18 – Média aritmética e desvio médio das propriedades obtidas pelo método 2

	Fibras a 0°/90°		Fibras a ±45°	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Módulo de elasticidade longitudinal, E_1	26,55 GPa	0,57	29,06 GPa	0,20
Módulo de elasticidade cisalhante, G_{12}	6,44 GPa	0,26	6,29 GPa	0,03
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0,16	0,005	0,17	0,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

De forma geral, em ambos os métodos, os desvios médios apresentaram valores que indicam pouca dispersão dos resultados obtidos. Dessa maneira, pode-se dizer que houve a uniformidade das propriedades mecânicas do material e confirma-se essa vantagem que o processo de infusão à vácuo apresenta, conforme apresentado na Tabela 2.

Observa-se que as propriedades mecânicas apresentaram valores próximos, independentemente do método utilizado para determiná-las. Porém, quando avaliadas pela orientação das fibras, há uma diferença nos resultados. Essa diferença foi ocasionada pelo processo de fabricação, pois as amostras com orientação de fibra a 0°/90° foram obtidas a partir da placa em que houve maior quantidade de resina despejada no molde.

É normal pensar que para solucionar o problema, bastaria aumentar o tempo da bomba de vácuo ligada. Entretanto, isso não alteraria o resultado, pois a resina começa a alterar suas propriedades em torno de 50 minutos após realizada a mistura com o endurecedor. Dessa

maneira, o recomendado para obter materiais similares no aparato montado seria utilizar a mesma quantidade de resina em ambos os moldes, uma vez que o sistema não possui um reservatório para a matriz como nos processos de VA-RTM e SCRIMP.

Outro detalhe importante de ressaltar é alto valor apresentado para as frações volumétricas de vazios, em ambos os métodos, apresentou em média 39%. Esse alto valor não pode ser considerado um volume de vazio, uma vez que para um processo de infusão a vácuo, o esperado dessa fração é até 5%. Essa diferença é a presença de água, o que retoma o assunto na seção 4.1, onde a umidade presente nos materiais utilizados para fabricação enfraquece a interface reforço-matriz.

5 CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo geral avaliar a qualidade do processo de fabricação de um material compósito, através da sua caracterização de forma analítica e experimental. Pode-se completar que foi fabricado o material, a partir de um processo de infusão a vácuo, o qual foi submetido ao ensaio de tração e teste de queima para determinação de suas propriedades mecânicas. Dessa maneira, pontua-se as considerações finais desse trabalho:

- Fabricação de placas de material compósito através do processo de infusão a vácuo, de forma adaptada aos métodos existentes, apresentou resultados satisfatórios. Atendendo as expectativas do processo e pode-se complementar que o aparato do laboratório está apto para uso. Porém, é necessário ter cautela na quantidade de resina aplicada no molde e na umidade presente nela, já que é um material higroscópica.
- As propriedades mecânicas do material obtidas de forma analítica, através dos dois métodos utilizados, de maneira geral proporcionaram resultados coerentes ao material fabricado. Houve uniformização das propriedades, devido ao baixo desvio médio. Verificou-se diferença das propriedades entre as duas placas fabricadas, por motivo da quantidade de resina utilizada. As frações volumétricas de vazios apresentaram alto valor por causa da fraca adesão dos constituintes do compósito.
- Determinar as propriedades mecânicas do material de forma experimental através do ensaio de tração não houve sucesso. Os deslocamentos transversais e os dados das curvas não foram captados, o que impossibilitou a avaliação do módulo cisalhante e do coeficiente de Poisson. Com a ausência de *tabs*, o resultado ficou comprometido, já que as falhas foram identificadas próximas a região de fixação do equipamento. Apesar disso, o esforço aplicado na amostra comprovou a falta de aderência do reforço e da matriz, por motivo da delaminação de uma das amostras. Ainda, pode-se perceber a direção da falha de acordo com a orientação da fibra.
- Sem as propriedades mecânicas determinadas experimentalmente, não foi possível compará-las com as obtidas analiticamente a fim de validar a qualidade do método de fabricação utilizado. Porém, pôde-se identificar os aspectos que influenciaram estes problemas pontuados anteriormente, para assim evitar falhas nos futuros materiais fabricados no laboratório.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade e aprimorar esse estudo, sugere-se:

- Aperfeiçoar o método de fabricação e realizar a infusão à vácuo dentro de uma estufa, onde o ambiente é controlado e evita os problemas provenientes da umidade;
- Fabricar outros materiais para aplicar o estudo e determinar propriedades mecânicas. Utilizar combinações de reforços e matrizes, como por exemplo, fibra de carbono e resina epóxi, ou ainda, fibras de vidro com resina poliéster.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, Donald F; CARLSSON, Leif A; PIPES, R. Byron. **Experimental characterization of advanced composite materials**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- ALMEIDA, Sérgio, F. M; CÂNDIDO, Geraldo M. Processamento de laminados e compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 10, n.1, 2000. Disponível em: <<http://www.revistapolimeros.org.br/PDF/v10n1/v10n1a05.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. **D2584-11**: standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. West Conshohocken: ASTM, 2011.
- _____. **D3039/D3039M-17**: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- _____. **D3518/D3518M-13**: standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CARBON BY DESIGN. **Vacuum Infusion (VARTM)**. Disponível em: <<http://www.carbonbydesign.com/infusion.htm>>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering mechanics of composite materials**. 2.ed. New York: Oxford, 2006.
- GALLI, Cecilia A. **Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia de Materiais da Escola Politécnica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf>> Acesso em: 04 mai. 2018.
- GAMA, Daniel P. N. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- JONES, Robert M. **Mechanics of Composite Materials**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.

- LOPES, Inês A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos**. 2009. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58809/1/000136169.pdf>> Acesso em: 10 jun. 2018.
- MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. 1.ed. Barueri: Manole, 2005.
- SILVA, Fernando Daniel R. **Modelação dinâmica de um processo de infusão a vácuo**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://sigarra.up.pt/feup/en/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=840094> Acesso em: 12 jun. 2018.
- TITA, Volnei. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico**. 2003. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- _____. **Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.