

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LUIZ FELIPE KAMIENSKI

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE DE COMPÓSITO
SANDUÍCHE PRODUZIDO POR INFUSÃO A VÁCUO

Joinville

2020

LUIZ FELIPE KAMIENSKI

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE DE COMPÓSITO
SANDUÍCHE PRODUZIDO POR INFUSÃO A VÁCUO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões
Pinto

Coorientador: Me. Jorge Oscar Nasseh

Joinville

2020

LUIZ FELIPE KAMIENSKI

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE DE COMPÓSITO
SANDUÍCHE PRODUZIDO POR INFUSÃO A VÁCUO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 12 de agosto de 2020.

Prof. Luis Fernando Peres Calil, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, Dr. Eng.
Orientador/Presidente

Prof. Jorge Oscar Nasseh, Me. Eng.
Coorientador

Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr. Eng.
Membro

Prof. Claudimir Antônio Carminatti, Dr. Eng.
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família: aos meus pais Renato e Silvelene por todo o enorme apoio prestado durante esta fase de desenvolvimento e aprendizagem, pela paciência e compreensão em todas as horas. Ao meu irmão Marcos, que serviu como referência, e me aconselhou em diferentes oportunidades. A Milena, pelo companheirismo, sempre disposta a me ajudar para a conclusão deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina através de sua estrutura física e dos docentes que prezam pela agregação do conhecimento para a vida, e por proporcionar uma educação de qualidade e gratuita.

Ao meu orientador professor Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, por me incentivar nesta área de estudo, corrigir e gerar novas ideias para desenvolvimento deste trabalho, bem como me influenciar no entusiasmo na área náutica.

Ao meu coorientador Jorge Nasseh, pelo apoio com seu conhecimento prático e esclarecimento de assuntos específicos relacionados a esse estudo, sendo referência de competência profissional.

Ao professor Gabriel Benedet Dutra, estando sempre disponível e interessado em ajudar, cedendo alguns instrumentos que possibilitaram a execução dos testes experimentais através do Laboratório de Ensino de Ciência dos Materiais da UFSC Joinville (LEMAT).

Ao Laboratório de Construção Naval da UFSC Joinville (LabNaval), pela disposição do espaço físico para execução dos experimentos em bancada, assim como disponibilização de equipamentos.

Ao Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas da UFSC Joinville (LAC), pela disponibilidade do viscosímetro utilizado no estudo.

À Equipe Babitonga e todos os membros com quem tive o prazer conviver ao longo dos 4 anos de forte imersão no desenvolvimento técnico e pessoal.

RESUMO

O processo de infusão a vácuo é caracterizado pela boa qualidade na geração de grandes peças em compósito de plástico reforçado com fibras, sendo largamente utilizado na indústria náutica e de energia eólica. Entretanto, o processo de infusão de grandes peças não é simples, exigindo estudos para o preciso posicionamento de suas linhas de vácuo e de escoamento da matriz plástica. Atualmente programas de simulação de fluxo auxiliam o projetista a determinar e dimensionar os locais destas na peça. Não obstante, independente da ferramenta utilizada para modelação do processo, é necessário o conhecimento da permeabilidade do material compósito. Compreendendo a importância quanto a sua obtenção, esse estudo tem como objetivo determinar de maneira experimental a permeabilidade de um compósito de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) com núcleo de polietileno tereftalato (PET). O método utilizado para determinação da permeabilidade foi o do fluxo unidirecional. A viscosidade e o tempo de gel da resina foram caracterizados, assim como o laminado final através das frações mássicas e volumétricas dos materiais de composição. A partir de demarcações da frente de fluxo a cada um minuto de infusão foram calculadas as suas distâncias longitudinais. Nas linhas demarcadas verificou-se a presença do fenômeno *race tracking*; para diminuição de sua influência foram propostas novas linhas de frente de fluxo verticais. Após todas as propriedades determinadas antes, durante e após o processo, foi utilizada a lei de Darcy para o cálculo da permeabilidade. Os resultados se apresentaram dentro da grandeza esperada, com média de 673,48 darcy, e desvio padrão de 136,35 darcy, indicando ser um bom método para obtenção da permeabilidade longitudinal de compósitos com núcleo.

Palavras-chave: Permeabilidade. Infusão a vácuo. Compósito sanduíche. Método do fluxo unidirecional.

ABSTRACT

The vacuum infusion process is characterized by good quality in the generation of large pieces of fiber-reinforced plastic composite, which are used in the nautical and wind energy industry. However, the process of infusing large parts is not simple, requiring studies for the precise positioning of its vacuum lines and flow of the plastic matrix. Currently, flow simulation programs assist the designer in determining and dimensioning their locations on the part. However, regardless of the tool used for modeling the process, it is necessary to know the permeability of the composite material. Understanding the importance of obtaining it, this study aims to determine in an experimental way the permeability of a glass-fiber reinforced plastic (GFRP) composite with polyethylene terephthalate (PET) core. The method used to determine the permeability was the channel flow method. The viscosity and gel time of the resin were characterized, as well as the final laminate through the mass and volumetric fractions of the composition materials. Infusion measurements were made every minute from the demarcations of the flow front, their longitudinal distances were calculated. In the demarcated lines, was verified the presence of the race tracking phenomenon; in order to reduce its influence, new vertical flow front lines were proposed. After all the properties determined before, during and after the process, Darcy's law was used to calculate the permeability. The results were within the expected magnitude, with average of 673.48 darcy, and a standard deviation of 136.35 darcy, indicating that it is a good method for obtaining the longitudinal permeability of composites with a core.

Palavras-chave: Permeability. Vacuum infusion. Sandwich composite. Channel flow method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases do material compósito.....	16
Figura 2 - Tipos comerciais de fibra de vidro. a) Manta, b) <i>Roving</i> e c) Tecido.	20
Figura 3 - Tipos de tecido: woven roving e biaxial.....	21
Figura 4 - Estrutura sanduíche em flexão.....	22
Figura 5 - Materiais de núcleo. a) Espuma sintética, b) <i>Honeycomb</i> e c) Madeira.....	23
Figura 6 - Módulo de elasticidade e resistência à tração por laminação manual e VIP.	26
Figura 7 - Processos VIP, CCBM e LRTM.....	26
Figura 8 - Processo VARTM.....	27
Figura 9 - Processo SCRIMP.....	28
Figura 10 - Coluna de areia utilizada por Darcy.	29
Figura 11 - Velocidade de Darcy.....	30
Figura 12 - Padrão elíptico da permeabilidade efetiva no plano.	33
Figura 13 - Orientações comumente utilizadas para experimentos unidirecionais.	33
Figura 14 - Métodos para mensuração da permeabilidade.	34
Figura 15 - Método do fluxo unidirecional	35
Figura 16 - <i>Race-tracking</i> e manchas secas. a) Início do processo, b) Surgimento do <i>race tracking</i> ; c) Fluido chegando ao fim do molde e d) Formação de mancha seca.	36
Figura 17 - Método do fluxo radial.	36
Figura 18 - Desenvolvimento dos ensaios experimentais.	38
Figura 19 - Materiais consumíveis: a) Fita selante, b) Bolsa de vácuo, c) Mangueira cristal, d) <i>Peel ply</i> , e) Espiroduto, f) Tê e g) Registro.	39
Figura 20 - Reforços fibrados utilizados. a) Tecido de trama plana de 330g/m ² e b) Manta de 300g/m ²	40
Figura 21 - Núcleo de PET utilizado e dimensões das ranhuras.	41
Figura 22 - Composição do laminado sanduíche.....	42
Figura 23 - Viscosímetro copo Ford.....	43
Figura 24 - Teste de tempo de gel.	44
Figura 25 - Bancada montada para o ensaio, com materiais e equipamentos de medição.	46
Figura 26 - Bomba de vácuo e filtro utilizados.	47
Figura 27 - Avanço da frente de fluxo pelo tempo percorrido. a) 1 min, b) 8 min, c) 18 min e d) 22 min.....	49

Figura 28 - Composição em massa de cada ensaio.	52
Figura 29 - Composição em volume de cada ensaio.	53
Figura 30 - Fração volumétrica da fibra e resina.	54
Figura 31 - <i>Race tracking</i> nos ensaios. a) Ensaio 1 e b) Ensaio 3.	55
Figura 32 - Linhas verticais da frente de fluxo.	56
Figura 33 - Distância da frente de fluxo pelo tempo percorrido.	57
Figura 34 - Distância da frente de fluxo ao quadrado pelo tempo percorrido.	58
Figura 35 - Permeabilidade experimental obtida de cada ensaio.	60
Figura 36 - Datasheet AZ 14.0	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matrizes e reforços correspondentes.	17
Tabela 2 - Avaliação qualitativa dos materiais de reforço.	20
Tabela 3 - Avaliação qualitativa dos materiais de núcleo.	23
Tabela 4 - Plano de laminação.....	42
Tabela 5 - Características dos ensaios.	48
Tabela 6 - Viscosidade cinemática e dinâmica da resina.	50
Tabela 7 - Resultados do teste de tempo de gel.....	51
Tabela 8 - Massa dos materiais utilizados nos ensaios.....	51
Tabela 9 - Densidades dos materiais.	52
Tabela 10 - Volumes dos materiais.	53
Tabela 11 - Dados de massa e volume entre fibra e resina.....	54
Tabela 12 - Inclinação das regressões lineares.	59
Tabela 13 - Variáveis estabelecidas para o cálculo da permeabilidade.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_f - Densidade da fibra

ρ_m - Densidade da matriz

W_f - Fração de massa da fibra

f - Fibra

m - Matriz

V_f - Fração volumétrica de fibra

Q - Vazão volumétrica

A - Área seccional do fluxo

K - Permeabilidade

ΔP - Diferença de pressão

μ - Viscosidade dinâmica

ΔL - Diferença de comprimento

\vec{u} - Vetor velocidade de Darcy

\bar{K} - Tensor permeabilidade

∇P - Gradiente de pressão

u - Velocidade de Darcy

v_f - Velocidade do fluido

ϕ - Porosidade

K_1 - Permeabilidade na direção principal 1 (no plano)

K_2 - Permeabilidade na direção principal 2 (no plano)

K_3 - Permeabilidade na direção principal 3 (transversal)

K_{eff} - Permeabilidade efetiva

β - Ângulo entre urdume e direção de fluxo

L - Comprimento

t - Tempo decorrido da frente de fluxo

R - Raio da frente de escoamento

R_0 - Raio da entrada de resina

r_f - Raio da fibra

k - Constante de Kozeny

K_{square} - Permeabilidade do empacotamento quadrático

K_{hexa} - Permeabilidade do empacotamento hexagonal

K_L - Permeabilidade longitudinal

K_T - Permeabilidade transversal

ν_5 - Viscosidade cinemática com orifício nº5

t_5 - Tempo de escoamento utilizado orifício nº5

ν - Viscosidade cinemática

L_v - Distância longitudinal da linha da frente de fluxo vertical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	16
2.1.1 Matrizes plásticas	17
2.1.2 Reforços	19
2.1.3 Núcleos.....	21
2.2 O PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO	23
2.2.1 Método VARTM.....	27
2.2.2 Método SCRIMP	27
2.3 DINÂMICA DE FLUIDO EM MEIO POROSO.....	28
2.3.1 Lei de Darcy	28
2.4 PERMEABILIDADE E SUA OBTENÇÃO	31
2.4.1 Métodos da direção do fluxo.....	34
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 MATERIAS.....	39
3.1.1 Materiais consumíveis	39
3.1.2 Materiais compósitos	40
3.2 PLANO DE LAMINAÇÃO	41
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA.....	42
3.4 PREPARAÇÃO E EQUIPAMENTOS	44
3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA.....	50
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LAMINADO	51
4.2.1 Composição em massa.....	51
4.2.2 Fração volumétrica de fibra	52
4.3 LINHAS DE FRENTE DE FLUXO	54
4.3.1 Race tracking	54

4.3.2 Distância longitudinal da frente de fluxo	55
4.4 CÁLCULO DA PERMEABILIDADE	58
5 CONCLUSÃO.....	61
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS.....	64
ANEXO A - INFORMAÇÕES DA RESINA AZ 14.0.....	67

1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de bens com materiais compósitos fibrados, a determinação do processo fabril tem forte impacto nas características finais do produto. Os fatores que definem a sua escolha irão depender da qualidade requerida pelo cliente, do nível tecnológico e recursos da empresa e do conhecimento do método produtivo.

Um processo de fabricação crescentemente usado nos últimos anos para fabricação de grandes peças em compósito reforçado com fibra, conferindo alto grau de qualidade, em cascos de embarcações e pás eólicas, é a laminação por infusão a vácuo. Similar ao *Resin Transfer Molding* (RTM), que é um sistema que aloca o material de reforço em moldes metálicos fechados, normalmente bipartidos, onde a resina (matriz) é injetada para dentro da cavidade. A infusão se diferencia do RTM pela utilização de um filme polimérico como molde superior, não necessitando de moldes metálicos. Outra diferença é a forma como é feita a distribuição da resina no interior da peça, em vez da injeção com pressão do fluido, o sistema é ligado a uma bomba de vácuo, que por diferença de pressão faz o fluido percolar o material poroso.

Uma das principais vantagens da infusão a vácuo é possibilitar à peça final um teor de resina menor que os processos convencionais fabricados manualmente, o que aumenta consequentemente a proporção de fibras no compósito, acarretando menor peso no laminado e resistência mecânica superior.

É necessário modelar com precisão o fluxo de resina através de uma peça, e para isso o projetista deve obter alguns parâmetros dos materiais que o compõem. Ferland, Guittard e Trochu (1996), destacam que o mais crítico é a permeabilidade, que é a capacidade de permitir o fluxo do fluido através dos seus poros.

A utilização de programas com simulação de fluxo de fluido em meios porosos tem sido empregada em projetos de linhas de infusão. Seu uso é de suma importância na determinação da posição e dimensionamento das linhas de resina e das linhas de vácuo, para que assim a peça esteja totalmente impregnada no menor tempo possível. Entretanto, a montagem dessa linha depende da definição dos parâmetros de permeabilidade dos materiais envolvidos para determinar com precisão o fluxo de resina através da peça.

A atuação da permeabilidade está diretamente ligada a velocidade e distribuição do escoamento. Sem esta mensuração, independente da ferramenta utilizada para previsão do processo, analítica ou numérica, os cálculos fundamentados na lei de Darcy se tornam inviáveis, sendo essa a base da grande maioria dos modelos de escoamento de fluidos em meios porosos.

A utilização de um valor inseguro pode acarretar a perda da peça, Nasseh (2007) expõe que mesmo o construtor com boa experiência, poderá cometer erros neste processo, e o custo para refazer o bem é muito alto. A forma mais confiável de se obter a permeabilidade é fazendo testes experimentais com as mesmas características do projeto original. A ideia é reproduzir o processo de maneira controlada e reduzida, e com alguns parâmetros conhecidos determinar a permeabilidade.

Compreendendo a importância para a manufatura de compósitos infundidos, seu valor agregado e seu desafio quanto a determinação confiável da permeabilidade, a proposta deste trabalho é obter a permeabilidade de um laminado de fibra de vidro e resina poliéster com núcleo de polietileno tereftalato (PET), pelo processo de infusão a vácuo, de maneira experimental. A caracterização dos materiais envolvidos e os parâmetros do experimento serão apresentados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Obter a permeabilidade longitudinal, pelo método do fluxo unidirecional de um compósito de resina poliéster reforçado com fibra de vidro tipo E contendo núcleo de PET, utilizando o processo de infusão a vácuo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir plano de laminação com reforço fibrado, matriz polimérica e núcleo para ensaios experimentais;
- Caracterizar a viscosidade e a relação iniciador e tempo de gel da resina;
- Executar processos de laminação por infusão a vácuo em bancada, demarcando as linhas de frente de fluxo;
- Determinar as frações mássicas e volumétricas dos ensaios;
- Calcular a permeabilidade longitudinal com os parâmetros obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

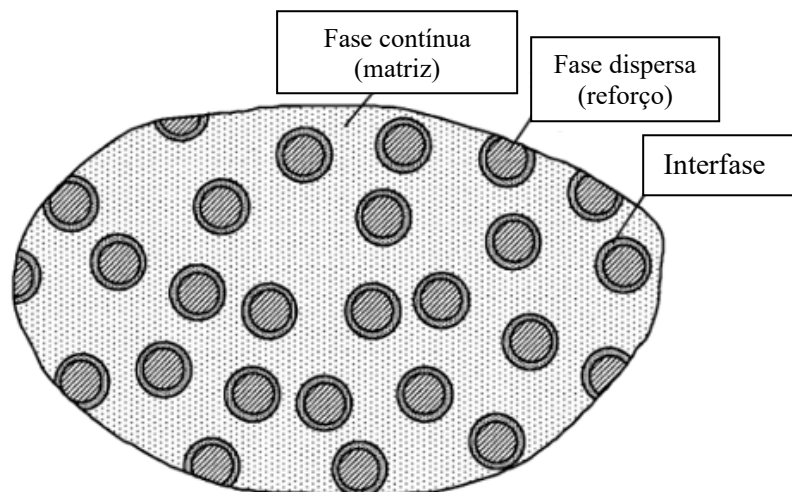
Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica utilizada nesse trabalho, sendo dividida em materiais compósitos, processo de infusão a vácuo, dinâmica do fluido em meio poroso e permeabilidade e sua obtenção.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósito é um material que consiste em duas ou mais fases em uma escala macroscópica, cujo desempenho e propriedades mecânicas são projetadas para serem superiores aos dos materiais constituintes que agem independentemente (DANIEL; ISHAI, 2006).

Daniel e Ishai (2006) explicam que uma das fases é dispersa, tem propriedades mecânicas superiores e é chamada de reforço, a outra fase é contínua e menos solicitada mecanicamente, porém com a função de transferir a carga aplicada e proteger o reforço, sendo chamada de matriz, Figura 1. Às vezes, devido a interações químicas ou outros efeitos de processamento, existe uma fase distinta adicional chamada interfase entre o reforço e a matriz.

Figura 1 - Fases do material compósito.



Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (2006, p.1).

As combinações tipicamente utilizadas entre matrizes e reforços estão mencionadas na Tabela 1. Conforme o foco desse estudo, será discutido adiante os compósitos fabricados por matrizes orgânicas (polímeros) com reforços cerâmicos ou orgânicos (fibras).

Tabela 1 - Matrizes e reforços correspondentes.

Matriz		Reforço	
Orgânica (PMC's - <i>Polymer Matrix Composites</i>)	Polímeros Termoplásticos Polímeros Termorrígidos	Cerâmico	<ul style="list-style-type: none"> • Fibra de vidro • Fibra de carbono
		Orgânico	<ul style="list-style-type: none"> • Aramida • Poliamida
		Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • Boro • Alumínio
Metálica (MMC's - <i>Metal Matrix Composites</i>)	Ligas leves de alumínio, magnésio e titânio	Cerâmico	<ul style="list-style-type: none"> • Fibra de carbono • Carboneto de silício
		Metálico	<ul style="list-style-type: none"> • Boro
		Misto	<ul style="list-style-type: none"> • Boro revestido com carboneto de silício
Cerâmica (CMC's - <i>Ceramic Matrix Composites</i>)		Cerâmico	<ul style="list-style-type: none"> • Carboneto de silício
		Metálica	<ul style="list-style-type: none"> • Boro ou tungstênio

Fonte: Silva (2016, p. 4)

Quando sua configuração se dá por uma matriz plástica e um reforço fibrado, segundo Mazumdar (2002), é chamado de material compósito reforçado com fibra, também conhecido por plástico reforçado com fibras – PRF, sendo a fibra de vidro o reforço mais comumente utilizado, neste caso tendo-se o acrônimo PRFV. A fibra é o reforço que confere resistência e rigidez enquanto a matriz é responsável pela distribuição de cargas e pela resistência do material ao ambiente. Dentre as vantagens atribuídas aos compósitos reforçados com fibra estão a redução de peso, a resistência a fadiga e a boa resistência a corrosão.

2.1.1 Matrizes plásticas

As matrizes plásticas têm desempenho fundamental na distribuição das tensões no carregamento imposto ao material e à proteção das fibras do ambiente externo.

Para Mazumdar (2002), a seleção da matriz é realizada com base nas exigências químicas, térmicas, elétricas, de flamabilidade, ambientais, custo, desempenho e fabricação do compósito. A matriz determina a temperatura máxima de serviço de um compósito, bem como os parâmetros de processamento para a fabricação de peças.

A tolerância ao dano do material compósito também é largamente determinada pela matriz. Isto se deve tanto ao seu papel de proteger as fibras, quanto porque os vazios estão sempre localizados na matriz. Vazios atuam como concentrações de estresse e locais de

iniciação de rachaduras, reduzindo assim a energia necessária para a falha (GDOUTOS; PILAKOUTAS; RODOPOULOS, 2000).

As matrizes podem ser classificadas em dois tipos: termoplásticas e termorrígidas. As matrizes termoplásticas conseguem fluir e fundir com facilidade quando submetidas a efeitos de pressão e temperatura. Entre suas vantagens estão a possibilidade de reciclagem e ser menos agressiva a saúde do laminador durante o processo de laminação. Porém, seu uso fica complexo quando as dimensões da peça a ser manufaturada são de grande escala, impossibilitando muitas atuações. Nesse estudo, pelo fato de não serem utilizadas de maneira significativa no processo de infusão à vácuo, as matrizes termoplásticas não serão abordadas.

Quanto as matrizes termorrígidas ou termofixas, segundo Nasseh (2007), tratam-se de polímeros sintéticos formados por cadeias longas, resultantes da união de muitos segmentos idênticos (monômeros), que uma vez curadas não podem ser refundidas. Termorrígidos são resinas que tem como característica serem quebradiças, porém oferecem maior estabilidade térmica e dimensional, maior rigidez e resistência a solventes. Mazumdar (2002), expõe que durante a cura são formadas cadeias moleculares tridimensionais chamadas de ligações cruzadas. Devido às ligações cruzadas, as moléculas são rígidas e não podem ser refundidas ou remodeladas. Quanto maior o número de ligações cruzadas, mais rígido e termicamente estável será o material.

Os três tipos de resinas mais comuns são a poliéster, éster vinílica e epóxi. Todas se apresentam em forma líquida em temperatura ambiente, e após certo tempo de cura, se tornam sólidas. Isso ocorre pela ação de agentes de cura, que dependendo do tipo da resina, podem ser catalisadores, iniciadores ou endurecedores adicionados à resina no momento do uso (MAZUMDAR, 2002).

As resinas de poliéster são os sistemas de resina mais utilizados na indústria náutica, devido principalmente ao seu baixo preço e facilidade de produção. No mercado, segundo Nasseh (2007), podem ser encontradas do tipo ortoftálica, isoftálica, e tereftálica, além de suas modificações nos padrões isoftálica com NPG (neo pentil glicol), ortoftálica tereftálica, que usa PET reciclado, e ortoftálica CCPD (diciclopentadieno).

Resina de poliéster é, de maneira simplificada, um poliéster produzido em reator, formado por reação de um álcool e um ácido, que depois é dissolvido em monômero de estireno. Em seu sistema de cura é utilizado um iniciador do tipo peróxido, geralmente sendo o peróxido de metil cetona, ou MEKP. O iniciador reage tanto com o monômero como com o poliéster, formando radicais livres, que acabam fazendo as ligações cruzadas. Após certo tempo que a reação foi iniciada, a resina líquida começa a ficar mais viscosa até entrar em estado de gel. O

tempo que é decorrido até esse processo ocorrer é chamado de tempo de gel, ou *gel time*. O *gel time* representa o tempo útil de trabalho com a resina (NASSEH, 2007).

2.1.2 Reforços

A principal função dos reforços é introduzir propriedades mecânicas desejadas para o material compósito. O reforço assegura praticamente toda a resistência a rigidez global do material. A combinação de uma matriz de baixo peso específico com um reforço de alta resistência pode levar à obtenção de um material compósito com um excelente desempenho e elevada aplicabilidade.

A distribuição do reforço determina a homogeneidade ou uniformidade do sistema material. Quanto mais uniforme é a distribuição dos reforços, mais homogêneo é o material e menor a probabilidade de falha nas áreas mais fracas. A geometria e a orientação do reforço afetam a anisotropia do sistema (DANIEL; ISHAI, 2006).

Atualmente, as fibras representam o principal material de reforço utilizado em materiais compósitos. As razões que levam à sua vasta aplicação devem-se principalmente ao seu tamanho. As mesmas são caracterizadas geometricamente pela sua excelente razão comprimento/diâmetro e pelo seu reduzido diâmetro. O efeito microestrutural contribui para o seu uso, uma vez que certos materiais ao serem processados em fibras sofrem uma alteração da sua estrutura cristalina ou molecular, no sentido longitudinal, aumentando a resistência mecânica (LOPES, 2009).

Uma grande variedade de fibras está disponível como reforço para compósitos. As fibras mais usadas na indústria são as de carbono, vidro e aramida. A Tabela 2 fornece uma classificação qualitativa em relação aos materiais de reforço.

Tabela 2 - Avaliação qualitativa dos materiais de reforço.

Características	Aramida	Carbono	Vidro
Resistência à tração	○	●	○
Módulo de tração	○	●	
Resistência à compressão		●	○
Módulo de compressão	○	●	
Resistência a flexão		●	○
Módulo de flexão	○	●	
Resistência à fadiga	○	●	
Resistência ao impacto	●		○
Resistência ao fogo	●		●
Densidade	●	○	
Trabalhabilidade		○	●
Custo			●

- Excelente
- Aceitável
- Baixa

Fonte: Adaptado de Nasseh (2007, p.18).

Existem diversos tipos de reforços fibrados no mercado, sendo os mais conhecidos o *roving*, a manta e o tecido, Figura 2. O *roving* é largamente utilizado para fabricações pelo método *spray-up* (laminação por dispersão) e *filament winding* (enrolamento filamental). A manta é um reforço com fibras descontínuas depositadas aleatoriamente que tem seu uso característico para união entre tecidos, fins estéticos e na construção de laminados que não necessitem de alta eficiência na relação entre peso e resistência mecânica (NASSEH, 2008).

Figura 2 - Tipos comerciais de fibra de vidro. a) Manta, b) *Roving* e c) Tecido.



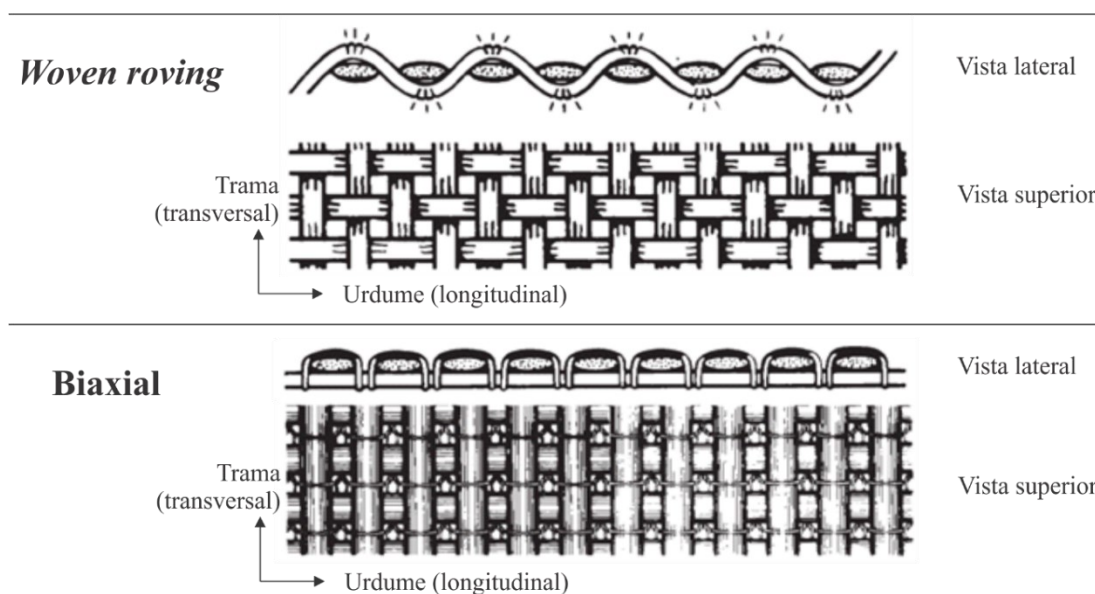
Fonte: Cpic Fiberglass (2019).

Os tecidos são a melhor opção para projetos estruturais. Os mesmos permitem direcionar e dimensionar as propriedades mecânicas necessárias para o compósito. Possuem grande

diversificação na construção, variando principalmente a gramatura, o tipo de trama e a orientação. A orientação de uma camada de tecido tem relação com as orientações principais da peça, as fibras que estão no sentido longitudinal são chamadas de urdume, enquanto as transversais a direção principal são chamadas de trama (DANIEL; ISHAI, 2006).

A Figura 3 ilustra as orientações e como são tramados dois tipos de tecido comumente utilizados na laminação: o *woven roving* e o biaxial.

Figura 3 - Tipos de tecido: woven roving e biaxial.



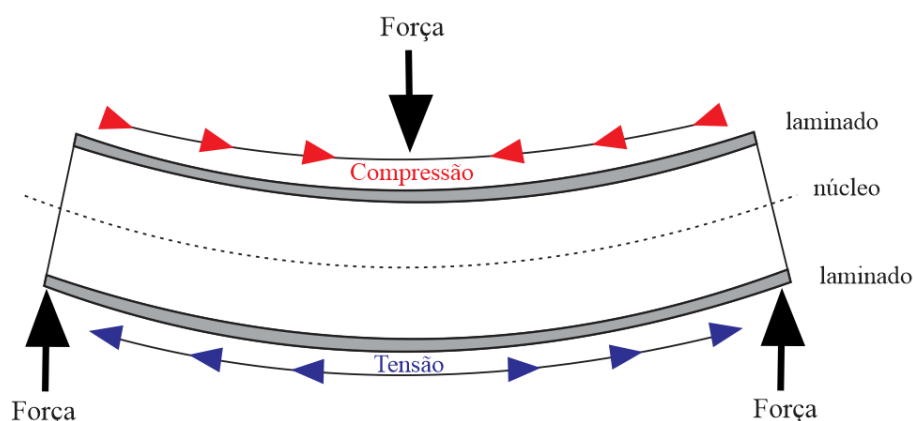
Fonte: Adaptado de Greene (1999, p. 68).

2.1.3 Núcleos

Estruturas que utilizam núcleo, são chamadas *sandwich* ou sanduíche. Elas aparecem em diferentes segmentos na construção de compósitos, principalmente de alta performance. Nasseh (2007), explica que o laminado *sandwich* consiste em duas faces de um laminado de alta resistência e núcleo de baixa densidade.

Para Kaw (2006), as principais motivações para a utilização de núcleo podem ser divididas em duas. Primeira: se o laminado sofrer uma flexão, as tensões máximas ocorrerão nas superfícies superior e inferior. Portanto, faz sentido usar materiais de alta resistência apenas na parte superior e inferior e materiais de baixa e leve resistência no meio, Figura 4. Segunda: a resistência à flexão de uma viga / placa de seção transversal retangular é proporcional ao cubo da espessura. Assim, aumentar a espessura adicionando um núcleo no meio aumenta essa resistência.

Figura 4 - Estrutura sanduíche em flexão.



Fonte: Autor (2020).

Kaw (2006) observa que as forças de cisalhamento são máximas no meio do painel sanduíche, exigindo, assim, que o núcleo suporte o cisalhamento solicitado. Al-Qureshi (2010, p.432), destaca que “O módulo de cisalhamento do núcleo é a mais importante propriedade, uma vez que o princípio básico do material do núcleo no painel tipo sanduíche é providenciar uma resistência às forças de cisalhamento longitudinal entre as superfícies do painel”.

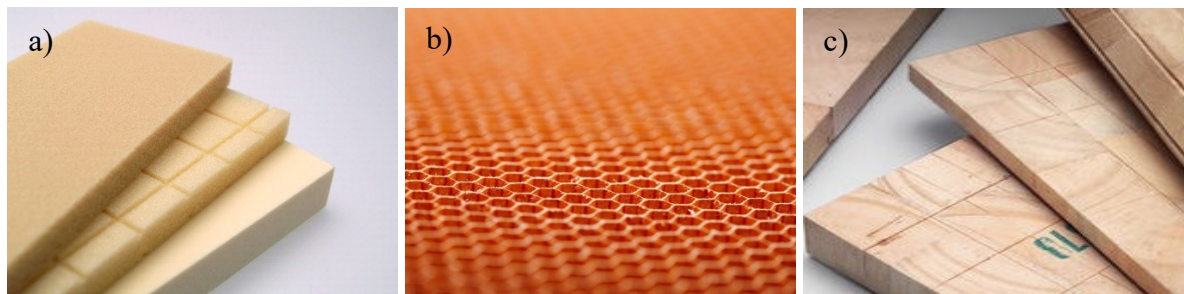
Cada material de núcleo possui vantagens e desvantagens que dependem da sua aplicação. Garay (2016) comenta que no mercado existem grande quantidade de núcleos, sendo os principais constituídos de madeira, espumas sintéticas e do tipo *honeycomb*. A Figura 5 ilustra alguns materiais utilizados como núcleo. Os núcleos de madeira mais usuais são os de compensado naval e de madeira do tipo balsa, corriqueiros na indústria naval. O *honeycomb* tem forte uso na indústria aeronáutica e aeroespacial, podendo ser constituído de diferentes materiais como papel impregnado com resina, fibra de vidro, fibra de carbono, fibra de aramida, polipropileno ou alumínio. (NASSEH, 2007).

As espumas sintéticas mais utilizadas são as de PVC (policloreto de vinila) e PET. As espumas de PVC podem ser encontradas nos tipos flexíveis (lineares) e ou semirrígidas (*cross linked*). Segundo Garay (2016) com as formulações mais recentes, as espumas de PVC oferecem grandes vantagens para a construção de compósitos de alto desempenho, e com isso são um dos tipos de núcleo mais utilizados.

As espumas de PET apresentam um custo mais baixo que as de PVC. São produzidas a temperatura ambiente, ou termoformadas quando se tratar de peças mais complexas. Possuem boa resistência a bases, ácidos fracos e solventes de álcool, acetona ou percloroetileno. Aceitam altas temperaturas de trabalho, têm como características possuir boa resistência ao impacto e fadiga, devido a um elevado alongamento e boa adesão (GARAY, 2016). Sua relação de

absorção de água é parecida com às espumas de PVC, enquanto a absorção de resina é levemente superior que essa mesma espuma (GARAY, 2016; NASSEH, 2007).

Figura 5 - Materiais de núcleo. a) Espuma sintética, b) *Honeycomb* e c) Madeira.



Fonte: Diprofiber (2020).

Os painéis sanduíche são avaliados normalmente com base na resistência, densidade, durabilidade, resistência à corrosão, resistência a impacto, resistência às intempéries e custo (KAW, 2006). Algumas características de materiais de núcleo são comparadas por meio de avaliação qualitativa apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Avaliação qualitativa dos materiais de núcleo.

Características	Balsa	PVC semirrígido	PVC flexível	<i>Honeycomb</i>	PET
Resistência à tração	●	●	●	○	●
Módulo de tração	●	○	○	●	○
Resistência à compressão	●	○	●	●	○
Módulo de compressão	●	○	○	●	○
Resistência à fadiga	●	○	●	○	●
Resistência ao impacto	○	●	●	○	●
Resistência à água	○	●	●	○	●
Resistência ao fogo	●	○	○	●	○
Trabalhabilidade	●	○	○	○	○
Custo	●	○	○	○	●

- Boa performance
- Performance regular

Fonte: Adaptado de Greene (1999, p. 83) e Garay (2016, p.30).

2.2 O PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO

Os processos de fabricação de compósitos de plástico reforçado com fibras – PRF possuem alta variedade, sendo possível classificá-los em dois grupos principais: processos com

molde aberto e processos com molde fechado. Nas manufaturas com molde aberto os materiais são expostos ao ambiente atmosférico durante o processo de fabricação da peça, enquanto no processo de moldagem fechado, os materiais compósitos não são expostos ao ambiente atmosférico durante o processamento. Nestes casos, as peças são fabricadas usando-se moldes dos dois lados do laminado, ou dentro de um molde selado a vácuo (ACMA, 2009).

Os processos mais conhecidos atualmente de molde aberto e molde fechado são:

Molde aberto:

- Laminação manual (*hand lay-up*);
- Laminação por aspersão (*spray-up*);
- Enrolamento filamental (*filament winding*);

Molde fechado:

- Laminação a vácuo (*vacuum bag*);
- RTM;
- Infusão a vácuo; e
- Compressão a quente (SMC).

A infusão a vácuo, também chamada de VIP (*Vacuum Infusion Process*), é um sistema de fabricação com molde fechado. O processo não é novo, muitas variações foram feitas em menor escala durante os anos. Algumas conseguiram sucesso e foram patenteadas, outras sofreram pequenas modificações e foram renomeados. Por consequência, a quantidade de nomes e acrônimos pode gerar certa confusão (ACMA, 2009; NASSEH, 2007).

A primeira patente do processo de infusão a vácuo é conhecida como Método Marco, foi utilizado na produção de barcos da Guarda Costeira Americana na década de 1940. As embarcações ficaram em operação até o final da década de 1970. Em seguida, em 1959, George Smith conseguiu outra patente para a fabricação de grandes tanques. Sua grande engenhosidade foi a utilização de linhas principais e secundárias, que como artérias podiam transportar a resina com melhor homogeneidade. Em 1964, dois engenheiros usaram canais do núcleo para aumentar a porosidade, permeando a resina com maior facilidade no material sanduíche (NASSEH, 2007).

Na década de 1990, a empresa Seemann Composites patenteou o método SCRIMP (*Seemann Composites Resin Infusion Molding Process*), que foi comercializado intensivamente. Segundo ACMA (2009), foi o método conhecido por dar abertura e desenvolvimento nos processos de infusão a vácuo, motivando pesquisas e desenvolvimento de materiais (alguns para contornar a patente). Como resultado, mais de 20 novas denominações foram criadas após este curto espaço de tempo.

A principal vantagem da utilização da laminação por infusão a vácuo está no aumento da resistência do laminado quando comparado com métodos de molde aberto. Isso acontece, devido a proporção de fibra e resina no laminado. Al-Qureshi (2010) descreve que a rigidez e a resistência desejadas podem ser obtidas simplesmente variando a percentagem de seus materiais constituintes, e que a fração em volume é o parâmetro mais comumente considerado na análise teórica.

A Equação 1 relaciona as densidades, ρ_f e ρ_m , e a fração em massa W_f , sendo f fibra e m matriz, resultando na fração em volume de fibra, V_f .

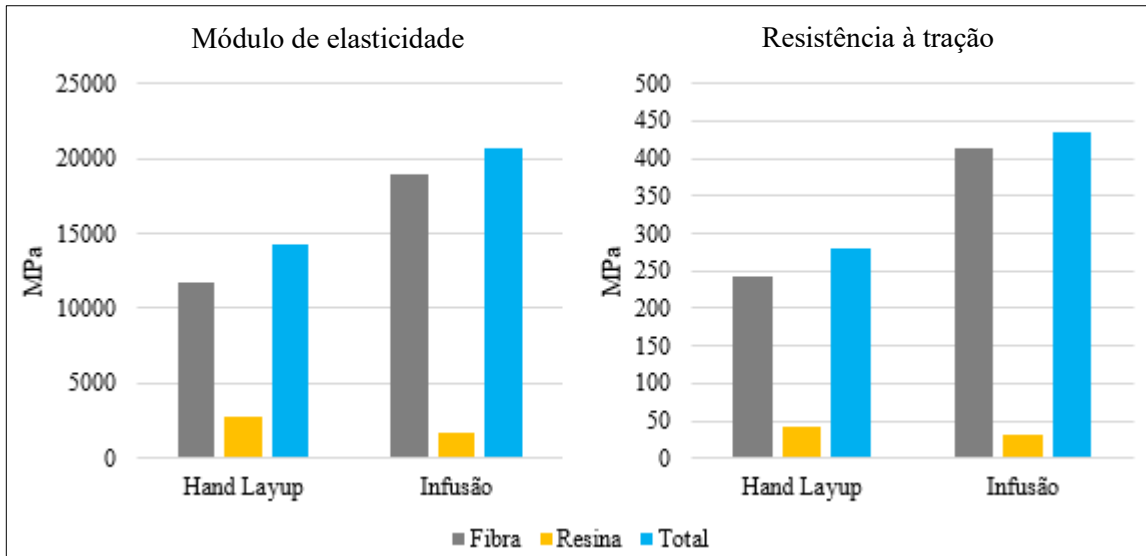
$$V_f = \frac{\frac{W_f}{\rho_f}}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{(1 - W_f)}{\rho_m}} \quad (1)$$

Além do reforço e da matriz, existem volumes não preenchidos dentro do laminado, chamados de vazios. Al-Qureshi (2010, p.112) explica que “Estruturas com grande quantidade de vazios apresentam baixa resistência a fadiga, pequena resistência a tração e decréscimo na sua confiabilidade. Na indústria, a quantidade de vazios é usada como uma medida da qualidade do compósito produzido [...]”. A utilização da infusão a vácuo traz reduções significativas de vazios no laminado, Al-Qureshi (2010) revela que compósitos com mais 5% são considerados de baixa qualidade, enquanto os com menos de 1% são de boa qualidade. Apesar de sua importância, a análise dos vazios não é levada em consideração nos cálculos de micromecânica.

Silva (2016) comenta que um dos fatores de utilização do processo de infusão a vácuo é a redução de problemas relacionados a implicações ambientais e de saúde, quando comparado com técnicas de laminação com moldes abertos. Isso ocorre principalmente devido ao baixo contato com a liberação do estireno, substância nociva quando inalada. A diminuição de perdas também é um fator considerável, já que a resina pode ser mensurada com maior precisão e o prejuízo da utilização de rolos e trinchas não existe.

Nasseh (2007) considerou, para fins comparativos, a fabricação de dois laminados de fibra de vidro com propriedades características. O primeiro fabricado pelo processo de laminação manual com fração volumétrica de 30% de fibra e o segundo fabricado por infusão a vácuo com fração volumétrica de fibra de 50%.

Figura 6 - Módulo de elasticidade e resistência à tração por laminação manual e VIP.

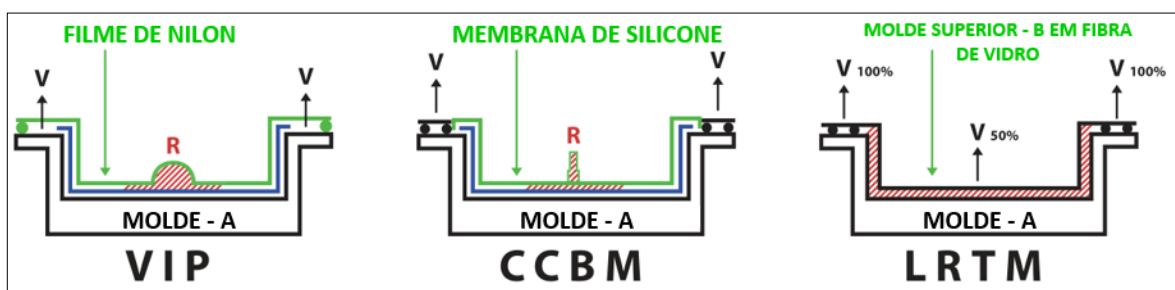


Fonte: Adaptado de Nasseh (2007, p. 246-247).

A Figura 6 apresenta o resultado de suas composições, comparando os módulos de elasticidade e resistência à tração alcançados. É possível verificar que as frações individuais geram grande impacto nas propriedades mecânicas totais, e por consequência, demonstram a superioridade da infusão nesse quesito

Silva (2016) descreve que a infusão a vácuo é uma evolução do processo RTM, e desde que se revelou como uma alternativa econômica, vem sofrendo várias transformações. Silva (2016) relata também que a primeira variante do RTM foi o RTM-*Light*, ou LRTM, e somente depois começaram a surgir as infusões com moldes superiores flexíveis, como o VIP e CCBM (*Closed Cavity Bag Molding*), Figura 7.

Figura 7 - Processos VIP, CCBM e LRTM.

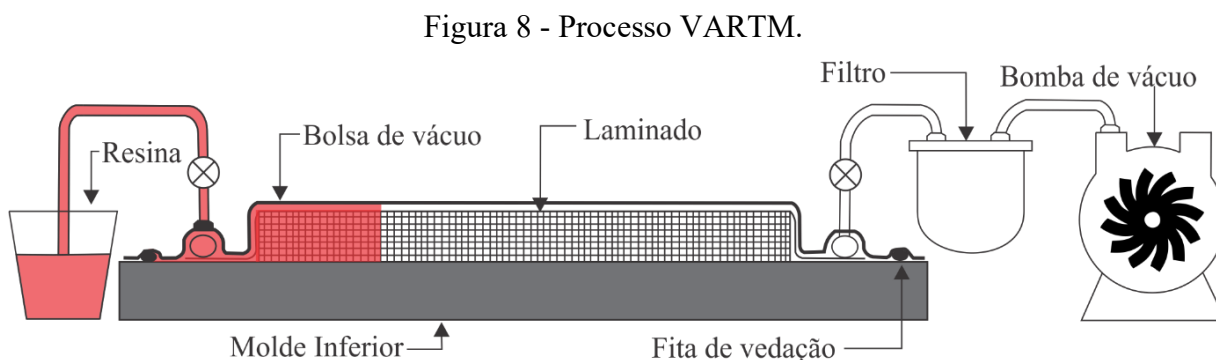


Fonte: ACMA (2009, p.52).

As principais variantes da manufatura por infusão a vácuo são o VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) e o SCRIMP, existindo ainda muitas outras ramificações que não serão apresentadas nesse estudo.

2.2.1 Método VARTM

O método VARTM é um processo que utiliza vácuo, de molde fechado, em que todo ar é removido por uma bomba de vácuo dos materiais de reforço, estando-os pré-cortados, “secos” e acomodados por uma bolsa de vácuo. Em seguida esse material, em consequência do ar retirado, é compactado pela pressão atmosférica, e com uma abertura, utilizando da diferença de pressão existente dentro da bolsa de vácuo, a resina é introduzida, penetrando em todo o volume vazio empacotado. A esquemática é apresentada na Figura 8.

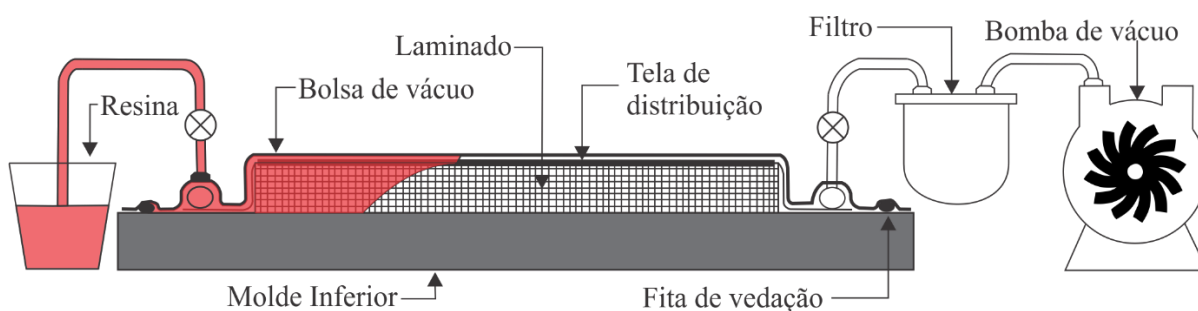


Fonte: Autor (2020).

2.2.2 Método SCRIMP

O método SCRIMP é muito parecido com método VARTM, com a diferença de utilizar uma tela ou camada de distribuição sobre o laminado para aumentar a porosidade e permeabilidade do sistema durante a infusão. Essa tela, após a laminação é descartada. A esquemática é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Processo SCRIMP.



Fonte: Autor (2020).

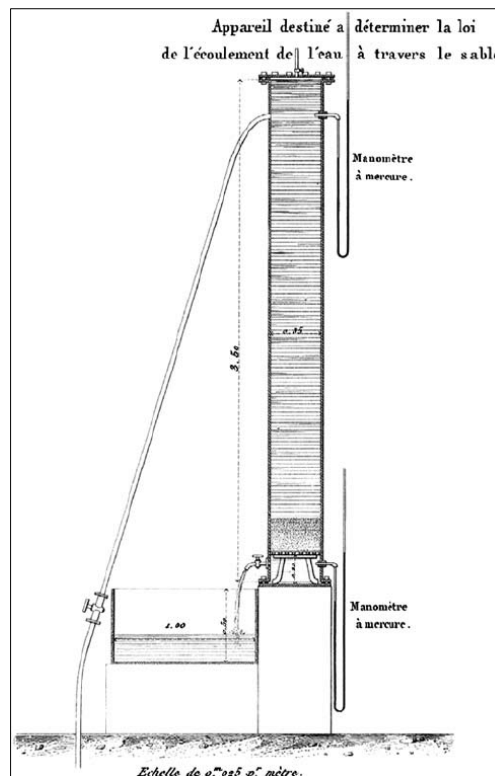
2.3 DINÂMICA DE FLUIDO EM MEIO POROSO

A dinâmica de fluido em meio poroso é descrita por um modelo de escoamento desenvolvido de forma a descrever o comportamento mais próximo da realidade. Para o nosso caso, o meio fibroso é considerado como homogêneo e anisotrópico. A resina é considerada incompressível, ou seja, um fluido newtoniano com massa volumétrica constante. Além disso, desprezam-se os efeitos da gravidade e, dependendo do caso, a variação da espessura pode ser, ou não, incluída (SILVA, 2016).

2.3.1 Lei de Darcy

O modelo de escoamento, em sua grande maioria, é baseado em estudos feitos pelo físico francês Henry Darcy. Em 1856, ele realizou experimentos para determinar a velocidade do fluxo de água através de uma coluna vertical de areia com gradiente de pressão conhecido, Figura 10 (DARCY, 1856).

Figura 10 - Coluna de areia utilizada por Darcy.



Fonte: Darcy (1856 apud Brown, 2002, p.9)

Darcy (1856), observando a dinâmica do experimento, elaborou uma fórmula empírica para líquidos viscosos em meios porosos, que passou a ser conhecida como lei de Darcy. Sua forma unidimensional é apresentada na Equação 2.

$$\frac{Q}{A} = -\frac{K \Delta P}{\mu \Delta L} \quad (2)$$

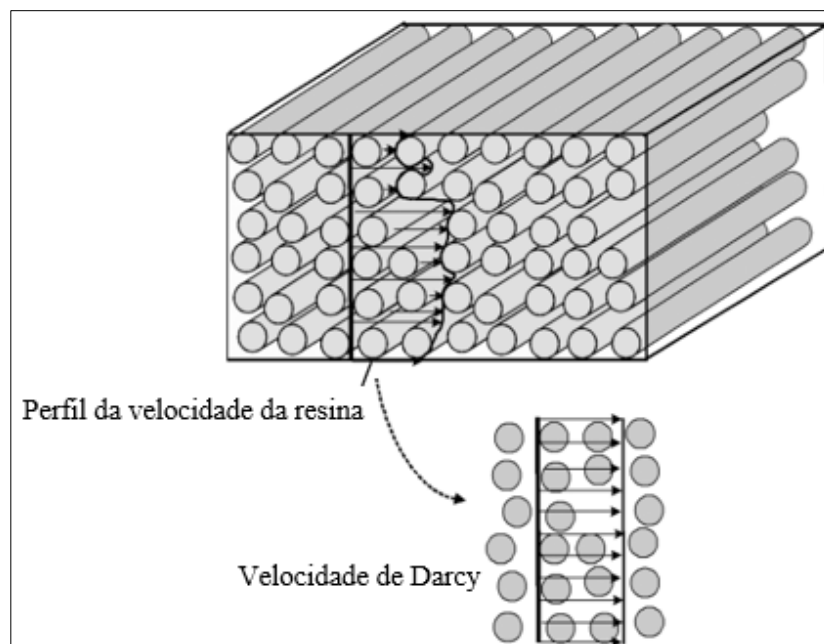
A lei afirma que a vazão Q dividida sobre a área transversal do fluxo A é proporcional ao gradiente de pressão ΔP aplicado em todo o comprimento ΔL e a constante de permeabilidade do meio K dividido pela viscosidade do fluido μ . É possível observar na Equação 2 que, para uma mesma geometria, mesma diferença de pressão e mesmas condições do fluido, a vazão é diretamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade.

O termo permeabilidade, segundo George (2011), foi definido pela primeira vez por Darcy, e considerado como o termo crítico para seu modelo. Uma notação mais generalizada, sendo o ponto de partida para modelos 2D e 3D, e não levando em consideração os efeitos da gravidade, é apresentada na Equação 3.

$$\vec{u} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \quad (3)$$

Onde \vec{u} é o vetor de velocidade média do volume ilustrado na Figura 11, chamado de velocidade de Darcy. A permeabilidade \bar{K} agora é apresentada como um tensor e ∇P sendo o gradiente de pressão. Repare que o sinal negativo desta expressão indica que a pressão diminui na direção do fluxo.

Figura 11 - Velocidade de Darcy.



Fonte: Adaptado de Advani; Sozer (2011, apud Sozer; Simacek e Advani 2012, p. 281).

A velocidade u não é mesma velocidade do fluido através dos poros. A velocidade do fluido (v_f) pode estar relacionada ao fluxo pela porosidade (ϕ), como demonstra a Equação 4. A porosidade somada a fração volumétrica da fibra representa o volume total do meio fibroso, Equação 5 (GEORGE, 2011).

$$v_f = \frac{u}{\phi} \quad (4)$$

$$1 = V_f + \phi \quad (5)$$

Para a lei de Darcy ser válida, o fluido deve ser newtoniano, laminar, quimicamente inerte e com número de Reynolds entre 0 e 10. O meio poroso deve ser rígido e estacionário, sendo homogêneo e isotrópico (SHARMA; SIGINER, 2010).

Sharma e Siginer (2010, p.13), destacam que “[...] nenhum fenômeno de transporte cruzado ou efeito acoplado no fluxo devido a uma força não conjugada é considerado[...]”, assim como o efeito Soret, que é o fluxo de massa causado por um gradiente de temperatura, bem como o efeito Dufour, causado por um gradiente de concentração.

Um assunto que é frequentemente levantando, segundo George (2011), é sobre o uso da lei de Darcy em fluxo insaturado na infusão a vácuo. A lei de Darcy destina-se a fluxos de estado estacionário e independentes do tempo através de um meio já saturado. George (2011, p.20), relata que “Embora o limite móvel da frente de fluxo complique a modelagem, uma suposição de estado quase estável (sucessão de fluxos permanentes) é invocada na região saturada (atrás da frente de fluxo) [...]”.

Portanto, o líquido segue a equação da continuidade para fluidos incompressíveis, Equação 6.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (6)$$

E combinando as Equações 3 e 6, obtemos a Equação 7, para resinas saturadas em meios porosos.

$$\nabla \cdot \left(\frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \right) = 0 \quad (7)$$

2.4 PERMEABILIDADE E SUA OBTENÇÃO

A permeabilidade do material pode ser definida como a habilidade ou capacidade de permitir o fluxo do fluido através dos seus poros. A dimensão específica da permeabilidade é o comprimento ao quadrado, muitas vezes sendo utilizado cm^2 ou m^2 , porém a unidade de medida mais utilizada é o darcy ($1 \text{ darcy} = 9,87 \cdot 10^{-13} \text{m}^2$).

A permeabilidade está diretamente ligada a outras propriedades do meio poroso, como a área de superfície interna, pressão de compactação e deformação, assim como propriedades da resina, como capilaridade e viscosidade (PATIÑO; VARGAS; VANEGAS, 2014; SCHEIDEGGER, 1974).

Para Scheidegger (1974, p.124), o conceito de permeabilidade “[...] permite uma descrição fenomenológica do fluxo através de meios porosos em um determinado domínio de velocidade”. E completa dizendo que, “[...] uma compreensão real dos fenômenos só pode ser obtida se o conceito de permeabilidade puder ser reduzido a princípios físicos mais fundamentais”.

Para Silva (2016), o maior desafio na utilização da lei de Darcy confere a obtenção da permeabilidade e sua necessidade de conhecimento prévio. Para resolver este problema, no caso mais simples, é necessário executar pelo menos um ensaio experimental e, com os valores resultantes, substituir na lei de Darcy e resolver em ordem ao coeficiente de permeabilidade.

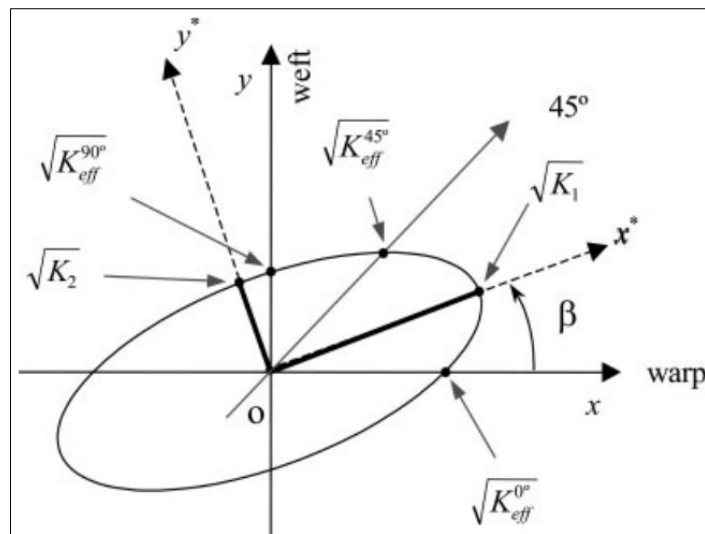
Em meios fibrosos com estrutura anisotrópica, segundo Silva (2016), a permeabilidade apresenta-se como um tensor, como mostrado a seguir.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Este tensor, para obter os três principais valores de permeabilidade, pode ser diagonalizado. Adota-se que as duas primeiras permeabilidades principais: K_1 e K_2 se encontram no plano das fibras, enquanto o terceiro, K_3 , está direcionado através da sua espessura (VERNET et al., 2014).

Bear (1972), através de cálculos, demonstra que com a mensuração da permeabilidade efetiva, K_{eff} , em apenas uma direção, é possível estabelecer uma conexão com as permeabilidades K_1 e K_2 . Ele explica que a raiz quadrada da permeabilidade efetiva ao longo de uma direção no meio poroso segue uma elipse com orientação β (definido como o ângulo entre o urdume, ou *warp*, e a direção do fluxo), em que os eixos x^* e y^* representam as raízes quadradas das principais permeabilidades, respectivamente K_1 e K_2 , como mostra a Figura 12.

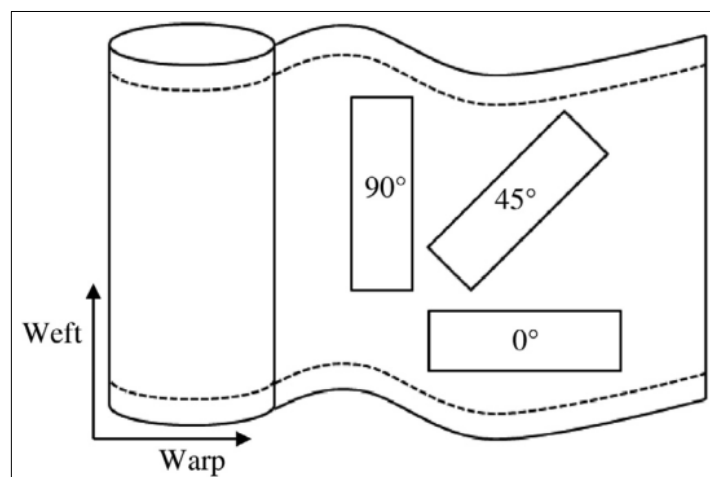
Figura 12 - Padrão elíptico da permeabilidade efetiva no plano.



Fonte: Demaría, Ruiz e Trochu (2007, p.799)

Portanto, se a permeabilidade efetiva for obtida em três direções diferentes do meio poroso por ensaios de fluxo unidirecionais, será possível construir a elipse da permeabilidade, cujos eixos principais definem completamente o tensor de permeabilidade no plano do reforço fibroso (DEMARÍA; RUIZ; TROCHU, 2007). Usualmente, as direções estabelecidas para medir a permeabilidade efetiva são as direções 0° , 90° e 45° , como ilustra o exemplo da Figura 13.

Figura 13 - Orientações comumente utilizadas para experimentos unidirecionais.

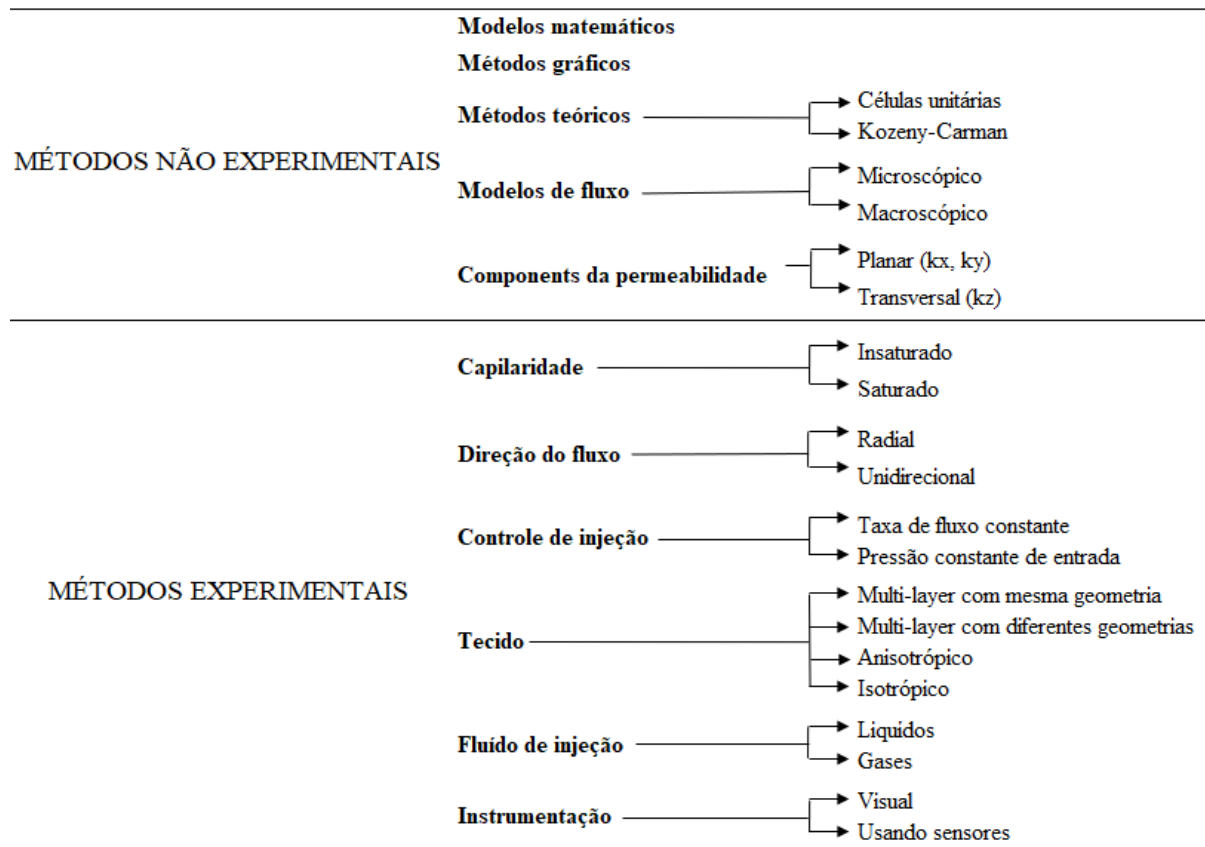


Fonte: Vernet et al. (2014, p. 174).

A obtenção da permeabilidade em reforços fibrosos pode ser classificada em dois grupos: métodos experimentais e métodos não experimentais. Porém, é possível também

utilizar de uma combinação de técnicas dos dois grupos. Uma classificação resumindo diferentes métodos para determinação da permeabilidade é apresentada na Figura 14 (PATIÑO; VARGAS; VANEGAS, 2014).

Figura 14 - Métodos para mensuração da permeabilidade.



Fonte: Adaptado de Patiño; Vargas; Vanegas (2014, p. 189)

Patiño, Vargas, Vanegas (2014) descrevem que é comum a utilização de diferentes técnicas usando métodos numéricos, métodos analíticos ou utilizando um tecido padrão como referência. Destacam ainda que a obtenção experimental pode ser um procedimento demorado e que por isso existem discrepâncias em alguns estudos.

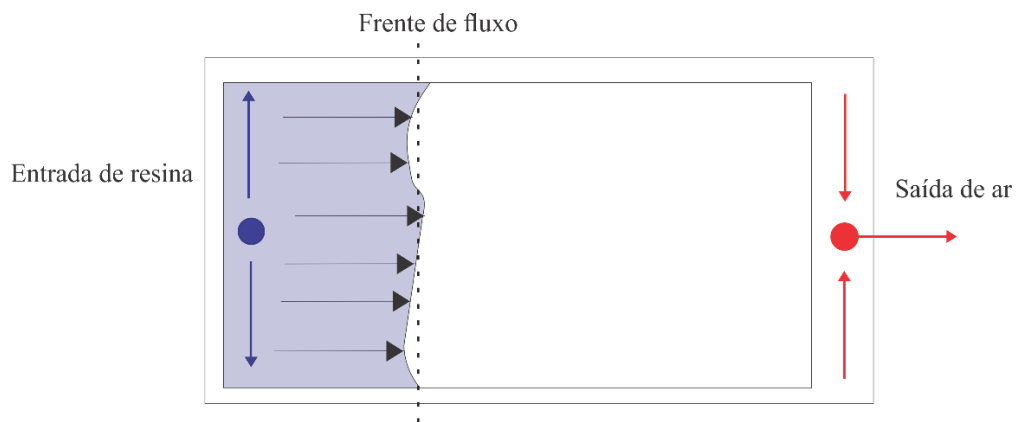
2.4.1 Métodos da direção do fluxo

O método mais comum de mensuração experimental da permeabilidade é o método da direção do fluxo. Existem duas técnicas de direção de fluxo, que segundo Sharma e Siginer (2010) são as mais utilizadas. A primeira utilizando direção do fluxo radial e a segunda utilizando direção do fluxo unidirecional. Em ambas, a obtenção pode ser feita empregando

pressão constante ou então empregando velocidade constante. Essas técnicas destacam-se por conseguirem obter as permeabilidades nas direções do plano do meio poroso. É possível também obter a permeabilidade no sentido da espessura, porém para isso será necessário utilizar recursos e técnicas extras no experimento. Silva (2016, p.21), relata que “[...] a permeabilidade na direção da espessura é cerca de 1 a 2 ordens de grandeza menor que a verificada no plano das fibras, por esse motivo, é comum desprezar o seu efeito, transformando um problema de 3 dimensões em apenas 2 dimensões.”

Para a determinação da permeabilidade utilizando o fluxo unidirecional, o meio poroso é colocado em molde retangular, longo, em que resina por diferença de pressão entra em uma extremidade e o ar sai em outra, de modo a criar uma frente de fluxo unidirecional, como demonstra a Figura 15. Existem duas maneiras de determinar a permeabilidade no experimento, uma é monitorar a queda de pressão ao longo de pontos, quando o meio estiver saturado, e a outra é monitorar o progresso da frente de fluxo à medida que o laminado vai sendo preenchido (ABRATE, 2002).

Figura 15 - Método do fluxo unidirecional



Fonte: Autor (2020).

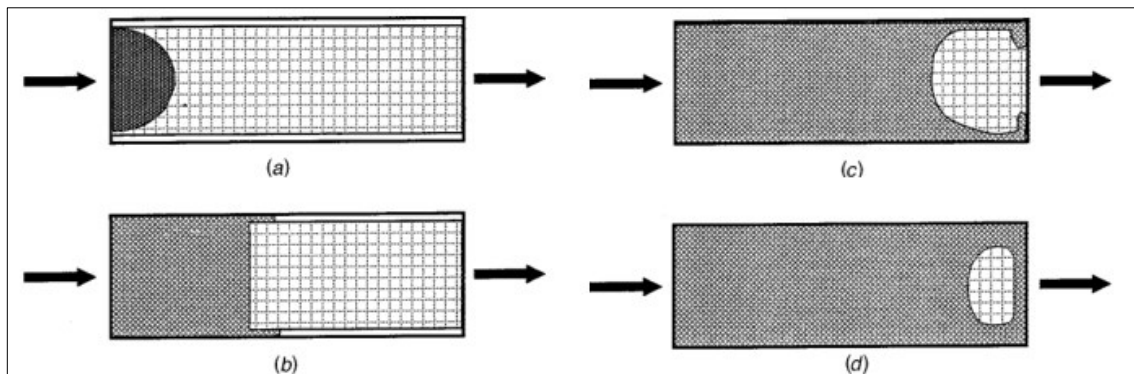
Para este tipo de experimento é possível a determinação da permeabilidade de apenas uma direção. O escoamento unidirecional é obtido através da integração da lei de Darcy, como apresenta a Equação 8.

$$K = \frac{\phi \mu L^2}{2 \Delta P t} \quad (8)$$

Quando é deixado um espaço entre o meio poroso e a borda do molde, haverá uma longa lacuna em que a resina fluirá mais rapidamente, devido a menor resistência encontrada. Esse

acontecimento é chamado de *race-tracking*, Figura 16(b), e devido a sua existência poderá produzir manchas secas, Figura 16(d), criando um padrão de frente de fluxo diferente do esperado (ABRATE, 2002).

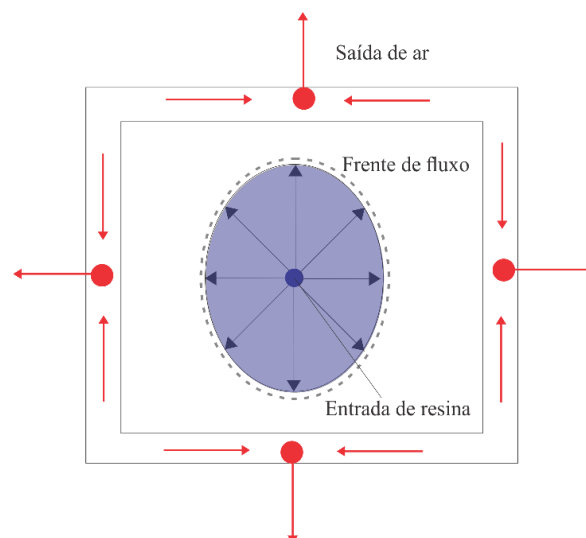
Figura 16 - *Race-tracking* e manchas secas. a) Início do processo, b) Surgimento do *race tracking*; c) Fluido chegando ao fim do molde e d) Formação de mancha seca.



Fonte: Abrate (2002, p.590)

Na determinação da permeabilidade pelo fluxo radial, é utilizado um molde parecido com o do método anterior, plano, porém sendo geralmente quadrático. A entrada da resina fica no topo do centro do reforço, as saídas de ar ficam distribuídas em volta do meio poroso, fazendo com que a frente de fluxo siga um padrão radial, Figura 17. Do mesmo modo que o unidirecional, o experimento pode ser feito monitorando a queda de pressão ou monitorando a frente de fluxo ao longo de eixo escolhidos.

Figura 17 - Método do fluxo radial.



Fonte: Autor (2020).

Um das grandes vantagens na utilização do fluxo radial é a possibilidade de mensurar mais de uma direção de permeabilidade. Outra vantagem, segundo George (2011), é de não ter problemas com *race-tracking*, já que o fluido não chega na parede do molde até o fim do experimento.

A solução de permeabilidade para uma pressão constante e um reforço fibrado isotrópico no experimento radial é apresentada na Equação 9. Esta equação deriva da lei de Darcy com a equação da continuidade, em que R é o raio da frente de escoamento, R_0 o raio da entrada de resina e t o tempo decorrente da frente de fluxo até R (SILVA, 2016).

$$K = \frac{\phi \mu R_0^2}{4 \Delta P t} \left\{ \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \left[2 \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) - 1 \right] + 1 \right\} \quad (9)$$

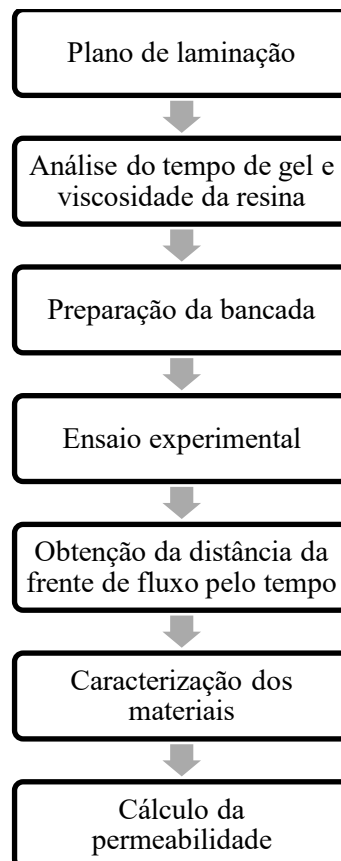
3 METODOLOGIA

Conforme os objetivos propostos nesse trabalho, foram realizados procedimentos experimentais de obtenção da permeabilidade adotando o método do fluxo unidirecional pelo processo de infusão a vácuo. Uma bancada com equipamentos de mensuração de parâmetros e controle do processo foi montada para realização dos ensaios.

Três ensaios foram executados, nas dimensões de 400x300 mm, em que um plano de laminação foi criado. A resina foi caracterizada, analisando sua viscosidade e o tempo de gel. Durante as infusões foram obtidos dados da distância longitudinal da frente de fluxo pelo tempo percorrido. Caracterização do laminado, através das composições mássicas e volumétricas do laminado foram adquiridas após a infusão. Por fim, a permeabilidade foi calculada por meio da lei de Darcy, em que foi comparada com valores encontrados na literatura.

O desenvolvimento do ensaio experimental pode ser apresentado em etapas por um fluxograma, Figura 18.

Figura 18 - Desenvolvimento dos ensaios experimentais.



Fonte: Autor (2020).

3.1 MATERIAS

Os materiais envolvidos foram classificados em dois grupos: os materiais consumíveis e os materiais compósitos.

3.1.1 Materiais consumíveis

Os materiais consumíveis são materiais específicos do processo de infusão a vácuo, após o seu uso são descartados, não fazendo parte do compósito final. A Figura 19 ilustra os materiais consumíveis utilizados nos ensaios.

Figura 19 - Materiais consumíveis: a) Fita selante, b) Bolsa de vácuo, c) Mangueira cristal, d) *Peel ply*, e) Espiroduto, f) Tê e g) Registro.



Fonte: Autor (2020).

A bolsa de vácuo, Figura 19 (b), é um filme polimérico que isola a zona infundida do meio atmosférico. Responsável por se comportar como um molde superior flexível, deve garantir estanqueidade e, ao mesmo tempo, facilitar a acomodação e fechamento da bolsa. O filme utilizado é de poliolefina, sendo multicamada com 75 microns de espessura e suportando temperaturas de até 120° C.

Para o fechamento do material compósito internamente na bolsa de vácuo foi utilizado uma fita selante, conhecida como *tacky tape*, Figura 19 (a). Trata-se de uma fita adesiva flexível, que sela o sistema em contato com o a bolsa de vácuo e molde.

O tecido desmoldante, chamado de *peel ply*, Figura 19 (d), é feito de poliamida. Tem duas funções principais, a primeira é auxiliar no desmolde de outros componentes após o processo. A segunda é texturizar a superfície do material compósito após sua retirada, facilitando a adesão de possíveis outros materiais.

Mangueiras, Figura 19 (c), também são utilizadas, com a função de transportar a resina e ar durante o processo. Para o estudo foi utilizada uma mangueira do tipo cristal de $\frac{1}{2}$ polegada, com 2 mm de espessura de parede.

Foram utilizados tubos espirais, ou espirodutos, Figura 19 (e), que servem para distribuir a resina e o vácuo nos extremos do molde. Devem ser rígidos o suficiente para não dobrar durante a infusão.

Conectados junto dos espirodutos e mangueiras, estão as conexões “tês”, Figura 19 (f), que são utilizadas para a ramificação da linha de alimentação da resina ou da linha de vácuo. Registros, Figura 19 (g) também são utilizados, a fim de controlar o fechamento da linha de vácuo ou de resina do sistema.

3.1.2 Materiais compósitos

O laminado em estudo neste trabalho é do tipo sanduíche, sendo portanto, composto por três materiais: reforço fibrado, matriz polimérica e núcleo. Informações para aprofundamento sobre características e funções de cada tipo de material estão contidas na fundamentação teórica.

Dois tipos de reforços foram empregados, ambos de vidro tipo E: tecido bidirecional $0/90^\circ$ de trama plana, ou *plain*, com 330 g/m^2 e manta de 300 g/m^2 , Figura 20 (a) e (b) respectivamente.

Figura 20 - Reforços utilizados. a) Tecido de trama plana de 330g/m^2 e b) Manta de 300g/m^2 .



Fonte: Autor (2020).

Foi utilizada uma resina do tipo poliéster insaturada como matriz, a Arazyn 14.0, da fabricante Ashland. Com baixa viscosidade e reatividade, é própria para infusão. Seu uso ocorreu faltando duas semanas para o fim de sua validade, que são de três meses segundo o fornecedor. O iniciador adotado na mistura foi o MEKP (peróxido de metiletil cetona). O *datasheet* da resina está disponível no Anexo A.

Para o material de núcleo foi utilizado a espuma rígida Divinycell PN80, do Grupo Diab. É constituída de PET, com 6 mm de espessura, densidade de 80 kg/m³ e cortes do tipo DC. As ranhuras, ou *groovings*, foram mensurados e as suas medidas estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Núcleo de PET utilizado e dimensões das ranhuras.



Fonte: Autor (2020).

3.2 PLANO DE LAMINAÇÃO

O plano de laminação é o modo que o laminado será composto em relação a orientação, sequenciamento e quantificação das camadas de reforço em conjunto com o núcleo.

Para o estudo foi adotado um laminado pouco espesso para um tipo sanduíche, que pode ser utilizado em diversas aplicações, como mobiliários, anteparas ou até cascos de embarcações miúdas. Trata-se de um laminado composto por 4 camadas de tecido e 6 camadas de manta, sendo simétrico em relação ao núcleo, como apresentado na Tabela 4.

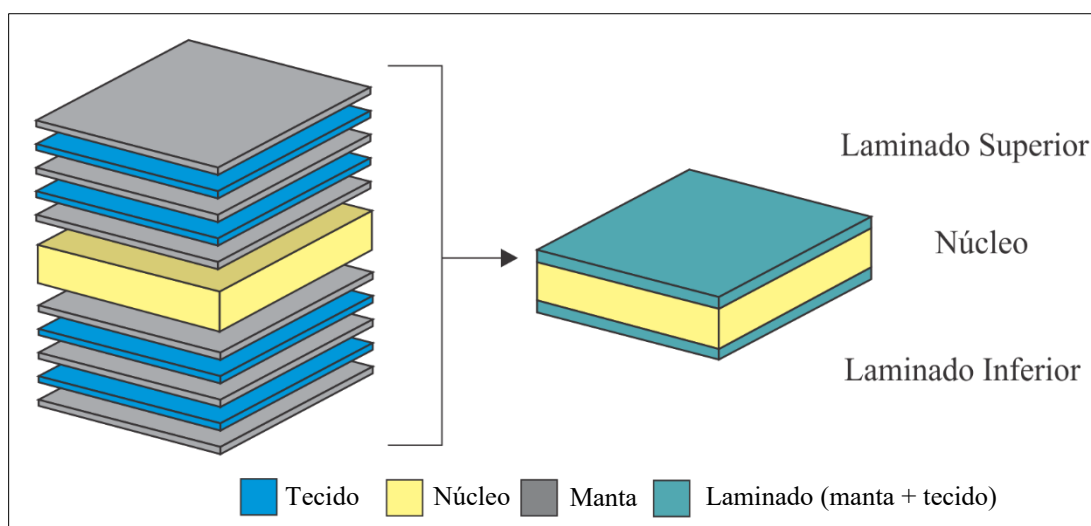
Tabela 4 - Plano de laminação.

Camada	Tipo	g/m ²	Orientação
1	Manta	300	-
2	Tecido trama plana	330	0/90°
3	Manta	300	-
4	Tecido trama plana	330	0/90°
5	Manta	300	-
6	Núcleo PET	480	0°
7	Manta	300	-
8	Tecido trama plana	330	0/90°
9	Manta	300	-
10	Tecido trama plana	330	0/90°
11	Manta	300	-

Fonte: Autor (2020).

A Figura 22 ilustra o plano de laminação descrito na Tabela 4, em que os laminados de fibra de vidro inferiores e superiores possuem as mesmas características de composição. Os tecidos, mantas e núcleo foram direcionados em 0° no sentido longitudinal do molde.

Figura 22 - Composição do laminado sanduíche.



Fonte: Autor (2020).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA

A análise da resina é de grande importância para o processo. Dados como viscosidade e tempo de cura devem ser cuidadosamente mensurados antes do processo de manufatura por infusão.

Para análise da viscosidade da resina foi utilizado um viscosímetro do tipo copo Ford fornecido pelo Laboratório de Combustão e Catálise Aplicada da UFSC Joinville. Este tipo de equipamento tem como vantagem obter de forma prática a viscosidade de um fluido newtoniano. Trata-se de um recipiente com capacidade de volume conhecido, e que possui diferentes aberturas de orifício, Figura 23. Seguindo a metodologia da norma ASTM D1200, o copo é preenchido de fluido com o orifício fechado, que em seguida é aberto com o tempo sendo cronometrado até a primeira interrupção de fluxo do escoamento. A peça de orifício é removível, existindo peças de diferentes aberturas, cada abertura corresponde a uma numeração, que é escolhida através do tempo do escoamento do líquido. Para os números 3, 4 e 5, o tempo de fluxo deve estar entre 20 e 100 segundos (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2005).

Figura 23 - Viscosímetro copo Ford.



Fonte: Autor (2020).

Para a resina poliéster empregada foram feitas tentativas com os diversos orifícios, e selecionado o orifício nº 5. Através da Equação 10, foi possível mensurar a sua viscosidade cinemática.

$$v_5 = 12,1(t_5 - 2) \quad (10)$$

Em que t_5 é o tempo em segundos decorrido até a primeira interrupção do fluxo para o orifício nº5, e ν_5 é a viscosidade cinemática, em centiStokes, (cSt), utilizando este mesmo orifício. Um centiStoke equivale a $1 \text{ mm}^2/\text{s}$.

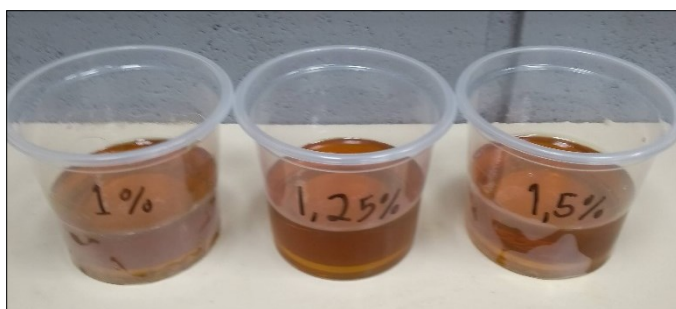
A viscosidade dinâmica foi empregada nos cálculos, sendo que para a sua aquisição foi utilizada a Equação 11, em que a multiplicação da viscosidade cinemática ν (obtida através dos ensaios) pela densidade do fluido ρ_m , resulta na viscosidade dinâmica, μ . Seu valor pode ser expresso em centiPoise (cP), unidade mais comum de emprego, onde 1 Cp equivale a 1 mPa.s.

$$\mu = \nu \cdot \rho_m \quad (11)$$

Outra análise feita foi o teste do tempo de gel, ou *gel time*, em que a proporção de iniciador na resina é variada afim de se descobrir uma relação de tempo de trabalho útil para total infusão da peça.

Foram feitas variações da massa de iniciador, adicionando 1%, 1,25% e 1,5% da massa de resina na mistura. Sua prática aconteceu com corpos de prova de 100 g de resina antes da primeira laminação, como ilustra a Figura 24. Nas laminações posteriores procurou-se executar a infusão em temperatura e umidade próximas ou iguais às do teste de gel realizado. O teste foi feito com umidade relativa em 66% e temperatura de $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 24 - Teste de tempo de gel.



Fonte: Autor (2020).

3.4 PREPARAÇÃO E EQUIPAMENTOS

O molde utilizado foi uma placa plana, de vidro temperado com 3 mm de espessura. Este molde foi alocado sobre dois cavaletes, de modo a ser possível o acompanhamento visual da infusão na parte inferior do molde transparente além do acompanhamento superior.

A preparação se iniciou demarcando a área que seria posicionado o compósito, nesta área foi aplicada cera de carnaúba, que tem a função de agente desmoldante. Para a primeira infusão foram aplicadas cinco demãos de cera, e para as subseqüentes apenas duas, isto foi feito devido a uma pequena quantidade de desmoldante que fica depositada mesmo após a retirada da peça. Foram utilizados 30 minutos entre cada demão, de modo que a cera depositada pudesse secar e não ser facilmente retirada pela aplicação subseqüente e tão pouco aderir aos reforços dificultando a aderência da matriz plásticas ao reforço de fibras.

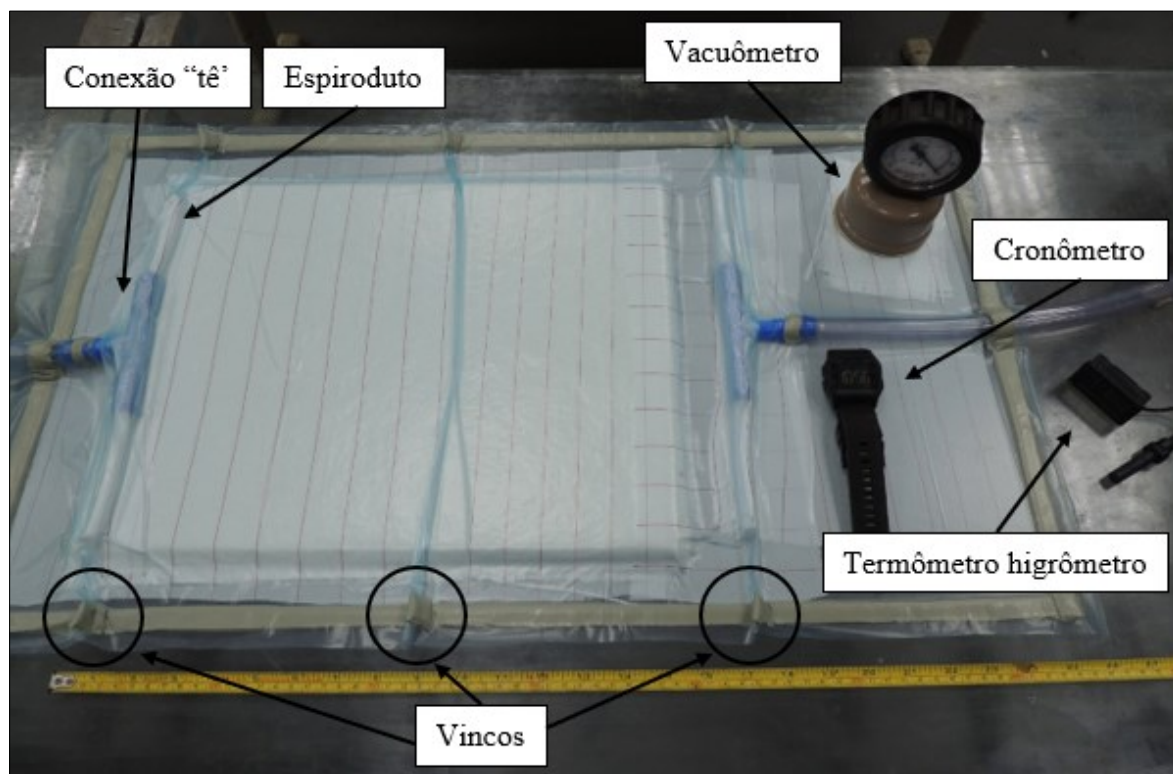
Os materiais compósitos foram cortados em formato retangular nas dimensões de 400x300 mm. A massa de cada camada foi mensurada com auxílio de uma balança digital, e em seguida foram sobrepostas de forma ordenada, seguindo a montagem do plano de laminação.

O *peel ply* foi cortado de maneira a cobrir todo o material compósito exposto, contando as áreas laterais. Em seguida, a fita selante foi posicionada e fixada de forma a contornar a geometria do compósito com certa margem de afastamento.

Com a fita colada no molde, e o material compósito com o *peel ply* posicionados, duas conexões “tês” foram colocadas nos extremos do compósito. Internamente às conexões, estavam os espirodutos, estes com a função de transferência e distribuição da resina e vácuo. Em volto de ambos, de forma a embrulhar, foi utilizada uma tira de *peel ply*, para facilitar a desmoldagem depois do processo.

Na ponta de cada conexão foram engatadas as mangueiras cristal, em seguida foi feito o fechamento de todos os itens mencionados anteriormente com a bolsa de vácuo. Esta etapa requer muita atenção, em que se procurou não obter rugas ou emendas, um fechamento indevido poderia comprometer o experimento. São feitos vincos ao longo da peça para melhor ajuste e para que não haja deformação acima do limite da bolsa de vácuo. A Figura 25 apresenta a configuração final da montagem em bancada com os elementos comentados.

Figura 25 - Bancada montada para o ensaio, com materiais e equipamentos de medição.



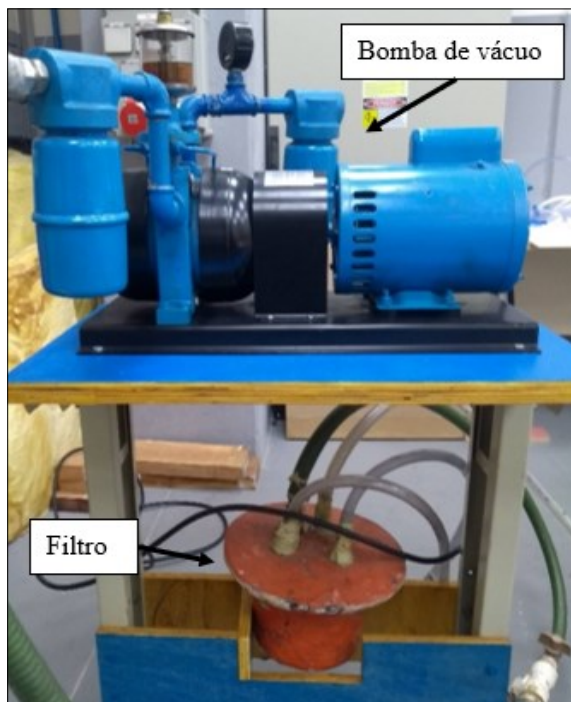
Fonte: Autor (2020).

Alguns equipamentos de medição foram utilizados antes e durante o processo de laminação. Um vacuômetro analógico, da marca Planatc, modelo VAC-001, foi incorporado para mensuração da pressão interna do sistema. O vacuômetro foi posicionado sobre uma abertura feita na bolsa de vácuo. Para que não ocorresse o fechamento da bolsa com molde, o que inutilizaria o equipamento, foram colocadas duas camadas de tecido 330 g/m² entre as mesmas, confirmando a passagem de ar naquele espaço. Um termômetro higrômetro com sensor externo, marca Gaqee, modelo Y5007, foi utilizado para as medições de umidade relativa do ar e temperatura do ambiente. Para a medição do tempo foi utilizado a função cronômetro de um relógio de pulso digital. Na Figura 25 é possível verificar como ficaram dispostos os equipamentos de medição durante os ensaios.

Foram instalados registros nas linhas das mangueiras já posicionadas. Na linha de resina foi instalado um registro entre a saída da peça e o recipiente com resina. Na linha de vácuo, o registro foi instalado entre a saída da peça e o filtro. Após o filtro, a linha ainda foi conectada com a bomba de vácuo. Os registros tem a função de dar controle sobre a orientação e diferença de pressão no sistema, tanto no início quando no final do processo.

A bomba de vácuo utilizada foi da marca Primatec, modelo 152, de 20V com 1,5 CV. O filtro é de fabricação do Laboratório de Ensino de Ciência dos Materiais da UFSC Joinville, que tem o volume interno de aproximadamente 3 litros. A Figura 26 ilustra esses equipamentos.

Figura 26 - Bomba de vácuo e filtro utilizados.



Fonte: Autor (2020).

Após completa montagem do sistema, foram feitas inspeções pra verificar a existência de vazamentos e má disposições. Com a bomba de vácuo ligada, todas as emendas, conexões, filtro e área da bolsa de vácuo foram analisadas - qualquer ruído e variação da pressão informada pelo vacuômetro poderia indicar vazamento.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Estando todos os materiais e equipamentos preparados, foi possível realizar os ensaios. Os experimentos ocorreram no Laboratório de Construção Naval da UFSC Joinville, onde foram executados com no mínimo 24 horas de diferença um do outro.

No início de cada ensaio foi feito a introdução do iniciador na resina. A mistura da resina com o iniciador foi feita igualmente para todos os ensaios, com a proporção de 1,25% da massa de resina, conforme teste realizado do tempo de gel. A pressão do sistema, a temperatura e umidade relativa do ambiente foram mensurados durante cada ensaio, seus valores médios estão

expostos na Tabela 5. A pressão do sistema foi considerada constante durante todo o processo de infusão.

Tabela 5 - Características dos ensaios.

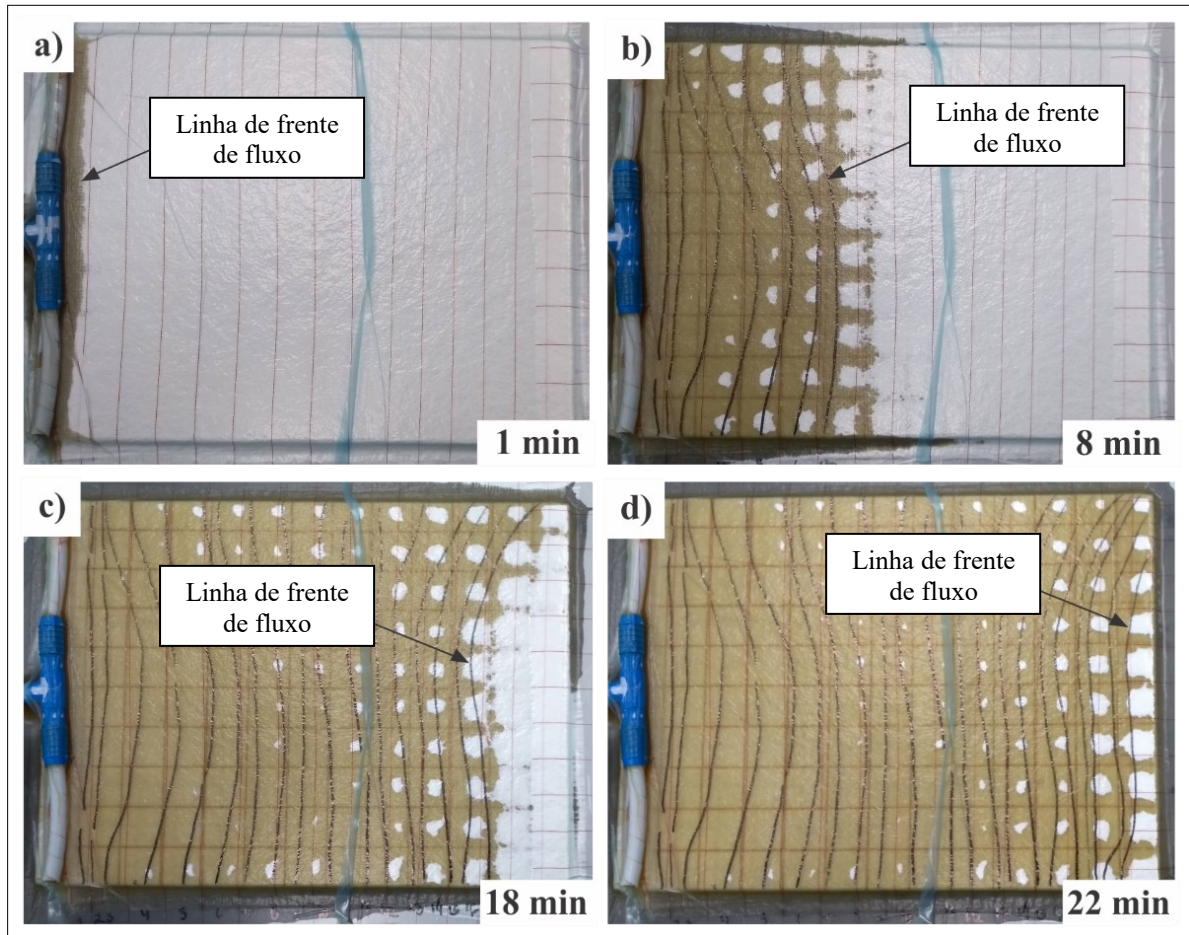
Ensaio	Iniciador [% massa de resina]	Temperatura [°C]	Umidade relativa [%]	Pressão [KPa]
1	1,25	20,6	66	66,6
2	1,25	21,5	60	67,3
3	1,25	21,9	62	68,0

Fonte: Autor (2020).

Para a caracterização da frente de fluxo, a bomba de vácuo foi ligada. Com a pressão ideal alcançada, o registro da linha da resina foi aberto, e a resina, por diferença de pressão entrou na peça percolando os materiais compósitos em direção ao outro extremo.

A frente de fluxo foi representada por linhas de frente de escoamento consideradas quase saturadas. A cada 1 minuto do processo, foi feito um referenciamento com um marcador sobre a peça. Para comparação, foram feitas marcações na parte de baixo do molde também. A Figura 27 ilustra alguns instantes de tempo durante o processo de infusão de um ensaio e sua respectiva marcação da linha da frente de fluxo.

Figura 27 - Avanço da frente de fluxo pelo tempo percorrido. a) 1 min, b) 8 min, c) 18 min e d) 22 min.



Fonte: Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões a respeito da caracterização da resina, caracterização do laminado, determinação das linhas de frente fluxo e o cálculo de permeabilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA

O número de orifício escolhido para uso no copo Ford foi o de número 5. O ensaio foi executado três vezes para melhor confiabilidade nos resultados. Através dos tempos de escoamento no copo mensurados, e utilizando as Equações 10 e 11, foi possível obter as viscosidades cinemática e dinâmica da resina, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Viscosidade cinemática e dinâmica da resina.

Tempo de escoamento [s]	Viscosidade cinemática [cSt]	Densidade [g/cm ³]	Viscosidade dinâmica [cP]
65	762,3	1,153	878,9
70	822,8	1,153	948,7
67	786,5	1,153	906,8

Fonte: Autor (2020).

Para os cálculos posteriores da permeabilidade, foi utilizado a média das viscosidades dinâmicas encontradas, no valor de 911,5 cP. Viscosidade essa, considerada alta para utilização em laminações pelo método de infusão a vácuo. Foi consultado o *datasheet* disponibilizado pelo distribuidor, disponível no Anexo 1, e constatada grande diferença entre a viscosidade dinâmica do documento e as mensuradas pelos ensaios.

Os resultados do teste de tempo de gel indicam o tempo de trabalho da resina para diferentes proporções de iniciador na mistura, como mostra a Tabela 7. Analisando os valores obtidos, a porcentagem de MEKP utilizada foi de 1,25% da massa de resina. Esta escolha foi feita para que a peça seja infundida totalmente com margem de segurança, em um tempo próximo ao de estado de gel, com limite máximo de 47 minutos. Ressalta-se que os testes foram executados em ambiente monitorado, com temperatura em 20,6 °C e umidade relativa do ar em 66%.

Tabela 7 - Resultados do teste de tempo de gel.

MEKP [kg de resina]	Tempo de gel [min]
1,00%	>100
1,25%	47
1,50%	35

Fonte: Autor (2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LAMINADO

Todos os laminados obtiveram completa saturação da resina em seu meio. Não foram localizadas bolhas e áreas secas após a cura por meio de uma análise visual. A caracterização foi feita analisando as composições físicas finais de cada ensaio.

A determinação das propriedades relativas à massa e volume são fundamentais para a obtenção da permeabilidade. Os dados utilizados estão disponíveis ao longo deste subcapítulo.

4.2.1 Composição em massa

Para a caracterização em massa, foram feitas mensurações individuais dos cortes dos tecidos, mantas e núcleos antes do processo de infusão a vácuo de cada laminado. Após o processo de laminação, estando as peças totalmente curadas, foram obtidas as massas totais dos sanduíches. Com esses valores, foi possível descobrir as massas de resina, em que a mesma é resultante da subtração das massas totais pelas massas dos materiais individuais mensurados. A Tabela 8 apresenta as massas calculadas dos laminados.

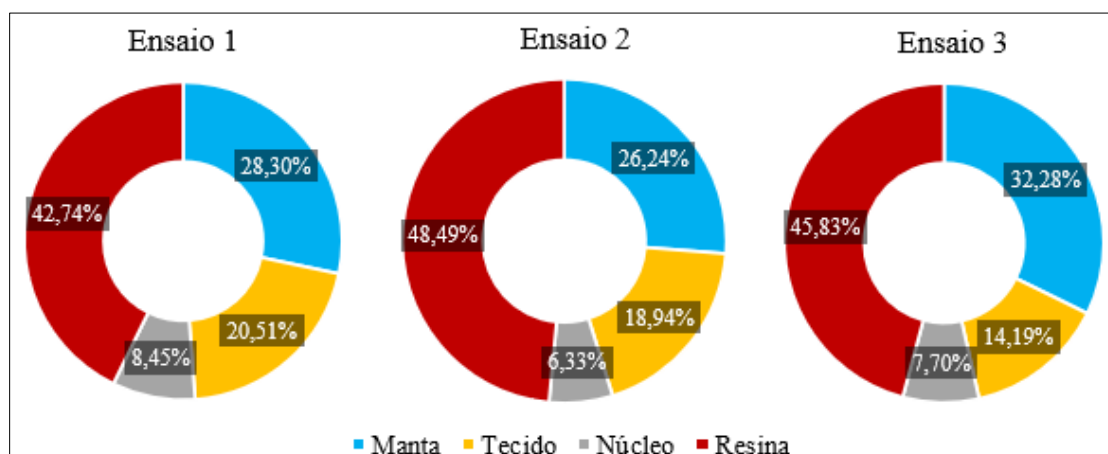
Tabela 8 - Massa dos materiais utilizados nos ensaios.

Ensaio	Manta (g)	Tecido (g)	Núcleo (g)	Resina (g)	Total (g)
1	242,53	175,80	72,40	366,37	857,10
2	240,13	173,33	57,93	443,80	915,20
3	290,67	127,80	69,30	412,63	900,40

Fonte: Autor (2020)

Na Figura 28 é possível visualizar as porcentagens em massa de cada material após os ensaios.

Figura 28 - Composição em massa de cada ensaio.



Fonte: Autor (2020).

Observa-se uma baixa variação na proporção dos materiais entre os ensaios, a importância maior se concentra na proporção de resina, já que é o único material não quantificado com precisão antes do processo.

4.2.2 Fração volumétrica de fibra

Para análise da caracterização em volume, foi necessário conhecer a densidade de cada material. A manta e o tecido foram considerados com o mesmo peso específico, por se tratarem da mesma matéria prima, o vidro do tipo E, seu valor foi retirado de Al-Qureshi (2010). A densidade da resina foi obtida de forma simples, calculada pela divisão da massa com o volume conhecido de uma pequena amostra. Para o núcleo foi feito o cálculo da densidade aparente, que de forma parecida com a resina, foi obtido pela divisão da massa pelo volume, porém utilizando o volume real do material em cada ensaio (400x300x6 mm), em vez de uma amostra. Os volumes das ranhuras foram descontados do volume aparente do núcleo calculado. A Tabela 9 apresenta os valores de densidades adotados, e a Tabela 10 apresenta os volumes calculados.

Tabela 9 - Densidades dos materiais.

Ensaio	Manta (kg/m ³)	Tecido (kg/m ³)	Núcleo (kg/m ³)	Resina (kg/m ³)
1	2540	2540	100,56	1153,42
2	2540	2540	80,46	1153,42
3	2540	2540	96,25	1153,42

Fonte: Al-Qureshi (2010, p. 65) e Autor (2020).

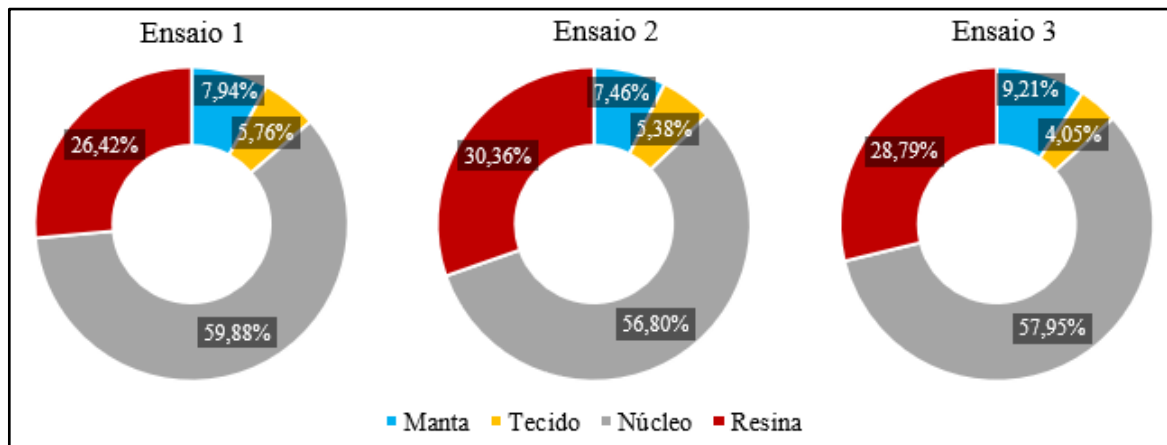
Tabela 10 - Volumes dos materiais.

Ensaio	Manta (ml)	Tecido (ml)	Núcleo (ml)	Resina (ml)
1	95,49	69,21	657,20	317,64
2	94,54	68,24	657,20	384,77
3	114,44	50,31	657,20	357,74

Fonte: Autor (2020).

A composição em volume de cada ensaio é melhor visualizada nos gráficos da Figura 29.

Figura 29 - Composição em volume de cada ensaio.



Fonte: Autor (2020).

É perceptível que, quando comparadas as relações de composição em massa com as em volume, se note o quanto o núcleo desempenha um aumento de volume significativo no compósito, representando em média 58,21% do total, de forma a não afetar o peso final expressivamente, em que compõe 7,49% em média.

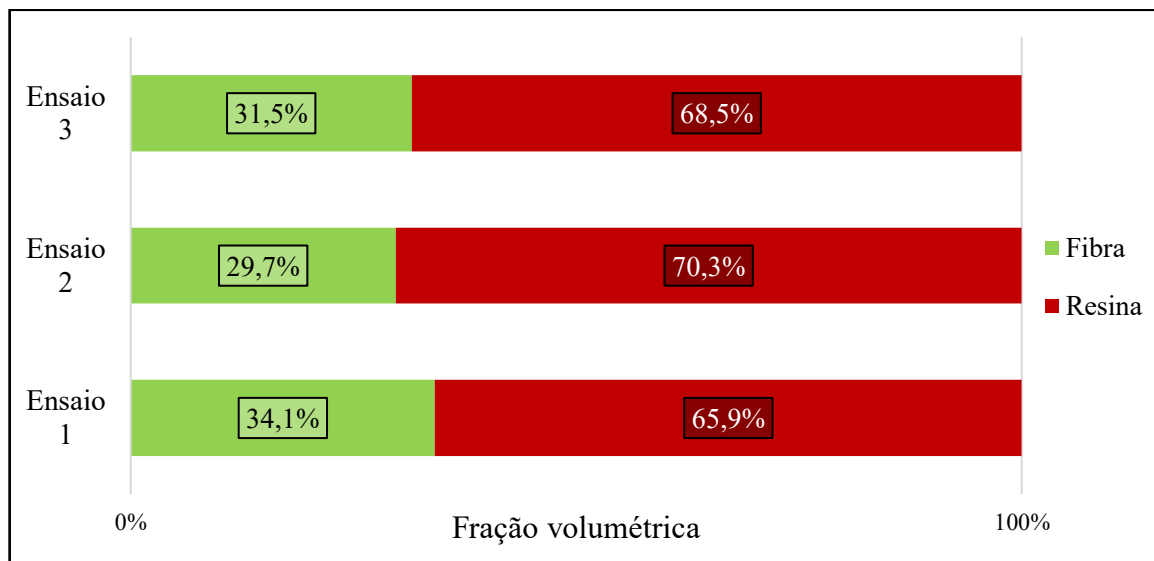
A fração volumétrica de fibra foi considerada como a fração de volume composto pela manta e tecido presentes no laminado. Para seu cálculo, foi utilizado a Equação 1. Nesta equação apenas os reforços fibrados e a matriz são considerados, o núcleo é, portanto, desprezado (porém os volumes de resina contidos nas ranhuras e paredes dos núcleos foram considerados nos cálculos). Como se trata de um compósito simétrico, as frações volumétricas da fibra na parte inferior e superior ao núcleo são iguais, possibilitando seu cálculo conjunto. A Tabela 11, apresenta os dados em massa e volume de fibra e resina calculados, enquanto a Figura 30 apresenta os resultados obtidos de fração volumétrica em porcentagens de composição.

Tabela 11 - Dados de massa e volume entre fibra e resina

Ensaio	Massa [g]		Volume [ml]	
	Fibra	Resina	Fibra	Resina
1	418,33	366,37	1,65	317,64
2	413,47	443,80	1,63	384,77
3	418,47	412,63	1,65	357,74

Fonte: Autor (2020).

Figura 30 - Fração volumétrica da fibra e resina.



Fonte: Autor (2020).

Os valores entre 29,7% e 34,1% de fração em volume de fibra se devem principalmente pelo tipo e composição do reforço fibrado. A manta é um material que necessita de uma maior quantidade de resina para sua completa saturação em relação ao tecido, e devido a sua quantidade ser superior no experimento deste estudo, se torna o principal influenciador destes valores.

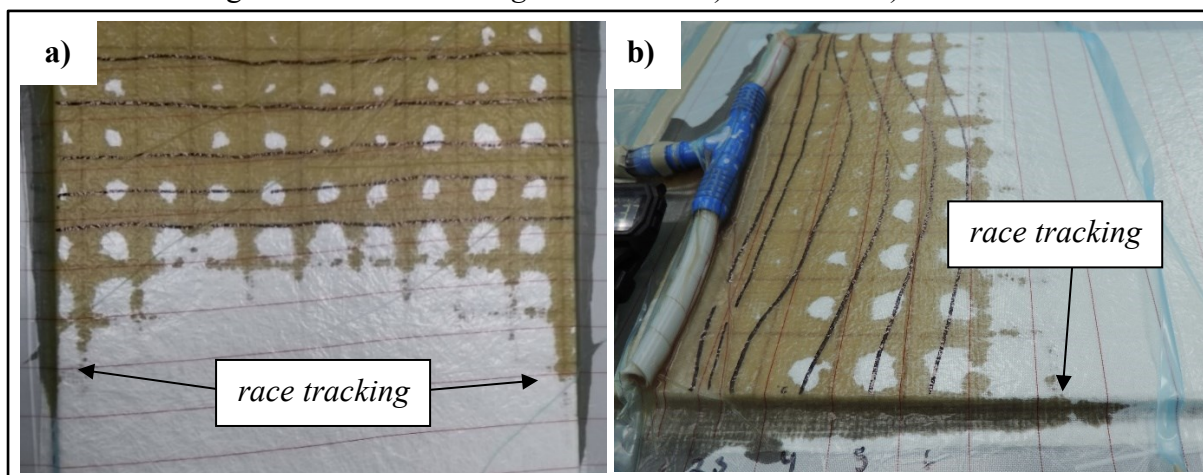
4.3 LINHAS DE FRENTE DE FLUXO

4.3.1 Race tracking

Durante o processo de infusão, uma parte da resina se movimentou pelas laterais de forma mais rápida que o restante da peça, entre o material compósito “seco”, molde e bolsa de vácuo, decorrendo o fenômeno do *race tracking*. Isso acontece por ser um caminho de maior

facilidade de percolação, o que dificultou a caracterização da linha de frente de fluxo, influenciando de modo negativo a análise posterior da velocidade de insaturação. Na Figura 31, é possível observar a sua ocorrência no ensaio 1 e no ensaio 3, em (a) e (b) respectivamente.

Figura 31 - *Race tracking* nos ensaios. a) Ensaio 1 e b) Ensaio 3.



Fonte: Autor (2020).

Foi verificado também o efeito das ranhuras existentes no núcleo. Os cortes se tornam um meio de passagem facilitada para a resina, motivando a direção do escoamento. Sua atuação é visível na saturação do reforço na Figura 31.

4.3.2 Distância longitudinal da frente de fluxo

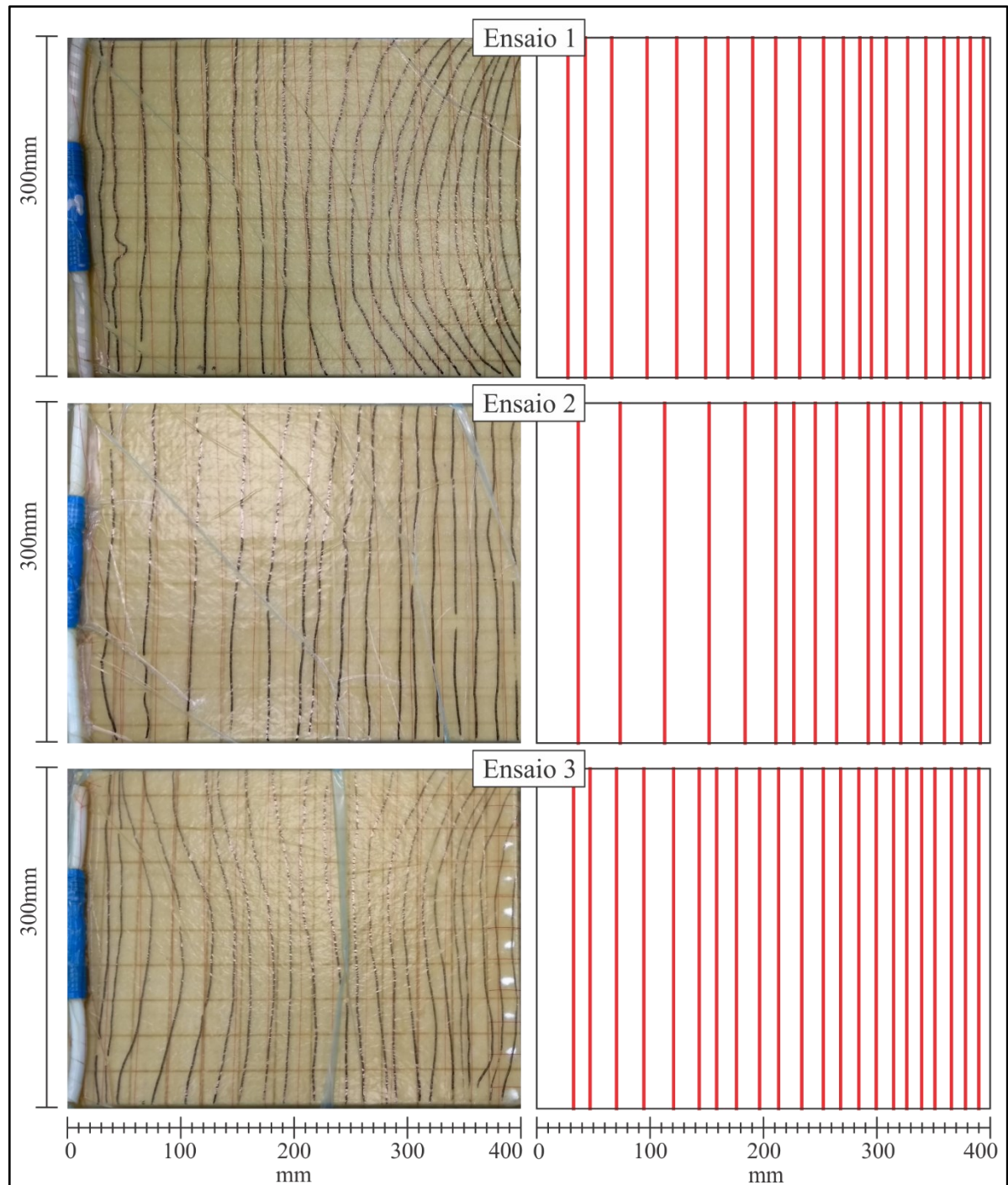
Concluída a demarcação das linhas de frente de fluxo em cada ensaio, foram feitas capturas fotográficas para análise posterior. Utilizando o programa de desenho vetorial Corel Draw, foi possível dimensionalizar as imagens na escala real da peça.

A velocidade de percolação da resina nas superfícies superior e inferior do compósito foram muito similares, o que gerou linhas de frente de fluxo com discretas diferenças. Portanto, admitiu-se que ambas as superfícies seriam representadas pelas mesmas linhas de frente de fluxo.

Muitas linhas se comportaram de maneira curvilínea, o que dificultou a determinação da distância longitudinal da frente percorrida. Para boa definição, e considerando o efeito do fenômeno do *race tracking*, foram feitas novas representações das linhas.

As novas linhas, são apresentadas em vermelho na Figura 32.

Figura 32 - Linhas verticais da frente de fluxo.



Fonte: Autor (2020).

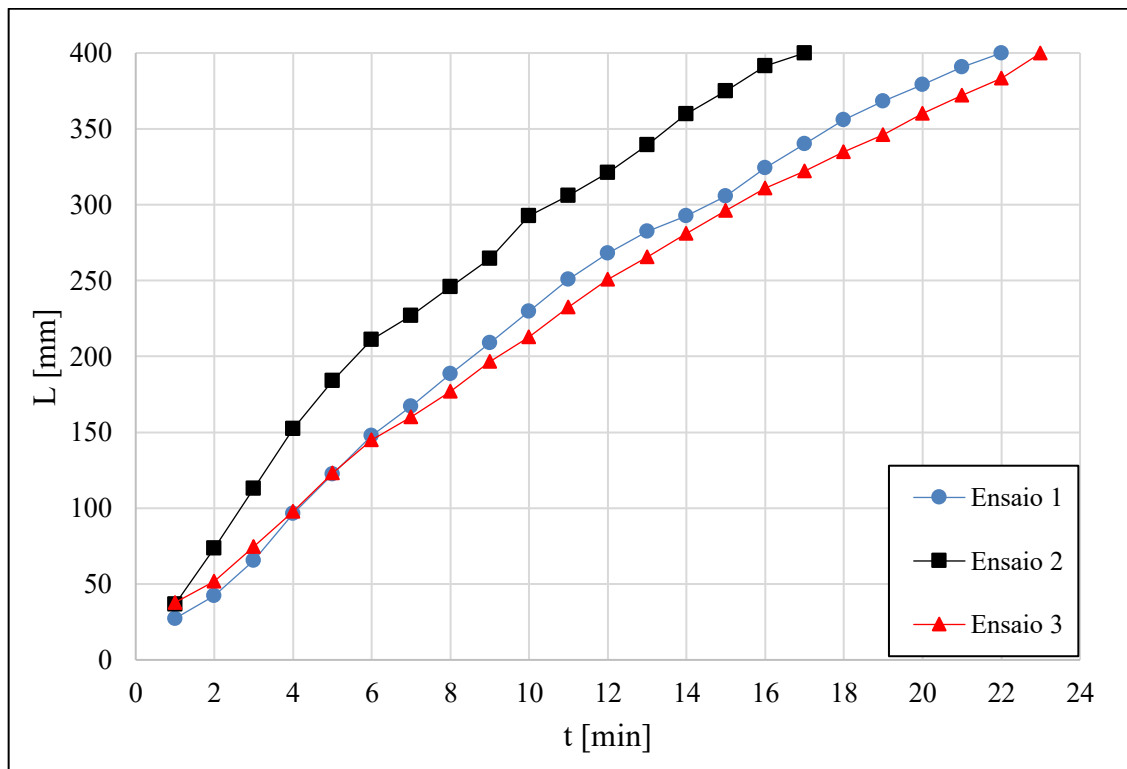
As novas linhas, tem como base as linhas demarcadas durante os processos e são representadas como curvas lineares verticais. Elas estabelecem uma média aritmética ponderada das distâncias longitudinais mensuradas ao longo das linhas demarcadas na peça, conforme apresenta a Equação 12.

$$L_v = \frac{(L_1) + (2 * L_2) + (4 * L_3) + (2 * L_4) + (L_5)}{10} \quad (12)$$

As distâncias longitudinais das linhas verticais, L_v , foram estabelecidas utilizando cinco pontos de cada curva, em que foram mensurados a cada 75 mm de distância vertical, sendo: L1, L2, L3, L4 e L5. Foi dado maior peso no cálculo para as distâncias obtidas no centro das curvas, com o objetivo de minimizar o efeito da *race tracking* nas laterais da peça.

Após a obtenção das distâncias percorridas empregando as linhas verticais de frente de fluxo, os dados puderam ser apresentados por meio de um gráfico, Figura 33, para melhor visualização e comparação dos ensaios.

Figura 33 - Distância da frente de fluxo pelo tempo percorrido.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados demonstram que os ensaios 1 e 3 tiveram suas linhas distribuídas ao longo do tempo de forma similar, ambos permitiram a resina chegar aos 400 mm de comprimento entre 22 e 23 minutos. O ensaio 2 finalizou a peça mais rapidamente, por volta de 17 minutos, porém mantendo sua curva de distribuição semelhante as outras.

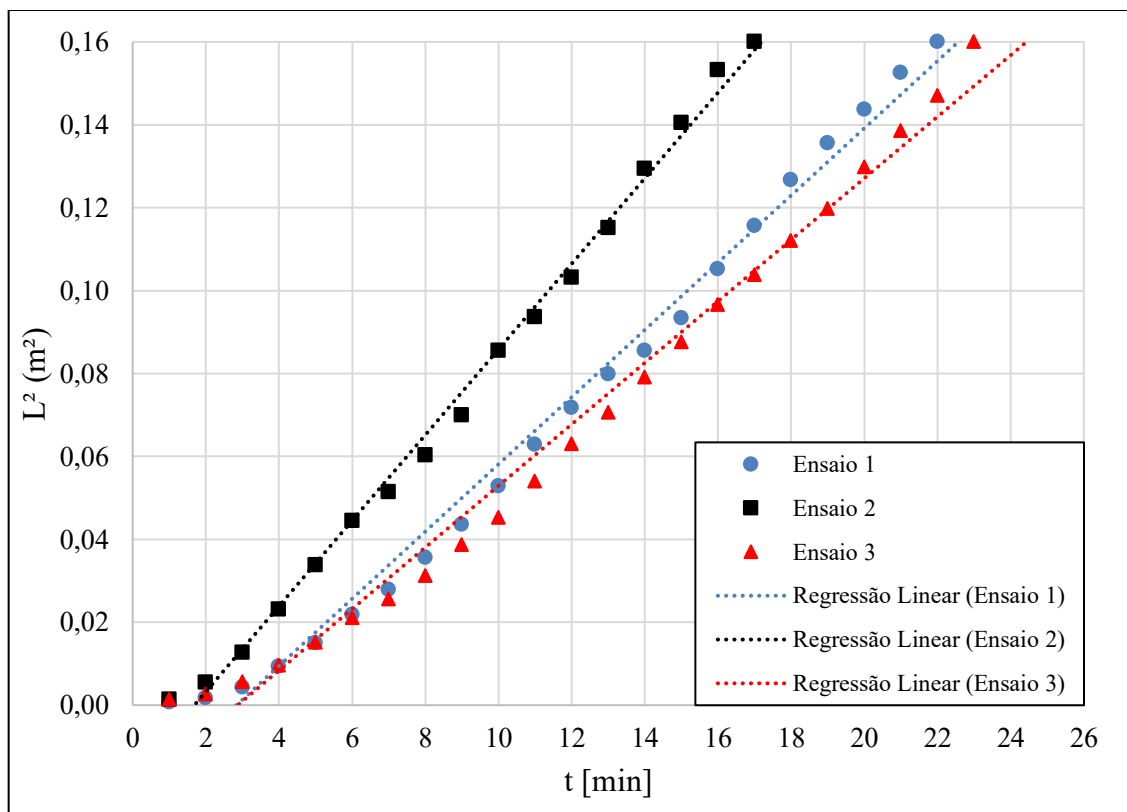
4.4 CÁLCULO DA PERMEABILIDADE

Para o cálculo da permeabilidade se fez necessário o conhecimento dos valores da distância da frente de fluxo ao quadrado dividido pelo tempo percorrido (L^2/t). A fim de se obter essa relação, foram feitas distribuições gráficas dos valores encontrados, como mostra a Figura 34.

Foram feitas regressões lineares com os dados das distribuições. O objetivo destas regressões é representar de maneira confiável os dados obtidos em uma reta de primeiro grau com comportamento previsível. As inclinações destas retas foram determinadas e correspondem as relações necessárias de L^2/t .

Para análise de cada regressão foi calculado o coeficiente de determinação, R^2 . Este coeficiente foi utilizado para avaliar a qualidade de cada reta em relação ao seu uso. A Tabela 12 apresenta os valores de R^2 e os valores de inclinação calculados para cada ensaio.

Figura 34 - Distância da frente de fluxo ao quadrado pelo tempo percorrido.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 12 - Inclinação das regressões lineares.

	Inclinação (m ² /s)	R ²
Ensaio 1	1,35x10 ⁻⁴	0,9885
Ensaio 2	1,72x10 ⁻⁴	0,9952
Ensaio 3	1,24x10 ⁻⁴	0,9860

Fonte: Autor (2020).

Os resultados de R² mostram que o modelo de regressão utilizado foi adequado para a representação das distribuições, com valores acima de 98,6%. Portanto, os resultados de inclinação foram considerados satisfatórios para uso no estudo.

Com os valores de L²/t, todas as propriedades necessárias estão determinadas para cálculo da permeabilidade conforme apresenta a Tabela 13.

Tabela 13 - Variáveis estabelecidas para o cálculo da permeabilidade.

Item	Viscosidade [Pa.s]	Inclinação [m ² /s]	Diferença de pressão [Pa]	Fração volumétrica fibra	Porosidade	Permeabilidade [m ²]
Símbolo	μ	L ² /t	ΔP	Vf	ϕ	K
Ensaio 1	0,9115	1,35x10 ⁻⁴	66661	0,341	0,659	6,08x10 ⁻¹⁰
Ensaio 2	0,9115	1,72x10 ⁻⁴	67328,61	0,297	0,703	8,18x10 ⁻¹⁰
Ensaio 3	0,9115	1,24x10 ⁻⁴	67994,22	0,315	0,685	5,68x10 ⁻¹⁰

Fonte: Autor (2020).

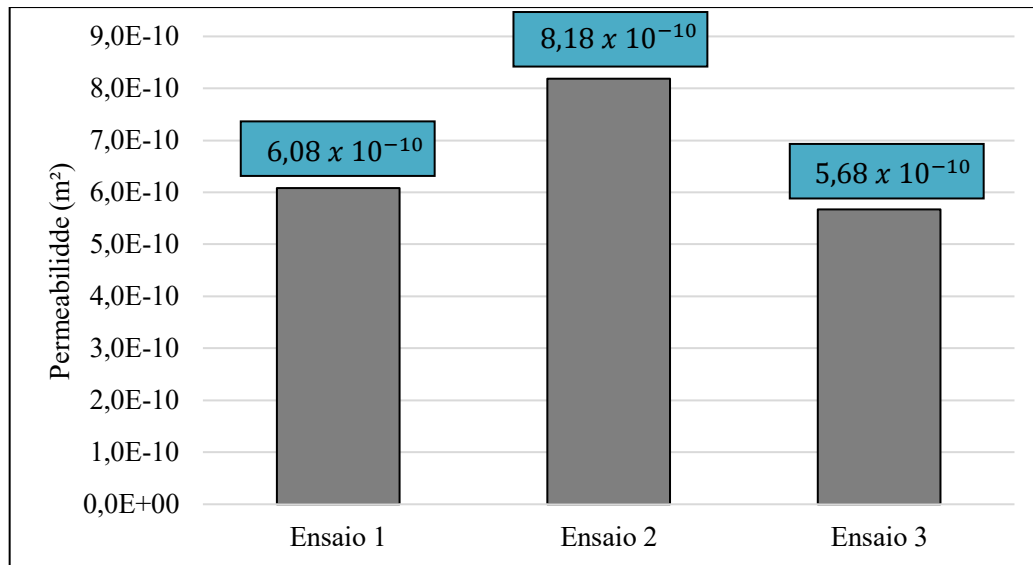
A pressão foi assumida como constante durante todo o processo, assim como a viscosidade. Para a porosidade, foi utilizado a Equação 5, considerado em seu cálculo os volumes vazios das ranhuras além da porosidade dos reforços.

$$1 = V_f + \phi \quad (5)$$

Portanto, com a Equação 8, foi possível calcular a permeabilidade. Os resultados obtidos para cada ensaio estão expostos por meio do gráfico da Figura 35.

$$K = \frac{\phi \mu L^2}{2 \Delta P t} \quad (8)$$

Figura 35 - Permeabilidade experimental obtida de cada ensaio.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados de permeabilidade apresentaram uma média de $6,65 \times 10^{-10}$ m² (616,24 darcy), com desvio padrão de $1,35 \times 10^{-10}$ m² (136,35 darcy), encontrando-se na mesma ordem de grandeza dos trabalhos de Jhan, Lee e Chung (2011), Ferland, Guittard e Trochu (1996), Swery et al. (2016) e Gebart e Lidström (1996). Que calcularam a permeabilidade de laminados de composições diferentes, porém pelo mesmo método de fabricação.

Cogita-se que a diferença encontrada nos resultados está ligada a complexibilidade da repetibilidade do processo. Apesar do esforço em garantir as mesmas propriedades em todos os ensaios, podem existir pequenas variações implicando no resultado final.

Devido os laminados compósitos terem em seu plano de laminação inúmeras possibilidades de composição e variação na escolha das propriedades dos materiais e processos, não foi encontrado na literatura nenhum trabalho com as mesmas características utilizadas neste estudo. Outro justificativa, é a não atratividade na divulgação de resultados de permeabilidade por empresas do ramo.

Para fins comparativos, foi investigado o trabalho de Jhan, Lee e Chung (2011), que fabricaram por VARTM um laminado com o mesmas quantidades e sequenciamento das camadas de manta, tecido e núcleo. As diferenças se deram nas espessuras e gramaturas dos materiais, sendo a manta de 450g/m², o tecido de 800g/m² e o núcleo feito de PVC com 25mm de espessura. O valor de permeabilidade calculada pelos mesmos foi de $8,05 \times 10^{-10}$ m², mostrando ser muito similar aos valores encontrados nesse estudo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram feitos cálculos de permeabilidade longitudinal de um compósito sanduíche de maneira experimental, utilizando o método do fluxo unidirecional pelo processo de infusão a vácuo.

Para seu sucesso foi definido um plano de laminação contendo reforço de fibra de vidro, matriz do tipo poliéster insaturada e núcleo de PET. A resina foi analisada, de modo a mensurar a sua viscosidade e verificar a proporção ideal do sistema de iniciador. Foram feitas laminações por infusão a vácuo em bancada, sendo que durante o avanço da resina o comportamento do fluxo foi demarcado. Com as peças curadas foram obtidos os dados das propriedades mássicas e volumétricas de cada laminado. Após os parâmetros estarem todos determinados ocorreu o cálculo da permeabilidade.

Pode-se concluir, com a análises e resultados obtidos que:

- Os resultados da mensuração da viscosidade da resina, utilizando copo Ford, se mostraram maiores que o esperado. Apesar do fato, o experimento não foi prejudicado. Cogita-se que a elevação da viscosidade ocorreu devido ao modo de conservação, na estocagem, ou pelo fato de a resina estar próxima ao fim de sua validade;
- A realização de testes de tempo de gel com diferentes proporções de iniciador na resina apresentou boa utilidade para planejamento e segurança dos experimentos;
- A determinação da distância da frente de fluxo foi dificultada pela ocorrência do fenômeno do *race tracking*. Novas linhas verticais foram criadas para diminuição de sua influência. Elas tiveram como base os dados das linhas demarcadas sobre os laminados;
- Os laminados foram manufaturados com sucesso durante o processo, todos foram completamente saturados pela matriz. Seu estado após a cura foi considerado satisfatório, não apresentando bolhas e regiões secas;
- O núcleo demonstrou ser um material de ótima aplicação estrutural em alta performance, apresentando baixa fração mássica e alta fração volumétrica no compósito;
- Os *groovings* existentes no núcleo se mostraram um elemento influenciador no direcionamento e velocidade da percolação do fluido;

- Observou-se que a velocidade de distribuição da resina se comportou de maneira similar em ambas as superfícies superior e inferior do compósito, e por consequência admitiu-se a mesma permeabilidade;
- O método do fluxo unidirecional exprimiu todas os cuidados e preparações executadas em uma laminação por infusão a vácuo real;
- Os resultados do cálculo da permeabilidade dos três ensaios foram considerados satisfatórios, com média de $6,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, com desvio padrão de $1,35 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. As diferenças entre os resultados justificaram-se pela dificuldade de repetibilidade do procedimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros relacionados com esse tema:

- Efetuar maior número de ensaios com variações volumétricas de fibra, verificando sua influência na permeabilidade final;
- Verificação da influência dos *groovings* do núcleo na velocidade de impregnação da matriz;
- Comparação entre os métodos de determinação de permeabilidade do fluxo unidirecional com o fluxo radial, observando o comportamento das três direções principais de permeabilidade;
- Verificação da influência do uso de tela de distribuição na permeabilidade;
- Utilização dos dados obtidos experimentalmente neste estudo para validação de métodos numéricos;
- Utilização do plano de laminação e permeabilidade deste estudo para projeto de peça estrutural;
- Utilização dos dados obtidos experimentalmente neste estudo em projeto auxiliado por programa de simulação de fluxo.

REFERÊNCIAS

- ABRATE, Serge. Resin flow in fiber preforms. **Applied Mechanics Reviews**, [s.l.], v. 55, n. 6, p. 579-599, 16 out. 2002. ASME International. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1506323>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- ACMA. **Vacuum Infusion Process**: Arlington: American Composites Manufacturers Association, 2009.
- AL-QURESHI, Hazim Ali. **Materiais Compostos: análises e fabricação**. 1. ed. Florianópolis: CEM/UFSC, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 1200**: Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup. West Conshohocken, 2005. 4 p.
- BEAR, Jacob. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. Nova Iorque: Dover Publications, 1972.
- BROWN, G. O.. Henry Darcy and the making of a law. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 38, n. 7, p. 11-1, jul. 2002. American Geophysical Union (AGU). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2001wr000727>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- CPIC FIBERGLASS. **Produtos**. Disponível em: <http://cpicfiber.com.br/#produtos>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- DARCY, Henry. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**. Paris, 1856.
- DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2006.
- DEMARÍA, C.; RUIZ, Edu; TROCHU, F.. In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part I: experimental results. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 28, n. 6, p. 797-811, 2007. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.20107>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- DIPROFIBER COMPOSITES (Curitiba). **Materiais de Núcleo**. Disponível em: <https://diprofiber.com.br/materiais-de-nucleo/>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- E-COMPOSITES. **Resina poliéster AZ 14.0**: datasheet. Rio de Janeiro. Ecomposites, 2020. p. 01.
- FERLAND, Pierre; GUITTARD, Dominique; TROCHU, François. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 17, n. 1, p. 149-158, fev. 1996. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.10600>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- GARAY, André Cechin. **Propriedades mecânicas de compósitos estruturas sanduíche moldadas por RTM light e simulação numérica da infiltração**. 2016. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia De Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de

Materiais da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em:
<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/143345/000996430.pdf?sequence=1>.
 Acesso em: 10 ago. 2020.

GDOUTOS, E. E.; PILAKOUTAS, K.; RODOPOULOS, Chris A.. **Failure Analysis of Industrial Composite Materials**. Michigan: Mcgraw-hill Professional, 2000.

GEBART, B. Rikard; LIDSTRÖM, Peder. Measurement of in-plane permeability of anisotropic fiber reinforcements. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 17, n. 1, p. 43-51, fev. 1996. Wiley.

GEORGE, Andrew. **Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: simulation and characterization strategies**. 2011. 245 f. Tese (Doutorado) - Curso de Aerospace Engineering and Geodesy, Institute of Aircraft Design, University of Stuttgart, Stuttgart, 2011.

GREENE, Eric. **MARINE COMPOSITES**. 2. ed. Annapolis: Eric Greene Associates, 1999.

JHAN, Yu-ti; LEE, Ya-jung; CHUNG, Cheng-hsien. Experimental and numerical investigation of the VARTM process with a sandwich structure. **Journal of Composite Materials**, [s.l.], v. 46, n. 12, p. 1417-1430, 21 set. 2011. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998311418703>. Acesso em: 19 fev. 2020.

KAW, Autar K. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2006.

LOPES, Inês Abreu Freire. **Estudo do Processo de Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos: produção de tampa de bagageira para autocarro**. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de 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: 4 fev. 2020.

MAZUMDAR, Sanjay. **Composites Manufacturing: materials, product, and process engineering**. Boca Raton: Crc Press, 2002.

NASSEH, Jorge. **Barcos: métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2007.

NASSEH, Jorge. **Técnica e Prática de Laminação em Composites**. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2008.

PATIÑO, Iván; VARGAS, Carlos; VANEGAS, Juan. Methods for permeability measurements of fibrous reinforced preforms. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, Medellín, v. 72, p. 186-202, set. 2014.

SHARMA, Sanjay; SIGINER, Dennis A.. Permeability Measurement Methods in Porous Media of Fiber Reinforced Composites. **Applied Mechanics Reviews**, [s.l.], v. 63, n. 2, p. 13-32, 22 fev. 2010. ASME International. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4001047>. Acesso em: 23 nov. 2019.

SCHEIDEGGER, Adrian E.. **The Physics of Flow Through Porous Media**. 3. ed. Toronto Buffalo: University Of Toronto Press, 1974.

SILVA, Fernando Daniel Ribeiro da. **Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/85562/2/146221.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2019.

SOZER, E. Murat; SIMACEK, Paval; ADVANI, Suresh G.. Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites. In: ADVANI, Suresh G.; HSIAO, Kuang-ting (ed.). **Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)**. Philadelphia: Woodhead, 2012. p. 245-309.

SWERY, Elinor e *et al.* Efficient experimental characterization of the permeability of fibrous textiles. **Journal of Composite Materials**, [s.l.], v. 50, n. 28, p. 4023-4038, 28 jul. 2016. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998316630801>. Acesso em: 12 fev. 2020.

VERNET, N. et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: benchmark ii. : Benchmark II. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 61, p. 172-184, jun. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.010>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ANEXO A - INFORMAÇÕES DA RESINA AZ 14.0

Figura 36 - Datasheet AZ 14.0

Propriedade	Unidade	Valor
Viscosidade Brookfield (25°C/LVF sp 2/30 rpm)	cps	150-190
Gel Time (25°C c/ 1,0 g MEK-P em 100 g resina)	minutos	20- 25
Intervalo Pico	minutos	max. 12
Pico Exotérmico	°C	max. 175
Índice de Acidez (em solução)	mg KOH/g de resina	max. 30
Aspecto	-	turvo
Cor (curada)	-	castanha
Teor de Sólidos	%	min. 55

Obs: Os valores das propriedades acima obtidos resultam da resina AZ 14.0 na sua forma original (padrão) Qualquer produto adicionado à mesma, afetará tais valores. O catalisador (MEK-P) usado, possui teor de oxigênio ativo de 8,9 a 9,1% e umidade máxima de 3%. CURA: Usar MEK-P como catalisador num teor que pode variar de 0,7 à 2,0%. A escolha do teor de MEK-P está diretamente ligada à espessura e volume da peça, bem como à temperatura ambiente.

Fonte: E-composites (2020).