



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

BRUNO HENRIQUE SAMPAIO COLARES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA DE RESINA ASSISTIDA A VÁCUO NA INDÚSTRIA EÓLICA**

FORTALEZA

2021

BRUNO HENRIQUE SAMPAIO COLARES

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA DE RESINA ASSISTIDA A VÁCUO NA INDÚSTRIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C649m Colares, Bruno Henrique Sampaio.

Modelagem e simulação numérica do processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo na indústria eólica / Bruno Henrique Sampaio Colares. – 2021.
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcondes.

Coorientação: Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva.

1. Simulação . 2. Compósito. 3. Permeabilidade . 4. Porosidade . 5. Infusão . I. Título.

CDD 669

BRUNO HENRIQUE SAMPAIO COLARES

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA DE RESINA ASSISTIDA A VÁCUO NA INDÚSTRIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Marcondes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva (Coorientador)
Instituto Federal do Ceará - Crateús (IFCE)

Dr. Fabio Coffani dos Santos de Siqueira
Universidade de São Paulo (USP) - Aeris Energy

A minha mãe Carmelita pelo apoio e suporte em minhas escolhas, me dando forças para perseguir meus sonhos. Ao meu pai Carlos e minha irmã Carla, que as suas presenças significaram parte importante nessa caminhada. Ao meus avós Carmelita, Valdir, Maria e Hélio pelo exemplo de pessoas que foram para mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Marcondes por me orientar em meu trabalho de conclusão de curso e pela ajuda na revisão e correção de todo o trabalho escrito.

Ao Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva pela orientação e suporte nas simulações. Sua disponibilidade em ajudar e seus ensinamentos foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Fábio Coffani dos Santos Siqueira, engenheiro de infusão da Aeris Energy, por tornar este trabalho possível e por todo suporte na parte experimental, na modelagem matemática e na simulação computacional.

A Dr. Andre Garay e ao Dr. Felipe Luz pela ajuda e pelas dicas valiosas para as soluções dos problemas enfrentados ao longo do trabalho.

A Célula de infusão da V150, principalmente ao engenheiro Leandro Freires dos Santos por ter me recebido, sido meu tutor e compartilhado comigo seus conhecimentos técnicos e de vida.

Ao time da Engenharia de Reparos, principalmente Leolincoln Correia e João Otoni que me receberam como estagiário. O conhecimento compartilhado pelos dois foi essencial para o meu desenvolvimento dentro da empresa.

Ao líder de manutenção de moldes, Francisco Xavier, que me ajudou a construir a mesa de experimentos e ao processista Wesley, pela ajuda na montagem dos planos de infusão.

A toda minha família, ao meu pai Carlos, minha mãe Carmelita, a minha irmã Carla pelo apoio durante o período da graduação, e aos meus avós maternos e paternos pelo exemplo de humildade, honestidade e superação.

A minha namorada Gabriela Carvalho por todo carinho e amparo durante esse período. Sua presença foi essencial para mim nessa caminhada.

Aos amigos de vida, Leonardo Linhares, Thiago Isaías, Bruno Ribeiro e Leolincoln Correia por todos os bons momentos compartilhados.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará.

A Universidade Federal do Ceará por proporcionar um ensino superior público e de qualidade e a Aeris Energy por viabilizar toda estrutura, materiais e equipamentos necessários.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Este trabalho visa estudar o escoamento em um meio poroso (fibroso) durante o processo de Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (VARTM) utilizando o software comercial Ansys Fluent que é um programa de simulação numérica CFD que soluciona problemas de comportamento e escoamento de fluidos através de métodos numéricos baseados em volumes finitos. Foram utilizados dados experimentais, empregando o tecido de fibra de vidro Biax 1200, que possui orientação de suas tramas em 80°. O material escolhido foi impregnado por óleo de bomba de vácuo por injeção radial em uma mesa de experimentos construída para o ensaio. Diversos experimentos foram repetidos buscando manter sempre as mesmas condições a fim de observar o efeito no comportamento do fluxo e levantar informações precisas para o cálculo de permeabilidade baseado no método de Hirt e Adams. Com estes dados, alimentou-se o Ansys-Fluent utilizando a equação de Darcy, e foram realizadas análises numéricas para todos os casos experimentais. Os resultados de porosidade, permeabilidade e variação da fração volumétrica das fases presentes são apresentados e analisados. Ao fim, verificou-se uma excelente concordância entre os resultados numéricos e experimentais (máxima diferença inferior a 5%).

Palavras-chave: VARTM, Infusão, Compósito, Tecido, Porosidade, Permeabilidade, Fibra de Vidro, Matriz Polimérica, Simulação Numérica.

ABSTRACT

This work aims to study the flow of a fluid in a porous (fibrous) medium during the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process using the commercial software Ansys Fluent which is a CFD numerical simulation program that solves behavior and fluid flow problems through numerical methods based on finite volumes. Experimental data was carried out, using the Biax 1200 fiberglass fabric, which has an orientation of its wefts at 80°. The chosen material was impregnated with vacuum pump oil by radial injection on an experiment table built for the test. Several experiments at the same conditions were developed in order to observe the effect of the flow behavior and to gather accurate information for the calculation of permeability based on the Hirt and Adams method. With this data, Ansys-Fluent was configured using the Darcy equation, and numerical analyzes were made for all experimental cases. Results of porosity, permeability and variation of the volumetric fraction of the present phases are presented and analyzed. In the end, there was an excellent agreement between the numerical and experimental results (maximum difference less than 5%).

Keywords: VARTM, Infusion, Composite, Fabric, Porosity, Permeability, Fiberglass, Polymeric Matrix, Numerical Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição dos tecidos que compõem um laminado	19
Figura 2 – Orientação dos tecidos que compõem um laminado	20
Figura 3 – Esquemático do processo VARTM	22
Figura 4 – Divisões de uma pá eólica	23
Figura 5 – Componentes da permeabilidade no plano (K_1 e K_2) e transversal (K_3)	28
Figura 6 – Método do fluxo linear (1D)	30
Figura 7 – Método do fluxo radial (2D)	31
Figura 8 – Fluxo isotrópico a esquerda e anisotrópico a direita	31
Figura 9 – Diagrama para o cálculo das permeabilidades pelo modelo de Hirt e Adams para o método do fluxo radial com pressão constante	34
Figura 10 – Esquemático da mesa de experimento feito no Autocad	38
Figura 11 – Vista superior da mesa utilizada no experimento	39
Figura 12 – Vista inferior da mesa de experimento realçando os bicos de vácuo adaptados	40
Figura 13 – Ficha técnica com as propriedades típicas do óleo para bomba de vácuo utilizado no experimento	40
Figura 14 – Tecido Biax 1200 utilizado no experimento com aspecto normal	41
Figura 15 – Tecido Biax 1200 apresentando esgarçamento	41
Figura 16 – Bomba de vácuo utilizada no experimento	42
Figura 17 – Mesa de experimentos montada	43
Figura 18 – Tecido centralizado na mesa de experimentos	43
Figura 19 – Método de medição utilizando o gabarito e a elipse no Autocad	44
Figura 20 – Valores das posições de descolamento em função do tempo de experimento	45
Figura 21 – Dimensão de entrada física do fluido e sua extensão elíptica correspondente	46
Figura 22 – Gráfico dos resultados das equações ξ_{f1} e ξ_{f2} representados por F1 e F2 respectivamente	46
Figura 23 – Gráfico da regressão linear do método dos quadrados mínimos utilizada para se obter a equação da reta	47
Figura 24 – Geometria do tecido utilizado nos experimentos	49
Figura 25 – Malha não-estruturada gerada para realização das simulações computacionais	50
Figura 26 – Relação entre gramatura e porosidade (ϕ) do tecido Biax 1200	52
Figura 27 – Sentido de propagação do fluido	54

Figura 28 – Curvas não ajustadas para o conjunto de dados calculados e o método dos quadrados mínimos	55
Figura 29 – Curvas ajustadas para o conjunto de dados calculados e o método dos quadrados mínimos	56
Figura 30 – Comparativo entre experimento e simulação. Em vermelho é retratado 100% da fase representada pelo óleo e em azul o tecido não impregnado.	57
Figura 31 – Comparativo do deslocamento do fluido em X no experimento e na simulação	59
Figura 32 – Comparativo do deslocamento do fluido em Y no experimento e na simulação	60
Figura 33 – Bordos da pá eólica indicados pelas setas em vermelho	61
Figura 34 – Esgarçamento nas laterais do tecido Biax 1200 indicado pela seta em vermelho	62
Figura 35 – Tecido seco presente no bordo de fuga da pá eólica	63
Figura 36 – Tecido seco presente no bordo de ataque da pá eólica	63
Figura 37 – Reforço esbranquiçado (<i>drop esbranquiçada</i>)	64
Figura 38 – Laminado Opaco	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de entrada para os cálculos de porosidade e permeabilidade	48
Tabela 2 – Valores dos resultados experimentais	53
Tabela 3 – Valores do erro experimental em comparação com a simulação	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Materiais Compósitos	18
2.2	Fase Matriz e Fase Dispersa	18
2.3	Tecidos de Fibra de Vidro	19
2.4	Fração Volumétrica de Fibra	20
2.5	Moldagem Líquida de Compósitos	21
2.6	VARTM (Infusão)	21
2.7	Processo de fabricação de pás eólicas	23
2.8	Escoamento em Meios Porosos	24
2.9	Lei de Darcy	25
2.10	Porosidade	26
2.11	Permeabilidade	27
2.12	Isotropia e Anisotropia	29
2.13	Relação da Permeabilidade com a Porosidade	29
2.14	Medidas de Permeabilidade no Plano	29
2.14.1	<i>Método do Fluxo Linear (Fluxo Unidirecional 1D)</i>	30
2.14.2	<i>Método do Fluxo Radial (2D)</i>	30
2.15	Fenômenos de Transporte no Processo VARTM	34
2.16	Análise Numérica	36
2.17	Discretização - Método dos Volumes Finitos	36
2.18	<i>Volume of Fluid - VoF</i>	37
3	METODOLOGIA	38
3.1	Materiais	38
3.2	Método Experimental	38
3.3	Cálculo da Permeabilidade e da Porosidade	44
3.3.1	<i>Análise Dimensional</i>	48
3.4	Simulação Computacional	49
4	RESULTADOS	52
4.1	Resultados de Porosidade	52

4.2	Resultados de Permeabilidade	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Um compósito é formado por uma combinação de dois ou mais materiais distintos para formar um novo material de propriedades aprimoradas (BARBERO, 1998). Os Compósitos poliméricos consistem em duas fases distintas: uma fase dispersa, também chamada de reforço (na forma de fibras ou particulados) e uma fase de matriz (polímero termoplástico ou termofixo). Suas propriedades variam em função das combinações dos dois componentes, do tipo de matriz, do tipo e forma do reforço e do método de processamento aplicado (LUZ, 2011).

O interesse na utilização de Compósitos de Matriz Polimérica (PMCs) vem crescendo principalmente devido ao seu baixo custo de fabricação aliado a boas propriedades mecânicas. PMCs estão se tornando uma escolha viável para substituir outros materiais em uma variedade de setores, como aeronáutico, naval, automotivo, construção, e estão se expandindo para novas aplicações como o eólico.

Existem algumas técnicas de fabricação de PMCs econômicas, incluindo fabricação de compósito líquido (LCM), moldagem por transferência de resina (RTM) e moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM), que oferecem potencial para a produção de peças em série, capacidade de fabricação de compósitos grandes e de formas complexas, com bom acabamento superficial e menores ocorrências de defeitos (SHAH; CHAUDHARYE, 2020).

O processo VARTM é composto pela acomodação das camadas de fibra vidro, impregnação com resina e cura. O reforço fibroso é colocado sobre um molde, que é selado por um saco de vácuo flexível (ou plástico de vácuo). A retirada do ar do meio se dá pela ligação de bombas de sucção através de mangueiras nas saídas de ar do molde para realização do vácuo. Esse procedimento fornece o mecanismo para preparar o tecido de fibra, ou *preform*, para a transferência da resina até a peça, através de entradas de alimentação.

Além do gradiente de pressão causado pelo vácuo, os efeitos da gravidade e do fluxo capilar também devem ser considerados. O tempo de infiltração do *preform* é uma função da viscosidade da resina, da permeabilidade e do gradiente de pressão aplicado (GRIMSLEY *et al.*, 2001).

O VARTM oferece uma redução significativa no custo ferramental do processo, portanto é um técnica recomendada para a fabricação de compósitos para grandes estruturas, como cascos de navios e pás eólicas. Outra vantagem deste processo é que o vácuo empregado proporciona um aumento significativo nas propriedades mecânicas do laminado pois diminui a quantidade de vazios presentes.

No entanto, este processo pode ser crítico, uma vez que é necessário garantir o banho adequado do material fibroso para se obter uma alta porcentagem do volume de fibra em todo o volume do material compósito reforçado (DEREK, 1981). A impregnação incompleta da resina pode causar diversos tipos de defeitos como tecidos secos e semi-secos (SHAH; CHAUDHARYE, 2020). Além disso, algumas características inerentes ao *preform*, como permeabilidade e porosidade, influenciam no escoamento do fluido. A permeabilidade é uma propriedade usada para quantificar a facilidade com que um fluido é capaz percorrer um meio poroso. Essa propriedade é em função do material do tecido e da compressão imposta pelo fechamento do molde (HÄRTER *et al.*, 2017).

Definir a permeabilidade e porosidade desses materiais é complexo e requer diversos experimentos de alta precisão. Com base nisso, este trabalho tem como objetivo validar o valor de permeabilidade e porosidade de uma fibra de vidro utilizada por um fabricante de pás eólicas e assim compreender as variáveis que influenciam o processo VARTM. A metodologia utilizada se baseia na medição radial do escoamento de um fluido no *preform* e simulações utilizando o software CFD Ansys-Fluent. Os resultados obtidos neste trabalho serão utilizados para alimentar modelos de simulação mais complexos que buscam reduzir custos e perdas de modificação no processo VARTM.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Materiais Compósitos

Materiais compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais distintos com o objetivo de se alcançar propriedades, físicas ou químicas que são superiores aos seus constituintes isoladamente. Os componentes principais de um compósito são sua fibra e sua matriz. As fibras provêm a maior parte da resistência mecânica e rigidez, e a matriz une as fibras de modo que haja transferência de cargas entre elas (BARBERO, 1998).

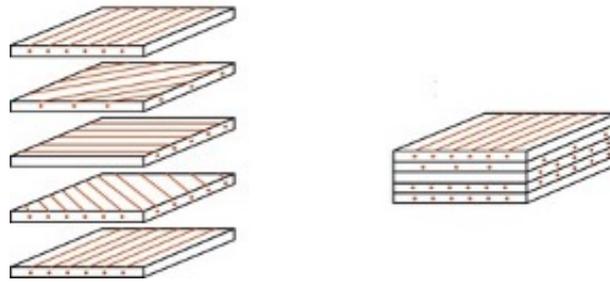
Callister e Rethwisch (2018) definem compósito como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é obtida. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por um arranjo criterioso de dois ou mais materiais distintos. As fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma fase distinta. Padilha (1997) cita que os materiais compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais.

2.2 Fase Matriz e Fase Dispersa

Em sua maioria, os materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases: uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve outra fase, chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são funções das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa.

O reforço estrutural laminado, ou *preform*, é composto por diversas laminas de tecido de fibra de vidro (BALIEIRO, 2017). As camadas são empilhadas, conforme apresentado na Figura 1, alternando as direções preferencias das laminas, garantindo assim diferentes propriedades no plano. Esse material é amplamente utilizado na indústria naval e eólica, e sua aplicação tem como objetivo fabricar peças com uma alta resistência e rigidez em relação ao peso.

Figura 1 – Disposição dos tecidos que compõem um laminado



Fonte: Elaborado pelo autor

As fibras de vidro que constituem os tecidos são disponibilizadas em diferentes formatos, são compostas por sílica (SiO_2) e uma variedade de óxidos metálicos. Fibras do tipo vidro-E são as mais comuns e possuem boa capacidade de isolamento elétrico, boas propriedades mecânicas, menor custo e são utilizadas onde uma alta resistência a tração e uma boa resistência química são necessárias, como reforços de componentes estruturais. Fibras do tipo vidro-C são mais caras, possuem alta resistência a corrosão química, mas menor resistência mecânica que as do tipo E (WOODHEAD, 1994).

A Fibra de vidro-H é uma fibra de densidade mais baixa em comparação com uma vidro-E e vidro-S, o que reduz assim o peso geral dos laminados curados. Essa fibra é mais elástica, tem maior resistência à compressão e características de resistência específicas em comparação com as fibras de vidro-E (GMBH, 2010).

As fibras de vidro em sua maioria possuem rigidez semelhante, mas diferentes resistências mecânicas que são atribuídas ao baixo número e tamanho de defeitos em suas superfícies.

2.3 Tecidos de Fibra de Vidro

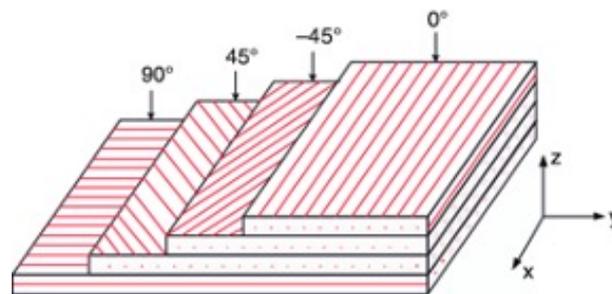
A estrutura do tecido possui importantes efeitos nas propriedades mecânicas que são obtidas pelos compósitos. As propriedades mecânicas dos laminados baseado no padrão de reforço do tecido são afetadas pela costura e pela crimpagem da fibra. Estas características também influem no escoamento do fluido no meio.

Os tecidos não-crimpados (NCFs) mais utilizados comercialmente utilizam um fio secundário para conectar fibras de diferentes orientações com propriedades mecânicas aprimoradas. Outra vantagem oferecida pelos tecidos não crimpados é a variedade de orientações das fibras que podem ser obtidas. Os NCFs em sua maioria são produzidos usando máquinas

especializadas.

São fabricados tecidos com até quatro grupos de fibras com orientações (θ°) de 0° , 90° , entre 30° e 60° , e em alguns casos 80° . Os tecidos disponíveis comercialmente são produzidos em uma variedade de configurações, incluindo Unidirecional $0^\circ/90^\circ$, Biaxial $\pm 45^\circ$, Triaxial ($0^\circ/\pm 45^\circ$) e Quadriaxial ($0/90/\pm 45^\circ$), as direções preferenciais desses materiais podem ser visualizada através da Figura 2.

Figura 2 – Orientação dos tecidos que compõem um laminado



Fonte: Elaborado pelo autor

Os tecidos de fibra de vidro podem possuir diferentes gramaturas. Essa propriedade consiste na medida de peso que corresponde à densidade do tecido, ou seja, é a quantidade de fibra por área dado em $\frac{g}{m^2}$, dessa maneira, quanto maior a gramatura mais denso será o tecido. É importante ressaltar que este valor é completamente diferente da espessura.

A espessura de tecidos com a mesma gramatura pode alternar. Esta variação tem origem na compactação das fibras e muda de um tecido para outro. Quanto mais pesado o tecido, mais resina será necessário para umedecê-lo.

Este trabalho se concentra na análise do Biax 1200, conhecido também como T80, por suas fibras possuírem uma orientação de aproximadamente 80° . Este tipo de reforço não é muito comum na indústria e suas propriedades foram pouco estudadas.

2.4 Fração Volumétrica de Fibra

A quantidade de fibra em um material (V_f), é a fração volumétrica do compósito que consiste em reforço. As propriedades mecânicas dominadas pela fibra devem sempre ser analisadas juntamente com V_f (GEORGE, 2018). O inverso do teor de volume da fibra é a porosidade (ϕ) que representa a relação de volume de espaços vazios no compósito. A propriedade de resistência por peso também é influenciada pela proporção de fibra.

Para que o compósito suporte os esforços definidos em seu projeto é necessário que cada uma de suas fibras esteja completamente impregnada pela resina polimérica. Propriedades superiores são obtidas quando a resina se encontra na quantidade mínima necessária para molhar todas as fibras.

Outro problema relativo a impregnação é a minimização de vazios. Mesmo aplicando gradientes de pressão maiores sempre existirá alguma quantidade de volume de ar, denominado conteúdo de vazios, V_0 . Para um determinado aumento no V_0 , as propriedades dominadas pela matriz geralmente diminuem em uma certa proporção (JUDD, 1978).

2.5 Moldagem Líquida de Compósitos

A Moldagem líquida de compósitos (LCM) se caracteriza como um conjunto de processos que incluem impregnação por gravidade, por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM), moldagem por transferência de resina (RTM) e moldagem por injeção de reação estrutural (SRIM).

Esses processos compartilham em comum a capacidade da introdução de uma resina líquida em um molde sob um gradiente de pressão, que pode ser estabelecido ao se aplicar um vácuo, uma fonte externa com elevada pressão, ou um dispositivo como uma bomba ou vaso de pressão.

Os processos de Moldagem líquida de Compósitos (LCM) deverão conter:

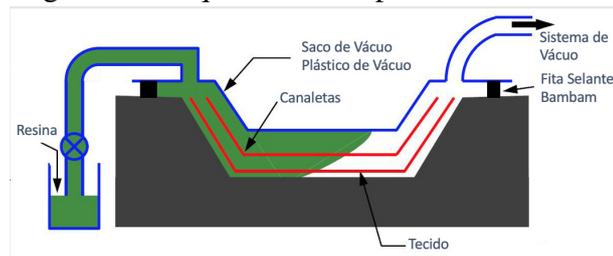
- 1 Um sistema de alimentação de resina;
- 2 Um sistema de manuseio das fibras;
- 3 Um molde;
- 4 Um sistema para controle do deslocamento e remoção do ar e do escoamento de resina.

2.6 VARTM (Infusão)

Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM) é uma técnica de moldagem de compósito líquido (LCM) usada para fabricar estruturas em grande escala. O processo VARTM, conhecido também como Infusão de Resina a Vácuo, é uma variante do processo de moldagem por transferência de resina (RTM) e foi desenvolvido para diminuir os custos e dificuldades associada ao ferramental deste processo. Atualmente é uma técnica bastante utilizada tanto na indústria eólica quanto naval.

O princípio da infusão a vácuo, demonstrado no esquemático da Figura 3, é usar pressão negativa para puxar o ar de um molde e, ao mesmo tempo, a resina também é sugada de modo que impregne o reforço. Após essa etapa, a resina remanescente será expelida para fora do molde. Como resultado temos a formação de um laminado com espessuras de camada mais constantes. O material fabricado utilizando esse processo apresenta uma proporção maior de fibra para resina. (SAPUTRA; SETYARSO, 2016).

Figura 3 – Esquemático do processo VARTM



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Shah e Chaudharye (2020) para o VARTM é necessário se trabalhar com três modelos fundamentais:

- 1 Escoamento da resina entre o escalonamento das fibras;
- 2 Compactação e relaxamento do tecido sob condições de vácuo;
- 3 Baixa viscosidade e cura cinética da resina.

O objetivo primário do processo VARTM é a adequada impregnação das fibras do reforço, caso contrário poderão ser produzidas peças com defeitos denominados tecido seco ou semi-seco.

No VARTM, utiliza-se um um saco de vácuo (plástico de vácuo) para garantir a vedação hermética da peça. Uma bomba de vácuo é usada para puxar todo ar do meio. Quando o sistema se encontrar em estanqueidade, a resina irá fluir entre as camadas do tecido. O vácuo continuará atuando até que toda resina gelatine em um processo chamado cura. A peça poderá ser curada em temperatura ambiente ou pela utilização de uma manta térmica.

Em decorrência da baixa pressão de injeção, é comum ser empregue um meio de alta permeabilidade conhecido como *transfer* sobre o tecido para facilitar a distribuição e fluxo de resina. No VARTM a utilização de consumíveis é adotado para diminuir o tempo de molhabilidade do tecido significativamente (SONG *et al.*, 2004).

As vantagens da utilização do processo VARTM compreendem:

- 1 Baixo custo ferramental em decorrência da utilização de um saco de vácuo;
- 2 Menos esforços;
- 3 Fabricação de componentes largos com alta fração de volume de fibra e pouca presença de vazios.

E as desvantagens incluem:

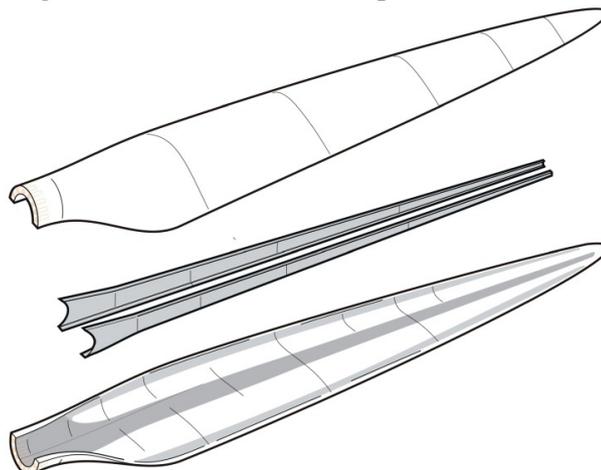
- 1 Processo relativamente complexo e sensível para ser repetido constantemente;
- 2 Podem ser necessários reparo no laminado decorrentes de partes sem correta impregnação;
- 3 As resinas utilizadas devem possuir baixa viscosidade.

2.7 Processo de fabricação de pás eólicas

Durante o processo de fabricação de uma pá eólica, camadas de tecidos de fibras de vidro, são dispostas na direção longitudinal do molde junto com espumas de polímero ou madeira balsa. A maioria das camadas vão da raiz até parcialmente à ponta da pá, com o intuito de formar um laminado espesso no início da pá e fino em sua ponta.

A estrutura de uma pá eólica pode ser observada na Figura 4, a esquerda da imagem se encontra a raiz, a direita a ponta e entre as duas cascas estão em destaque as duas almas de cisalhamento.

Figura 4 – Divisões de uma pá eólica



Fonte: Mishnaevsky *et al.* (2017)

Os tecidos acomodados são posteriormente cobertos por um saco de vácuo e selados hermeticamente. Após a aplicação do vácuo, uma resina de baixa viscosidade irá escoar e molhar as fibras. Ao fim da infusão, a resina cura em temperatura ambiente e às vezes, a peça é

pós-curada em temperaturas elevadas. As cascas e as almas então são coladas, desmoldadas e por fim é realizado o acabamento superficial com lixamento e pintura.

Na maioria dos casos, as pás eólicas são feitas como duas cascas e duas almas de cisalhamento. Em princípio, este método de manufatura é adequado em virtude do aumento das dimensões da pá, uma vez que o número de entradas de resina e pontos de vácuo podem ser aumentados (MISHNAEVSKY *et al.*, 2017). Após a fabricação, as peças são submetidas a um controle de qualidade e os defeitos de produção são reparados.

2.8 Escoamento em Meios Porosos

A lei de Darcy é a equação de referência que descreve a propagação (fluxo) da resina através da fibra de reforço. Para sua aplicação deve-se considerar o fluido como incompressível, em regime laminar escoando através de um meio poroso.

Para interpretar melhor o comportamento deste fluxo é importante compreender a relação de um meio poroso com a permeabilidade.

Para Shamey e Zhao (2014) um meio poroso pode ser definido como um sólido, ou coleção de corpos sólidos, com espaços abertos suficiente em seu interior para permitir que um fluido passe através ou em torno deles. Uma interpretação mais simples considera um meio poroso como um sólido contínuo, que pode possuir vazios que se conectam ou não. O fluido tenderá a passar por esses vazios, se os mesmos estiverem conectados.

A propriedade mais importante de um meio poroso é a sua porosidade, definida como a razão de volume de poros pelo volume total:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

Macroscopicamente a porosidade se caracteriza como o volume efetivo de poros no meio e é diretamente proporcional aos seus respectivos tamanhos.

Na Infusão assistida á vácuo a resina flui através dos reforços que são caracterizados por um entrelaçamento de fibras. Neste meio, uma porção de seu espaço é ocupado por matéria heterogênea e multifásica, onde pelo menos uma das fases não é sólida (resina e ar) e as lacunas que não fazem parte da matriz, são os espaços vazios (LUZ, 2011).

2.9 Lei de Darcy

No processo VARTM ocorre o fluxo planar de um fluido newtoniano e incompressível através das fibras de reforço. A equação aceita para descrever este comportamento é a lei de Darcy (1856), que estabelece que a velocidade do fluido através de um meio poroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido (SCHMIDT *et al.*, 2009). A lei de Darcy foi estendida para descrever o fluxo de uma resina polimérica através de um *preform* fibroso (STADTFELD *et al.*, 2002).

Vazão pode ser definida como a quantidade de fluido que escoar através de um conduto num determinado período de tempo. A vazão em volume pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = vA \quad (2.2)$$

Em que (Q) é a vazão, (v) a velocidade média do fluido e (A) a área da seção transversal do conduto.

Isolando v , temos que:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

Ou seja, a velocidade média do fluido pode ser definida pela divisão da vazão volumétrica pela área da seção transversal do conduto.

Sabendo disso, Darcy estabeleceu que a velocidade do fluido, (v), em um meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão aplicado (ΔP) e inversamente proporcional ao comprimento (ΔL) e viscosidade (μ) do fluido, sendo a constante de proporcionalidade (K), definida como a permeabilidade do meio.

$$\frac{Q}{A} = -\frac{K \Delta P}{\mu \Delta L} \quad (2.4)$$

Negligenciando os efeitos da gravidade, podemos obter a equação dada por:

$$u = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (2.5)$$

Em que (u) é um vetor denominado fluxo de Darcy ou de velocidade média no volume, (ΔP) é o gradiente de pressão, e (K) o tensor permeabilidade. Darcy também estabeleceu que a velocidade do fluido (v) pode ser relacionado ao fluxo pela porosidade (ϕ) :

$$v = \frac{u}{\phi} \quad (2.6)$$

ϕ será um valor entre 0 e 1 o qual representa a fração do volume total do meio no qual o fluxo percorre, podendo ser calculado a partir da fração volumétrica V_f :

$$V_f = 1 - \phi \quad (2.7)$$

É complexo definir a propagação de um fluido na fibra. Existem vários modelos com precisões variadas que tentam prever este comportamento. Diante disto é necessário a repetibilidade de testes com o intuito de se obter variáveis mais precisas para alimentar as equações.

2.10 Porosidade

A porosidade do material de reforço é definida como a fração do volume total da amostra que é ocupada por poros, ou seja, é a medida de espaço vazio em determinado material (FANCHI, 2002). Esta fração indica a quantidade de espaço que pode ser preenchido por um fluido. A porosidade (ϕ) está relacionada à fração de volume da fibra (V_f) pela Equação 2.7, que pode ser reescrita na forma:

$$\phi = 1 - V_f \quad (2.8)$$

Sabendo que V_f é definido como o volume de fibras em relação ao volume total de uma amostra, esse valor poderá ser calculado da seguinte maneira:

$$V_f = \frac{nW_f}{h\rho} \quad (2.9)$$

Em que n é o número de camadas, W_f é a massa do tecido por unidade de área (kg/m^2), h é a espessura (m) da amostra e ρ é a densidade (kg/m^3) da fibra de vidro. W_f , por sua vez, pode ser calculado por:

$$W_f = \frac{W}{nA_f} \quad (2.10)$$

No qual W é a massa (kg) da amostra e A_f é a sua área (m^2). Inserindo a Equação 2.10 em 2.9, e considerando $n = 1$ para tratar o caso de apenas uma camada de tecido, V_f pode ser escrito como:

$$V_f = \frac{W}{hA_f\rho} \quad (2.11)$$

2.11 Permeabilidade

Todos os tecidos podem ser caracterizados através de sua permeabilidade (GEORGE, 2018). A permeabilidade expressa a facilidade em que o fluido percorre um meio (STEENKAMER *et al.*, 1995), é função tanto da estrutura do material quanto de sua porosidade (DARCY, 1856) e deve ser independente de outras condições de fluxo como gradiente de pressão e viscosidade. As relações no meio poroso deverão ser analisadas na interface fluido estrutura fibra do *preform* (RANGANATHAN *et al.*, 1996).

A permeabilidade é um tensor, e está relacionado a resistência ao escoamento do fluido no reforço. Essa propriedade também pode indicar a distribuição do tamanho médio dos poros de um meio poroso, pois estes influem diretamente na resistência ao escoamento. A permeabilidade também é conhecida por condutividade hidráulica, representada pela letra K , e sua unidade no *SI* é m^2 .

Para um material isotrópico, a permeabilidade é caracterizada por um valor escalar, entretanto, para materiais anisotrópicos, a permeabilidade deverá ser expressa por um tensor de segunda ordem.

O tensor de permeabilidade para materiais de reforço pode ser assumido como simétrico (ortotrópico). Isto reduzirá o número de componentes para seis em um sistema de

coordenadas ortogonais arbitrário (SONG *et al.*, 2004).

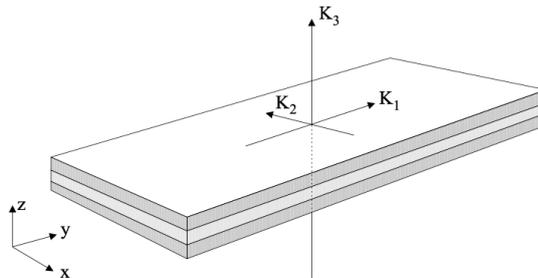
$$K_{arbitrario} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Existe um conjunto de três eixos mutuamente ortogonais onde os componentes do tensor fora da diagonal são iguais a zero. Neste, as três direções de permeabilidade podem ser expressas por três componentes principais K_1 , K_2 e K_3 . Dois dos eixos principais (K_1 e K_2) podem ser assumidos como estando no plano do tecido devido à estrutura em camadas. O último eixo (K_3) é perpendicular à camada do tecido (SONG *et al.*, 2004).

$$K_{principal} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Os componentes K_1 e K_2 de permeabilidade no plano do tecido são chamados de permeabilidade no plano e o componente K_3 perpendicular é chamado de permeabilidade transversal ou de espessura, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Componentes da permeabilidade no plano (K_1 e K_2) e transversal (K_3)



Fonte: Koefoed (2018)

Há uma relação direta entre permeabilidade e porosidade. Se a porosidade for zero, a permeabilidade será igualmente zero. Entretanto, não se pode definir a permeabilidade diretamente da porosidade.

A determinação dos valores de permeabilidade são complexos em decorrência do tipo de material de reforço somado as variáveis presentes no processo real de manufatura. Essa variável pode ser determinada com maior precisão de forma experimental por escoamento retilíneo ou por escoamento radial, com a aplicação da lei de Darcy (SHAMEY; ZHAO, 2014).

2.12 Isotropia e Anisotropia

Dependendo do material de reforço o fluxo pode assumir um comportamento Isotrópico ou Anisotrópico.

Isotropia é uniformidade do fluxo em todas as orientações. A distribuição radial isotrópica possui a mesma intensidade do fluxo, independentemente da direção da medição.

A anisotropia é usada para descrever um fluxo em que seu comportamento varia sistematicamente, dependendo da direção. No caso do meio poroso anisotrópico, a permeabilidade irá atuar de uma forma não ordenada o que irá afetar o comportamento do fluido (KANTZAS *et al.*, 2012).

2.13 Relação da Permeabilidade com a Porosidade

Baixa porosidade geralmente resulta em baixa permeabilidade, mas alta porosidade não implica necessariamente em alta permeabilidade. A explicação se dá pelo fato de que um meio altamente poroso pode possuir pouca ou nenhuma interconexão entre seus poros. Entretanto isso não ocorre nos reforços de fibra de vidro como observado por Fanchi (2002) que através de uma análise de valores de porosidade e permeabilidade em larga escala verificou que essas variáveis estão fortemente correlacionadas e apresentam uma tendência mutua de crescimento.

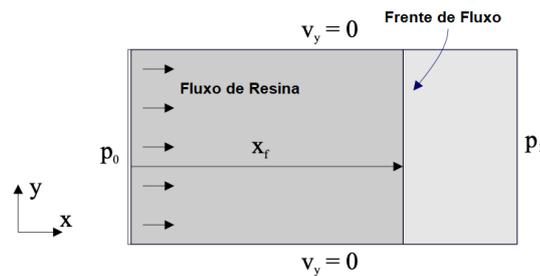
2.14 Medidas de Permeabilidade no Plano

Vários métodos de medição de permeabilidade foram propostos. Estes podem ser classificados de acordo com o comportamento do fluxo e estão relacionados com o número de componentes dimensionais analisados nos testes.

2.14.1 Método do Fluxo Linear (Fluxo Unidirecional 1D)

No método linear ou método do fluxo paralelo, o fluido é injetado em uma mesa de experimentos retangular contendo as fibras do reforço. Considerando que não há fluxo nas laterais da mesa, através deste método é possível obter um comportamento unidirecional do fluido.

Figura 6 – Método do fluxo linear (1D)



Fonte: Koefoed (2018)

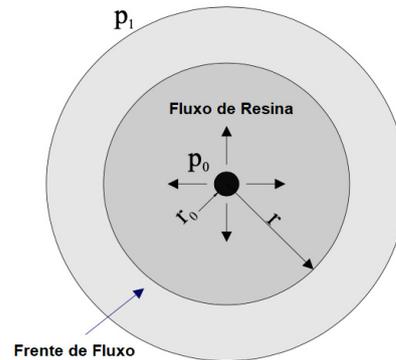
Se o fluxo é retilíneo, ou seja, se a velocidade do fluido tanto em Y quanto em Z são nulas, a lei de Darcy é reduzida para a seguinte expressão:

$$v_x = \frac{Q_x}{A} = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.14)$$

2.14.2 Método do Fluxo Radial (2D)

No método do fluxo radial a entrada é posicionada no meio da amostra como mostrado na Figura 7, e os dados de teste são adquiridos conforme a frente do fluxo se move (DRAPIER *et al.*, 2005). O teste radial oferece duas vantagens principais sobre o método retilíneo. A primeira é que as duas principais permeabilidades no plano são medidas simultaneamente. A segunda é que, o fluxo radial elimina a necessidade de precisão uma vez que não há efeitos do contato do fluido com a parede do molde (RUDD *et al.*, 1997).

Figura 7 – Método do fluxo radial (2D)



Fonte: Koefoed (2018)

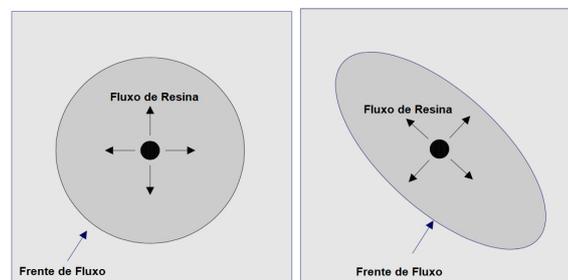
Neste trabalho o método do fluxo radial foi utilizado para definir as componentes bidimensionais do tensor de permeabilidade. No procedimento o fluido é injetado e escoado durante todo o experimento através de uma entrada central em um tecido inicialmente seco, sob pressão constante.

Nessas condições a lei de Darcy pode ser aplicada na forma radial:

$$Q_r = -\frac{KA}{\mu} \frac{dP}{dr} = -\frac{K}{\mu} 2\pi rh \frac{dP}{dr} \quad (2.15)$$

Esta técnica permite enxergar com precisão as frentes de escoamento do fluido no tecido. Como mostrado pela Figura 8, para um material isotrópico o avanço possui formato circular e para um material anisotrópico (ortotrópico) o avanço possui formato elíptico (que é o caso do tecido estudado).

Figura 8 – Fluxo isotrópico a esquerda e anisotrópico a direita



Fonte: Koefoed (2018)

Para um material anisotrópico, as permeabilidades podem ser calculadas a partir da permeabilidade isotrópica equivalente medindo os eixos da elipse frontal de fluxo (NEDANOV; ADVANI, 2002).

As permeabilidades no plano podem ser definidas através do método de Hirt *et al.* (1987). O qual inclui a mensuração dos comprimentos dos eixos X e Y em relação ao tempo para solucionar duas equações diferenciais e calcular o fluxo nas direções principais.

O algoritmo da Figura 9, apresentado por Rudd *et al.* (1997), foi utilizado para estabelecer os valores de permeabilidade da fibra estudada, o qual devem ser calculados para o tecido a partir do comprimento da frente do fluxo (os índices 1 e 2 se referem às direções X e Y respectivamente):

$$\frac{d\xi_{f1}}{dt} = \frac{K_1(P_0 - P_r)}{\phi \mu R_0^2} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f1} - \xi_0)(\cosh^2 \xi_{f1})} \quad (2.16)$$

$$\frac{d\xi_{f2}}{dt} = \frac{K_1(P_0 - P_r)}{\phi \mu R_0^2} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f2} - \xi_0)(\cosh^2 \xi_{f2} - 1)} \quad (2.17)$$

Em que ξ_{f1} e ξ_{f2} são as extensões elípticas das frentes de fluxo principais, que são obtidas através das Equações 2.18 e 2.19:

$$\xi_{f1} = \sinh^{-1} \left[\frac{R_{f1}}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.18)$$

$$\xi_{f2} = \cosh^{-1} \left[\frac{R_{f2}}{R_0} (1 - \alpha)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.19)$$

- R_{f1} e R_{f2} são o raios da frente do escoamento do fluido ao longo dos eixos principais do fluxo
- R_0 é o raio da entrada
- α é o grau de anisotropia do fluxo ($\frac{K_1}{K_2}$)
- ξ_0 é a extensão elíptica de entrada, dado por:

$$\ln \left[\frac{(1 + \sqrt{\alpha})}{\sqrt{(1 - \alpha)}} \right] \quad (2.20)$$

- P_0 e P_r são as pressões na entrada e de frente de fluxo
- ϕ é a porosidade do material

As Equações 2.16 e 2.17 não podem ser resolvidas diretamente usando os dados experimentais, sendo necessário estimar o grau de anisotropia (α) e buscar a solução para a permeabilidade de forma iterativa usando um método numérico.

Podemos desenhar dois gráficos a partir das Equações 2.16 e 2.17, sendo:

$$y = \frac{d\xi_{f1,2}}{dt} \quad (2.21)$$

$$x = \frac{1}{(\xi_{f1} - \xi_0)(\cosh^2 \xi_{f1})}, \frac{1}{(\xi_{f2} - \xi_0)(\cosh^2 \xi_{f2} - 1)} \quad (2.22)$$

E a curvatura (m) será dada por:

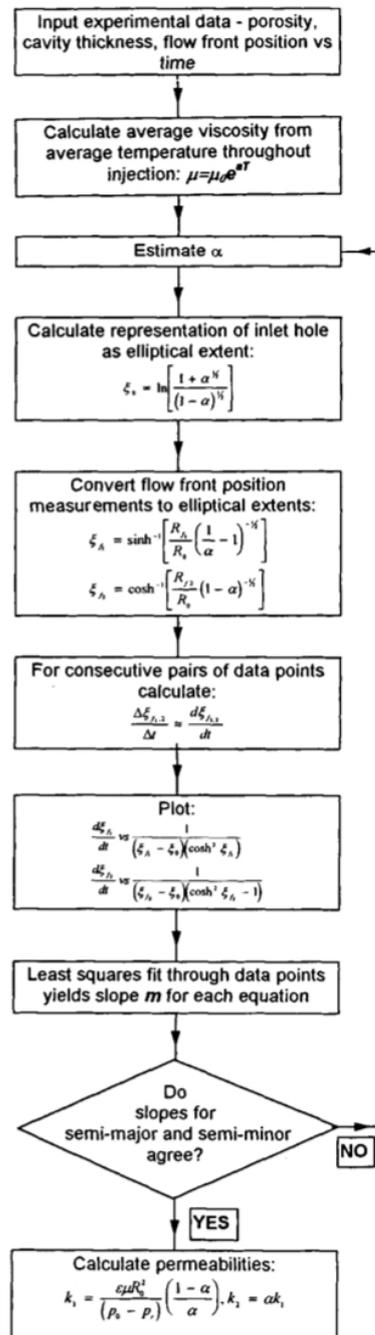
$$m = \frac{K_1(P_0 - P_r)}{\phi \mu R_0^2} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (2.23)$$

Para um determinado valor de α as curvaturas das linhas deverão iguais e K_1 e K_2 poderão ser calculados através das fórmulas:

$$K_1 = \frac{\phi \mu R_0^2}{P_0 - P_r} \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \quad (2.24)$$

$$K_2 = \alpha K_1 \quad (2.25)$$

Figura 9 – Diagrama para o cálculo das permeabilidades pelo modelo de Hirt e Adams para o método do fluxo radial com pressão constante



Fonte: (RUDD *et al.*, 1997)

2.15 Fenômenos de Transporte no Processo VARTM

Fluxo, calor e massa são influenciados pela microestrutura do meio poroso (VAFAI, 2015). Usam-se as propriedades média do volume elementar para representar o comportamento macroscópico dos vazios no sistema (LUZ, 2011).

Variáveis de macroescala podem ser pensadas como campos regularizados dos

campos de microescala. Reações de transferência isotérmica de massa são baseadas nas equações de continuidade das espécies na forma molar.

A lei de Darcy vem sendo aplicada para fluxos através de um meio poroso quando o número de Reynolds baseado no tamanho dos vazios é bem pequeno. Neste caso, a equação do momento para um fluido passando por um meio isotrópico

$$-\nabla P = \frac{\mu u}{K} \quad (2.26)$$

Em que P é a pressão no poro, μ a viscosidade do fluido e u a velocidade de Darcy, que pode ser classificada como velocidade superficial ao considerar o meio sendo contínuo e ignorando os detalhes da estrutura porosa. A permeabilidade é dada por:

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{a(1-\phi)^2} \quad (2.27)$$

Onde ϕ é a porosidade e a é a constante para parametrizar a geometria microscópica de um material poroso.

A transferência de calor em um meio poroso é por condução quando o fluido permanece estático. Assumindo o equilíbrio entre o fluido e a fase sólida, suas temperaturas podem ser consideradas iguais e as equações de condução de calor calculadas sobre as fases podem ser agrupadas na seguinte equação:

$$(\rho c_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} = [K_{st} \nabla T] \quad (2.28)$$

Sendo T é a temperatura média e K_{st} a condutividade térmica estacionária. A capacidade de calor efetiva da mistura do sólido e fluido $(\rho c_p)_m$ é definida como:

$$(\rho c_p)_m = \phi \rho c_p + (1 - \phi) \rho_s c_{ps} \quad (2.29)$$

Onde ρc_p e $\rho_s c_{ps}$ são as capacidades caloríficas do fluido e do sólido sendo, respectivamente, ρ e ρ_s suas densidades.

2.16 Análise Numérica

A simulação computacional (método numérico) é capaz de solucionar problemas complicados, com contornos definidos em geometrias complexas e gerando resultados em um relativo curto período de tempo (LUZ, 2011). Para a implementação destas simulações é necessário desenvolver um modelo matemático adequado ao processo de manufatura de materiais compósitos juntamente com a experimentação em laboratório de parâmetros reais do processo.

Os softwares de simulação computacional são meios utilizados para a resolução dos modelos e equações relacionados ao transporte de fluídos em meios porosos, bem como para prever impregnação do material de reforço por um determinado fluido. O intuito da utilização desses programas é analisar o tempo de avanço e preenchimento da resina no interior do molde, que deve ficar abaixo do tempo de cura (TAN *et al.*, 2007), avaliar pontos de impregnação deficientes, além de determinar entradas e saídas de resina/ar mais adequados (GREVE; PICKETT, 2006).

A simulação de processos tem um valor considerável na avaliação dos parâmetros de produção e na melhoria da qualidade dos produtos manufaturados. Para este trabalho as simulações foram realizadas através do software Ansys-Fluent que utiliza um solucionador baseado em volumes finitos.

2.17 Discretização - Método dos Volumes Finitos

Computational Fluid Dynamics (CFD) é um conjunto de métodos numéricos aplicados para se obter soluções aproximadas de dinâmica dos fluidos, transferência de calor, transferência de massa e reações químicas. O Ansys-Fluent é um código CFD, no qual o domínio é discretizado em um número finito de volumes de controle e as equações gerais, partindo da forma integral da equação da conservação, são solucionadas (MATSSON, 2020).

No centro de cada volume de controle localiza-se um nó onde são calculados os valores das variáveis. Na superfície esses valores são obtidos por interpolação em função dos nós (centro do volume de controle). As integrais de volume e de superfície são aproximados e as equações de transporte, ou de conservação, são integradas em cada volume.

Como resultado, obtém-se uma equação algébrica discretizada para cada volume de controle, na qual aparecem os valores das variáveis do nó e dos seus vizinhos (malha computacional). As equações obtidas deste modo expressam a conservação das propriedades no

escoamento.

O método dos volumes finitos pode ser aplicado a qualquer tipo de malha e se adapta bem a geometrias complexas. Devido a geometria utilizada nas simulações, este trabalho emprega malhas não-estruturadas, as quais são compostas por elementos quadriláteros (MALISKA, 2004).

2.18 Volume of Fluid - VoF

O modelo VoF possibilita modelar dois ou mais fluidos imiscíveis através da solução das equações de conservação do momento e de análise da fração volumétrica de cada fluido em todo o domínio (FLUENT, 2009).

Este modelo parte da premissa que os fluidos não se misturam, de modo que para cada fase adicionada será criada uma variável referente a sua fração volumétrica. Posto isto, em cada volume de controle, a soma das frações volumétricas das fases será igual a um, e as propriedades dos fluidos serão compartilhadas pelas fases e representadas pela média ponderada da fração volumétrica de cada uma (PORTO; ANDRADE, 2015).

A definição das interfaces entre as fases é realizado pela solução da equação da continuidade para as suas frações volumétricas, conforme a equação:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.30)$$

Em que t é o tempo, ρ_q , a massa específica, v_q , a velocidade da fase q , \dot{m}_{qp} , o fluxo mássico da fase q para a fase p e \dot{m}_{pq} é a transferência de massa da fase p para a fase q .

A equação de fração volumétrica não pode ser solucionada para a fase primária. Desta forma, conhecendo-se os valores das frações volumétricas da fases secundárias, é possível definir o valor da fase primária pela equação:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.31)$$

3 METODOLOGIA

O seguinte trabalho foi dividido em duas partes:

- 1 Materiais e métodos utilizados para os experimentos;
- 2 Metodologia para utilização do software Ansys-Fluent.

3.1 Materiais

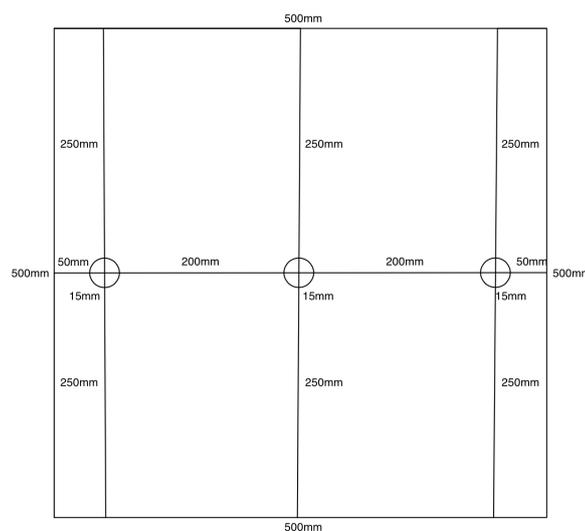
Os materiais utilizados no experimento, foram:

- Óleo para lubrificação de bombas de alto vácuo (Mobil Vacuum Pump Oil);
- Tecido Biaxial ($\pm 80^\circ$) de fibra de vidro-H, de gramatura $1200 (g/m^2)$, da Owens Corning;
- Bomba de vácuo Busch de palheta rotativa R5 RA 0063/0100 F;
- Mangueiras 3/4 de polegada, válvulas e juntas de conexão.

3.2 Método Experimental

Para estabelecer os valores de permeabilidade e porosidade do tecido de fibra de vidro utilizado no estudo, foi construído uma mesa de injeção radial baseado nos experimentos encontrados na literatura e conforme o esquemático apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Esquemático da mesa de experimento feito no Autocad



Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado pela Figura 10 a mesa possui 500mm de largura por 500mm de comprimento e 10mm de espessura. Os três bicos de vácuo são de 15mm de diâmetro e estão separados por 200mm, possuem distância de 50mm da borda na horizontal e 250mm na vertical.

Para a construção da mesa foi empregada a técnica de *hand-layup*, que consiste em impregnar manualmente com resina, camadas de tecido sobrepostas até formar um laminado. Três bicos de vácuo foram adaptados e instalados como pode ser visto nas Figuras 11 e 12 para permitir a conexão das mangueiras de entrada do fluido (bico central) e saída do ar (bicos laterais).

Figura 11 – Vista superior da mesa utilizada no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 – Vista inferior da mesa de experimento realçando os bicos de vácuo adaptados



Fonte: Elaborado pelo autor

Para se determinar os valores de entrada do modelo computacional é necessário conhecer as propriedades do fluido. Optou-se por utilizar um óleo de bomba a vácuo, um fluido newtoniano, de fácil manuseio, de baixo custo e de fácil acesso na fábrica. A sua massa específica foi obtida através de sua ficha técnica, apresentada na Figura 13, e sua viscosidade foi medida em laboratório com a utilização de um viscosímetro.

Figura 13 – Ficha técnica com as propriedades típicas do óleo para bomba de vácuo utilizado no experimento

MOBIL VACUUM PUMP OIL

Viscosidade,	
cSt a 40 °C, ASTM D 445	84,9
cSt a 100 °C, ASTM D 445	10,3
Índice de Viscosidade, ASTM D 2270	102
Ponto de Fulgor, °C, ASTM D 92	258
Ponto de Fluidez, °C, ASTM D 97	-3
Cor, ASTM D 1500	1.0
Densidade (20°C), ASTM D 4052	0,876

Fonte: Mobil (2020)

Quatro amostras do tecido Biax 1200 foram cortadas nas dimensões de 300mm de largura por 300mm de comprimento como pode ser observado na figura 14.

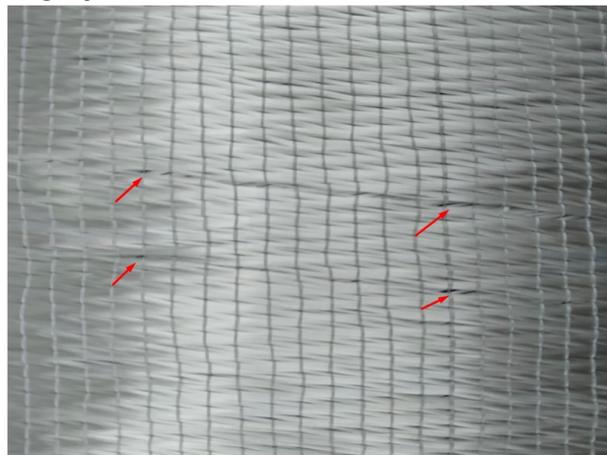
Figura 14 – Tecido Biax 1200 utilizado no experimento com aspecto normal



Fonte: Elaborado pelo autor

Este tecido, em decorrência do tipo de sua costura e da orientação de suas fibras, esgaça facilmente conforme indicado pelas setas em vermelho na Figura 15, podendo tornar inviável sua utilização.

Figura 15 – Tecido Biax 1200 apresentando esgarçamento



Fonte: Elaborado pelo autor

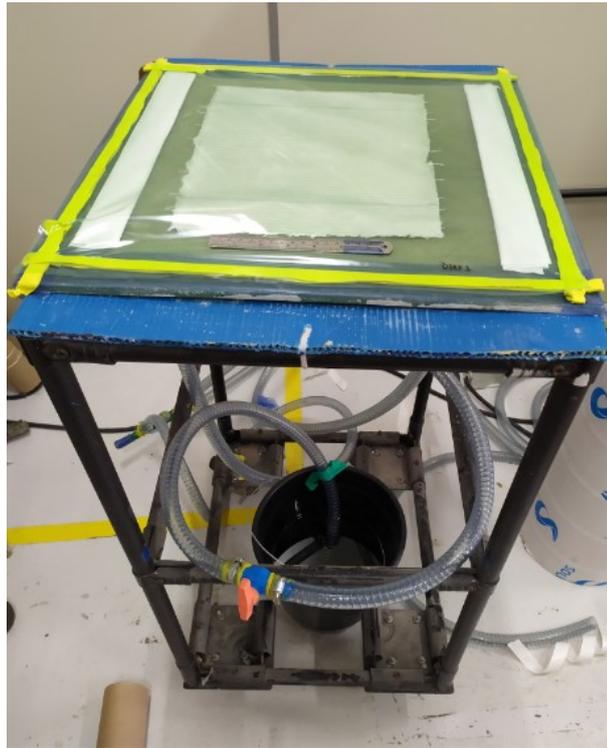
Previamente ao início do ensaio os tecidos foram pesados e as medidas de suas espessuras foram coletadas em média três vezes para garantir maior precisão. Para a realização do experimento a mesa foi instalada em uma sala de testes junto com todo o sistema de vácuo conectado a bomba, Figura 16, e o sistema de alimentação ligado a um recipiente contendo óleo, Figura 17.

Figura 16 – Bomba de vácuo utilizada no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Mesa de experimentos montada



Fonte: Elaborado pelo autor

A montagem do plano é apresentado na Figura 18. Após a centralização do tecido, é colocado fita isolante (*bambam*) nas laterais da mesa e por fim a peça é vedada com o saco de vácuo (plástico de vácuo). Liga-se a bomba que irá retirar todo ar do meio e em seguida é feito um teste de estanqueidade para garantir que não há furos no saco e conseqüente perda de vácuo. Garantindo o teste, a válvula que liga a entrada do fluido ao recipiente contendo óleo é aberta e o fluido percorre a mangueira central, molhando o tecido e escoando radialmente.

Figura 18 – Tecido centralizado na mesa de experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor

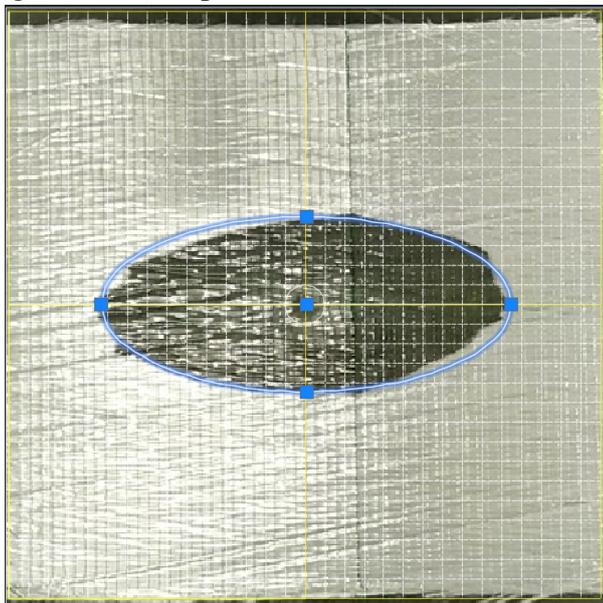
O fluido injetado na cavidade central da mesa de experimentos deverá ter a pressão de entrada, a temperatura e o raio de avanço da frente de fluxo monitorados até atingir as extremidades do tecido. Durante todo o período do teste a bomba se mantém funcionando para manter a pressão constante. Esse mesmo experimento pode ser verificado nos trabalhos de George (2018), Greve e Soh (1990), Luz (2011), Sirtautas (2017) e Swery *et al.* (2016).

3.3 Cálculo da Permeabilidade e da Porosidade

Os dados experimentais são coletados e analisados para os instantes de tempo 5, 15, 35, 65, 125, 185, 305, 425, 545 e 665 segundos. Os raios da frente de fluxo, ou frente de infusão devem ser medidos, tanto na vertical quanto na horizontal, através de imagens capturadas das gravações realizadas do experimento. Um gabarito foi criado no Autocad para ajudar a manter a escala.

Visto que na simulação, o fluido se comporta de forma homogênea pelo meio, e no experimental ocorre algumas variações decorrente da estrutura e concentração da fibra do tecido, uma elipse foi criada para ajudar a padronizar as medições conforme é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Método de medição utilizando o gabarito e a elipse no Autocad



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das posições em função do tempo para um experimento são apresentados no gráfico da Figura 20. No eixo vertical são mostrados os valores de deslocamento em milímetros e no horizontal os de tempo em segundos.

Figura 20 – Valores das posições de descolamento em função do tempo de experimento



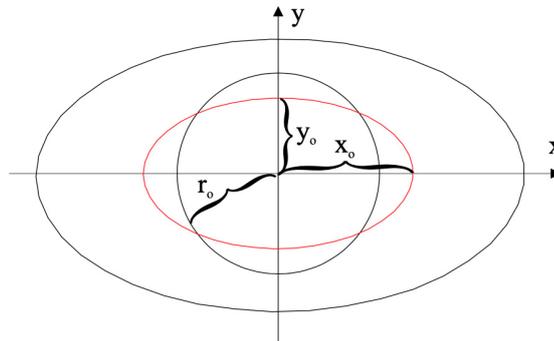
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo da porosidade é necessário alimentar o modelo com os valores de largura (L), área (A), densidade (ρ), espessura (h) e peso da amostra (W). A fração volumétrica de fibra (V_f) e a porosidade (ϕ) são calculadas com referência a essas variáveis pelas Equações 2.9 e 2.8 respectivamente.

A primeira etapa do cálculo da permeabilidade é realizar uma estimativa do grau de anisotropia do tecido (α). Essa variável é uma medida de quão orientadas são as estruturas dentro de um volume (HARRIGAN; MANN, 1984). Para um sistema isotrópico (perfeitamente orientado), o grau de anisotropia será igual a 1. À medida que o sistema se torna mais anisotrópico (menos orientado), o grau de anisotropia diminui para um valor menor que 1. Pela Equação 2.25, quanto maior o grau de anisotropia, maior K_2 em relação a K_1 .

Após estimado o valor de α é necessário realizar a representação da entrada de resina como uma extensão elíptica, como mostrado na Figura 21. O círculo em preto indica o canal de passagem da resina e o círculo em vermelho sua representação elíptica. Essa etapa é necessária visto que estamos tratando com um tecido de propriedades anisotrópicas em que há uma propagação do fluido no formato elíptico já nos primeiros momentos da impregnação.

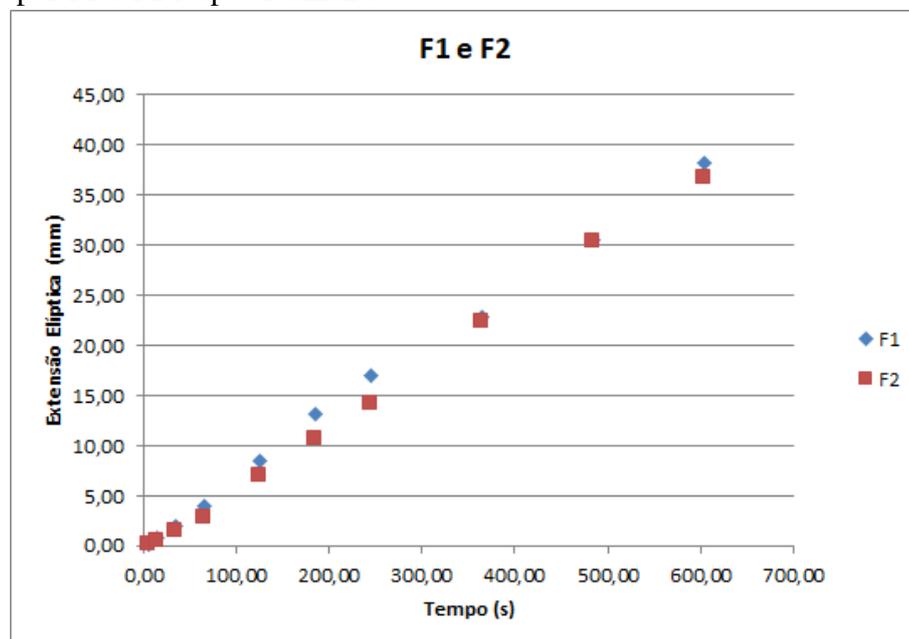
Figura 21 – Dimensão de entrada física do fluido e sua extensão elíptica correspondente



Fonte: (KOEFOED, 2018)

Os valores de frente de fluxo medidos são convertidos em extensões elípticas representadas por ξ_{f1} e ξ_{f2} , conforme as Equações 2.18 e 2.19 respectivamente. Os resultados dessas equações são derivados em função do tempo para os pares consecutivos de dados e plotados em um gráfico junto com os valores das soluções das equações 2.22. O gráfico construído é apresentado na Figura 22, no qual o eixo das ordenadas representa os valores das extensões elípticas em milímetros e o eixo das abscissas os tempos de propagação em segundos.

Figura 22 – Gráfico dos resultados das equações ξ_{f1} e ξ_{f2} representados por F1 e F2 respectivamente

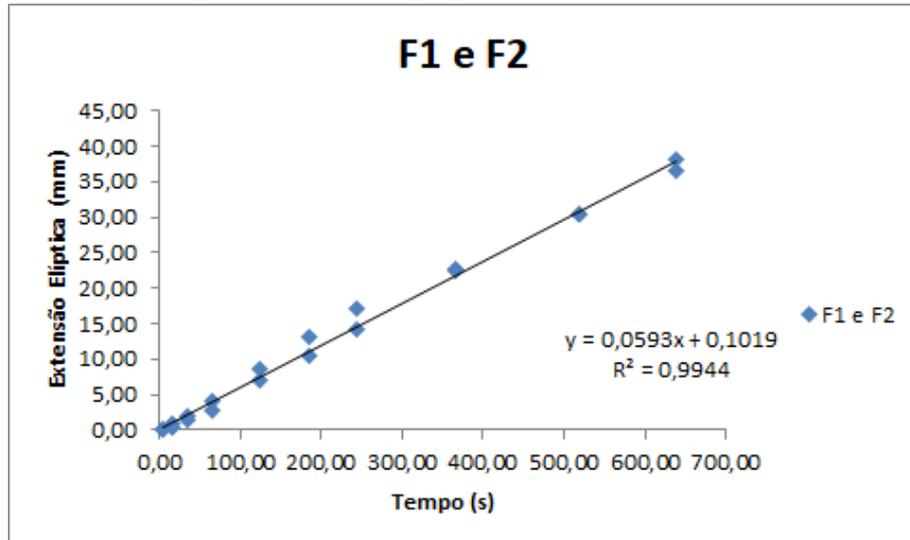


Fonte: Elaborado pelo autor

O ajuste pelos quadrados mínimos através dos pontos de dados produz a inclinação m para cada equação descrita anteriormente. Através desse método numérico, encontra-se o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre

o valor estimado e os dados observados. Para isso são adquiridos os valores dos coeficientes obtidos a partir de uma amostra dos pares que correspondem aos pontos no gráfico por regressão linear através da equação da reta, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico da regressão linear do método dos quadrados mínimos utilizada para se obter a equação da reta



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma única linha de mínimos quadrados não caberá em ambos os conjuntos de dados se α não for escolhido corretamente. Ao alterar α e monitorar os erros, o melhor valor para esta variável é selecionado. Constata-se assim que a análise de dados de um escoamento em um meio poroso com propriedades anisotrópicas é iterativa conforme descrito por Golestanian (2008). Diante disto, a inclinação da linha de melhor ajuste, que será apresentada nos resultados deste trabalho, é usada na Equação 2.23 para posteriormente se obter as permeabilidades direcionais K_1 e K_2 .

Se a curvatura para semi eixo maior e semi eixo menor (geometria do elipsoide) concordarem, a permeabilidade poderá ser calculada pelas Equações 2.24 e 2.25. Se não, deve-se estimar mais uma vez α e realizar o procedimento novamente para o ajuste das curvaturas.

Todas essas funções descritas foram implementadas no Excel através da linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA).

3.3.1 Análise Dimensional

Para que os resultados de permeabilidade sejam estimados com uma maior precisão, é necessário realizar corretamente a medição dos valores de entrada do modelo. Valores inexatos irão resultar em cálculos e simulações inconsistentes.

A análise dimensional levou em consideração a espessura de referência do fornecedor do tecido. As amostras foram retiradas de um mesmo lote para haver o mínimo de variação em suas gramaturas e conseqüentemente em seus pesos.

A densidade utilizada foi a da fibra do tipo vidro-H, que possui esse valor menor que os demais tipos de fibras de vidro encontrados no mercado. A viscosidade inserida foi o valor médio das análises feitas em laboratório. A largura, e conseqüentemente a área do tecido, também foram padronizadas, visto que as peças foram cortadas em uma máquina de corte. Todos os valores de entrada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de entrada para os cálculos de porosidade e permeabilidade

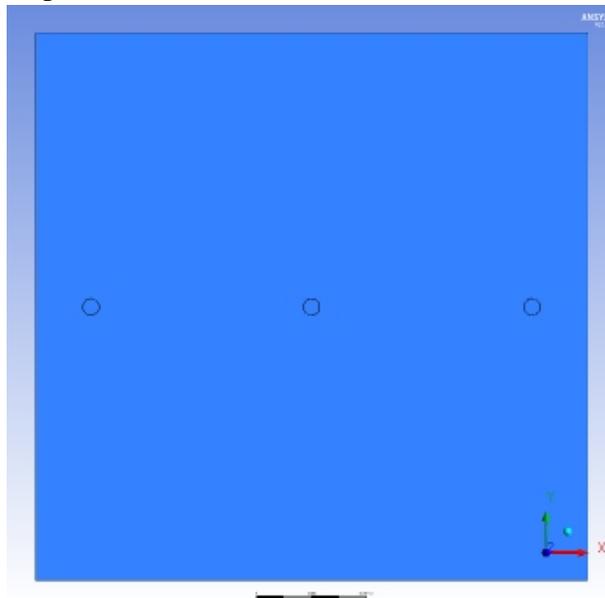
Variáveis	Valores de entrada
Peso (<i>kg</i>)	0,110430
Espessura (<i>m</i>)	0,000919
Largura (<i>m</i>)	0,3
Área (<i>m</i> ²)	0,09
Densidade (<i>kg/m</i> ³)	2325
Viscosidade (<i>cP</i>)	74,3724

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Simulação Computacional

A lei de Darcy foi escolhida para modelar o escoamento de um fluido em um meio poroso. Os resultados dos cálculos para permeabilidade e porosidade foram utilizados para alimentar o software Ansys-Fluent, que é um simulador comercial de dinâmica de fluidos para modelagem de fluxo, transferência de calor e reações químicas. A geometria do tecido, com suas respectivas dimensões foi desenhada utilizando o CAD 3D SpaceClaim como mostrado na Figura 24.

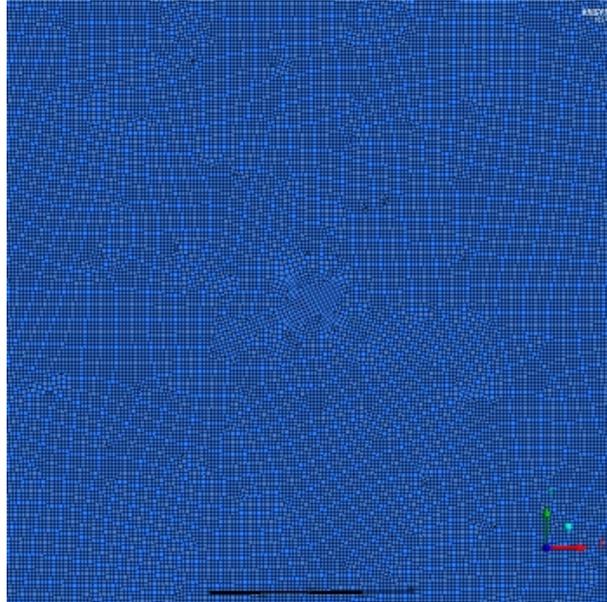
Figura 24 – Geometria do tecido utilizado nos experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma malha não-estruturada foi adotada, conforme pode ser observado na Figura 25, visto que a geração de uma malha estruturada nas tentativas iniciais não se adaptou bem a geometria das dimensões de entrada de resina e das saídas de ar. A malha final empregada foi dividida em 3 regiões: canal de entrada (inlet), canais de saída (outlet), paredes (walls), e apresentou 5055676 nós e 251837 elementos.

Figura 25 – Malha não-estruturada gerada para realização das simulações computacionais



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Marcondes (1996) malhas não-estruturadas podem ser geradas com relativa facilidade para geometrias complexas e dão origem a sistemas lineares com largura de banda variável. Vários exemplos de comparação entre malhas estruturadas e não-estruturadas podem ser encontrados nos trabalhos de Maliska (2004), Ferziger *et al.* (2002) e Löhner (2008).

A qualidade da malha desempenha um papel significativo na precisão e estabilidade do cálculo numérico. Para testar se a solução é independente da malha, iniciou-se os testes com uma malha mais grosseira e em seguida foi realizado o refinamento em todas as direções até que os resultados parassem de diferir entre as soluções.

O fluido de impregnação usado foi óleo para bomba de vácuo com a sua respectiva densidade e viscosidade medida. Os valores de permeabilidade e porosidade foram calculados através da implementação do algoritmo da Figura 9 no Excel e inseridos nas variáveis de entrada do modelo numérico.

Para a *Cell Zone Conditions*, foi considerada a abordagem proposta por Sayre (2000), que sugere que a porosidade se mantém constante, portanto, negligenciando a influência da mudança de espessura do tecido que ocorre no processo de manufatura.

As seguintes condições de contorno foram empregadas:

- 1 Pressão de saída (P_{saida}) = 0;
- 2 Pressão constante na entrada ($P_{entrada}$) = P_{atm} .

O modelo aplicado foi o *Volume of Fluid* (VoF), que segundo Matsson (2020), deve ser utilizado para simulações de escoamento em meios porosos, pois é capaz de resolver um único conjunto de equações de momento e rastrear a fração de volume de cada fluido em todo o domínio. O passo de tempo (*timestep*) e o número de iterações foram determinados através de diversos testes, até que o algoritmo *Piso* apresentasse uma maior estabilidade.

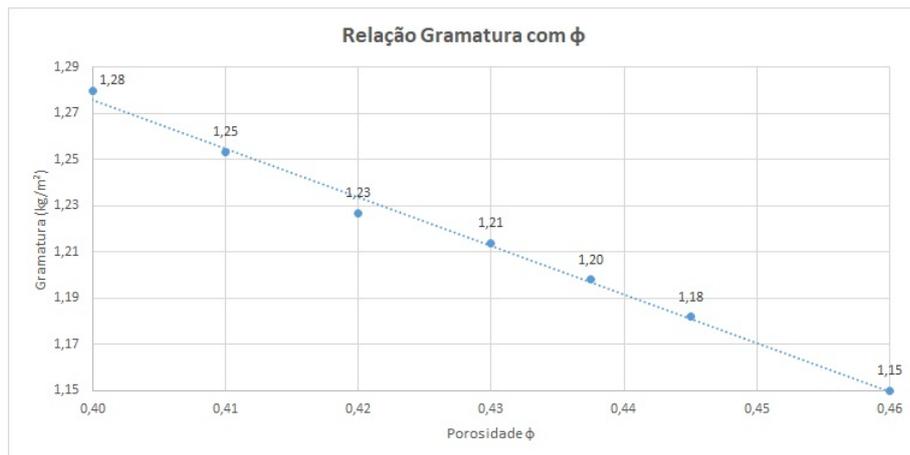
4 RESULTADOS

4.1 Resultados de Porosidade

O fluxo depende da interação do fluido com a estrutura do meio poroso. Esse comportamento pode ser melhor compreendido pelos estudos de Fanchi (2002), no qual o autor discorre da relação da porosidade com a velocidade superficial e intersticial de escoamento. A primeira é definida pela taxa de fluxo volumétrico dividida pela área da seção transversal. A segunda é a velocidade real do fluido percorrendo o meio poroso e pode ser encontrada com a divisão da velocidade superficial pela porosidade. Essa relação também pode ser observada na Equação 2.6, a qual indica que a velocidade do fluido é inversamente proporcional a porosidade do meio.

O gráfico da Figura 26 representa a relação do intervalo de gramaturas especificadas pelo fabricante com a porosidade calculada para o Biax 1200. Observa-se que quando a gramatura aumenta a porosidade (ϕ) do material diminui, e que essa variação é aproximadamente linear. Esse aumento na gramatura pode ser explicado pela presença, em uma mesma área do tecido, de uma concentração maior de fibras ocasionada pelo acréscimo na quantidade de fios na trama ou pela existência de fios mais espessos.

Figura 26 – Relação entre gramatura e porosidade (ϕ) do tecido Biax 1200



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico da Figura 26, podemos concluir que quando a gramatura do Biax 1200 está próxima ao seu limite superior, sua porosidade diminui, maior é a propagação do fluido no tecido e mais curto será o tempo de infusão. Como há menos poros para o fluido contornar, menores serão as perdas de carga, ou seja, menos energia será perdida durante o percurso do fluido quando este escoar. Entretanto essa gramatura alta irá tornar o laminado mais pesado.

De forma similar Padoin *et al.* (2013) chegou aos mesmos resultados em seu trabalho. Em suas análises o autor verificou que baixos valores de porosidade, aumentaram a capacidade de resistência viscosa e inercial. Quanto maiores eram essas capacidades, menos o fluido tendia a escoar.

Diante destas verificações, se torna mais fácil compreender a questão da sensibilidade do processo de infusão descrito ao final da seção 2.6, o que nos leva também a deduzir que qualquer variação nas propriedades do tecido terão impacto nas velocidades de propagação superficial do fluido (FLUENT, 2009) e no tempo de impregnação, o que pode acarretar em comportamentos inesperados do fluxo e conseqüentemente modificar a percepção do operador, levando este a uma interpretação incorreta do aspecto do laminado e a tomada de decisões de abertura de válvulas que podem acarretar em futuros defeitos.

4.2 Resultados de Permeabilidade

O modelo utilizado pelo Ansys-Fluent requer como parâmetro de entrada os valores de porosidade e de resistência viscosa que é obtido pelo inverso da permeabilidade. Os resultados dos cálculos através do método de Hirt *et al.* (1987) para o tecido Biax 1200 de quatro experimentos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores dos resultados experimentais

Resultados Experimentais					
Experimento	Tecido	Gramatura (g/m^2)	ϕ	K_1 ($10^{-12}m^2$)	K_2 ($10^{-13}m^2$)
1	Biax	1200	0,4	4,64	8,88
2	Biax	1200	0,4	4,65	8,90
3	Biax	1200	0,4	4,62	8,85
4	Biax	1200	0,4	4,64	8,89

Fonte: Elaborado pelo autor

As permeabilidades K_1 e K_2 demonstram um comportamento assimétrico de propagação, visto que o valor de K_1 foi bem superior ao valor de K_2 , dessa maneira a frente de fluxo de um fluido no plano para o caso geral de uma fibra anisotrópica apresenta uma forma elíptica, nos

quais os valores na direção horizontal e vertical divergem. Como consequência o fluido tende a escoar com uma maior facilidade em K_1 , que é a permeabilidade no sentido contrário a costura do tecido como observado no experimento e pela Figura 27.

Figura 27 – Sentido de propagação do fluido



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando ainda a Figura 27 essa característica de propagação elíptica do fluido no plano através de um meio poroso é comum em materiais de reforço anisotrópicos e o mesmo comportamento foi observado por Chan *et al.* (1993) em seus experimentos.

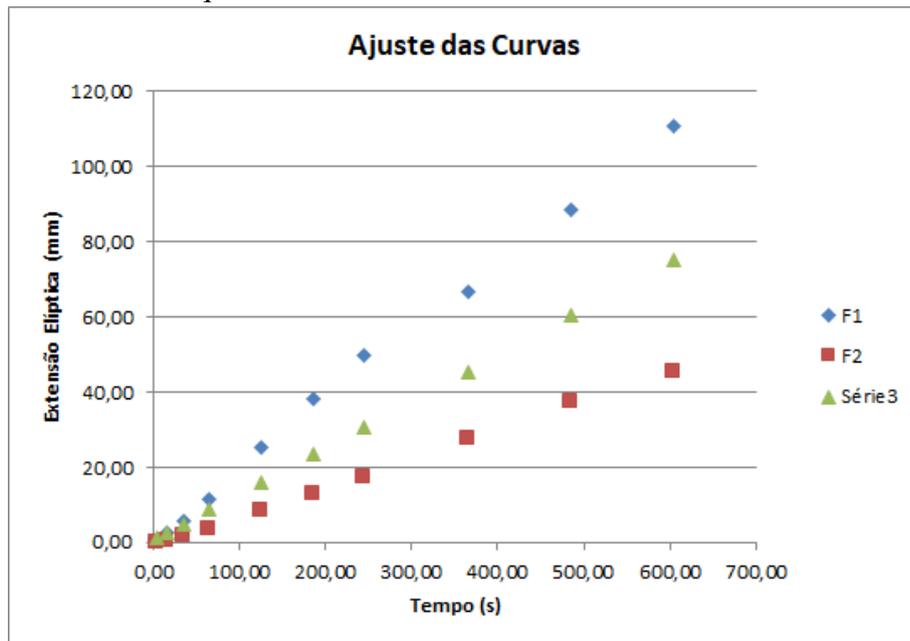
Através dos resultados da Tabela 2, nota-se que os valores de K_1 variam de $4,62 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ para $4,65 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e K_2 de $8,85 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ para $8,90 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, apresentando uma variação média de 0,33% entre os experimentos. Esse baixo valor decorre principalmente da precisão das medidas e da correta definição do grau de anisotropia (α) nas Equações 2.16 e 2.17.

No modelo de Hirt *et al.* (1987) é necessário estimar (α) e resolver de forma iterativa os cálculos para a permeabilidade utilizando o método numérico dos quadrados mínimos. Para determinar um α preciso foram realizados diversos testes alterando esse valor, até o ajuste preciso das curvas.

Os resultados das linhas de melhor ajuste dos experimentos selecionados para a fibra de vidro Biax 1200 são apresentados nos gráficos 28 e 29. O padrão de fluxo experimental foi elíptico, assim sendo, os pontos dos conjuntos de dados devem ser ajustados por uma única linha mais adequada pelo método dos quadrados mínimos.

O gráfico 28 manifesta um comportamento disperso dos pontos de dados dos resultados das Equações 2.18 e 2.19 para um determinado coeficiente de anisotropia, em relação aos valores obtidos através do método dos quadrados mínimos para o ajuste das inclinações das retas representadas. Na legenda, a direita do gráfico, $F1$ e $F2$ representam ξ_{f1} e ξ_{f2} respectivamente, e MQ os valores para a formulação da linha dos quadrados mínimos.

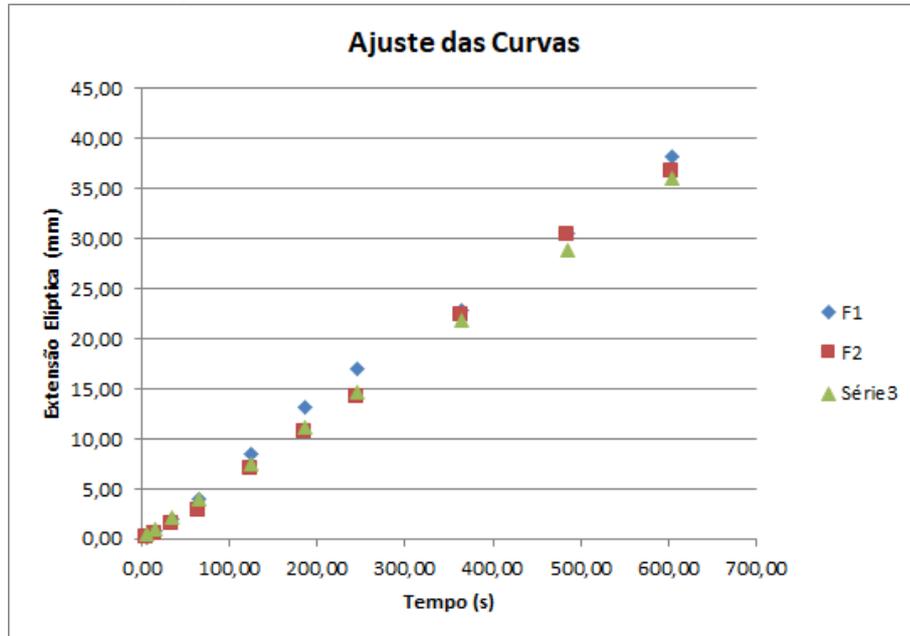
Figura 28 – Curvas não ajustadas para o conjunto de dados calculados e o método dos quadrados mínimos



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico da Figura 29 apresenta a convergência dos pontos do conjunto de dados calculados para uma única linha de quadrados mínimos. Esse comportamento coeso é obtido após a definição mais precisa do grau de anisotropia α .

Figura 29 – Curvas ajustadas para o conjunto de dados calculados e o método dos quadrados mínimos



Fonte: Elaborado pelo autor

Outro aspecto importante para a correta simulação é a definição das propriedades do fluido. O óleo para bomba de vácuo utilizado no experimento possui baixa mobilidade em temperatura ambiente, sendo necessário estimar precisamente sua viscosidade e densidade através de diferentes procedimentos. A mobilidade é definida como a razão entre a permeabilidade efetiva e a viscosidade. Fluidos com grandes mobilidades se moverão com velocidades mais altas através de um meio poroso do que fluidos com pequenas mobilidades (FANCHI, 2002).

Após coletadas os dados experimentais de porosidade, permeabilidade, viscosidade e densidade do óleo, foi efetuada a simulação do fluxo de um fluido em um reforço de fibra de vidro. Os resultados experimentais foram utilizados como meio para a validação dos resultados numéricos.

A simulação no Ansys-Fluent, através do *Volume of Fluid (VoF)* possibilita a descrição das frentes de escoamento multifásico, a partir dos resultados relativos às frações volumétricas de óleo e ar (OLIVEIRA *et al.*, 2011). O *VoF* foi configurado conforme os valores obtidos experimentalmente, e o regime do fluido foi considerado como laminar. Por fim foram feitos os testes de malha e de passe de tempo, e após essas etapas foi realizada a simulação. Na Figura 30

é apresentado o comparativo das imagens para os mesmos instantes de tempo do experimento (esquerda) e da simulação (direita).

Figura 30 – Comparativo entre experimento e simulação. Em vermelho é retratado 100% da fase representada pelo óleo e em azul o tecido não impregnado.

1. Comparativo em 5s.	2. Comparativo em 15s.
	



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 30, percebe-se que o fluido propaga em uma taxa próxima ao experimental. As regiões em vermelho são as partes do tecido que se encontram totalmente impregnadas pelo fluido, enquanto que as regiões em azul representam o tecido ainda seco. Nota-se que a partir dos 15 segundos do início da infusão as frentes de fluxo experimentais avançam radialmente no formato elíptico, e nas simulações o mesmo comportamento é observado. Algumas irregularidades na frente elíptica podem ser constatadas durante o escoamento no experimento, isto ocorre porque há uma variação local da concentração de fibras, o que gera um avanço heterogêneo do fluxo. Diferentemente das simulações que se considera uma distribuição homogênea das fibras no tecido e conseqüentemente um fluxo regular. Essa mesma contestação sobre a concentração de fibras foi verificado por Luz (2011).

Outra causa que pode explicar esse erro maior entre 5 e 15 segundos, é a possibilidade do modelo considerar uma mistura de óleo e ar nos primeiros instantes da simulação, o que na prática não ocorre, visto que todo ar é retirado do meio previamente ao início da infusão.

Para estudos mais precisos nos primeiros instantes de tempo da simulação e com o intuito de diminuir o erro, podem ser empregados malhas mais refinadas ou passe de tempos menores. Malhas menores beneficiam os padrões de preenchimento do meio poroso simulado e melhoram ligeiramente o escoamento, porém a um custo computacional maior (TUNCOL, 2010).

Erros maiores foram verificados até os 35 segundos de início da infusão. Como é necessário avaliar a propagação global os testes de malha e de passe de tempo se mostraram suficientes. Um perfil regular de impregnação foi obtido e se manteve até o final do procedimento.

A concordância entre o experimento e a simulação numérica é satisfatória em relação ao progresso geral da frente de fluxo. A reação do fluido registrado no experimento parece concordar bem com a simulação durante o processo de infusão. O fluxo apresentou um comportamento anisotrópico, relativo a orientação de 80° das fibras do tecido.

Medições analisando a propagação na simulação em comparação aos quatro experimentos, mostrou que o modelo apresentou um erro médio de 5,1%, valor dentro do aceitável. A Tabela 3 apresenta as medidas dos erros relativos aos quatro experimentos em comparação com a simulação.

A simulação computacional apresentou uma boa relação com o experimento real, conforme apresentado na Tabela 3. Isto demonstra a lei de Darcy e o modelo proposto por Hirt *et al.* (1987) podem ser aplicados nos cálculos das propriedades de porosidade e permeabilidade.

Tabela 3 – Valores do erro experimental em comparação com a simulação

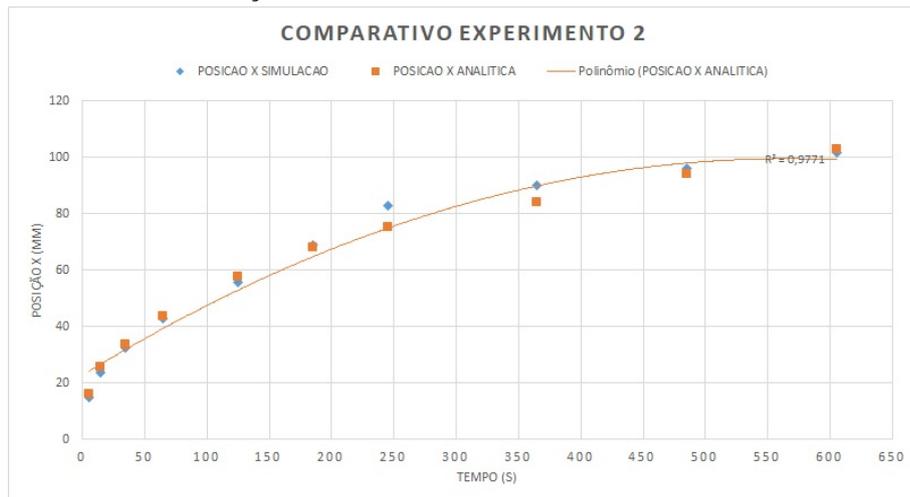
Experimento	Erro (%)
1	6
2	4,6
3	5,4
4	4,4

Fonte: Elaborado pelo autor

Esses resultados podem ser verificados na literatura pelo trabalho de Chan *et al.* (1993), no qual o autor constatou que em geral, os desvios dos cálculos para um fluxo lento e um fluido com alta viscosidade através de uma reforço de fibra é muito pequeno.

O gráfico da Figura 31 representa o deslocamento do fluido em X , para diferentes instantes de tempo da simulação computacional e do experimento.

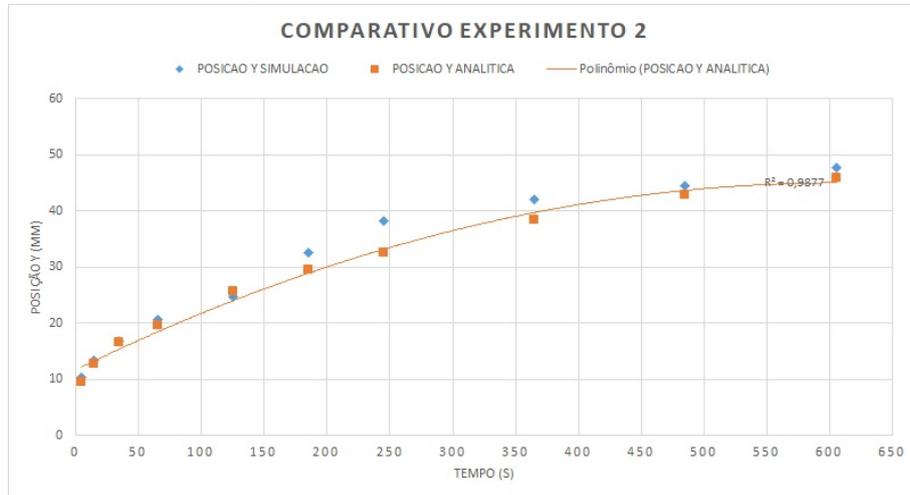
Figura 31 – Comparativo do deslocamento do fluido em X no experimento e na simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Por sua vez, o gráfico da Figura 32 representa o deslocamento do fluido em Y , para instantes de tempo alternados da simulação computacional e do experimento.

Figura 32 – Comparativo do deslocamento do fluido em Y no experimento e na simulação



Os gráficos das Figuras 31 e 32 permitem enxergar com precisão a distribuição dos valores medidos, que por sua vez foram bastantes próximos. Essa relação do experimento com a simulação no Ansys-Fluent pode ser confirmada pela definição do R^2 , que é um coeficiente de determinação que ajuda na previsão de variáveis dependentes em modelos de pesquisa. Para determinar esse valor, foi criada uma linha de tendência polinomial referente a flutuação dos dados apresentados. Para a Figura 31 temos R^2 igual 0,9771 e para a Figura 32 temos R^2 igual a 0,9877. Esses resultados mostram a confiabilidade da linha de tendência, que por sua vez indica um bom ajuste do modelo aos dados reais.

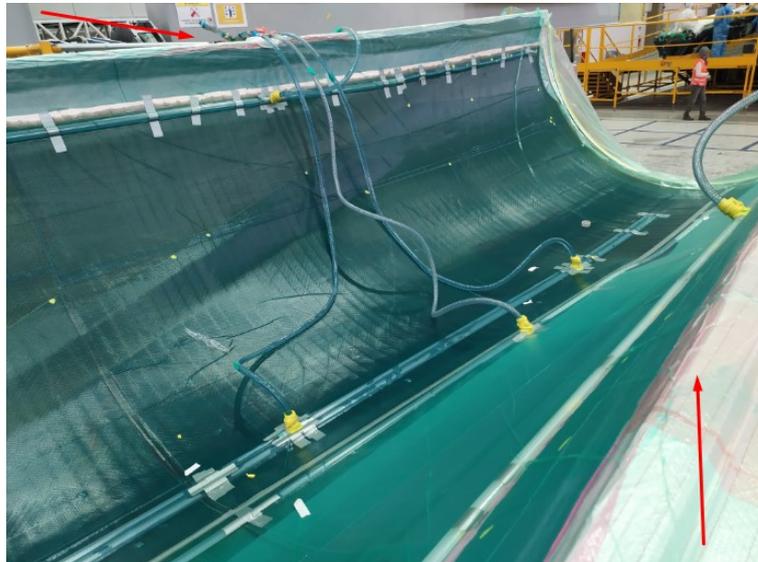
O comportamento anisotrópico do tecido Biax 1200 representa uma dificuldade para a impregnação correta da região em que essas camadas de fibra de vidro são dispostas. O problema se torna mais complexo quando somado a isso temos ocorrências de alterações em variáveis do processo, variações nas características físicas da fibra e aplicação conjunta desse tecido com outros tecidos de diferentes permeabilidades na manufatura de um compósito.

Gauvin *et al.* (1996) verificou que a taxa de fluxo, o gradiente de pressão, a natureza do fluido, o manuseio do reforço e a rigidez da cavidade do molde estão entre os fatores que podem influenciar fortemente as medidas de permeabilidade. George (2018) constatou pelos seus resultados que o envelhecimento do material e do "sizing", um tipo de tratamento químico que torna a fibra apta a absorver resina, podem contribuir para um fluxo mais lento. Outro aspecto

importante levantado pelo autor é que em alguns de seus experimentos foi notado uma constrição da mangueira de entrada de resina, o que afetou diretamente a pressão de injeção do fluido. Sirtautas (2017) e Chan *et al.* (1993) observaram que diferentes tipos de deformações podem alterar substancialmente a permeabilidade e o comportamento do fluxo durante o processo de infusão.

Frente a essas constatações é notável que as áreas mais afetadas pela anisotropia e deformação do tecido Biax 1200 são os bordos da pá eólica, indicado pelas setas vermelhas na Figura 33.

Figura 33 – Bordos da pá eólica indicados pelas setas em vermelho



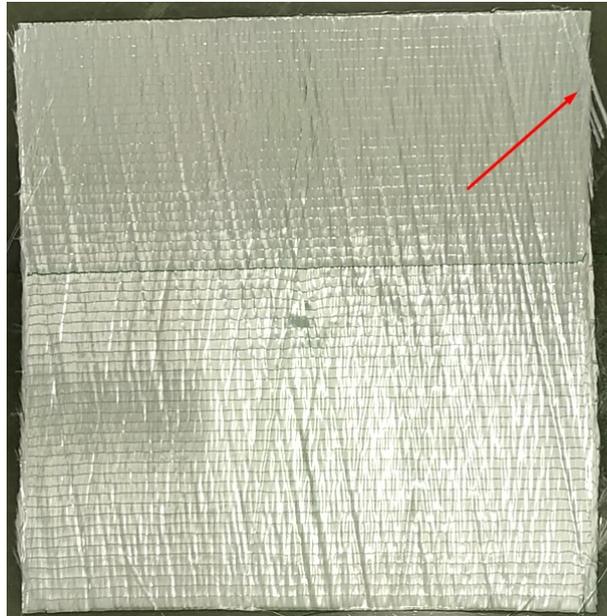
Fonte: Elaborado pelo autor

Os bordos são locais de maior curvatura na qual a resina deve fluir na orientação contrária a costura e ao escalonamento do *preform*. Na região da raiz (início da pá), além da curvatura atingir seu valor máximo no sentido corda (vertical) a permeabilidade atuante pela disposição das camadas de fibra de vidro será K_2 , que pelo resultado apresentado na Tabela 2, é aproximadamente cinco vezes menor que a permeabilidade na longitudinal, ou na direção K_1 . Como consequência dessa configuração haverá uma maior dificuldade para a correta impregnação dos tecidos sobrepostos nesse local.

O corte do reforço para sua acomodação no formato da pá pode acarretar em danos nas suas tramas, separando os fios e impedindo que o mesmo recupere seu formato original. Esse defeito é conhecido como esgarçamento de tecido, é bastante comum no Biax 1200 com orientação de 80° e é um fator que pode impactar profundamente o comportamento da resina

nessa região. Como observado durante os experimentos, a Figura 34 indica as laterais da amostra que sofreram esse tipo de avaria.

Figura 34 – Esgarçamento nas laterais do tecido Biax 1200 indicado pela seta em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor

Outro aspecto importante é a resistência gravitacional que o fluido sofre ao movimentar-se pela superfície mais inclinada dos bordos. Esse fenômeno faz com o que o fluxo perca energia cinética e diminua sua velocidade de propagação. Somado a isso, temos que os bordos são as regiões mais distantes das entradas de resina, conseqüentemente há uma resistência relativa ao aumento da viscosidade dessa substância relacionada ao tempo e calor do molde, que poderá ser modelada no futuro.

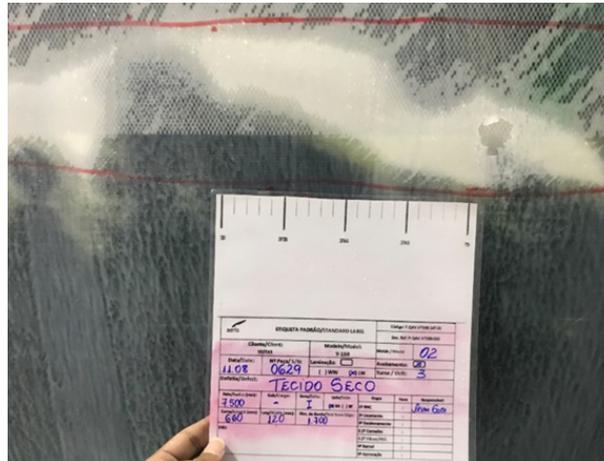
Diante dessas características do reforço e do formato da pá eólica, o fluido tende a escoar lentamente e apresentar um comportamento não característico que pode causar colisões de diferentes frentes de resina, com conseqüente envelopamento (ilhamento) e surgimento de defeitos relativos a má impregnação das camadas, mais conhecido como tecido seco, Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Tecido seco presente no bordo de fuga da pá eólica



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 – Tecido seco presente no bordo de ataque da pá eólica



Fonte: Elaborado pelo autor

Problemas de laminado opaco (*drop esbranquiçada*) são comuns e podem estar relacionados a sobreposição de camadas com permeabilidades distintas. Uma tonalidade branca se torna visível e é realçada durante a impregnação quando essa diferença for alta, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Reforço esbranquiçado (*drop esbranquiçada*)



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando essa falha é perceptível, o operador é induzido a deixar a válvula de alimentação mais tempo aberta, com conseqüente aumento do consumo de resina. Entretanto, nem sempre essa prática é recomendável visto que, dependendo do local, os tecidos irão saturar igualmente, só que em um intervalo de tempo maior. Quando esse problema atinge as regiões mais internas da pá eólica e a resina começa a curar antes de impregnar totalmente as camadas, poderá ocorrer um defeito denominado de laminado opaco, representado pela Figura 38.

Figura 38 – Laminado Opaco



Fonte: Elaborado pelo autor

Conhecer as permeabilidades do tecido e as variáveis do processo, facilitam na definição de planos de infusão mais eficientes em que se faz necessário o uso consciente de recursos como freios, canaletas, malhas de infusão (*transfer*) entre outros consumíveis. Esse conhecimento também permite definir melhor a localização das entradas de resina e os tempos de abertura das válvulas de alimentação.

Algumas dificuldades foram encontradas em determinados estágios da modelagem numérica e da caracterização do material. As adversidades enfrentadas são referentes a certos tecidos possuírem alterações complexas na estrutura e disposição de suas fibras, que não podem ser modeladas com precisão. A adoção de uma abordagem mais específica pode solucionar alguns desses problemas, no entanto, mais complicados serão os cálculos e muito mais parâmetros serão necessários para descrever o modelo numérico, que por sua vez, devem buscar uma compensação razoável entre o aumento da complexidade, o custo de processamento e a precisão (SIRTAUTAS, 2017).

O baixo nível dos valores de erro, mostra que a permeabilidade calculada é considerada aceitável para descrever o tecido Biax 1200. Essas análises também relataram um tensor de permeabilidade anisotrópico para este material conforme proposto por Darcy (1856).

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No caso estudado, a lei de Darcy (1856) foi usada com sucesso para expressar o escoamento de um fluido através de um meio poroso, e o método de Hirt *et al.* (1987) se mostrou uma metodologia eficiente para a determinação da permeabilidade da fibra de vidro Biax 1200 com orientação de 80°. Os resultados dos cálculos foram utilizados para alimentar o software comercial Ansys-Fluent, que por sua vez, permitiu a modelagem e simulação computacional do processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM). Os resultados das simulações apresentarem erro máximo com diferença inferior a 5% em comparação ao experimento, comprovando a eficácia do modelo implementado e ampliando a capacidade científica de compreensão do processo de infusão a vácuo.

Os estudos realizados serão aplicados com o objetivo de minimizar defeitos de fabricação, propor e atualizar planos de infusão e aprofundar as análises de causa raiz referentes as falhas de processo. Com as lições aprendidas na elaboração deste trabalho, será desenvolvido um artigo contendo a análise da permeabilidade deste e de outros tecidos empregues na indústria eólica.

REFERÊNCIAS

- BALIEIRO, R. S. L. Deformações em elementos estruturais de materiais compósitos reforçados por fibras em software baseado em elementos finitos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.
- BARBERO, E. J. **Introduction to Composite Material Design**. [S. l.]: Taylor Francis, 1998. v. 1.
- CALLISTER, J. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering : an introduction**. [S. l.]: Wiley, 2018. v. 10.
- CHAN, A. W.; LARIVE, D. E.; MORGAN, R. J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement. **Journal of composite materials**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 27, n. 10, p. 996–1008, 1993.
- DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Exposition et Application des Principes a Suivre et des Formulesa Employer dans les Questions de Distribution d’Eau**. Paris: Victor Dalmont, 1856.
- DEREK, H. **An introduction to composite materials**. [S. l.]: Cambridge University Press, 1981.
- DRAPIER, S.; MONATTE, J.; ELBOUAZZAOU, O.; HENRAT, P. Characterization of transient through-thickness permeabilities of non crimp new concept (nc2) multiaxial fabrics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 36, n. 7, p. 877–892, 2005.
- FANCHI, J. R. **Shared Earth Modeling: Methodologies for Integrated Reservoir Simulations**. [S. l.]: Gulf Professional Publishing, 2002.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. **Computational methods for fluid dynamics**. [S. l.]: Springer, 2002. v. 3.
- FLUENT. **Ansys Fluent User’s Guide 12.0**. [S. l.], 2009.
- GAUVIN, R.; TROCHU, F.; LEMENN, Y.; DIALLO, L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. **Polymer composites**, Wiley Online Library, v. 17, n. 1, p. 34–42, 1996.
- GEORGE, A. **Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies** 2011. 245 f. Tese (Doctor of Engineering Sciences) – Faculty of Aerospace Engineering and Geodesy, University of Stuttgart, Alemanha, 2018.
- GMBH, R. F. **Technical Data Hollow glass fibres (H-glass)**. [S. l.], 2010.
- GOLESTANIAN, H. Preform permeability variation with porosity of fiberglass and carbon mats. **Journal of materials science**, Springer, v. 43, n. 20, p. 6676–6681, 2008.
- GREVE, B. N.; SOH, S. K. Directional permeability measurement of fiberglass reinforcements. **SAE transactions**, JSTOR, p. 331–343, 1990.

GREVE, L.; PICKETT, A. Delamination testing and modelling for composite crash simulation. **Composites science and technology**, Elsevier, v. 66, n. 6, p. 816–826, 2006.

GRIMSLEY, B.; HUBERT, P.; SONG, X.; CANO, R.; LOOS, A. C.; PIPES, R. Flow and compaction during the vacuum assisted resin transfer molding process. In: . [S. l.: s. n.], 2001.

HARRIGAN, T.; MANN, R. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 19, n. 3, p. 761–767, 1984.

HIRT, D. E.; ADAMS, K. L.; PRUD’HOMME, R. K.; L, R. In-plane radial fluid flow characterisation of fibrous materials. *Journal of Thermal Insulation*, v. 10, p. 153–73, 1987.

HÄRTER, F. V.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D. dos; AMICO, S. C. Transverse permeability determination and influence in resin flow through an orthotropic medium in the RTM process. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, scielo, v. 22, 2017.

JUDD, N. C. Voids and their effects on the mechanical properties of composites. an appraisal. 1978.

KANTZAS, A.; BRYAN, J.; TAHERI, S. Fundamentals of fluid flow in porous media. **Pore size distribution**, 2012.

KOEFOED, M. S. **Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades** 2003. 229 f. Tese (Industrial Ph.D. Dissertation) – Danish Academy of Technical Sciences, LM Glasfiber A/S, AALBORG UNIVERSITY, Dinamarca, 2018.

LÖHNER, R. **Applied computational fluid dynamics techniques: an introduction based on finite element methods**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.

LUZ, F. F. **Análise Comparativa do Escoamento de Fluido em Experimentos RTM Utilizando Aplicativos Comerciais** 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011.

MALISKA, C. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ª. **Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora**, v. 2, 2004.

MARCONDES, F. **Solução numérica usando métodos adaptativos-implícitos e malha de Voronoi de problemas de reservatórios de petróleo**. Tese (Doutorado), 1996.

MATSSON, J. **An Introduction to ANSYS Fluent 2020**. [S. l.]: SDC Publications, 2020.

MISHNAEVSKY, L.; BRANNER, K.; PETERSEN, H. N.; BEAUSON, J.; MCGUGAN, M.; SØRENSEN, B. F. Materials for wind turbine blades: an overview. **Materials**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 11, p. 1285, 2017.

MOBIL. **Technical Data Mobil Vacuum Pump Oil**. [S. l.], 2020.

NEDANOV, P. B.; ADVANI, S. G. Um método para determinar a permeabilidade 3d de reforços fibrosos. *Journal of Composite materials*, v. 36, p. 241–254, 2002.

OLIVEIRA, C. P.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C.; ISOLDI, L. A.; SILVA, R. D. S. d. Comparação dos métodos vof e fe/cv aplicados à solução de problemas de rtm. 2011.

PADILHA, A. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. [S. l.]: Hemus Editora Limitada, 1997. v. 1.

PADOIN, N.; DAL'TOÉ, A.; SOARES, C. Cfd applied to the investigation of flow resistances in porous media. In: **Proceedings of the 11o. CAIP-Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, At Lima-Peru**. [S. l.: s. n.], 2013.

PORTO, T. R. N.; ANDRADE, T. H. F. de. Estudo numérico termo fluidodinâmico da moldagem de compósito polimérico reforçado com liga niti via técnica rtm. **XIV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande**, 2015.

RANGANATHAN, S.; JR, F. R. P.; ADVANI, S. G. A generalized model for the transverse fluid permeability in unidirectional fibrous media. **Polymer Composites**, Wiley Online Library, v. 17, n. 2, p. 222–230, 1996.

RUDD, C. D.; LONG, A. C.; KENDALL, K.; MANGIN, C. **Liquid moulding technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques**. [S. l.]: Elsevier, 1997.

SAPUTRA, A. H.; SETYARSO, G. Vacuum infusion equipment design and the influence of reinforcement layers addition to the resin infusion time. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S. l.], 2016. v. 162, n. 1, p. 012015.

SAYRE, J. R. **Vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) model development, verification, and process analysis**. Tese (Doutorado) – Virginia Tech, 2000.

SCHMIDT, T.; GOSS, T.; AMICO, S.; LEKAKOU, C. Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 23, p. 2839–2850, 2009.

SHAH, M.; CHAUDHARYE, V. Flow modeling and simulation study of vacuum assisted resin transfer molding (vartm) process: A review. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** 872 012087, 2020.

SHAMEY, R.; ZHAO, X. **Modelling, simulation and control of the dyeing process**. [S. l.]: Elsevier, 2014.

SIRTAUTAS, J. **Coupled fabric deformation and infusion process simulation**. Tese (Doutorado), 2017.

SONG, X.; LOOS, A. C.; GRIMSLEY, B. W.; CANO, R. J.; HUBERT, P. Modeling the vartm composite manufacturing process. **Citeseer**, 2004.

STADTFELD, H.; ERNINGER, M.; BICKERTON, S.; ADVANI, S. An experimental method to continuously measure permeability of fiber preforms as a function of fiber volume fraction. **Journal of reinforced plastics and composites**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 21, n. 11, p. 879–899, 2002.

STEENKAMER, D.; MCKNIGHT, S.; WILKINS, D.; KARBHARI, V. Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 30, n. 12, p. 3207–3215, 1995.

SWERY, E. E.; ALLEN, T.; COMAS-CARDONA, S.; GOVIGNON, Q.; HICKEY, C.; TIMMS, J.; TOURNIER, L.; WALBRAN, A.; KELLY, P.; BICKERTON, S. Efficient experimental characterisation of the permeability of fibrous textiles. **Journal of composite materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 50, n. 28, p. 4023–4038, 2016.

TAN, H.; ROY, T.; PILLAI, K. M. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: an experimental investigation. **Composites Part A: Applied science and manufacturing**, Elsevier, v. 38, n. 8, p. 1872–1892, 2007.

TUNCOL, G. **Modeling the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process for Fabrication of Fiber/metal Hybrid Laminates**, Michigan State University. Tese (Doutorado), 2010.

VAFAI, K. **Handbook of porous media**. [S. l.]: Crc Press, 2015.

WOODHEAD, L. H. **Handbook of Polymer Composites for Engineers**. [S. l.]: Cambridge: Publishing Limited, 1994. v. 1.