

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME NEVES MARCHI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DO TEMPO
DE PREENCHIMENTO EM PROCESSOS VARTM**

JOINVILLE

2024

GUILHERME NEVES MARCHI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DO TEMPO
DE PREENCHIMENTO EM PROCESSOS VARTM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica no Cen-
tro de Ciências Tecnológicas CCT, da Universi-
dade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

JOINVILLE

2024

GUILHERME NEVES MARCHI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DO TEMPO
DE PREENCHIMENTO EM PROCESSOS VARTM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica no Cen-
tro de Ciências Tecnológicas CCT, da Universi-
dade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Orientador: Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Assoc. Ricardo de Medeiros
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Prof. Dr. Paulo Sergio Berving Zdanski
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Profa. Me Karla Beatriz Vivian Silveira
Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA

Joinville, 05 de julho de 2024

RESUMO

A Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM) é um processo de fabricação de compósitos que se destaca por sua versatilidade e baixo custo. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre o processo VARTM, explorando seus princípios, aplicações e avanços recentes. Além disso, o trabalho investiga a dinâmica dos fluidos envolvida no processo e discute o papel da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) na implementação do escoamento multifásico em meios porosos. O objetivo do presente trabalho é a aplicação numérica do processo VARTM utilizando o software Ansys Fluent, para replicar o tempo de preenchimento nesse processo, a partir de três estudos de caso obtidos na literatura, e assim, validando experimentalmente a simulação para poder realizar um quarto estudo de caso em que é possível avaliar outras propriedades da infusão. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com dados experimentais dos artigos utilizados como estudo de caso, e todos tiveram uma boa correspondência no geral, com maior divergência nos primeiros segundos simulados, sendo realmente mais acentuado no primeiro estudo de caso. No quarto estudo de caso, avalio-se o quão positivo é a implementação do meio de distribuição e também uma possível relação entre tempo de preenchimento e a viscosidade da resina.

Palavras-chave: VARTM. Fluent. Compósito. Escoamento de resina. Simulação numérica.

ABSTRACT

Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) is a composite manufacturing process that stands out for its versatility and low cost. This paper presents a comprehensive literature review on the VARTM process, exploring its principles, applications and recent advances. In addition, the paper investigates the fluid dynamics involved in the process and discusses the role of Computational Fluid Dynamics (CFD) in implementing multiphase flow in porous mediums. The aim of this work is to numerically apply the VARTM process using Ansys Fluent software, to replicate the filling time in this process, based on three case studies obtained from the literature, and thus experimentally validating the simulation in order to be able to carry out a fourth case study in which it is possible to evaluate other properties of the infusion. The results obtained in the simulations were compared with experimental data from the articles used as case studies, and all corresponded well overall, with a greater divergence in the first few seconds simulated, which was actually more pronounced in the first case study. In the fourth case study, it was possible to assess how positive the implementation of the distribution medium is and also a possible relationship between filling time and resin viscosity.

Keywords: VARTM. Fluent. Composite. Resin flow. Numerical simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Fases de um compósito. | 17 |
| Figura 2 – Classificação dos compósitos. | 17 |
| Figura 3 – Processos de manufatura. | 21 |
| Figura 4 – Experimento do processo de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM). | 23 |
| Figura 5 – VARTM e RTM. | 24 |
| Figura 6 – Método HPM ou HPL. | 24 |
| Figura 7 – Método CIC. | 25 |
| Figura 8 – Componentes do processo VARTM. | 25 |
| Figura 9 – Elemento de volume para processo VARTM. | 26 |
| Figura 10 – Regimes de escoamento. | 29 |
| Figura 11 – O propósito do método numérico. | 30 |
| Figura 12 – Tipos de elementos. | 33 |
| Figura 13 – Tipos de malha. | 33 |
| Figura 14 – Malha formada por diferentes elementos. | 34 |
| Figura 15 – Interfaces. | 36 |
| Figura 16 – Método de Youngs. | 37 |
| Figura 17 – Presença de oscilação numérica (a) e difusão numérica (b). | 40 |
| Figura 18 – Malha e geometria descrita no artigo. | 49 |
| Figura 19 – Geometria utilizada para as simulações. | 49 |
| Figura 20 – Malhas utilizadas. | 50 |
| Figura 21 – Geometria utilizada para a simulação do caso A-1. | 51 |
| Figura 22 – Geometria do artigo. | 52 |
| Figura 23 – Geometria Utilizada nas Simulações do Estudo de Caso 3. | 52 |
| Figura 24 – Geometria do Estudo de Caso 4. | 54 |
| Figura 25 – Convergência de malha para o esquema PISO e Couped. | 55 |
| Figura 26 – Resultados, malha e geometria descrita no artigo. | 57 |
| Figura 27 – Resultados desenvolvidos para o estudo de caso. | 57 |
| Figura 28 – Convergência de malha para o esquema PISO e Coupled. | 58 |
| Figura 29 – Comparativo do experimento A-1. | 59 |
| Figura 30 – Comparativo do experimento A-2. | 60 |
| Figura 31 – Comparativo do experimento A-3. | 60 |
| Figura 32 – Comparativo do experimento A-4. | 61 |
| Figura 33 – Comparativo do experimento A-1 e A-5. | 61 |
| Figura 34 – Comparativo do experimento A-6 e A-7. | 62 |
| Figura 35 – Espessura das camadas. | 63 |
| Figura 36 – Representação gráfica das medições de espessura. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 37 – Convergência de malha realizada. | 64 |
| Figura 38 – Preenchimento do experimento realizado no artigo. | 65 |
| Figura 39 – Camada próxima a bag de vácuo, raio do 1.5 mm. | 65 |
| Figura 40 – Camada do meio, raio do 1.5 mm. | 66 |
| Figura 41 – Camada próxima ao molde, raio do 1.5 mm. | 66 |
| Figura 42 – Diferença no tempo de preenchimento das camadas para diferentes raios. . . | 67 |
| Figura 43 – Convergência de malha. | 68 |
| Figura 44 – Correção da malha. | 69 |
| Figura 45 – Curvas de Frente de Fluxo por Tempo para Diferentes Porosidades. | 70 |
| Figura 46 – Curvas de Frente de Fluxo por Tempo para Diferentes Viscosidades. | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | – Condições de Entrada e Propriedades do Material do Estudo de Caso 1. | 50 |
| Tabela 2 | – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 2. | 50 |
| Tabela 3 | – Parâmetros dos experimentos. | 51 |
| Tabela 4 | – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 3. | 53 |
| Tabela 5 | – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 4. | 54 |
| Tabela 6 | – Comparação dos valores e erros para diferentes configurações de malha e x_f | 56 |
| Tabela 7 | – Comparação dos valores e erros de x_f , entre o artigo e as simulações realizadas. | 56 |
| Tabela 8 | – Comparação dos valores e erros de x_f , entre o artigo e as simulações realizadas. | 59 |
| Tabela 9 | – Comparação dos valores de tempo de preenchimento das simulações realizadas. | 71 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| BD | Bidirecional |
| CFD | Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional) |
| CIC | Channels in core (Canais no núcleo) |
| CICSAM | Esquema de captura de interface compressiva para malhas arbitrárias |
| COVs | Compostos orgânicos voláteis |
| CVFEM | Control-volume based finite volume method (Método de Elementos Finitos de Volume de Controle) |
| DE | Difference Elements (Elementos de diferença) |
| EDP | Equação Diferencial Parcial |
| EMM | Método do Meio Equivalente |
| FDM | Finite Difference Method (Método das diferenças finitas) |
| FE | Finite Elements (Elementos finitos) |
| FVM | Finite Volume Method (Método dos volumes finitos) |
| HPL | High-Permeability Layers (Camadas de alta permeabilidade) |
| HPM | High-Permeability Medium (Meio de alta permeabilidade) |
| HRIC | High Resolution Interface Capturing (Captura de interface de alta resolução) |
| LIMS | Liquid Injection Molding Simulation (Simulação de moldagem por injeção líquida) |
| NVD | Normalized Variable Diagram (Diagrama de Variáveis Normalizadas) |
| RC | Resistor capacitor |
| RIFT | Injeção de resina flexível |
| RMS | Erro quadrático médio |
| RTM | Resin Transfer Molding (Moldagem por transferência de resina) |
| RTM-Light | Resin Transfer Molding light (Moldagem por transferência de resina leve) |
| SCRIMP | Seemann Composite Resin Infusion Molding Process (Processo de Moldagem por Infusão de Resina Composta Seemann) |
| SMC | Composto de moldagem em folha |
| TPU | Poliuretano termoplástico |
| UD | Unidirecional |
| UHMWPE | Poliétileno de ultra-alto peso molecular |

| | |
|-------|---|
| VARTM | Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo) |
| VI | Vacuum Infusion (Infusão a vácuo) |
| VM | Vacuum molding (Moldagem a vácuo) |
| VOF | Volume of Fluid (Volume de fluido) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------------|--|
| K | Permeabilidade |
| $\bar{\bar{K}}$ | Tensor de permeabilidade |
| L_c | Comprimento característico do objeto que está sob o escoamento |
| P | Pressão |
| Re | Número de Reynolds |
| $S_{\alpha q}$ | Termo de geração de massa |
| U | Velocidade do escoamento |
| \vec{U} | Vetor de velocidade |
| U_f^{n+1} | Velocidade através da face f no passo de tempo $n + 1$ |
| V_f | Fração volumétrica de fibra |
| W_i | Função peso |
| α_q | Fração volumétrica do fluido q |
| $\alpha_{q,f}^{n+1}$ | Fração volumétrica do fluido q na face f no passo de tempo $n + 1$ |
| Γ | Área |
| Γ_{el} | Área do elemento |
| Δp | Diferença de pressão |
| $\varepsilon_h^{\mathcal{L}}$ | Erro do operador |
| ϕ | Propriedade de interesse |
| ϕ_a | Propriedade interesse a ser aproximada |
| μ | Viscosidade do fluido |
| ν | Viscosidade cinemática |
| ∇P | Gradiente de pressão |
| Ω | Volume onde está definida a integral |
| Ω_{el} | Volume do elemento onde está definida a integral |
| Ω_{cell} | Volume na célula de controle |
| t | Variável tempo |
| Δt | Intervalo de tempo entre os instantes n e $n + 1$ |
| $\mathcal{L}(\phi)$ | Operador |
| ρ | Densidade |
| φ | Porosidade |

| | |
|--------------|---|
| \hat{n} | Direção normal à superfície |
| \mathbf{u} | Vetor de velocidade superficial da resina |
| x | Variável de distância no plano |
| x_f | Distância da frente de fluxo |
| h | Espessura do laminado |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | COMPÓSITO | 16 |
| 2.1.1 | Definição | 16 |
| 2.1.2 | Classificação | 17 |
| 2.1.2.1 | <i>Reforçados com partículas</i> | 17 |
| 2.1.2.2 | <i>Reforçados com fibras</i> | 18 |
| 2.1.2.3 | <i>Compósitos estruturais</i> | 18 |
| 2.1.2.4 | <i>Laminados</i> | 18 |
| 2.1.2.5 | <i>Fibras</i> | 18 |
| 2.1.2.6 | <i>Matriz</i> | 19 |
| 2.2 | MANUFATURA | 20 |
| 2.3 | VACUUM-ASSISTED RESIN TRANSFER MOLDING (VARTM) | 22 |
| 2.3.1 | Tipologia e Funcionamento | 23 |
| 2.3.2 | Relações constitutivas | 26 |
| 2.3.3 | Propriedades importantes | 27 |
| 2.4 | DINÂMICA DOS FLUIDOS | 27 |
| 2.4.1 | Tipologia | 28 |
| 2.4.2 | Regimes de escoamento | 28 |
| 2.5 | ANÁLISE COMPUTACIONAL | 29 |
| 2.5.1 | Volumes finitos | 30 |
| 2.5.1.1 | <i>Origem e diferenciação dos outros métodos</i> | 30 |
| 2.5.1.2 | <i>Formulação</i> | 31 |
| 2.5.2 | Desenvolvimento da malha | 32 |
| 2.5.2.1 | <i>Volumes de controle</i> | 33 |
| 2.5.3 | Volume of Fluid | 34 |
| 2.5.3.1 | <i>Cálculos em estado estacionário e transiente utilizando o VOF</i> | 35 |
| 2.5.3.2 | <i>Formulação implícita e explícita</i> | 35 |
| 2.5.3.3 | <i>Esquemas (Schemes) ou métodos de interpolação</i> | 36 |
| 2.5.3.4 | <i>Propriedades dos Materiais</i> | 38 |
| 2.5.3.5 | <i>Equação da conservação do movimento</i> | 38 |
| 2.5.4 | Difusão numérica | 39 |
| 2.6 | ESTUDOS CORRELATOS | 40 |
| 2.6.1 | Análises semelhantes | 40 |
| 2.6.2 | Análises considerando a escala microscópica | 42 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 2.6.3 | Análise da compactação da fibra | 44 |
| 2.6.4 | Análise com a inclusão da parcela térmica | 45 |
| 2.6.5 | Diferentes métodos para a resolução de processos VARTM | 46 |
| 2.6.6 | Análise estocásticas | 47 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 48 |
| 3.1 | ESTUDO DE CASO 1 | 48 |
| 3.2 | ESTUDO DE CASO 2 | 50 |
| 3.3 | ESTUDO DE CASO 3 | 51 |
| 3.4 | ESTUDO DE CASO 4 | 54 |
| 4 | RESULTADOS | 55 |
| 4.1 | ESTUDO DE CASO 1 | 55 |
| 4.2 | ESTUDO DE CASO 2 | 57 |
| 4.3 | ESTUDO DE CASO 3 | 63 |
| 4.4 | ESTUDO DE CASO 4 | 68 |
| 5 | CONCLUSÃO | 72 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS | 73 |
| | REFERÊNCIAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de materiais compósitos em aplicações industriais, impulsionada pela busca por materiais leves, resistentes e duráveis, especialmente nos setores aeroespacial, automotivo e naval, motivou diversos pesquisadores a investigarem o processo moldagem por infusão de resina assistida por vácuo (VARTM) (Naik; Sirisha; Inani, 2014; Tuncol; Loos; Cano, 2011). Existe também uma grande necessidade de métodos de fabricação eficientes e de baixo custo, capazes de produzir componentes de alta qualidade e geometria complexa, como cascos de barcos e painéis automotivos, justifica o interesse no estudo e aprimoramento do VARTM (Dong, 2006; Johnson; Pitchumani, 2007). Além disso, a busca por materiais mais sustentáveis e com menor impacto ambiental também impulsiona o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais, como o linho, que apresentam propriedades interessantes e vantagens econômicas em relação aos materiais à base de petróleo (Vo et al., 2022).

O processo VARTM, apesar de suas vantagens, apresenta desafios significativos na fabricação de compósitos de alta qualidade. E por consequência, existem várias áreas que devido à complexidade do fenômeno de fluxo de resina em meios porosos, são alvos recorrentes de pesquisas, como a formação de bolhas de ar e regiões secas durante a etapa de enchimento do molde. Esses problemas frequentemente atribuídos aos defeitos em peças produzidas pelo processo VARTM, isso acontece principalmente quando a aplicação do processo é feita em peças de maiores dimensões ou com geometrias complexas, como painéis balísticos (Park et al., 2011a; Johnson; Pitchumani, 2007; Moretti et al., 2023; Gokce et al., 2005). Bem como prever com precisão caracterização da permeabilidade de um pré-formado de tecido e a dinâmica da interface gás-líquido usando o método *Volume of fluid* (VOF) ainda é um grande desafio, pois são fatores chave que afetam a precisão da modelagem do processo (Mulbah et al., 2022; Yalcinkaya; Caglar; Sozer, 2017). Outro desafio está na característica da permeabilidade poder variar dependendo da arquitetura do reforço, porosidade, propriedades da resina e condições de processamento, o que dificulta sua determinação precisa e a obtenção de resultados consistentes entre diferentes estudos (Vernet et al., 2014).

Este trabalho propõe a aplicação numérica do processo VARTM, utilizando o software Ansys Fluent, para replicar o tempo de preenchimento nesse processo. Para isso é necessário realizar uma revisão de literatura afim de adquirir o conhecimento necessário sobre o processo, bem como realizar uma validação das simulações a partir de experimentos obtidos na literatura. A partir disso modelar uma extrapolação com o método já validado para identificar a influência de diferentes parâmetros do processo.

Para alcançar esses objetivos, foi conduzida uma revisão bibliográfica sobre compósitos, a partir de suas definições e características, da mesma forma, para os processos de manufatura como um todo, com ênfase no processo de Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM). Em seguida, foram discutidos os fundamentos da dinâmica dos fluidos, incluindo uma análise dos diferentes regimes de escoamento e a importância dos métodos numé-

ricos na resolução do escoamento multifásico em meios porosos, como o método de volumes finitos e o modelo *Volume of Fluid* (VOF). Subsequentemente, foi feita uma revisão de estudos correlatos, abrangendo áreas como a escala microscópica, compactação de fibra, inclusão da parcela térmica, implementação de estudos estocásticos e métodos diferentes para a resolução numérica do processo VARTM. Após isso, foram realizadas simulações computacionais utilizando o software Ansys Fluent para analisar diferentes estudos de caso na fabricação de compósitos. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais disponíveis nos artigos referentes aos estudos de caso. Por fim, foram discutidas as implicações dos resultados obtidos, destacando as contribuições do estudo para a otimização do processo de fabricação de compósitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo de revisão bibliográfica, explorar-se-á os principais avanços na fabricação de compósitos, incluindo os processos de manufatura, com foco especial no processo de injeção de resina assistida por vácuo (VARTM). Assim como, os princípios fundamentais da dinâmica dos fluidos utilizados no processo de VARTM e será discutido o papel do CFD como uma ferramenta de simulação essencial para otimização do processo, bem como o método que será utilizado para a feitura das simulações posteriormente. Por último foi feito uma revisão de estudos correlatos do processo VARTM.

2.1 COMPÓSITO

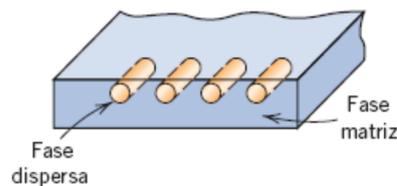
Segundo Callister (2021), o surgimento dos compósitos como uma classe de materiais distintos ocorreu no século XX, com a produção de compósitos multifásicos como os polímeros reforçados com fibras de vidro. Embora materiais multifásicos fossem conhecidos há milênios, o reconhecimento desse novo conceito de combinar materiais durante a fabricação levou à identificação dos compósitos como uma nova classe de materiais. Como esse conceito é capaz de formar propriedades que não podem ser obtidas por metais, cerâmicas ou polímeros convencionais utilizados individualmente. Isso abriu um novo universo de materiais que são essenciais para diversas aplicações de alta tecnologia, como na indústria aeroespacial, submarina, bioengenharia e transporte. Por exemplo, os engenheiros aeroespaciais buscam materiais estruturais que sejam leves, rígidos, tenham resistência à abrasão, impacto e corrosão. No entanto, entre os materiais convencionais, geralmente, o aumento da resistência ou rigidez resulta em uma redução da tenacidade.

2.1.1 Definição

Um material composto pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais distintos, resultando em propriedades superiores às dos materiais individuais usados isoladamente. Ao contrário das ligas metálicas, onde os componentes interagem em uma escala atômica, nos materiais compostos, cada material mantém suas propriedades químicas, físicas e mecânicas separadas. Esses materiais são combinados em uma escala macroscópica e são normalmente compostos por uma fibra e uma matriz. Fibras típicas incluem vidro, aramida e carbono, que podem ser contínuas ou descontínuas, enquanto as matrizes podem ser feitas de polímeros, metais ou cerâmicas. Na fabricação de compósitos, cientistas e engenheiros manipulam esses materiais de forma a criar composições com características mecânicas otimizadas, como rigidez, tenacidade e resistência, adequadas para diversas aplicações e condições de temperatura. Essa característica dos compósitos permite a maximização das propriedades desejáveis e a minimização das indesejáveis, desempenhando um grande papel na engenharia moderna (Campbell, 2003; Callister, 2021; Mendonça, 2005).

Os materiais compósitos frequentemente consistem em duas fases distintas: uma matriz contínua que envolve a segunda fase, conhecida como fase dispersa (Figura 1). As propriedades dos compósitos são determinadas pelas características das fases constituintes, suas proporções relativas e pela geometria da fase dispersa (Callister, 2021).

Figura 1 – Fases de um compósito.

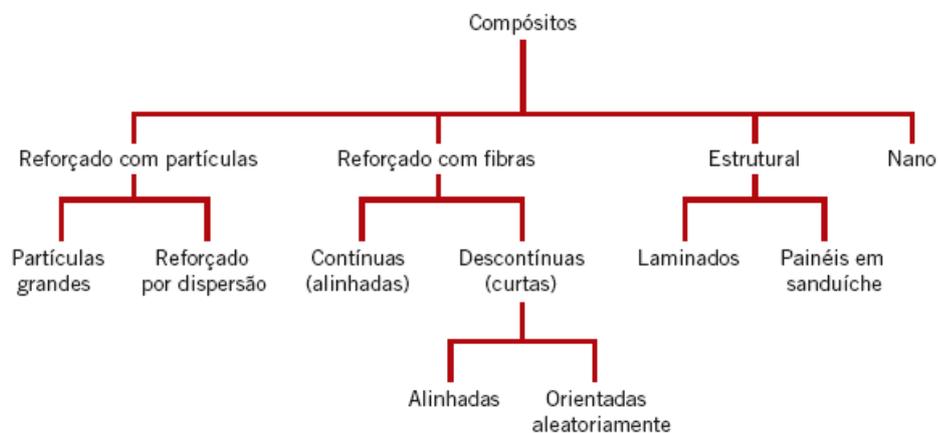


Fonte: Callister (2021).

2.1.2 Classificação

A Figura 2 ilustra o diagrama de classificação dos compósitos, que será explorado em detalhes posteriormente.

Figura 2 – Classificação dos compósitos.



Fonte: Callister (2021).

2.1.2.1 Reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas podem ser subdivididos em duas categorias principais: aqueles com partículas grandes e os reforçados por dispersão. A distinção entre eles reside no mecanismo de reforço. Nos compósitos com partículas grandes, as interações partícula-matriz são tratadas em uma escala macroscópica, enquanto nos reforçados por dispersão, essas interações ocorrem em nível atômico ou molecular. Em ambos os casos, as partículas reforçadoras tendem a restringir o movimento da matriz, resultando em um aumento da resistência mecânica (Callister, 2021).

2.1.2.2 *Reforçados com fibras*

Os compósitos reforçados com fibras são essenciais na tecnologia, especialmente quando a fase dispersa assume a forma de fibra. Eles são projetados para proporcionar alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso, expressas pelos parâmetros de resistência específica e módulo específico. A subdivisão dos compósitos reforçados com fibras é baseada no comprimento das fibras, sendo os compósitos com fibras curtas caracterizados por fibras que não oferecem uma melhoria significativa na resistência (Callister, 2021).

2.1.2.3 *Compósitos estruturais*

Um compósito estrutural é um material composto por várias camadas, conhecido pela sua baixa massa específica e usado em aplicações que requerem integridade estrutural, alta resistência à tração, compressão e torção, além de rigidez. Suas propriedades são determinadas não apenas pelos materiais constituintes, mas também pelo design geométrico das várias camadas. Os compósitos laminados e os painéis-sanduíche são exemplos comuns de compósitos estruturais (Callister, 2021).

2.1.2.4 *Laminados*

Os compósitos de fibras contínuas são materiais laminados em que as camadas individuais, ou lâminas, são orientadas para maximizar a resistência na direção principal da carga. Laminados unidirecionais (0°) são extremamente fortes e rígidos na direção 0° , mas muito fracos na direção 90° , devido à menor resistência da matriz polimérica, que possui uma resistência à tração de apenas 5-10 ksi, comparada aos 500 ksi ou mais das fibras de alta resistência. As fibras suportam as cargas de tração e compressão longitudinal, enquanto a matriz distribui as cargas entre as fibras e impede que elas se dobrem sob compressão, além de suportar a carga de cisalhamento interlaminar e tensão transversal (90°). A orientação das fibras impacta diretamente nas propriedades mecânicas, e, embora pareça lógico orientar o máximo de camadas na direção principal da carga, é necessário equilibrar a capacidade de suporte de carga em várias direções (0° , $+45^\circ$, -45° e 90°). Um laminado balanceado com igual número de camadas nessas direções é chamado de laminado quasi-isotrópico, pois suporta cargas igualmente em todas as direções (Campbell, 2003).

2.1.2.5 *Fibras*

De acordo com Campbell (2003), fibras em compósitos têm a função principal de fornecer resistência e rigidez. No entanto, as fibras de alta resistência são frágeis, apresentam comportamento linear de tensão-deformação com pouca ou nenhuma evidência de escoamento. Têm baixa deformação até a ruptura (1-2% para o carbono) e mostram variações de resistência maiores que os metais.

- Fibras de vidro, como E-glass e S-2 glass, são amplamente utilizadas devido ao seu bom equilíbrio de propriedades mecânicas e baixo custo. E-glass é comum em produtos comerciais por sua resistência à corrosão e boas características de manuseio, enquanto S-2 glass é usada em aplicações estruturais exigentes.
- Fibras de quartzo são utilizadas em aplicações elétricas devido à sua baixa constante dielétrica, embora sejam muito caras. Fibras de aramida (como Kevlar) são extremamente resistentes, com baixa densidade e excelente tolerância a danos, mas têm desempenho ruim sob compressão e são sensíveis à luz ultravioleta. Fibras de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE), como Spectra, têm baixa densidade e alta resistência específica, mas são limitadas a temperaturas abaixo de 290°C e têm baixa adesão à matriz.
- Fibras de carbono combinam propriedades excepcionais, como baixa densidade, baixo coeficiente de expansão térmica e excelente resistência à fadiga, mas são caras e frágeis. Fibras de carbono têm uma ampla gama de resistência e rigidez, classificadas como alta resistência, módulo intermediário ou alto módulo. Fibras de grafite são carbonizadas a temperaturas mais altas e têm maior módulo.
- Fibras Boron tem excelente resistência à compressão e fibras cerâmicas de alta temperatura, como carbeto de silício (Nicalon) e óxidos de alumínio, usadas principalmente em compósitos cerâmicos.

2.1.2.6 *Matriz*

Segundo Campbell (2003), matriz em um compósito desempenha diversas funções cruciais, incluindo manter as fibras em posição, protegê-las de danos, transferir cargas entre elas e fornecer resistência ao cisalhamento entre camadas. Uma matriz bem escolhida também oferece resistência ao calor, produtos químicos e umidade, além de apresentar alta capacidade de deformação antes da falha. Idealmente, ela deve curar em baixas temperaturas, ter um longo tempo de trabalho e não ser tóxica. As resinas termofixas mais comuns usadas como matrizes em compósitos são poliésteres, vinilésteres, epóxis, bismaleimidas, poliamidas e fenólicos. As matrizes podem ser termofixas ou termoplásticas. As termofixas geralmente consistem em uma resina (como epóxi) e um agente de cura compatível. Quando misturados, formam um líquido de baixa viscosidade que cura com calor interno ou externo. A cura cria ligações cruzadas entre as cadeias moleculares, resultando em um sólido resistente que não pode ser reprocessado. Já os termoplásticos são materiais completamente reagidos e de alta viscosidade que não formam ligações cruzadas ao serem aquecidos. Em vez disso, eles amolecem ou derretem, permitindo o reprocessamento.

2.2 MANUFATURA

De acordo com Groover (2010), manufatura pode ser definida de duas formas, tecnológica e econômica. Na primeira, a manufatura é a aplicação de processos físicos e químicos para alterar a geometria, propriedades e/ou aparência de um material inicial para fazer peças ou produtos; manufatura também inclui a montagem de múltiplas peças para fazer produtos. Os processos para realizar a manufatura envolvem uma combinação de máquinas, ferramentas, energia e trabalho. Manufatura é quase sempre realizada como uma sequência de operações. Cada operação aproxima o material do estado final desejado. E em sua definição econômica, é a transformação de materiais em itens de maior valor por meio de uma ou mais operações de processamento e/ou montagem. O ponto chave é que a manufatura agrega valor ao material quando muda sua forma ou propriedades, ou ao combiná-lo com outros materiais que foram alterados de maneira semelhante. A maioria dos materiais de engenharia pode ser classificada em uma das três categorias básicas e cada uma tem propriedades químicas, mecânicas e físicas diferentes. Essas diferenças afetam os processos de manufatura que podem ser usados para produzir produtos a partir deles. Sendo elas:

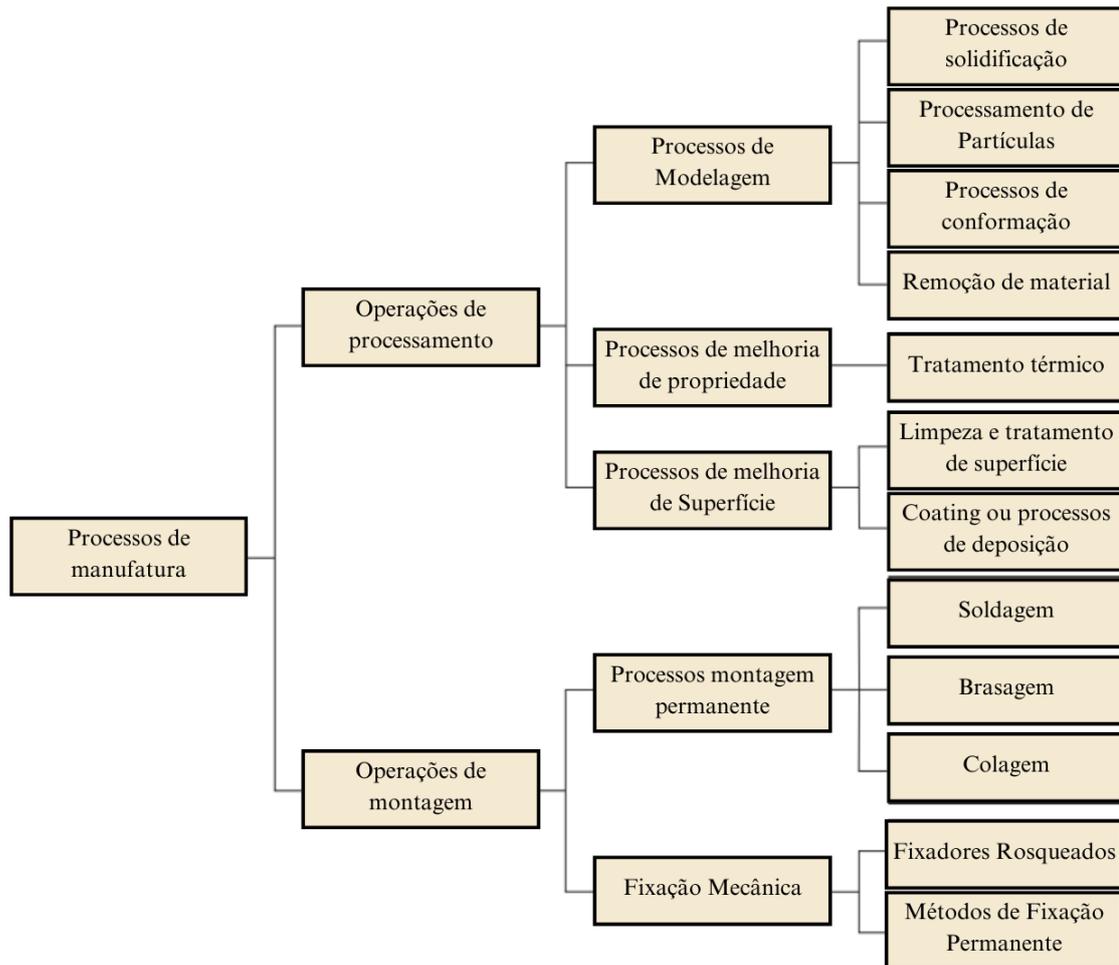
1. Metais,
2. Cerâmicas,
3. Polímeros.

Além das três categorias básicas, existem os Compósitos e misturas não homogêneas dos outros três tipos básicos, já explorados na seção anterior.

Um processo de manufatura é um procedimento que resulta em mudanças físicas e/ou químicas em um material inicial com a intenção de aumentar o valor desse material. Geralmente é realizado como uma operação unitária, o que significa que é uma única etapa na sequência de etapas necessárias para transformar o material inicial em um produto final. As operações de manufatura podem ser divididas em dois tipos básicos: operações de processamento e de montagem. Sendo a primeira transforma um material de trabalho de um estado de conclusão para um estado mais avançado, ou seja, mais próximo do produto final desejado. Ela agrega valor ao mudar a geometria, propriedades ou aparência do material inicial. Em geral, as operações de processamento são realizadas em peças de trabalho discretas, mas certas operações de processamento também são aplicáveis a itens montados, como por exemplo, a pintura de um corpo de carro soldado por pontos. Já a operação de montagem une dois ou mais componentes para criar uma nova entidade, chamada de montagem, sub-montagem ou algum outro termo que se refira ao processo de união como por exemplo, uma montagem soldada é chamada de solda. A classificação dos processos de manufatura é apresentada na Figura 3 (Groover, 2010).

No trabalho de Campbell (2003), são citados diversos métodos de manufatura para compósitos, sendo eles:

Figura 3 – Processos de manufatura.



Fonte: Groover (2010).

- **Laminação por pré-impregnação:** Processo em que camadas individuais pré-impregnadas são colocadas em um molde e curadas. É o processo mais utilizado para compósitos de alto desempenho na indústria aeroespacial, capaz de produzir peças complexas e de alta qualidade, mas é caro devido à colocação manual das camadas.
- **Enrolamento Filamentar:** Utilizado há anos para construir estruturas eficientes em forma de corpos de revolução. As fibras secas são puxadas através de um banho de resina antes de serem enroladas em um mandril. A cura geralmente ocorre em um forno, com ou sem saco de vácuo.
- **Laminação Manual Úmida (*Hand Lay-up*):** Usado para construir grandes estruturas, como cascos de iates. É econômico para pequenas quantidades. Reforços secos são colocados manualmente e impregnados com resina. A cura pode ser feita à temperatura ambiente ou elevada, geralmente sem saco de vácuo.
- **Moldagem por Spray (*Spray-up*):** Mais econômico que a laminação manual úmida, mas com propriedades mecânicas inferiores devido ao uso de fibras picadas aleatoriamente.

As fibras de vidro contínuas são picadas, misturadas com resina e pulverizadas no molde. A compactação manual é usada para compactar as camadas.

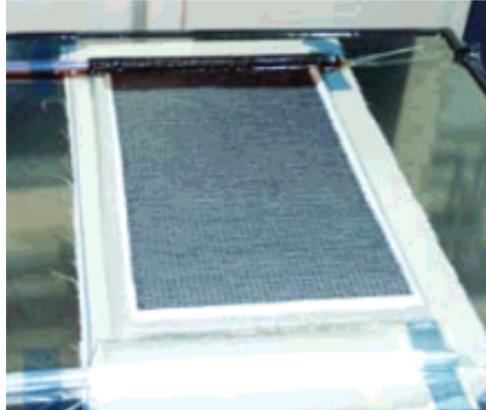
- **Moldagem Líquida:** Cobre um conjunto de processos. Na moldagem por transferência de resina (RTM), um pré-forma seco é colocado em um molde metálico e a resina de baixa viscosidade é injetada sob pressão. A cura ocorre no molde aquecido. Variações incluem RTM assistida por vácuo (VARTM), que é o principal processo desse trabalho.
- **Moldagem por Compressão:** Utiliza composto de moldagem em folha (SMC) ou composto de moldagem a granel (BMC) descontínuos e aleatoriamente orientados. Uma carga de peso predeterminado é colocada entre os moldes, onde calor e pressão são aplicados. O composto flui para preencher o molde e cura rapidamente.
- **Moldagem por Injeção:** Processo de alto volume para peças pequenas e médias. Reforço geralmente é de fibra de vidro picada com resina termoplástica ou termofixa. Pellets são aquecidos e injetados sob alta pressão em um molde.
- **Pultrusão:** Produz peças longas e de espessura constante. As fibras de vidro secas são puxadas através de um banho de resina, pré-formadas e curadas em um molde aquecido. Peças curadas são puxadas e cortadas no comprimento desejado.

2.3 VACUUM-ASSISTED RESIN TRANSFER MOLDING (VARTM)

Existem diversas metodologias para produzir estruturas compostas de polímeros. Uma delas é a técnica de Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM), também conhecida por infusão à vácuo (VI), moldagem à vácuo (VM), Injeção de resina flexível (RIFT) e Processo de Moldagem por Infusão de Resina Composta Seemann (SCRIMP) (Correia et al., 2005). Esta abordagem é versátil, pois não requer equipamentos especiais, como fornos, para moldar a estrutura composta, tornando-a aplicável a uma ampla gama de tamanhos de estrutura. Durante o processo, as camadas do compósito são envolvidas por um material plástico, enquanto a resina é sugada para dentro do compósito envolvido, preenchendo os espaços entre as camadas (Kwon, 2015).

A VARTM tem representado um avanço significativo na tecnologia de fabricação de compósitos. Esse processo, representado na Figura 4, é utilizado para produzir compósitos de alto desempenho, destacando-se na razão custo/eficiência para processar compósitos de alto desempenho. Esta técnica de fabricação apresenta uma vantagem competitiva devido às suas baixas emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) e sua eficiência em termos de custos. A aplicação da técnica também pode contribuir para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do compósito, além de potencialmente evitar uma distribuição não uniforme da resina na matriz (Nik Wan et al., 2023).

Figura 4 – Experimento do processo de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM).



Fonte: Bekyarova et al. (2007).

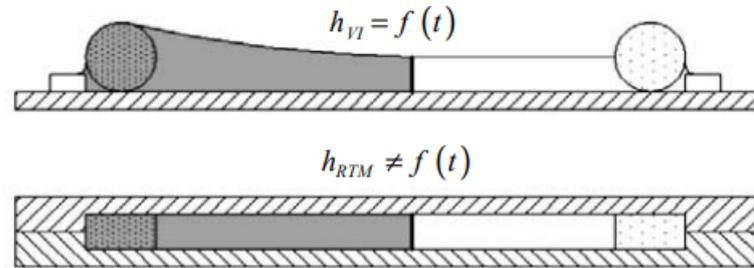
2.3.1 Tipologia e Funcionamento

A infusão a vácuo é um processo de produção de infusão de resina em molde fechado que apresenta semelhanças com a moldagem por transferência de resina (RTM). A principal diferença é que os moldes rígidos de duas partes totalmente fechados usados na RTM são substituídos por um molde rígido de uma única parte selado com um saco/bolsa a vácuo, na Figura 5 representa a diferença dos processos VARTM e RTM. O reforço é colocado no molde rígido com uma camada de meio de distribuição de fluxo removível, usado para reduzir o tempo de preenchimento, juntamente com uma lona de descascamento (Peel ply) para facilitar o descarte. Entradas e saídas são colocadas e o saco a vácuo é selado ao molde rígido usando uma fita selante. O ar é retirado da cavidade para compactar o pré-formado entre o saco a vácuo e o molde, para submeter a resina a um diferencial de pressão, permitindo que ela flua através do pré-formado compactado. A flexibilidade do saco a vácuo introduz um aspecto novo que não está presente na RTM: o campo de pressão do fluido que induz o fluxo também modifica o estado de compactação local do reforço e, em última análise, altera a permeabilidade. Um modelo de fluxo na VI deve incluir deformações locais do meio poroso e efeitos de compactação na permeabilidade. A permeabilidade mais alta do meio de distribuição de fluxo favorece o fluxo e reduz o tempo de infusão. No entanto, devido às diferenças significativas na permeabilidade, seu uso induz um fluxo através da espessura do reforço, formando uma frente de fluxo tridimensional que avança primeiro através do meio de infusão e fica para trás no reforço (Correia et al., 2005).

Segundo Dai, Pellaton e Hahn (2003), quando o processo VARTM é realizado em painéis sanduíche, existem geralmente duas abordagens empregadas para reduzir o tempo de infusão da resina:

- Método HPL (High-Permeability Layers) ou HPM (High-Permeability Medium): são utilizadas camadas de alta permeabilidade, que consistem em uma malha de arame plás-

Figura 5 – VARTM e RTM.

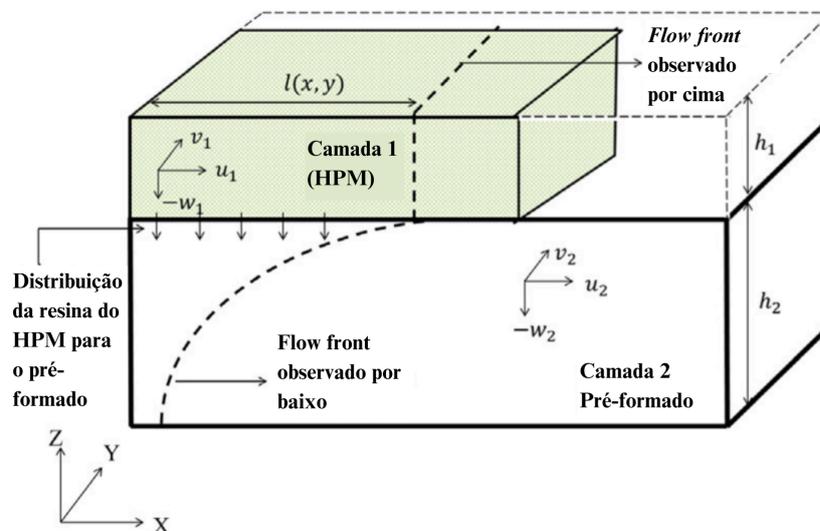


Fonte: Correia et al. (2005).

tica com alta porosidade, aplicadas sobre as camadas de tecido de vidro e essas camadas permitem uma rápida infusão da resina, priorizando o preenchimento das camadas de alta permeabilidade antes do pré-formado de fibra, garantindo uma distribuição uniforme da resina. Dentre toda a minha pesquisa esse é o método mais utilizado para o processo VARTM, representado na Figura 6, pois também pode ser usado para pré formado feito a partir de laminados.

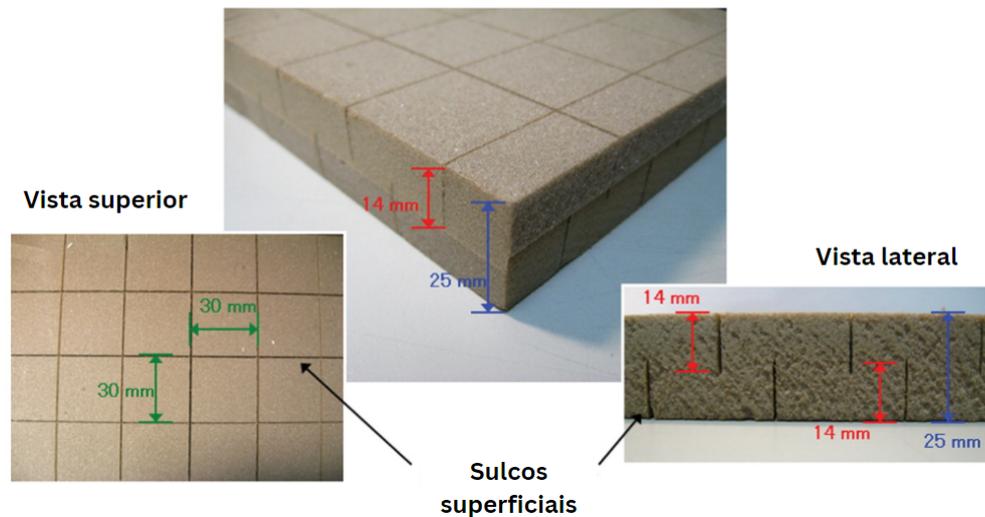
- Método CIC (Channels in Core): canais são introduzidos no material do núcleo do painel, esses são recortes ou sulcos no pré-formado. Assim, a resina flui pelos canais, difundindo-se uniformemente no pré-formado de fibra, proporcionando uma infusão eficiente da resina. A resina é direcionada pelos canais, garantindo uma infusão uniforme no pré-formado de fibra. Esse método foi utilizado no trabalho de Jhan, Lee e Chung (2012), Figura 7.

Figura 6 – Método HPM ou HPL.



Fonte: Adhikari, Gururaja e Hemchandra (2021).

Figura 7 – Método CIC.

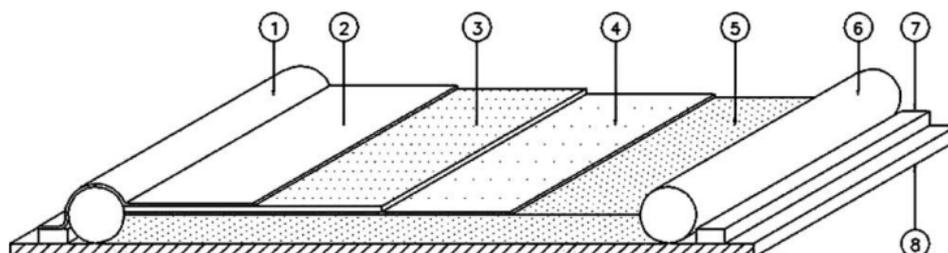


Fonte: Jhan, Lee e Chung (2012).

Dentro do processo experimental de Dai, Pellaton e Hahn (2003), para evitar o ingresso de resina em excesso na bomba, são adicionados um tanque de vácuo e uma barreira entre a bomba e o saco a vácuo. Além disso, uma mola conectada a um tanque de resina serve como porta de linha de injeção. Após o selamento do saco a vácuo e o fechamento da porta de injeção, a bomba de vácuo é ativada para evacuar o ar interno, permitindo então a infusão da resina no molde sob pressão atmosférica. Durante todo o processo de injeção de resina, a bomba de vácuo permanece em funcionamento, assegurando a completa gelificação da resina. Gelificação, que segundo Farsane et al. (2023), é definida como o ponto em que o sistema de cura se transforma abruptamente de um líquido viscoso para um gel elástico, a viscosidade do sistema torna-se infinita e o cisalhamento cresce de zero para valores finitos.

A Figura 8 descreve todos os componentes que compõem o processo de VARTM, sendo eles: Inlet (Entrada) (Fig. 8.1), Bolsa de vácuo (Fig. 8.2), Meio de distribuição (Fig. 8.3), Lona de descascamento (Fig. 8.4), Reforço (Fig. 8.5), Outlet (Saída) (Fig. 8.6), Vedação a vácuo (Fig. 8.7), Bancada do molde (Fig. 8.8).

Figura 8 – Componentes do processo VARTM.



Fonte: Correia et al. (2005).

2.3.2 Relações constitutivas

Correia et al. (2005) descreve a equação (1) como uma relação entre as taxas de fluxo através das fronteiras de um volume de controle e suas taxas de expansão/contração, bem como a densidade do fluido/porosidade do meio dentro dele

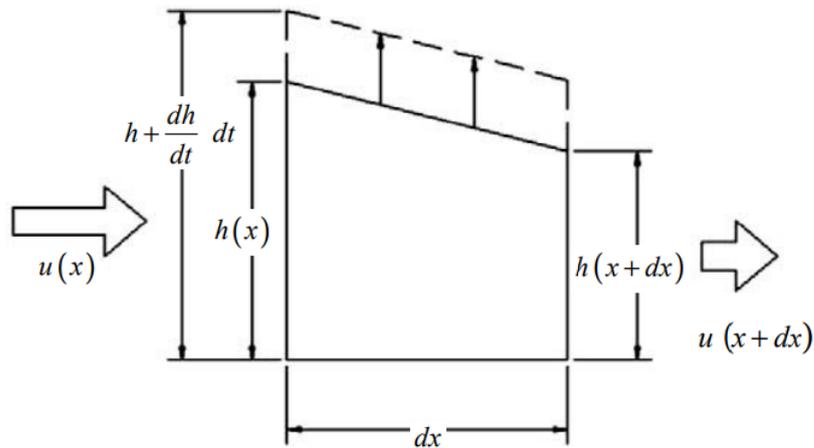
$$\oint_{\Gamma} \rho \cdot \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} - \rho \cdot \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} d\Gamma + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \cdot \varphi d\Omega = 0, \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, Γ é a área, Ω é o volume, \mathbf{u} é o vetor de velocidade superficial da resina ou no plano, $\hat{\mathbf{n}}$ é o versor da direção normal a superfície, t é a variável do tempo e φ é a porosidade. A Figura 9 demonstra a representação do elemento de volume para o processo de infusão a vácuo, e aplicando a equação (1) para esses caso resulta em

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(u, h)}{\partial x}, \quad (2)$$

onde h é a espessura do laminado e x é a variável de distância no plano. Segundo Jhan, Lee e

Figura 9 – Elemento de volume para processo VARTM.



Fonte: Correia et al. (2005).

Chung (2012), a Lei de Darcy para processos de VARTM e RTM é representada por

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

onde \vec{U} é o vetor de velocidade, $\bar{\bar{K}}$ é o tensor de permeabilidade, μ é a viscosidade do fluido e ∇P é o gradiente de pressão. Também pode ser escrita na e na forma expandida

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

bem como, pode ser simplificada para um dimensão

$$\frac{K}{\varphi} = \frac{\mu}{2\Delta p} \frac{L^2}{t}, \quad (5)$$

sendo L o comprimento total do pré-formado e Δp é a diferença de pressão.

2.3.3 Propriedades importantes

Um das propriedades mais importantes dentro do estudo dos processos de VARTM é a fração volumétrica de fibra, que segundo Ansari, Singh e Azam (2018), é uma medida quantitativa que expressa a quantidade de fibra presente em um material compósito em relação ao volume total do material, incluindo tanto as fibras quanto a matriz. Essa fração é fundamental para caracterizar a composição e as propriedades de um laminado compósito. Geralmente expressa como uma porcentagem, a fração volumétrica de fibra influencia uma ampla gama de propriedades mecânicas do material, como rigidez, resistência estática e à fadiga, e capacidade de suporte de carga. Um valor ideal para a fração volumétrica de fibra é tipicamente entre 45% e 60%, pois quando ela é muito alta, a resistência última do compósito pode diminuir devido à falta de resina suficiente para aderir perfeitamente às fibras.

Outra propriedade muito importante é a permeabilidade. Descrita por Naik, Sirisha e Inani (2014), como uma propriedade que depende da arquitetura do reforço, porosidade, características da resina, condições de processamento, design do molde e geometria da peça. As características da resina que afetam a permeabilidade incluem viscosidade, tensão superficial e ângulo de contato. Já as condições de processamento, como pressão de injeção, taxa de fluxo e temperatura, também exercem influência sobre a permeabilidade. É importante ressaltar que a permeabilidade é uma propriedade direcional, variando em três dimensões dentro da pré-forma. A permeabilidade indica a facilidade que a resina se desloca através do meio poroso utilizado. Pode ser classificada como não saturada (transiente) ou saturada (estacionário). Quando o fluxo se estabiliza, o comportamento do fluxo torna-se independente do tempo e da distância percorrida, caracterizando-se como estado estacionário. Nesse caso, a relação entre taxa de fluxo e diferença de pressão é linear. Antes da estabilização do fluxo, seu comportamento depende da distância alcançada pela frente de fluxo e do tempo transcorrido. Isso ocorre em uma condição transitória, caracterizada por permeabilidade transitória ou não saturada. A equação (6) descreve como é a relação entre a fração volumétrica de fibra e a porosidade

$$\varphi = 1 - V_f, \quad (6)$$

onde V_f é a fração volumétrica de fibra.

2.4 DINÂMICA DOS FLUIDOS

Para a resolução dos problemas neste trabalho serão utilizados escoamentos implementados em uma análise computacional, sendo o tópico principal o escoamento de um fluido em

varias camadas de fibra. Nesta situação, um fluido apresenta diferentes comportamentos ou regimes de escoamento.

2.4.1 Tipologia

Quando existe movimento entre duas camadas de um fluido, desenvolve-se uma força de atrito e a camada mais lenta tenta reduzir a velocidade da camada mais rápida. Tal resistência interna ao escoamento é quantificada pela propriedade de viscosidade. Todos os fluidos possuem viscosidade, mas em alguns casos seu efeito é desprezível, permitindo considerá-lo um escoamento não viscoso. Caso contrário, o escoamento é classificado como viscoso. O escoamento dos fluidos também é classificado como interno ou externo dependendo de o escoamento do fluido ser em um espaço confinado ou sobre uma superfície (Çengel; Cimbala, 2015).

2.4.2 Regimes de escoamento

Segundo Çengel e Cimbala (2015), alguns escoamentos são suaves e ordenados, enquanto outros são caóticos. O movimento ordenado dos fluidos, caracterizado por camadas suaves, é denominado laminar. Porém quando o movimento dos fluidos é desordenado, que ocorre em altas velocidades e é caracterizado por flutuações de velocidade, é chamado de turbulento. A transição do escoamento laminar para turbulento depende de fatores como geometria, rugosidade da superfície, velocidade de escoamento, temperatura da superfície e tipo de fluido. Experimentos realizados por Osborne Reynolds na década de 1880 revelaram que o regime de escoamento depende principalmente da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido, expressa pela Fórmula de Reynolds

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{U \cdot L_c}{\nu} \quad \text{ou} \quad Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L_c}{\mu}, \quad (7)$$

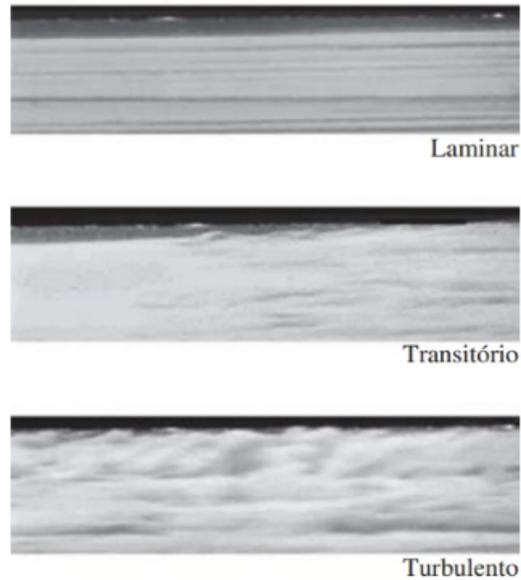
onde Re é o número de Reynolds, U é a velocidade do escoamento, L_c é o comprimento característico do objeto que está sob o escoamento, ν é a viscosidade cinemática.

Segundo Fox e T. (2018), em um duto circular os regimes de Reynolds são delimitados de seguinte forma:

- Escoamento laminar: $Re < 2300$
- Escoamento transitório: $2300 < Re < 4000$
- Escoamento turbulento: $Re > 4000$

A Figura 10 representa um experimento prático que demonstra cada um dos regimes sobre uma placa plana.

Figura 10 – Regimes de escoamento.



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

2.5 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Segundo Maliska (2004) na engenharia, há três principais abordagens para desenvolver projetos e resolver problemas complexos:

- **Métodos Analíticos:** Esses métodos buscam resolver equações matemáticas que descrevem o problema de forma direta. No entanto, eles só são aplicáveis a problemas simples ou que possam ser simplificados, o que pode desviar significativamente do fenômeno real quando aplicados a problemas complexos.
- **Métodos Numéricos:** Esses métodos lidam com a solução de equações complexas usando computadores para realizar cálculos aproximados. Eles são ideais para problemas mais complicados, pois lidam melhor com a complexidade das equações. Um exemplo disso é a simulação numérica, que permite resolver problemas com geometrias complexas e condições de contorno gerais de forma rápida e eficiente.
- **Experimentação em Laboratório:** Esta abordagem envolve testar o problema na configuração real em um ambiente controlado. Embora forneça resultados precisos, é cara e, às vezes, perigosa devido a questões de segurança.

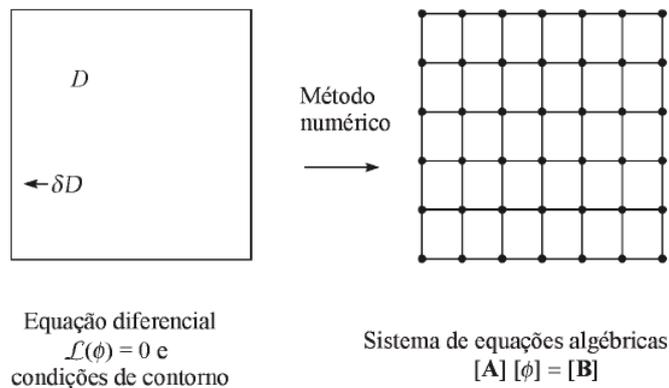
Na prática, uma combinação inteligente de simulação numérica e experimentação em laboratório é recomendada. Isso permite obter resultados precisos e relevantes enquanto reduz custos e tempo de projeto. Para problemas de engenharia que envolvem fluidos, como escoamento de fluidos, o foco principal é nos métodos numéricos devido à natureza altamente não linear das equações de Navier-Stokes, que descrevem esses fenômenos. No entanto, é importante manter em mente a física subjacente do problema, mesmo ao utilizar métodos numéricos,

para garantir que os resultados sejam consistentes com o comportamento real do fenômeno (Maliska, 2004)

2.5.1 Volumes finitos

A tarefa central de um método numérico reside na transformação de uma Equação diferencial parcial (EDP), definida em um domínio contínuo D , em um sistema de equações algébricas discreto. Essa transformação é alcançada através da substituição das derivadas presentes na EDP por expressões algébricas que envolvem a função incógnita em pontos discretos do domínio. Em outras palavras, os métodos numéricos discretizam a EDP, convertendo-a em um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas computacionalmente. Essa discretização, no entanto, introduz um erro inerente ao processo, que deve ser cuidadosamente considerado e minimizado na medida do possível. A Figura 11, ilustra essa ideia ao demonstrar como um método numérico transforma uma EDP em um sistema de equações algébricas. Essa transformação é essencial para a implementação computacional do método, permitindo a obtenção de soluções numéricas para a EDP em questão. É importante ressaltar que a escolha do método numérico mais adequado depende de diversos fatores, como a natureza da EDP, o nível de precisão desejado e os recursos computacionais disponíveis (Maliska, 2004).

Figura 11 – O propósito do método numérico.



Fonte: Maliska (2004).

2.5.1.1 Origem e diferenciação dos outros métodos

Löhner (2008) descreve que os conceitos fundamentais da teoria da aproximação estão na base de qualquer esquema de discretização, seja ele de diferenças finitas, volumes finitos, elementos finitos, elementos espectrais ou elementos de contorno. Sempre que uma Equação Diferencial Parcial (EDP) é resolvida numericamente, a solução exata está sendo aproximada por algum conjunto conhecido de funções. São exemplos de aproximações:

- Séries de Taylor truncadas;

- Expansões de Fourier (por exemplo, séries de senos truncadas);
- Polinômios de Legendre
- Polinômios de Hermite

Todos os métodos numéricos tem origem um único método predecessor, que se chama Método dos resíduos ponderados (Weighted Residuals Method) . Porém cada um com sua característica única, assim permitindo uma melhor abordagem para problemas com características distintas (Löhner, 2008; Maliska, 2019). Enquanto a teoria da aproximação lida com o problema na forma

$$\phi, \text{ quando } \|\phi - \phi^a\| \rightarrow \min, \quad (8)$$

a solução numérica de equações diferenciais ou integrais lida com o seguinte problema na forma

$$\mathcal{L}(\phi) = 0, \text{ quando } \|\mathcal{L}(u) - \mathcal{L}(\phi)^a\| \rightarrow \min \Rightarrow \|\mathcal{L}(\phi)^a\| \rightarrow \min, \quad (9)$$

onde, $\mathcal{L}(\phi)$ denota um operador, como o operador Laplace $\mathcal{L}(\phi) = \nabla^2 \phi$, também pode ser entendido como uma equação diferencial parcial (EDP), bem como, ϕ a propriedade calculada, ϕ^a e $\mathcal{L}(\phi)^a$ é a versão aproximada/numérica da função e operador ϕ e $\mathcal{L}(\phi)$, respectivamente (Maliska, 2019; Löhner, 2008) . $\mathcal{L}(\phi)$ tem como objetivo de minimizar o erro do operador usando funções conhecidas.

$$\varepsilon_{\mathcal{L}}^h = \mathcal{L}(\phi) = \mathcal{L}(N^1 \hat{\phi}_1) \rightarrow 0. \quad (10)$$

Assim, o método de resíduos ponderados representa a maneira mais geral de realizar essa minimização.

$$\int_{\Omega} W^i \varepsilon_{\mathcal{L}}^h d\Omega = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

sendo W^i é uma função peso e junto com o operador $\mathcal{L}(\phi)$ determina método de aproximação.

2.5.1.2 Formulação

Segundo Löhner (2008), diferentemente dos métodos de diferenças finitas (FDM) que são obtidos tomando $W^i = \delta(x_i)$, os métodos de volumes finitos (FVM) são obtidos tomando $W^i = 1$ se $x \in \Omega_{el}$, se não $W^i = 0$, onde as entidades com el subscripto são referentes ao elemento, sendo Ω_{el} é o volume do elemento onde está definida a integral. Como W^i é uma constante de cada um dos respectivos elementos, qualquer integração por partes reduzem-se a integrais de fronteira dos elementos. Para operadores de primeira ordem da forma

$$\mathcal{L}(\phi) = \nabla \cdot \mathbf{F}(\phi), \quad (12)$$

sendo \mathbf{F} uma função de fluxo na face, isso resulta em

$$\int_{\Omega} W^i \mathcal{L}(\phi) d\Omega = \int_{\Omega_{el}} \nabla \cdot \mathbf{F}(\phi) d\Omega_{el} = - \int_{\Gamma_{el}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{F}(\phi) d\Gamma_{el}, \quad (13)$$

onde Γ_{el} é a área do elemento e \mathbf{n} é um versor da direção desse fluxo. Isso implica que apenas os fluxos normais através das faces dos elementos $\mathbf{n} \cdot \mathbf{F}(\phi)$ aparecem na discretização. Métodos de volumes finitos são comumente usados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) em conjunto com malhas estruturadas e não estruturadas. Para operadores com derivadas de segunda ordem, a integração não é mais óbvia, e várias estratégias foram desenvolvidas para contornar essa limitação. Uma das mais populares é avaliar as primeiras derivadas em uma primeira passagem sobre a malha e obter as segundas derivadas em uma passagem subsequente (Löhner, 2008).

2.5.2 Desenvolvimento da malha

No método dos volumes finitos, o conceito de elemento não é tradicionalmente utilizado, já que, para fins de integração, é suficiente definir os volumes de controle. No entanto, ao inicialmente definir os elementos, e posteriormente relacioná-los aos volumes de controle, é possível realizar uma série de generalizações. Isso inclui a criação de uma abstração computacional mais abrangente, com base nos elementos (Maliska, 2004).

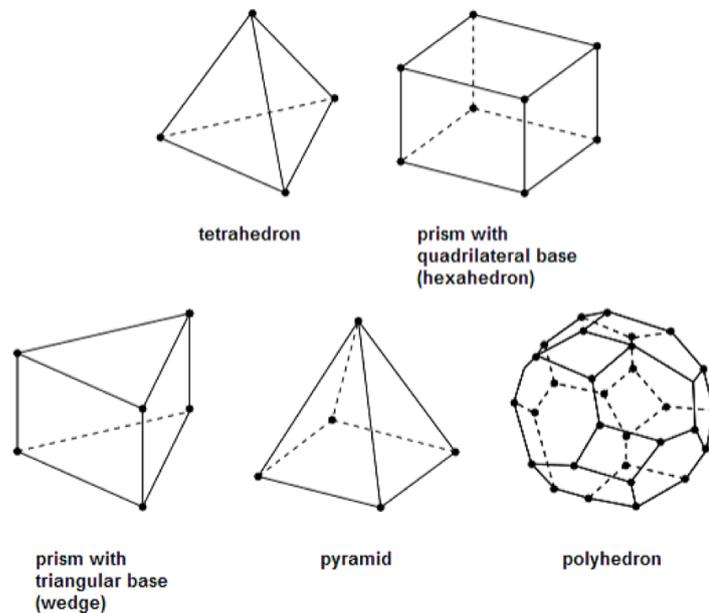
Segundo Bergheau e Fortunier (2008), o conceito de malha para o método de elementos finitos é o domínio geométrico analisado, que é subdividido em uma série de subdomínios de elementos, os quais são conectados por nós, que asseguram certas condições de regularidade da aproximação global em todo o domínio. Este tipo de aproximação também é chamado de aproximação nodal de subdomínio. Ou em uma abordagem mais ampla, quando sólido Ω é dividido em m domínios de elementos, chamados Ω_{el} , como parte da discretização. A vantagem desse método de discretização é a capacidade de representar cada domínio de elemento Ω_{el} de forma geométrica simples, como triângulos ou quadriláteros em 2D, tetraedros ou hexaedros em 3D, entre outros (Figura 12). Esses elementos satisfazem duas condições fundamentais:

- A união dos m domínios de elementos Ω_{el} forma o sólido Ω .
- A interseção entre dois domínios de elementos distintos é vazia.

Quando os volumes de controle são definidos por uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais, como ilustrado nas Figura 13.a, chamamos a malha resultante de estruturada, pois cada volume interno sempre possui o mesmo número de vizinhos. Logo, se os volumes da malha seguem uma determinada lei de construção, mantendo sempre o mesmo número de vizinhos, diz-se que a malha é estruturada (Maliska, 2004).

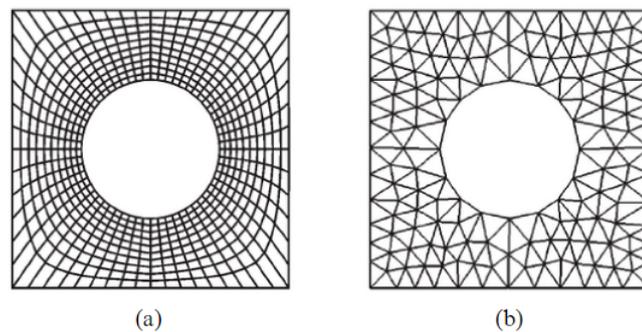
As malhas estruturadas apresentam vantagens, como a facilidade de ordenação, o que resulta em matrizes diagonais que tornam o desenvolvimento de solvers mais simples e eficientes. No entanto, devido à complexidade da geometria em problemas reais, nem sempre é

Figura 12 – Tipos de elementos.



Fonte: Aeroengineering (2020)

Figura 13 – Tipos de malha.



Fonte: Maliska (2004).

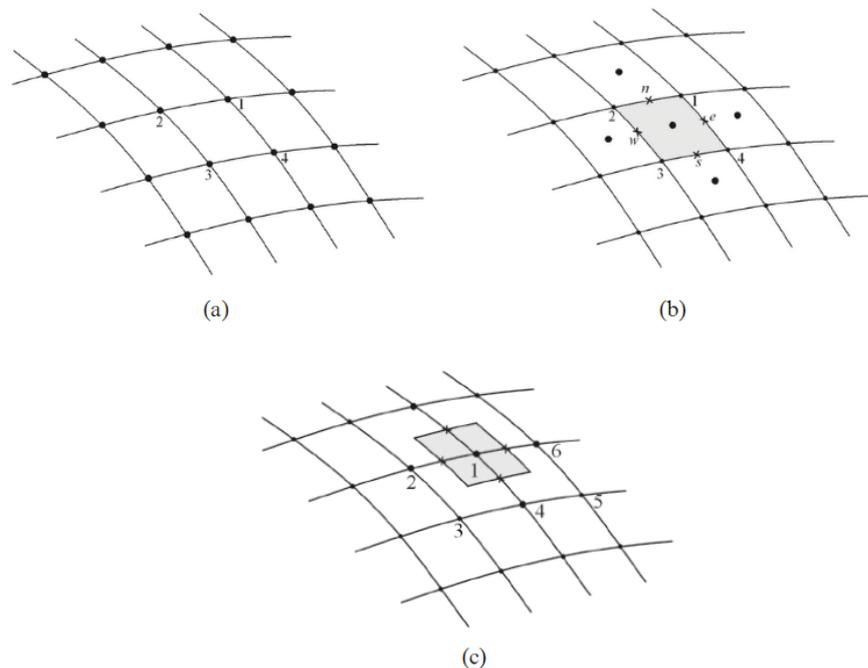
possível utilizar malhas estruturadas. Por outro lado, as malhas não estruturadas (Figura 13.b) são mais versáteis e têm maior adaptabilidade, sendo mais adequadas para discretizar geometrias irregulares. Em muitos problemas, apenas malhas não estruturadas conseguem discretizar adequadamente o domínio. No entanto, elas enfrentam a dificuldade da ordenação, o que resulta em matrizes não diagonais (Maliska, 2004).

2.5.2.1 Volumes de controle

A criação dos volumes de controle é realizada com base nos elementos, sendo que existem três classes básicas de métodos que se baseiam na relação geométrica entre o volume de controle e o elemento (Maliska, 2004). Os volumes de controle podem ser subdivididos em 3 classes:

- *Cell center* (Figura 14.a) : o volume de controle é selecionado como sendo o próprio elemento, com as variáveis a serem determinadas armazenadas no centro do volume de controle (ou do elemento). Nesse caso, o centro do volume de controle coincide com o centro do elemento (Maliska, 2004).
- *Cell vertex* (Figura 14.c): o volume de controle é construído com o centro nos nós da malha. Assim, as incógnitas são armazenadas nos nós da malha e nos pontos que definem o elemento, uma vez que a incógnita está sempre armazenada no centro do volume de controle (Maliska, 2004).
- Construção clássica do método dos volumes finitos em coordenadas generalizadas (Figura 14.b): os fluxos são avaliados nos pontos de integração, localizados no meio de cada face. Portanto, para calcular esses fluxos, são necessários os valores da função incógnita nos centros dos volumes vizinhos. Essa situação também se aplica quando uma malha não estruturada é empregada e os elementos são utilizados como volumes de controle (Maliska, 2004).

Figura 14 – Malha formada por diferentes elementos.



Fonte: Maliska (2004).

2.5.3 Volume of Fluid

O modelo VOF (*Volume of Fluid*) é capaz de representar a interação de dois ou mais fluidos que não se misturam ao resolver um único conjunto de equações de momento. Ele acompanha a fração de volume de cada fluido em todo o domínio, permitindo a análise de

uma variedade de cenários, como a quebra de jatos, o movimento de grandes bolhas em um líquido e o comportamento de líquidos após o rompimento de barragens. É uma ferramenta valiosa para estudar a dinâmica de interfaces líquido-gás, tanto em situações estáticas quanto transitórias (ANSYS, 2023).

2.5.3.1 Cálculos em estado estacionário e transiente utilizando o VOF

A formulação VOF (*Volume of Fluid*) no Ansys Fluent pode calcular tanto soluções dependentes do tempo quanto em estado estacionário. Baseia-se na ideia de que dois ou mais fluidos não se misturam, com uma variável introduzida para cada fase adicional no modelo: a fração de volume da fase em cada célula computacional (ANSYS, 2023).

Em cada célula de controle, as frações de volume de todas as fases somam-se totalizando o valor 1. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume, desde que a fração de volume de cada fase seja conhecida em cada local. Portanto,

Se $q^{\text{ésimo}}$ é um fluido que pertence ao sistema e α_q a fração de volume do desse fluido na célula, então três condições são possíveis:

- $\alpha_q = 0$: A célula está vazia (do fluido $q^{\text{ésimo}}$).
- $\alpha_q = 1$: A célula está cheia (do fluido $q^{\text{ésimo}}$).
- $0 < \alpha_q < 1$: A célula contém a interface entre o fluido $q^{\text{ésimo}}$ e um ou mais outros fluidos.

O Ansys Fluent calcula a Fração volumétrica através de

$$\frac{1}{\rho_q} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (14)$$

onde S_{α_q} pode ser especificado como um termo de geração de massa devido a uma reação química devido a interação das fases, n denota o passo de tempo, \dot{m}_{pq} sendo a vazão mássica da fase p para fase q e \dot{m}_{qp} a vazão mássica da fase q para a fase p (Barral Jr.; Minussi; Canhoto Alves, 2019). Porém, equação da fração de volume não será resolvida para a fase primária; a fração de volume da fase primária será calculada com base na seguinte restrição:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (15)$$

2.5.3.2 Formulação implícita e explícita

Quando a formulação implícita é utilizada, a equação da fração de volume é discretizada da seguinte forma:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} \Omega_{cell} + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left(S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right) \Omega_{cell}, \quad (16)$$

onde Δt é o intervalo de tempo entre os instantes n e $n + 1$, Ω_{cell} é volume na célula de controle, U_f^{n+1} é a velocidade através da face f no passo de tempo $n + 1$. e $\alpha_{q,f}^{n+1}$ é a fração volumétrica do fluido q na face f no passo de tempo $n + 1$. Uma vez que a fração de volume no momento atual depende de outras variáveis nesse mesmo momento, uma equação de transporte escalar é resolvida de forma iterativa para cada fração de volume da fase secundária em cada etapa de tempo. Os fluxos nas faces são calculados através de interpolação, utilizando o esquemas (*scheme*) de discretização espacial escolhido (ANSYS, 2023).

Quando a formulação explícita é utilizada, a equação da fração de volume é discretizada da seguinte forma:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} \Omega_{cell} \Omega_{cell} + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left(S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right) \Omega_{cell}. \quad (17)$$

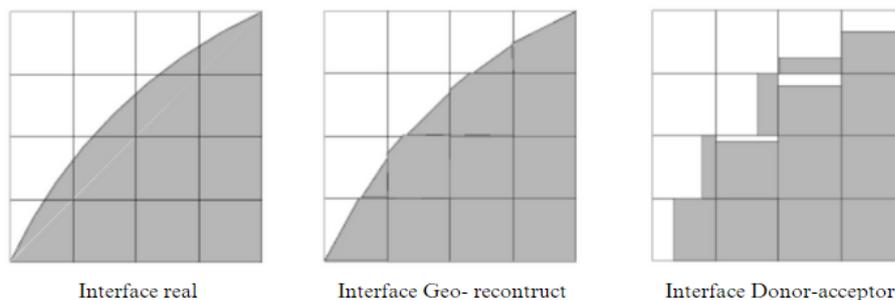
Como a fração de volume no passo de tempo atual é calculada diretamente com base em quantidades conhecidas no passo de tempo anterior, a formulação explícita não requer uma solução iterativa da equação de transporte durante cada passo de tempo. Os fluxos nas faces podem ser interpolados utilizando esquemas (*schemes*) de rastreamento ou captura de interface, como *Geo-Reconstruct*, *CICSAM*, *Compressive e Modified HRIC* (ANSYS, 2023).

2.5.3.3 Esquemas (Schemes) ou métodos de interpolação

De maneira geral, um esquema numérico pode ser compreendido como uma descrição algorítmica que, quando corretamente aplicada, produzirá uma solução para um problema matemático. Você pode pensar nele como uma receita de culinária: se você a seguir cuidadosamente, acabará com uma solução numérica para um problema de entrada (Rapp, 2017).

Na abordagem de reconstrução geométrica ou geometric reconstruction (Figura 15.b), a interface entre os fluidos é representada de forma linear por partes. Quando uma célula está completamente preenchida com uma fase, os fluxos de face são obtidos utilizando os esquemas de interpolação padrão do Ansys Fluent. Por outro lado, se a célula está próxima da interface entre duas fases, entra em cena o esquema de reconstrução geométrica, conhecido por sua precisão e aplicabilidade em malhas não estruturadas (ANSYS, 2023).

Figura 15 – Interfaces.



Fonte: ANSYS (2023).

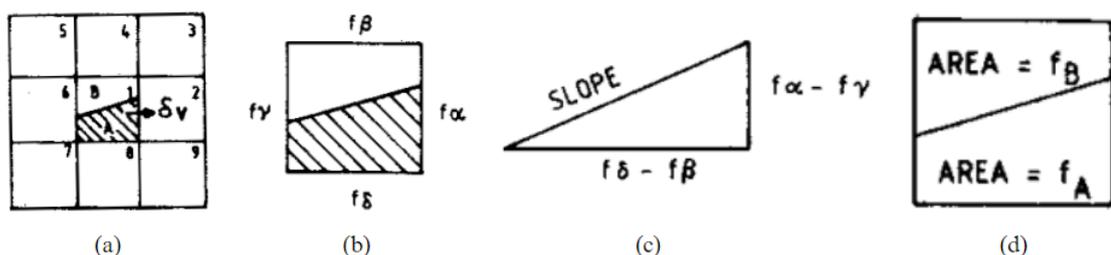
Segundo ANSYS (2023), processo de reconstrução ocorre em três etapas:

1. Calcula-se a posição da interface linear em relação ao centro de cada célula parcialmente preenchida, com base nas informações sobre a fração de volume e suas derivadas na célula;
2. Determina-se a quantidade de fluido advectado através de cada face usando a representação linear da interface calculada, juntamente com informações sobre a distribuição de velocidade normal e tangencial na face;
3. Calcula-se a fração de volume em cada célula, fazendo uso do balanço de fluxos calculados durante o passo anterior.

No trabalho de (Youngs, 1982), que foi o predecessor do esquema utilizado no Ansys Fluent ocorre da seguinte maneira:

1. A porção de uma interface em uma célula é aproximada por uma linha reta;
2. O método para localizar essa linha reta para o caso de uma célula contendo dois materiais A e B é mostrado na Figura 16 (a) (b) (c) e (d);
3. As frações de volume do material A para a célula em questão e suas oito células vizinhas são usadas para determinar a inclinação da interface;
4. A posição da interface é então ajustada para que ela divida a célula em duas áreas que correspondam às duas frações de volume;

Figura 16 – Método de Youngs.



Fonte: Youngs (1982).

No método do doador-receptor ou donor-acceptor (Figura 15.c), os esquemas de interpolação padrão utilizados no Ansys Fluent são aplicados para obter os fluxos de face quando uma célula está completamente preenchida com uma fase. Quando a célula está próxima da interface entre duas fases, é empregado um esquema de "doador-receptor" para calcular a quantidade de fluido advectada através da face. Esse método identifica uma célula como doadora de uma certa quantidade de fluido de uma fase e outra célula (vizinha) como receptora da mesma quantidade

de fluido, visando evitar a difusão numérica na interface. A quantidade de fluido de uma fase que pode ser convectada através de uma fronteira celular é limitada pelo menor valor entre o volume preenchido na célula doadora e o volume livre na célula receptora. Além disso, a orientação da interface é considerada na determinação dos fluxos de face. A orientação da interface pode ser horizontal ou vertical, dependendo da direção do gradiente de fração de volume da fase dentro da célula e da célula vizinha que compartilha a face em questão. Conseqüentemente, os valores de fluxo são determinados por meio de advecção pura ascendente, advecção pura descendente ou uma combinação dos dois, dependendo da orientação e do movimento da interface (ANSYS, 2023).

O esquema de captura de interface compressiva para malhas arbitrárias (CICSAM), baseado no trabalho de Ubbink (1997), é um esquema adequado para fluxos onde as razões de viscosidades entre as fases é muito alta. O CICSAM oferece a vantagem de produzir uma interface que é quase tão nítida quanto o esquema de reconstrução geométrica (ANSYS, 2023).

O esquema compressivo é um esquema de reconstrução de segunda ordem fundamentado no limitador de inclinação, esses são usados em esquemas de discretização espacial para evitar oscilações ou flutuações espúrias que ocorreriam em esquemas alta ordem devido a mudanças bruscas no domínio (ANSYS, 2023).

O esquema HRIC modificado é um esquema composto NVD que consiste em uma mistura não linear de diferenças de upwind e downwind. Foi elaborado para superar os problemas dos esquemas de upwind, que geralmente são inadequados para o rastreamento de interfaces devido ao comportamento difusivo, e os esquemas de diferença central, embora capazes de manter a nitidez da interface, podem fornecer resultados não físicos (ANSYS, 2023).

2.5.3.4 Propriedades dos Materiais

De acordo com equação ANSYS (2023) todas as propriedades presentes nas equações de transporte são determinadas pela presença das fases componentes em cada volume de controle. Em um sistema de duas fases, por exemplo, se as fases são representadas pelos subscritos 1 e 2, e se a fração de volume da segunda dessas está sendo acompanhada, a densidade em cada célula é dada por

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1, \quad (18)$$

em geral, para um sistema de n fases, a densidade média ponderada pela fração de volume assume a seguinte forma

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q. \quad (19)$$

2.5.3.5 Equação da conservação do movimento

Uma única equação da conservação do movimento é resolvida em todo o domínio, e o campo de velocidade resultante é compartilhado entre as fases. A equação da conservação do

movimento é descrita por

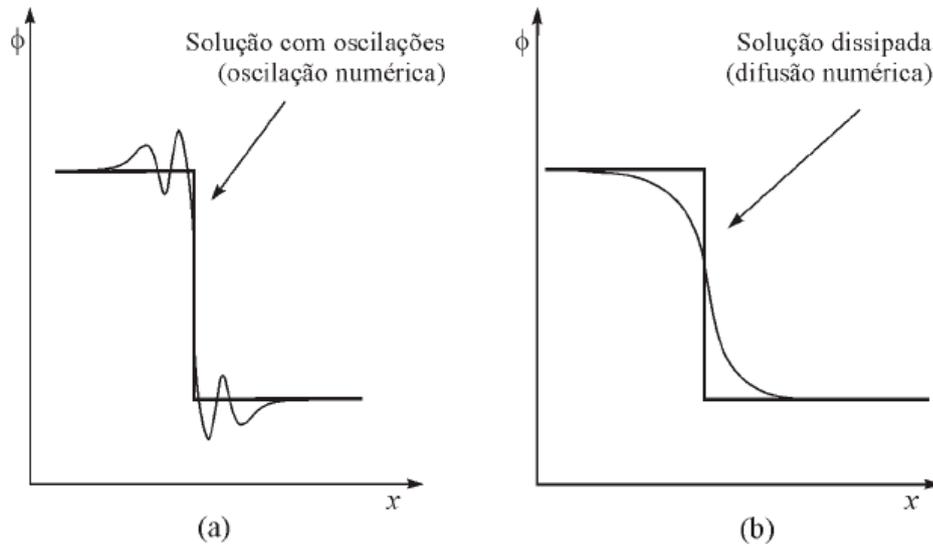
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right) + \vec{\rho} g + \vec{F}, \quad (20)$$

e depende das frações de volume de todas as fases através das propriedades e quando a velocidade relativa entre as fases é muito grande, a precisão pode ser afetada (ANSYS, 2023).

2.5.4 Difusão numérica

Maliska (2004) descreve que a interpolação adotada para os termos advectivos é, usualmente, feita por diferenças centrais (usa uma interpolação linear, considerando que as faces do volume de controle estejam situadas no meio da distância entre os pontos nodais) ou pelo método upwind (relação direta com o termo parabólico, o valor da função na interface é igual ao valor da função no volume a montante), cada um apresentando suas características e riscos. A abordagem por diferenças centrais apresenta sérios riscos como a possibilidade de divergência da solução. Isso ocorre quando são usados métodos de solução de sistemas lineares inadequados, especialmente aqueles que não tratam bem coeficientes negativos. Esse método também pode levar a soluções não realísticas com oscilações numéricas, uma vez que não possui habilidade para dissipar as perturbações inerentes ao processo de solução. A presença de um coeficiente negativo pode originar uma perturbação que se propaga sem dissipação, fazendo a solução divergir ou, mesmo que convergida, apresentar oscilações numéricas, como ilustrado na Figura 17.a . Uma solução para essas oscilações é o refino da malha. Por outro lado, a interpolação adotada pelo método upwind resulta em uma solução bastante estável e realística, porém com alta dissipação embutida, particularmente nas regiões de grandes gradientes. Essa dissipação excessiva pode muitas vezes reduzir detalhes importantes da solução, conforme mostrado na Figura 17.b . O mecanismo de suavização dos gradientes nesse método é semelhante ao processo de difusão de um gás, por isso é chamado de difusão numérica ou falsa difusão. Em resumo, enquanto o método de diferenças centrais pode sofrer com oscilações numéricas e instabilidade, o método upwind, apesar de sua estabilidade, pode introduzir uma dissipação significativa que compromete a precisão da solução em áreas com grandes gradientes.

Figura 17 – Presença de oscilação numérica (a) e difusão numérica (b).



Fonte: Maliska (2004).

2.6 ESTUDOS CORRELATOS

Nesta seção, explorar-se-á uma variedade de artigos com diferentes análises para compreender o que já foi estudado sobre o processo de fabricação VARTM. Inicialmente, serão examinadas análises semelhantes às que serão realizadas nesse trabalho, que por não seguirem os critérios estabelecidos na Seção 3, não se tornaram um dos estudos de caso para a validação experimental. Em seguida, serão abordadas análises considerando a escala microscópica, visando entender os fenômenos que ocorrem durante a infusão de resina em compósitos em um volume elementar. Além disso, serão discutidos métodos que incorporam a parcela térmica no processo de fabricação, seguidos por diferentes métodos para a resolução de processos de infusão de resina, oferecendo alternativas eficazes para simular e analisar o preenchimento de moldes e a saturação de pré-formas. Por último, será explorada a análise estocástica do processo VARTM, que por consequência da natureza da análise, são estudos mais complexos. Este capítulo visa fornecer uma visão abrangente do estado atual da pesquisa em fabricação de compósitos a partir do processo de VARTM.

2.6.1 Análises semelhantes

De acordo com Trochu et al. (2006), os autores desse estudo se concentraram nas etapas de preenchimento e cura durante a moldagem de compósitos líquida, visando resumir as principais contribuições em termos de simulação e otimização de processos para melhorar a eficiência da prototipagem virtual de moldes. Investigações iniciais resultaram em modelos 2D bem sucedidos para peças finas, porém, para processos de injeção flexíveis, como na VARI ou RTM-Light (que são subcategorias do VARTM), e mesmo em moldes rígidos e fechados, como

no RTM, a aproximação de casca fina nem sempre é aplicável. Portanto, uma nova estratégia de modelagem é proposta para simular cascas compostas 3D com reforços multicamadas. Para otimizar os cálculos em simulações de fluxo de RTM, várias melhorias são sugeridas, incluindo discretização apropriada do domínio e uso de elementos finitos prismáticos. Uma técnica de refinamento de malha é combinada com um algoritmo de extrusão para gerar elementos finitos prismáticos não conformes, bem como, níveis de acoplamento podem ser considerados entre cálculos de elementos finitos (FE) no plano e aproximação de diferenças finitas (DE) através da espessura, proporcionando resultados precisos e rápidos. Essa abordagem flexível pode auxiliar engenheiros de processo na fase inicial de projeto de moldes, mantendo simulações complexas para otimização final. Os resultados do estudo incluíram a aplicação de cálculos acoplados de *momentum*, calor e transferência de massa com diferentes níveis de acoplamento, visando otimizar o processo de preenchimento. Foram realizadas várias simulações numéricas para comparar a precisão e a velocidade dos cálculos, demonstrando que formulações 2D não acopladas de FE/FD podem produzir resultados precisos rapidamente. Além disso, um procedimento de otimização de preenchimento com base em um número capilar modificado foi apresentado, calculando a taxa de fluxo ideal durante a injeção para manter o número capilar constante em seu valor ótimo, o que contribui para aumentar o desempenho mecânico dos compósitos ao minimizar a formação de vazios durante a injeção de resina.

No estudo de Jhan, Lee e Chung (2012), os autores investigaram a infusão de resina em estruturas sanduíche utilizando o processo VARTM para aumentar a rigidez à flexão e atender aos requisitos de leveza. Realizou experimentos para observar as etapas de saturação da resina e analisou os frentes de fluxo não lineares. A pesquisa também examinou o fenômeno de rastreamento de corrida e realizou simulações em 3D usando elementos de tubo circular para comparar com os dados experimentais, com o objetivo de garantir uma saturação completa e otimizar a fabricação de grandes estruturas sanduíche. Segundo as conclusões apresentadas, o comportamento do fluxo de resina em estruturas sanduíche, com laminados fibrosos e núcleo com sulcos, difere substancialmente da saturação da resina em montagens que envolvem apenas laminados de fibra pura. A pesquisa abordou essa complexidade através de experimentos, simulações e análises numéricas. Destacam-se três principais contribuições e conclusões. Primeiramente, observou-se que o perfil de fluxo nas superfícies inferiores de laminados finos e grossos apresenta diferenças notáveis, com a presença do fenômeno de corrida de infusão em laminados finos devido à pouca resistência ao fluxo na direção da espessura. Em segundo lugar, identificaram-se quatro estágios de condições de infusão dentro da estrutura sanduíche, baseados em observações e julgamentos de saturação de permeabilidade, o que explica a infusão não linear e tem potencial para aplicação em futuros processos de fabricação. Por fim, propôs-se um modelo 3D para simular o processo de fluxo da montagem sanduíche, substituindo os sulcos e canais do núcleo por elementos circulares, o que se mostrou eficaz na reprodução dos resultados experimentais e pode reduzir tempo e custo na execução de futuros experimentos de simulação.

No estudo abordado em Godbole et al. (2021), o objetivo principal dos autores foi inves-

tigar os desafios enfrentados na modelagem do fluxo de resina em estruturas de tecido composto por dois níveis de escala, como tecidos bidirecionais (BD) (costurados ou tecidos) e tecidos triaxiais, durante processos de moldagem por transferência de resina (RTM) e moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM). Um dos principais desafios é a caracterização de dois valores de permeabilidade: a permeabilidade do vão entre as fibras ou a permeabilidade em massa e a permeabilidade da fibra. O estudo propõe um modelo de permeabilidade em forma fechada para tecido unidirecional (UD) de duas escalas, combinando tanto a permeabilidade da fibra quanto a do vão entre as fibras, levando em conta o efeito da zona parcialmente saturada durante o fluxo de duas escalas. Esse modelo abrange os efeitos da permeabilidade do vão entre as fibras, a permeabilidade da fibra e o comprimento da zona parcialmente saturada. Os resultados do estudo apresenta as seguintes conclusões:

- A permeabilidade molhada efetiva foi relacionada à permeabilidade entre as fibras, e ao comprimento não saturado.
- Comprimento não saturado permanece constante com o aumento do comprimento e pode ser alcançada em comprimentos mais curtos se a fração volumétrica de fibra do fio for reduzida.
- A permeabilidade molhada analítica desenvolvida no artigo teve boa correspondência com os resultados da simulação LIMS.
- A permeabilidade saturada é maior que a permeabilidade não saturada.
- O modelo proposto não considera a heterogeneidade na direção da espessura, mas oferece uma base para entender diferentes cenários de fluxo e sugere áreas para pesquisas futuras, incluindo a consideração da heterogeneidade no plano e na direção da espessura.

2.6.2 Análises considerando a escala microscópica

No trabalho de Bayldon e Daniel (2009), os autores descreveram a formulação de um modelo de processo VARTM unidimensional que incorporou a dependência de saturação do comportamento de compactação da pré-forma. Um diferencial deste estudo foi a consideração do tamanho e da permeabilidade microscópica dentro dos fios para obter uma aproximação mais realista do processo de VARTM. Os resultados mostraram boa concordância com os dados experimentais, indicando que o efeito da pressão sobre a espessura foi adequadamente modelado neste caso, mas o efeito da saturação (que controla a espessura mínima) não foi. Para a pré-forma de CFM, nenhuma mudança na espessura foi observada na saturação e a espessura após a saturação aumentou de forma monotônica em resposta à redução na pressão de compactação. Embora não esteja claro o que causa esse comportamento, existem duas áreas principais a serem consideradas. Primeiro, a negligência dos esforços de cisalhamento na pré-forma durante a infusão, segundo é a taxa com que a saturação altera a conformidade da pré-forma e a taxa

associada com que a pré-forma se deforma. A conformidade da pré-forma é controlada pelo atrito nos pontos onde as fibras tocam, uma vez que a saturação ocorre enquanto a pré-forma está em estado comprimido, é possível que a taxa com que os pontos de contato se lubrificam efetivamente seja muito mais lenta do que o modelo simples proposto aqui indicaria.

No artigo de Park et al. (2011b), os autores propõem a modelagem e simulação do processo de VARTM com os fenômenos de formação de vazios tanto no macroporo entre os fios de fibra quanto no microporo dentro dos próprios fios de fibra. Além disso, foram considerados a compressão das bolhas, a saturação dos fios após a formação dos vazios na frente de fluxo e o processo de migração dos vazios. Foi conduzida uma simulação que representou os padrões de preenchimento de moldes em termos do fator de preenchimento e do grau de saturação, juntamente com a migração de vazios para representar uma zona parcialmente saturada de alto teor de bolhas perto da frente de fluxo. Os resultados da simulação representaram com sucesso algumas características importantes da física dos vazios:

- A correlação da formação de vazios dentro e entre os fios de fibra com o número capilar modificado.
- A influência da aplicação de vácuo na saída de ar sobre a saturação dos fios e a compressão das bolhas.

Além disso, constatou-se que a existência de vazios pode alterar o padrão de fluxo global da resina:

- Queda de pressão de injeção no caso de injeção com taxa de fluxo constante.
- Perfil de pressão não linear na zona parcialmente saturada.

O artigo também conclui que a representação de uma zona parcialmente saturada sugere a necessidade de um processo de sangria, para a retirada dos vazios formados no processo de injeção do molde.

No artigo de Acheson, Simacek e Advani (2004), os autores investigaram a influência da compactação das fibras, sob as seguintes condições:

- Utilização de um volume de controle não rígido para formular um conjunto de equações governantes que descrevem o fluxo da resina.
- Impregnação dos fios em escala microscópica acoplada ao fluxo global da resina em escala macroscópica.
- Modelagem da compactação da pré-forma como várias molas não lineares, onde a pressão de compactação é distribuída dinamicamente entre a resina e a pré-forma.
- Permeabilidade em função das mudanças na fração volumétrica das fibras como resultado da mudança na compactação.

Os resultados indicam que a curva de pressão da resina difere significativamente entre os casos com e sem compactação. Isso sugere que os valores de pressão obtidos de maneira analítica e desacoplada podem ser imprecisos devido à variação na compactação durante o experimento. Embora os tempos de preenchimento para os casos de compactação acoplada e desacoplada possam ser ajustados para coincidir ao usar uma permeabilidade eficaz, essa abordagem pode ser imprecisa ao lidar com peças de geometria complexa. Além disso, como a forma da curva de pressão varia com o tempo, uma única permeabilidade eficaz pode não se ajustar adequadamente a essa variação. Devido à natureza não linear da compactação das pré-formas, a maioria das mudanças na compactação e na espessura, ocorre próximo à porta de injeção. Embora os efeitos da saturação na pressão e no tempo de preenchimento sejam pequenos, devido à saturação dos fios de fibra, eles podem ter um impacto considerável na qualidade final da peça.

2.6.3 Análise da compactação da fibra

No estudo de Simacek et al. (2012), os autores propõem um modelo de processo que combina fluxo e deformação em uma dimensão foi comparado com dados experimentais. Os experimentos registraram a pressão da resina e a espessura da peça em diferentes pontos após o preenchimento. Foram realizadas medições experimentais em um processo VARTM usando membrana como base. A diferença entre VARTM com membrana e o VARTM convencional está na utilização da membrana para fornecer a saída de ar, já que ela é impermeável à resina, funciona como uma camada de distribuição, porém ao invés de ser para os líquidos, será para o ar. Duas estratégias de saída de ar após a injeção foram aplicadas:

1. A linha de injeção de resina foi mantida aberta após a infusão ser concluída. Processo de VARTM com membrana ou VARTM seguida de ventilação.
2. A linha de injeção é fechada após o tecido estar totalmente saturado.

As previsões numéricas se aproximam bem dos valores medidos experimentalmente, capturando os padrões em todos os cenários. No entanto, há uma diferença notável na previsão da espessura final da peça e da fração volumétrica de fibras no Cenário 2. Resolver essa questão exigirá um melhor controle do processo e uma caracterização mais precisa dos materiais. Apesar disso, as previsões oferecem uma boa estimativa do tempo necessário para atingir o equilíbrio e das dimensões finais da peça.

No trabalho de Vernet et al. (2014), os autores tiveram como objetivo obter resultados comparáveis para avançar em direção à padronização das medições de permeabilidade, pois isso impede a comparação entre resultados obtidos em diferentes configurações experimentais. A permeabilidade não saturada unidirecional do tecido foi avaliada em três direções (0, 45 e 90 graus), considerando parâmetros como o fluido de teste, pressão de injeção, dimensões da amostra e fração volumétrica de fibras. Os resultados indicaram que a permeabilidade média apresentou um desvio padrão de $\pm 20\%$. Para sua determinação, foram aplicadas duas técnicas:

Regressão Linear e Ajuste de Quadrados Mínimos, com este último apresentando uma dispersão menor. Destaca-se que o controle rigoroso das condições de teste é essencial para a padronização das medições de permeabilidade. No entanto, três das doze instituições participantes não seguiram as diretrizes estabelecidas. Por outro lado, aqueles que seguiram as recomendações conseguiram obter valores de permeabilidade reproduzíveis. Vale ressaltar que o método proposto permite apenas a comparação entre medições de permeabilidade unidirecionais não saturadas.

2.6.4 Análise com a inclusão da parcela térmica

No artigo de Johnson e Pitchumani (2006), os autores descreveram o aquecimento localizado foi investigado como uma abordagem para melhorar a uniformidade de preenchimento na presença de heterogeneidades da pré-forma, reduzindo a viscosidade da resina em regiões de baixa permeabilidade. O objetivo foi investigar o controle ativo do preenchimento do molde com aquecimento localizado para alcançar uma progressão de fluxo uniforme. Foram utilizadas estratégias de controle para o movimento da bobina e variação da tensão da bobina em tempo real para derivar um esquema de controle ótimo para implementação prática em um estudo posterior. Os esquemas de controle ativo foram inicialmente implementados em um ambiente de simulação. Os resultados dos estudos demonstraram que o esquema de controle foi capaz de melhorar a uniformidade do fluxo, medida pelo erro quadrático médio (RMS) em relação a um preenchimento uniforme ideal, em até 88% em comparação com um preenchimento de molde não controlado, enquanto simultaneamente mantinha temperaturas de material aceitáveis ao longo do processo de preenchimento.

Em um artigo posterior do mesmo autor Johnson e Pitchumani (2007), os autores implementaram o esquema de controle em um processo padrão de VARTM e realizar experimentos para avaliar a eficácia do controle em uma variedade de disposições de pré-forma. Várias disposições de pré-forma heterogêneas e homogêneas foram colocadas em um processo padrão de VARTM, ampliado por um controlador ativo baseado em aquecimento localizado. Essas geometrias de pré-forma foram preenchidas com e sem o auxílio do controle ativo, e a uniformidade da frente de fluxo e os tempos de preenchimento para esses experimentos foram comparados neste estudo. Os resultados indicaram que o uso de controle ativo pôde resultar em padrões de fluxo aprimorados em disposições de pré-forma heterogêneas e de geometria complexa. O controle ativo foi eficaz na prevenção do aprisionamento de pontos secos dentro da pré-forma, na melhoria da forma do fluxo à medida que ele se deslocava para o final do molde, onde vazios adicionais eram comumente formados, e na promoção da uniformidade do fluxo. Além disso, o controle ativo demonstrou uma redução significativa nos tempos de preenchimento em casos de disposições de pré-forma heterogêneas, quando comparado com os tempos de preenchimento na ausência de qualquer controle, com exceção do caso de uma pré-forma homogênea de alta permeabilidade.

O artigo de Grujicic, Chittajallu e Walsh (2005), os autores desenvolveram um modelo

de elemento finito de volume de controle para analisar a preenchimento de uma pré-forma de fibra com resina sob condições não isotérmicas dentro de um meio de distribuição de resina de alta permeabilidade baseado no processo VARTM. Os resultados obtidos sugerem que, as simulações do processo em condições não isotérmicas em tempos de preenchimento curtos, o efeito do aquecimento da placa da ferramenta pode ser benéfico e pode levar a um aumento na taxa de preenchimento. Além disso uma análise de otimização do processo de preenchimento do pré-formado VARTM mostrou que, para aproveitar plenamente o aquecimento da placa da ferramenta, de 70% a 80% do molde deve ser preenchido com a resina à temperatura ambiente antes que o aquecimento da placa da ferramenta seja iniciado. Para a geometria retangular e condições de contorno usadas no artigo, pode-se reduzir o tempo de preenchimento em cerca de 5% em relação ao tempo de preenchimento completo à temperatura ambiente.

2.6.5 Diferentes métodos para a resolução de processos VARTM

No trabalho de Francucci, Rodríguez e Juan Morán (2014), os autores propõem um modelo que inclui a variação da permeabilidade e o fenômeno de inchaço das fibras, resultante da utilização de fluidos polares em conjunto com fibras naturais. Esse modelo proporciona uma previsão mais precisa do movimento da frente de fluxo em comparação com os modelos clássicos. Foram desenvolvidos dois modelos: o de permeabilidade homoganeamente variável e o de campo de permeabilidade. O primeiro considera que a permeabilidade diminui uniformemente com o tempo devido ao inchaço das fibras, enquanto o segundo leva em conta as variações regionais no inchaço das fibras ao longo da pré-forma molhada, dependendo do tempo de imersão no fluido. Ao comparar esses dois modelos, observou-se que o modelo de campo de permeabilidade prevê uma taxa de fluxo ligeiramente maior do que o modelo de permeabilidade homoganeamente variável, principalmente durante as etapas iniciais da injeção. No entanto, essa diferença se torna insignificante à medida que o fluxo progride, tornando-se muito lento e com um gradiente de saturação estreito e pouco significativo em relação ao comprimento da pré-forma molhada. Entre esses estágios, as curvas de velocidade previstas pelos modelos divergem, resultando em um movimento da frente de fluxo ligeiramente mais rápido no modelo de campo de permeabilidade.

No trabalho de Dong (2006), os autores desenvolveram o método do meio equivalente (EMM) e produz a mesma distribuição de pressão e padrão de fluxo que o método tradicional de CVFEM. Esse método pode ser aplicado não apenas ao HPM, mas também à pré-forma de fibra quando uma grande parte precisa ser simulada. As informações de malha 3D podem ser geradas a partir de uma malha 2D, assim, menos elementos são necessários na simulação, e por conseguinte, o tempo de computação pode ser significativamente reduzido. Os resultados do artigo demonstraram que a eficácia deste método foi comprovada em comparação com a simulação CVFEM convencional e experimentos. Reduzido o tempo de simulação em mais de 85%, e mantendo uma precisão comparável.

O trabalho de Fracassi e Donadon (2018), os autores tiveram como proposta uma associ-

ação paralela entre uma resistência e uma capacitância de fluido, ou seja, uma comparação entre o perfil de infusão de Darcy e o modelo do circuito resistor-capacitor-paralelo (RC-paralelo). Os resultados indicaram que o modelo RC-paralelo proposto é uma representação viável do sistema, e a função de transferência foi determinada por meio do circuito elétrico duplamente análogo. Quando não há absorção de fluido considerada, essa mesma descrição foi mostrada como equivalente à lei de Darcy. Os experimentos validaram o modelo, demonstrando ser ainda mais preciso na descrição frente de fluxo em comparação com outros métodos, de três a cinco vezes. A simulação é conduzida usando um algoritmo simples que não requer múltiplas iterações ou um conjunto de equações diferenciais, resultando em menor carga computacional.

2.6.6 Análise estocásticas

O trabalho de Matsuzaki e Shiota (2016), os autores exploraram a assimilação de dados combinando observação visual e simulação numérica estocástica do fluxo de resina na moldagem por transferência de resina assistida a vácuo. Utilizou-se o filtro de raiz quadrada do conjunto assíncrono em quatro dimensões (4DEnSRF) para assimilação de dados e a expansão de Karhunen-Loève para modelar o campo de permeabilidade. Os resultados dos experimentos numéricos confirmaram uma melhoria na precisão da estimativa do comportamento de impregnação da resina em comparação com o método convencional. Além disso, demonstrou-se a capacidade de estimar simultaneamente o campo de permeabilidade, relacionado à impregnação da resina. O estudo também avaliou a eficácia do método proposto para VARTM de injeção radial, e independentemente do método de injeção ou espessura do modelo, o método proposto estimou com sucesso o comportamento de impregnação da resina e o campo de permeabilidade. Além disso, determinou-se que o número ótimo de membros do conjunto corresponde ao mínimo necessário, garantindo a maior precisão com baixo custo computacional.

O trabalho de Yun et al. (2017), os autores se propuseram a analisar o papel da permeabilidade do meio de distribuição quando ele é aplicado sobre o reforço, ou seja, quando a variação na permeabilidade do tecido tramado tem um impacto significativo no processo. Essa, que decorre das regiões aleatórias de furos presentes nas junções das fibras do tecido. Os resultados revelaram que a porcentagem de vazios aumenta consideravelmente com uma maior permeabilidade do meio de distribuição. Para investigar essa relação, foram realizadas quinhentas simulações variando os valores de permeabilidade do meio de distribuição, e vinte experimentos foram conduzidos para cada configuração. Durante os experimentos, foi observado que o fluxo ao longo da superfície inferior se tornava mais irregular e desigual à medida que a permeabilidade do meio de distribuição aumentava, resultando em uma maior proporção de vazios no produto final. As simulações numéricas corroboraram qualitativa e quantitativamente essas observações experimentais, confirmando que a região não preenchida aumenta significativamente com o aumento da permeabilidade do meio de distribuição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado a partir de três estudos de casos de artigos sobre o método VARTM que tenham validação experimental ou sejam experimentais, assim com os dados fornecidos nos artigos foram feitas simulações afim de reproduzir esses processo. Após isso será feito um estudo de caso para a análise das propriedades porosidade e viscosidade. O *Software* computacional utilizado foi o FLUENT disponível no Ansys Workbench 2022 R2, e as simulações foram realizadas em um computador Dell Optiplex 5000, para retirada dos pontos para formar os gráficos foi utilizado o site WebPlotDigitalizer (Costinett, 2010) e para criar os gráficos ou *plot's*, utilizou-se o *Software* OriginLab 8.1.

Após a entrada dos dados no programa, realizou-se análises de convergência de malha utilizando o parâmetro de preenchimento ou frente de fluxo (a distância em que a interface da resina está em relação ao início do molde) com uma versão simplificada a simulação. E os esquemas utilizados foram PISO e Coupled para acoplamento de pressão ou velocidade, PRESTO! para a pressão e Geo-reconstruct para a fração volumétrica. As simulações foram realizadas com *time step* adaptativo, todas com a simplificação para duas dimensões e todos os *plot's* da frente de fluxo pelo tempo de preenchimento foram realizados a partir de uma linha no meio da espessura do pré-formado. Todas os estudos de caso em que a densidade não foi descrita tiveram como parâmetro sendo igual à $1000\text{kg}/\text{m}^3$ e a densidade e viscosidade do ar foram consideradas como constantes com os valores padrões do Fluent $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ e $1.7894 \cdot 10^{-10}$ Pa.s, respectivamente; além disso, a resistência viscosa (inverso da permeabilidade) do meio foi considerada igual para a resina usada e o ar, bem como, constante em todo o domínio. Para os parâmetros do VOF, todas as análises foram realizadas com a formulação explícita e com o número de *Courant* do VOF sendo 0.25 e o número de *Courant* global, foi considerado igual a 1. Os critérios para a escolha dos artigos foi a inclusão dos seguintes itens:

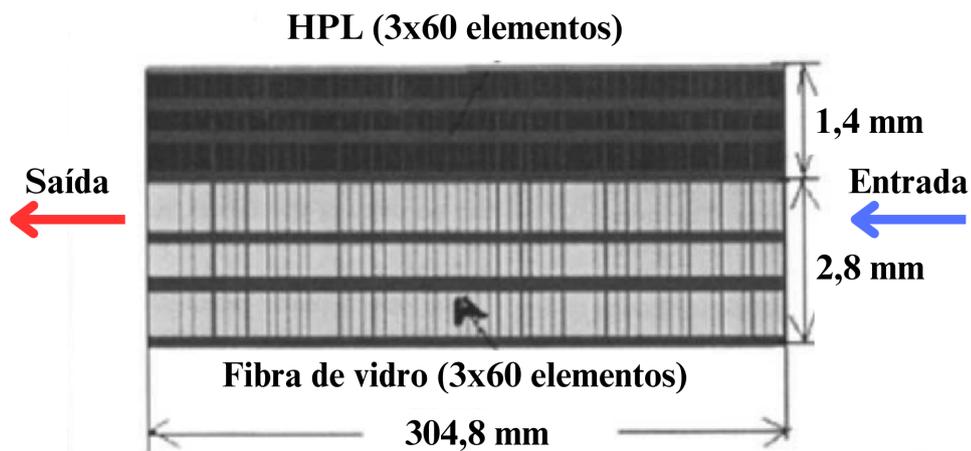
- Geometria simples e bem descrita;
- Permeabilidade do meio;
- Porosidade ou fração volumétrica de fibra;
- Viscosidade da resina;
- Pressão de entrada;
- *Plot* da frente de fluxo pelo tempo de preenchimento.

3.1 ESTUDO DE CASO 1

O primeiro estudo de caso escolhido foi o artigo de Dai, Pellaton e Hahn (2003), que compreende as vantagens e desvantagens dos métodos de camadas de alta permeabilidade

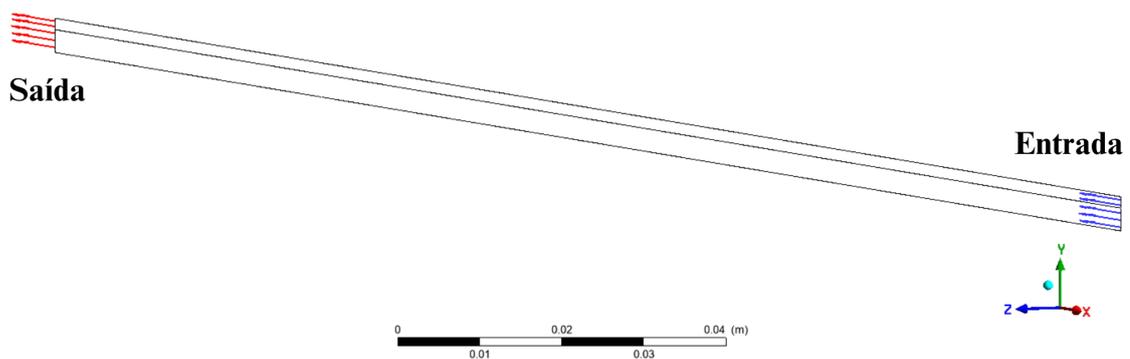
(HPL) e adição de canais nas superfícies do núcleo (CIC) em termos de custo e tempo de fabricação por meio de simulações e observações experimentais. Um modelo de custo foi desenvolvido e o tempo de infusão de resina para cada método foi minimizado por meio de simulações. Sob as condições estudadas nesse artigo, o método HPL foi considerado melhor do que o método CIC. Desse estudo foi utilizado apenas a parcela que compreende o método HPL, tendo sua geometria descrita pelo artigo na Figura 18 e a versão utilizada para as simulações Figura 19, bem como, seus dados na Tabela 1.

Figura 18 – Malha e geometria descrita no artigo.



Fonte: Dai, Pellaton e Hahn (2003).

Figura 19 – Geometria utilizada para as simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

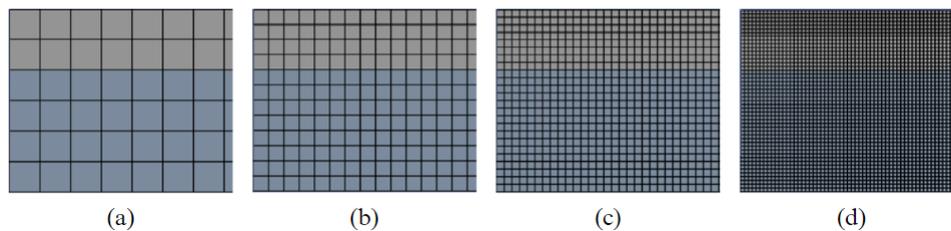
Malhas utilizadas no teste de convergência, 0,7 (Fig. 20 a) 0,35 (Fig. 20 b), 0,175 (Fig. 20 c), 0,0875 (Fig. 20 d) e 0,04375 milímetros. A partir desses resultados, foi feita a simulação completa utilizando a malha composta por elementos de 0,0875 milímetros. Como o autor apenas disponibilizou o escoamento em três pontos de tempo a medição foi feita a medição utilizando o site WebPlotDigitalizer (Costinett, 2010) para determinar o x_f (frente de fluxo) para a fibra de vidro e para o HPL e após isso foram convertidas para milímetros e comparadas com os resultados do plot de frente de fluxo por tempo gerado pelo Fluent.

Tabela 1 – Condições de Entrada e Propriedades do Material do Estudo de Caso 1.

| Parâmetro | Valor | Dimensão |
|---|--|--|
| Pressão de injeção | $1.013 \cdot 10^5$ | [Pa] |
| Viscosidade da resina | 0.475 | [Pa·s] |
| Espessura do HPL | 0.0014 | [m] |
| Permeabilidade do HPL | $K_{11} = K_{22} = K_{33} = 5.2311 \cdot 10^{-9}$ | [m ²] |
| Espessura da manta de fibra de vidro | 0.0028 | [m] |
| Permeabilidade da manta de fibra de vidro | $K_{11} = K_{22} = 2.961 \cdot 10^{-10}$ $K_{33} = 2.46 \cdot 10^{-10}$ | [m ²] [m ²] |
| Porosidade do HPL | 0.80 | [-] |
| Porosidade da manta de fibra de vidro | 0.66 | [-] |
| Comprimento | 0.3048 | [m] |

Fonte: Dai, Pellaton e Hahn (2003).

Figura 20 – Malhas utilizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 ESTUDO DE CASO 2

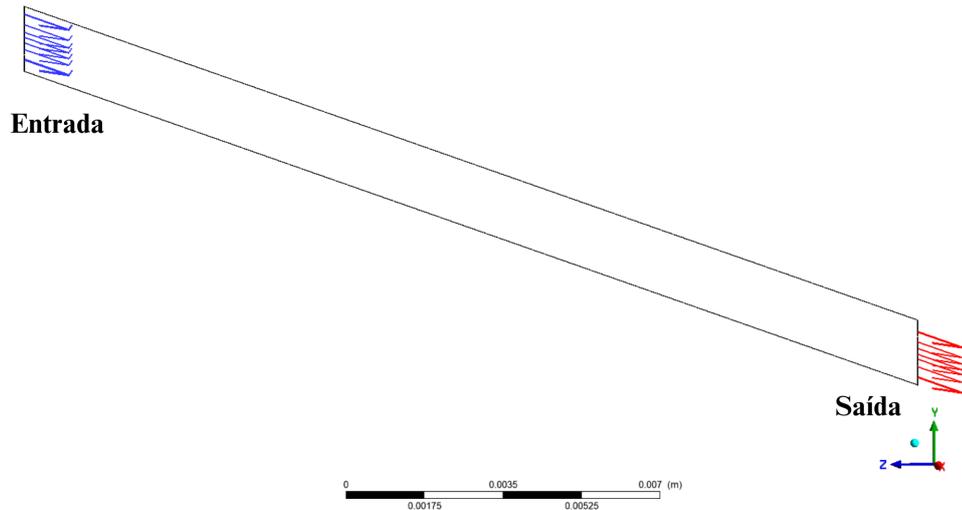
O segundo estudo de caso escolhido foi o artigo de Geng, Jiang e Chen (2019), que investiga o comportamento de impregnação em regiões curvas, assim realizando um estudo experimental sistemático para detectar as influências dos ângulos de curvatura, comprimentos de fluxo e camadas de pré-forma na progressão da frente de fluxo de resina. Desse estudo foi utilizado apenas a parcela que compreende o molde A, tendo uma de suas geometria descrita pela Figura 21 (experimento A-1) e Tabela 3, e seus dados descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 2.

| Parâmetro | Valor | Dimensão |
|---------------------------------|--------------------|----------|
| Pressão de injeção | $1.013 \cdot 10^5$ | [Pa] |
| Viscosidade do óleo de silicone | 0.350 | [Pa·s] |
| Ângulo de curvatura | 180 | [Graus] |

Fonte: Geng, Jiang e Chen (2019).

Figura 21 – Geometria utilizada para a simulação do caso A-1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Parâmetros dos experimentos.

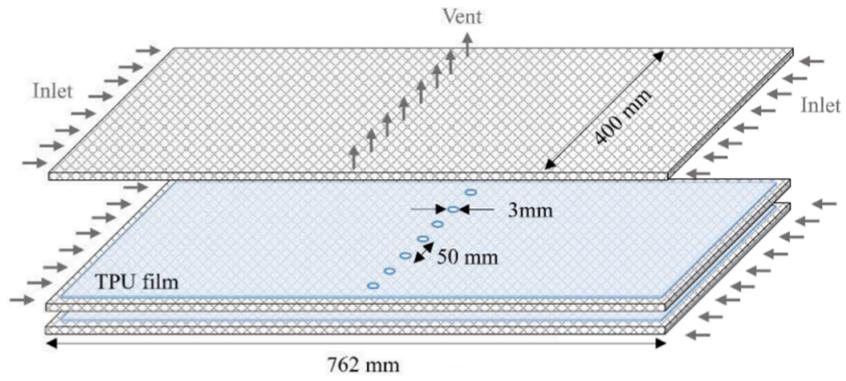
| Experimento | Comprimento [cm] | Espessura [mm] | Fração de volumétrica de fibra [%] | Permeabilidade [m^2] |
|-------------|------------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|
| A-1 | 15 | 1.46 | 22 | $3.57 \cdot 10^{-11}$ |
| A-2 | 10 | 1.46 | 22 | $3.90 \cdot 10^{-11}$ |
| A-3 | 20 | 1.46 | 22 | $3.54 \cdot 10^{-11}$ |
| A-4 | 25 | 1.46 | 22 | $3.40 \cdot 10^{-11}$ |
| A-5 | 15 | 2.08 | 31 | $3.49 \cdot 10^{-11}$ |
| A-6 | 15 | 3.96 | 33 | $3.75 \cdot 10^{-11}$ |
| A-7 | 15 | 4.84 | 40 | $3.92 \cdot 10^{-11}$ |

Fonte: Geng, Jiang e Chen (2019).

3.3 ESTUDO DE CASO 3

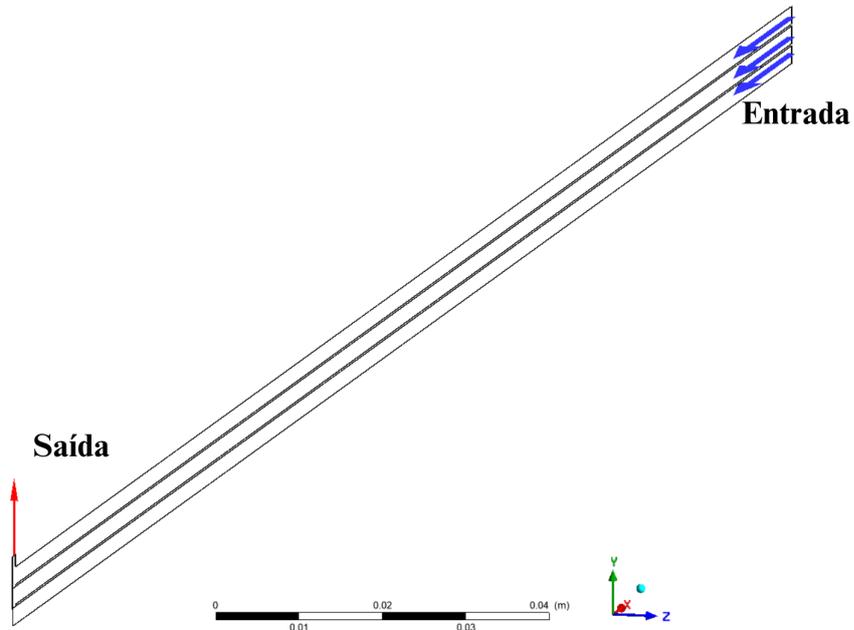
No trabalho Moretti et al. (2023), os autores propõem um método para fabricar compósitos com inter camadas flexíveis e impermeáveis, usando esquemas de ventilação central. Uma análise do fluxo de ar é realizada para definir os padrões de perfuração, e a abordagem de infusão é aplicada em um painel de tecido de vidro com filmes termoplásticos, seguida pela análise da permeabilidade. As descobertas podem ser aplicadas em várias aplicações de compósitos híbridos. A geometria utilizada no artigo, representada na Figura 22, foi simplificada para uma versão em duas dimensões e com apenas um dos lados, representada na Figura 23. A Tabela 4 foi obtida a partir dos dados fornecidos no artigo, sendo eles dados implicitamente como a permeabilidade e a espessura da camada ou explicitamente como os demais.

Figura 22 – Geometria do artigo.



Fonte: Moretti et al. (2023).

Figura 23 – Geometria Utilizada nas Simulações do Estudo de Caso 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 3.

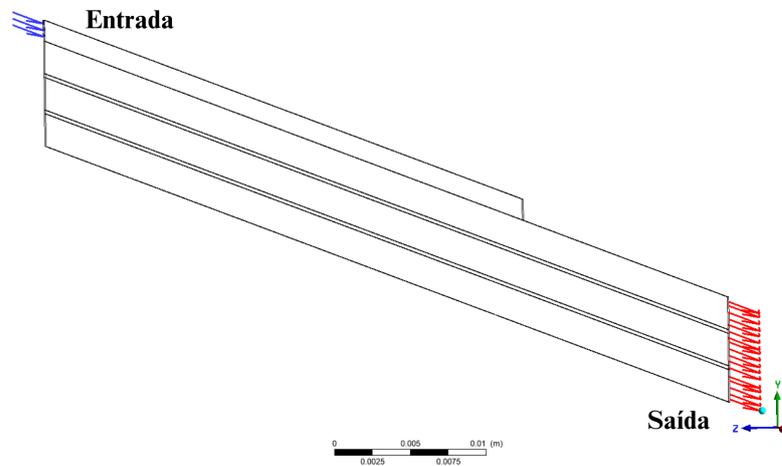
| Parâmetro | Valor | Dimensão |
|---|---------------------------------|-------------------|
| Pressão de injeção | $1.01324 \cdot 10^5$ | [Pa] |
| Viscosidade da resina | 0.403 | [Pa·s] |
| Permeabilidade camada próxima à bag de vácuo | $K_{max} = 1.93 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| | $K_{min} = 1.22 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade camada do meio | $K_{max} = 1.81 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| | $K_{min} = 1.13 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade camada próxima ao molde | $K_{max} = 1.93 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| | $K_{min} = 1.22 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Fração volumétrica da camada próxima à bag de vácuo | 0.522 | [-] |
| Fração volumétrica da camada do meio | 0.557 | [-] |
| Fração volumétrica da camada próxima ao molde | 0.509 | [-] |
| Espessura das camadas de fibra | 2.17 | [mm] |
| Espessura das camadas de TPU | 0.25 | [mm] |

Fonte: Moretti et al. (2023).

3.4 ESTUDO DE CASO 4

Para o estudo de caso 4 foi proposto como uma junção de certas características cada um dos estudos de caso baseados na literatura. Tendo uma camada de distribuição como o Dai, Pellaton e Hahn (2003), porém, tendo um comprimento de 75% do tamanho do pré-formado e tendo a entrada de resina apenas sobre essa camada, as três camadas assim como no Moretti et al. (2023), mas com o diferencial de que ao invés de camadas de um material impermeável como nesse artigo, foi utilizada permeabilidade e porosidade do experimento A-4 de Geng, Jiang e Chen (2019), tendo sua geometria descrita na Figura 24 e os parâmetros utilizados para a construção da simulação na Tabela 5.

Figura 24 – Geometria do Estudo de Caso 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Condições de Entrada e Propriedades do Material Estudo de Caso 4.

| Parâmetro | Valor | Dimensão |
|---|---------------------------------|-------------------|
| Pressão de injeção | $1.01324 \cdot 10^5$ | [Pa] |
| Permeabilidade camada próxima à bag de vácuo | $K_{min} = 1.22 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade camada do meio | $K_{min} = 1.13 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade camada próxima ao molde | $K_{min} = 1.22 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade das inter camadas | $K = 3.40 \cdot 10^{-11}$ | [m ²] |
| Permeabilidade camada de distribuição | $K = 5.2311 \cdot 10^{-7}$ | [m ²] |
| Fração volumétrica da camada próxima à bag de vácuo | 0.522 | [-] |
| Fração volumétrica da camada do meio | 0.557 | [-] |
| Fração volumétrica da camada próxima ao molde | 0.509 | [-] |
| Fração volumétrica das inter camadas | 0.22 | [-] |
| Espessura das camadas de fibra | 2.17 | [mm] |
| Espessura das camadas das inter camadas | 0.25 | [mm] |
| Comprimento do pré formado | 250 | [mm] |
| Comprimento da camada de distribuição | 187.5 | [mm] |

Fonte: Elaborado pelo autor.

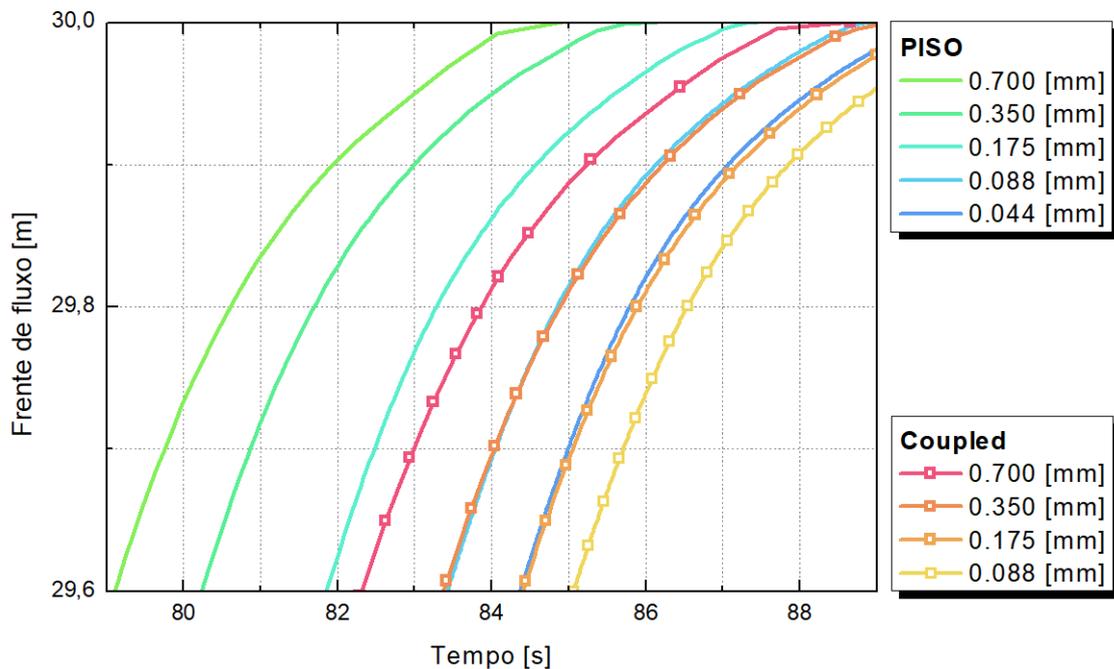
4 RESULTADOS

Neste capítulo, será explorado os resultados referentes aos quatro estudos de caso relacionados à simulação de processos de fabricação citados no capítulo anterior. Cada estudo escolhido se difere na abordagem do processo de VARTM, todas as análises contém desde a escolha dos esquemas de simulação e malhas até a comparação dos resultados obtidos com dados experimentais disponíveis nos artigos.

4.1 ESTUDO DE CASO 1

A partir dos parâmetros descrito no artigo foi possível realizar as simulações, que a permeabilidade no transversal foi considerada igual à do plano como simplificação, e utilizando o tamanho de elemento inicial de 0.7 milímetros para gerar a malha. A partir disso foram realizadas simulações para a convergência de malha, por conseguinte obtendo o *plot* de frente de fluxo por tempo representados pela Figura 25.

Figura 25 – Convergência de malha para o esquema PISO e Couped.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 25 , foi formada a Tabela 6 que demonstra o erro a partir de quatro pontos das duas melhores malhas para os esquemas PISO e Couped, 0.044 e 0.088 milímetros. Assim, o esquema Couped se demonstrou mais vantajoso tanto no quesito de exatidão e quanto precisão, sendo visível que as soluções tendem para curva da simulação realizada com 0.088

milímetros do esquema Coupled. Diminuir ainda mais o tamanho dos elementos para o esquema PISO é inviável, mesmo sendo inerentemente mais rápido no quesito tempo computacional que o esquema Coupled, o tempo para a simulação de 0.044 milímetros já era muito alto.

Tabela 6 – Comparação dos valores e erros para diferentes configurações de malha e x_f .

| Malha | Elemento | x_f (29,8) | x_f (29,6) | x_f (29,4) | x_f (29,2) |
|-------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| PISO | 0.044 [mm] | 0.1732 [m] | 0.1726 [m] | 0.1712 [m] | 0.1714 [m] |
| Coupled | 0.088 [mm] | 0.1729 [m] | 0.1723 [m] | 0.1717 [m] | 0.1711 [m] |
| Erro | – | 0.167 % | 0.168 % | 0.169 % | 0.163 % |

Fonte: Elaborado pelo autor.

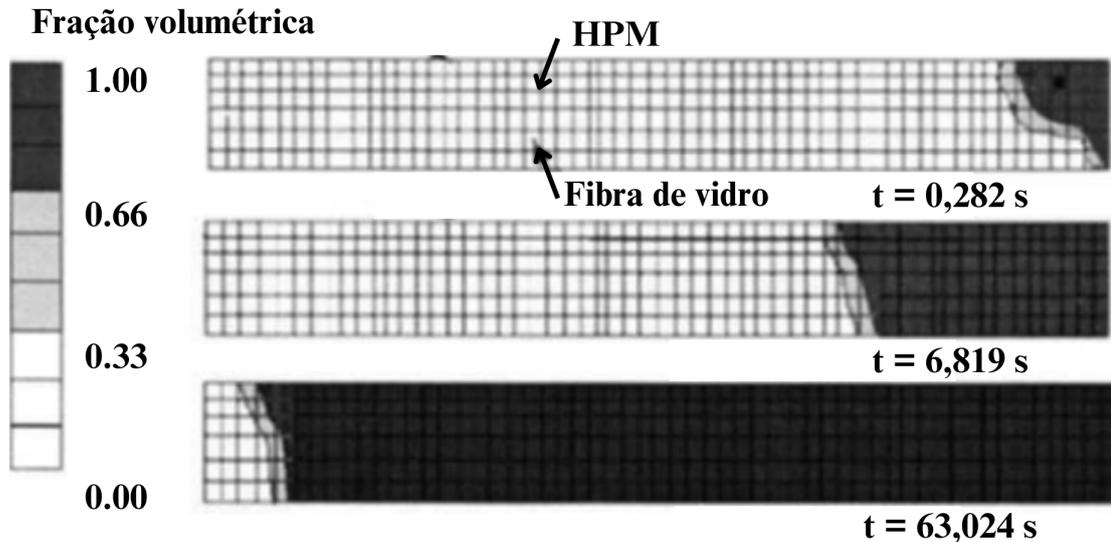
Após isso, foram retirados os valores de frente de fluxo da Figura 26 disponibilizada no artigo, e utilizando o site WebPlotDigitalizer (Costinett, 2010). Com esses valores em conjunto com os obtidos pelo *plot* de frente de fluxo por tempo gerado pelo Fluent foi possível formar a Tabela 7. Assim, é possível concluir que os valores de x_f são aceitáveis para os pontos x_f (6.819) e x_f (63.024), porém divergem bastante para o ponto x_f (0.282), tanto para a fibra de vidro quanto para o HPL, devido a aplicação da resina ser por pressão esta é uma região muito sensível, pois existe uma aceleração muito grande na resina, o que pode ter ocasionado o aumento do erro nesse ponto. As Figuras 26 e 27 mostram uma comparação dos escoamentos disponibilizados no artigo e os realizados pelas simulações desenvolvidas nesse trabalho, respectivamente.

Tabela 7 – Comparação dos valores e erros de x_f , entre o artigo e as simulações realizadas.

| | Fibra de vidro | | | HPL | | |
|--------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| | x_f (0.282) | x_f (6.819) | x_f (63.024) | x_f (0.282) | x_f (6.819) | x_f (63.024) |
| Simulado | 8,1 [cm] | 76,9 [cm] | 251,5 [cm] | 15,3 [cm] | 84,2 [cm] | 258,7 [cm] |
| $V_{f100-66}$ | 1,3 [cm] | 76,6 [cm] | 275,9 [cm] | 30,4 [cm] | 91,3 [cm] | 287,1 [cm] |
| V_{f66-33} | 5,0 [cm] | 83,6 [cm] | 279,7 [cm] | 36,4 [cm] | 95,5 [cm] | 292,7 [cm] |
| Erro $V_{f100-66}$ | 83,5 % | 0,3 % | 8,8 % | 49,6 % | 7,8 % | 9,9 % |
| Erro V_{f66-33} | 38,3 % | 10,1 % | 11,8 % | 57,9 % | 11,8 % | 11,6 % |

Fonte: Elaborado pelo autor.

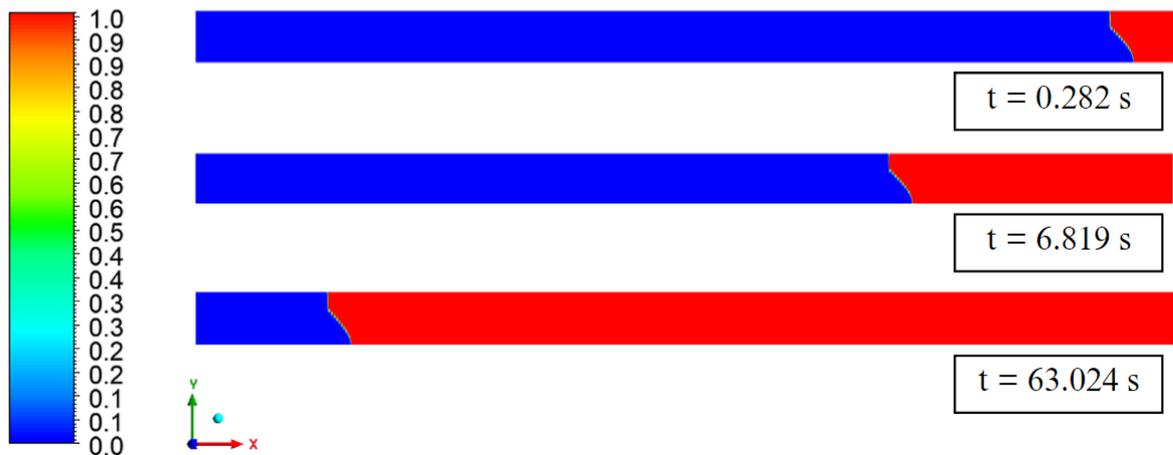
Figura 26 – Resultados, malha e geometria descrita no artigo.



Fonte: Dai, Pellaton e Hahn (2003).

Figura 27 – Resultados desenvolvidos para o estudo de caso.

Fração volumétrica

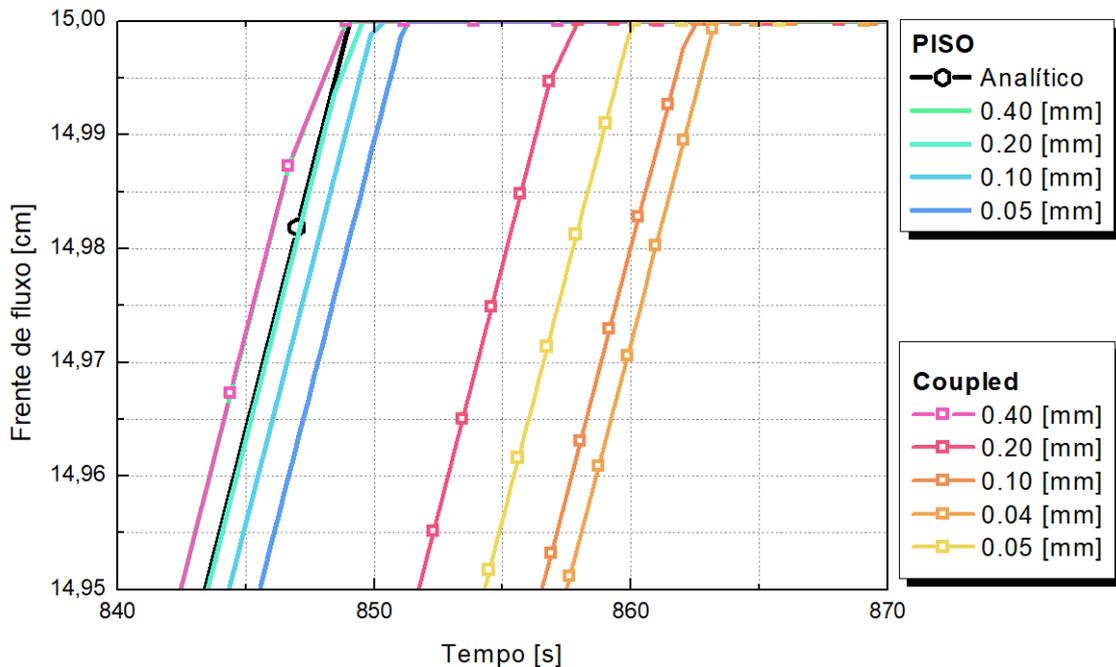


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 ESTUDO DE CASO 2

A partir dos dados da Tabela 3 foi possível realizar as simulações para verificar se a malha será compatível para realizar os estudos subsequentes. O tamanho de elemento inicial foi de quatro milímetros e foi-se dividindo até meio milímetro, conforme é possível ver nas Figura 28 , o esquema de acoplamento de velocidade e pressão Piso se demonstrou vantajoso quando comparado ao Coupled, pois demonstrou maior exatidão e precisão avaliado à lei de Darcy unidimensional com os mesmos parâmetros, portando para esse estudo de caso as simulações foram realizadas com esse esquema e com a malha de 2 milímetros, devido a velocidade para obter a resposta sem a perda de resolução da resposta. Após isso, a Tabela 3 foi utilizada

Figura 28 – Convergência de malha para o esquema PISO e Coupled.



Fonte: Elaborado pelo autor.

novamente para realizar as simulações e obter os *plot's* de frente de fluxo por tempo gerado pelo Fluent, e assim, comparar com os resultados do gráficos do artigo que foram retirados utilizando o site WebPlotDigitalizer (Costinett, 2010), utilizando a mesma escala descrita no artigo. Além disso, diferentemente das Figuras 33 e 34, nas comparações das Figuras 29, 30, 31 e 32 foi utilizada uma versão manipulada a lei de Darcy unidimensional (Eq. 5) na forma

$$x_f = \sqrt{\frac{2K \cdot \Delta p}{\mu \cdot \phi} \cdot t_f}. \quad (21)$$

Desta forma, é possível concluir que os resultados de frente de fluxo tiveram uma ótima correspondência com o tempo de preenchimento final do experimento, porém divergem um pouco quando comparadas com o início do escoamento, indicando que o experimento realizado no artigo começa em um velocidade menor. Este que poderia ser observado só nos primeiros segundos, porém não na escala descrita no artigo. Outro indicativo que esse fenômeno ocorre está no fato que em todas as comparações a velocidade final descrita no artigo é maior que na sua respectiva versão simulada, isso é mais visível nas curvas de velocidade do experimento A-1 (Fig. 29). Esse efeito pode estar ligado mais à própria lei de Darcy do que as condições de contorno aplicadas a simulação, visto que em relação a sua versão unidimensional, os resultados tiveram uma excelente correspondência, além disso, a partir do trabalho de Fracassi e Donadon (2018), onde foi proposto uma forma diferente de realizar as simulações tempo de impregna-

ção a partir de uma associação de resistores, as curvas tem a mesma diferença quando se comparado a Lei de Darcy.

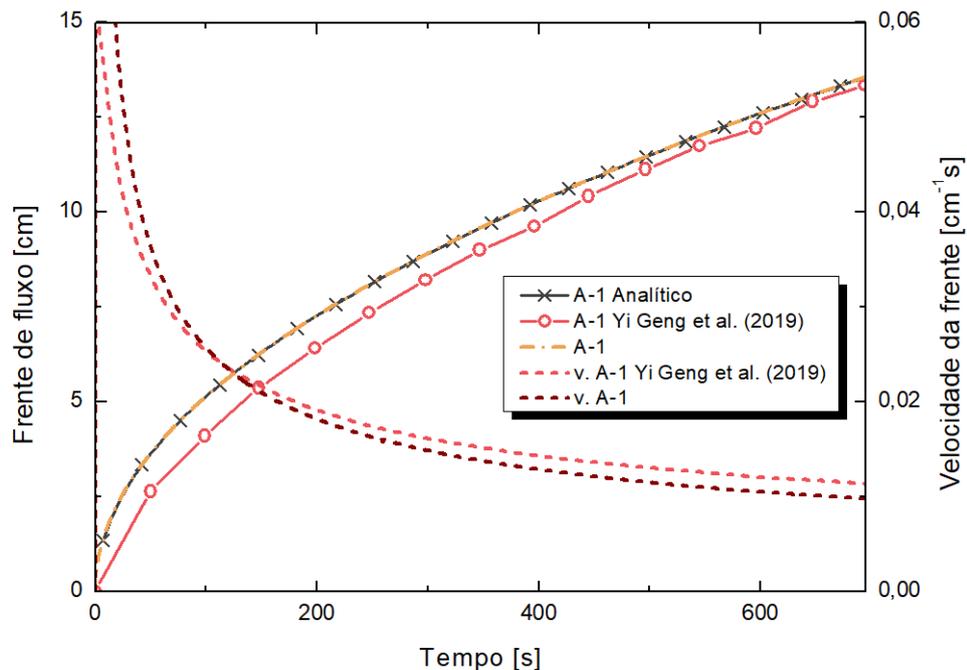
Entre as Figuras 33 e 34, que são os gráficos referentes aos experimentos que tiveram como variável a quantidade de camadas, a velocidade teve uma maior diferença para as curvas dos experimentos A-5, A-6 e A-7 se comparado ao experimento A-1, mesmo o tempo de preenchimento tendo uma boa correspondência para todos os experimentos como representado na Tabela 8, isso pode ser devido as geometrias serem construídas a partir de um único meio poroso, ao invés de uma associação de fibras e uma camada de ar.

Tabela 8 – Comparação dos valores e erros de x_f , entre o artigo e as simulações realizadas.

| Experimento | x_f | | Erro |
|-------------|-------------|---------------|-------|
| | Artigo [cm] | Simulado [cm] | |
| A-2 | 9,500 | 9,784 | 2,99% |
| A-1 | 13,349 | 13,555 | 1,54% |
| A-3 | 19,388 | 19,903 | 2,66% |
| A-4 | 23,389 | 23,849 | 1,97% |
| A-5 | 12,445 | 12,623 | 1,43% |
| A-6 | 12,919 | 13,060 | 1,09% |
| A-7 | 12,440 | 12,747 | 2,47% |

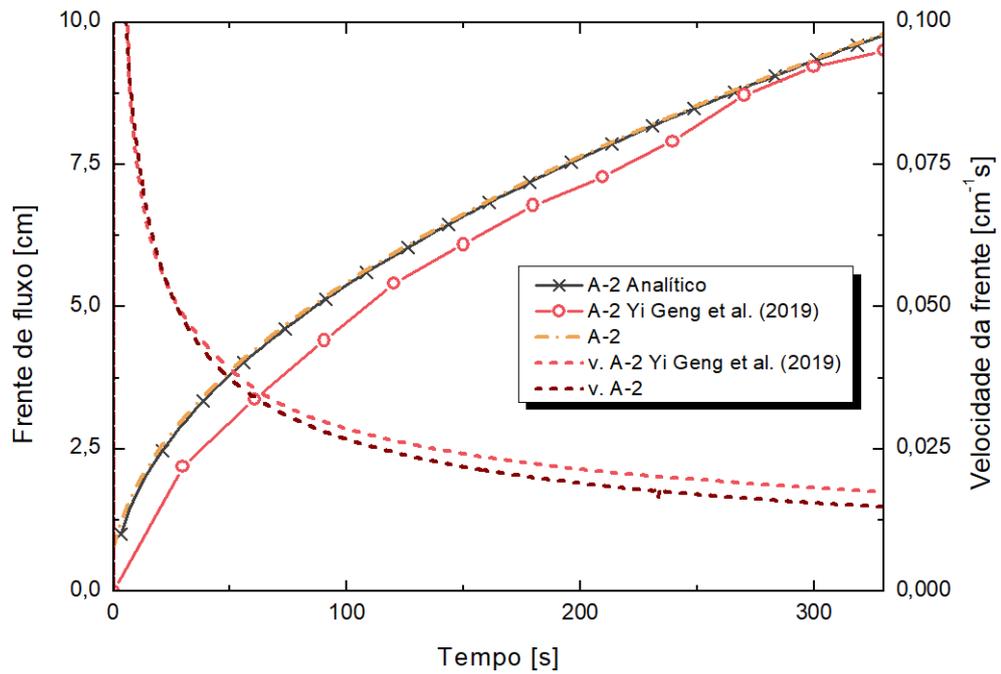
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Comparativo do experimento A-1.



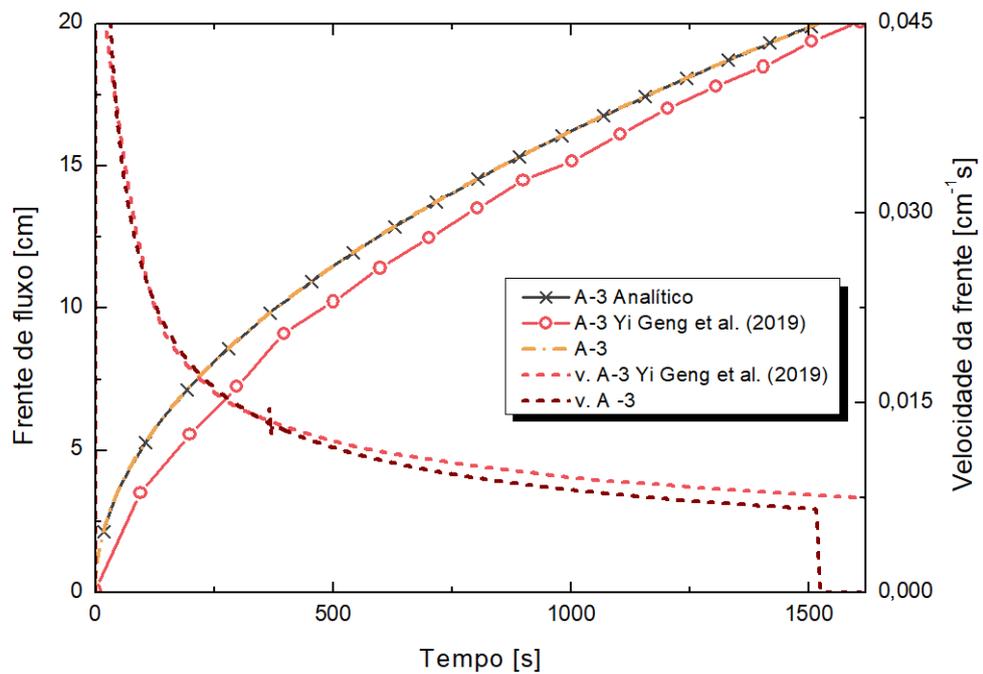
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Comparativo do experimento A-2.



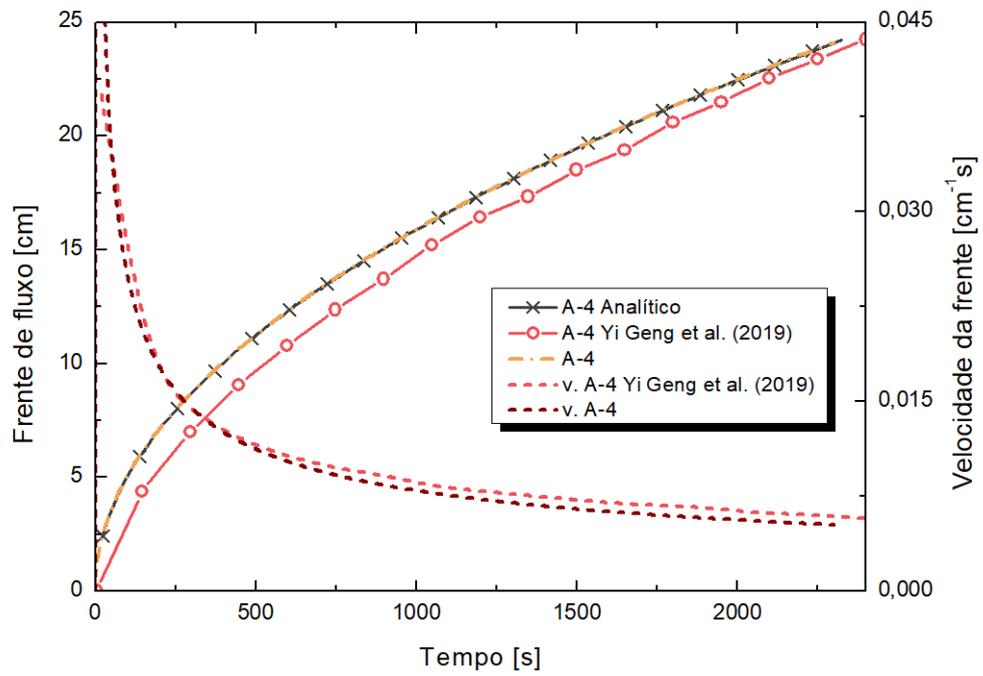
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Comparativo do experimento A-3.



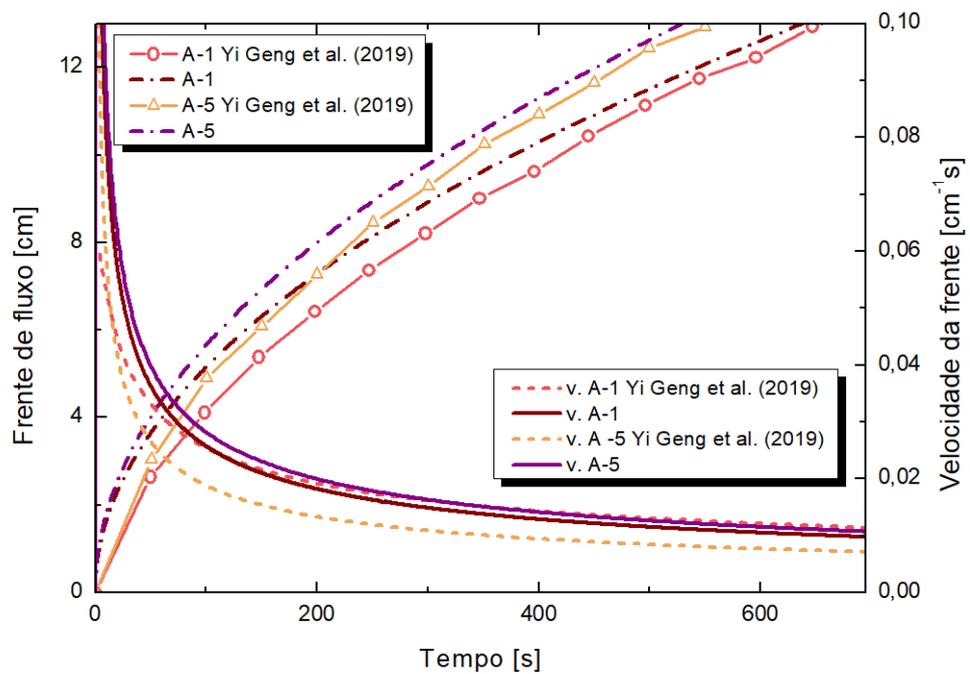
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Comparativo do experimento A-4.



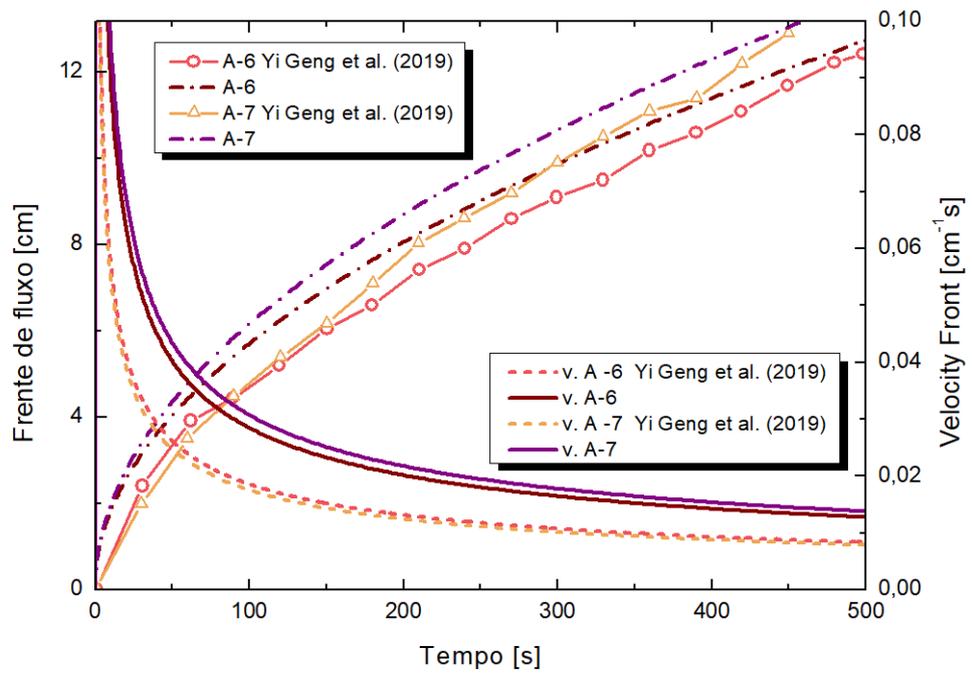
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Comparativo do experimento A-1 e A-5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Comparativo do experimento A-6 e A-7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ESTUDO DE CASO 3

A Lei de Darcy unidimensional (Eq. 5) foi manipulada para a forma

$$K = \frac{\mu \cdot \varphi \cdot x_f^2}{2\Delta p \cdot t_f}, \quad (22)$$

com pontos obtidos nos *plot's* de frente de fluxo pelo tempo disponibilizados no trabalho de Moretti et al. (2023), e utilizando o site WebPlotDigitalizer Costinett (2010) foi possível obter as permeabilidades mínimas e máximas para cada domínio utilizadas no artigo. De forma semelhante, a medida da espessura das fibras foi realizada utilizando a Figura 35 e obtendo a Figura 36, que demonstra o desvio das medições obtidas tendo um desvio padrão de 9.31 para a parte superior e 5.09 para a camada inferior da fibra, o desvio está demonstrado com a variável *Range*, pois diferente dos pontos obtidos para a permeabilidade, para a espessura não foi utilizado um sistema de coordenadas, ou seja, os pontos estão descritos pela quantidade de pixels da imagem e foram rearranjados para milímetros a partir da legenda da Figura, por uma regra de três. Esse procedimento de retirada dos dados foi necessário porque os autores não descrevem a tanto a permeabilidade quanto espessura explicitamente no artigo, apenas a espessura da camada de TPU.

Figura 35 – Espessura das camadas.

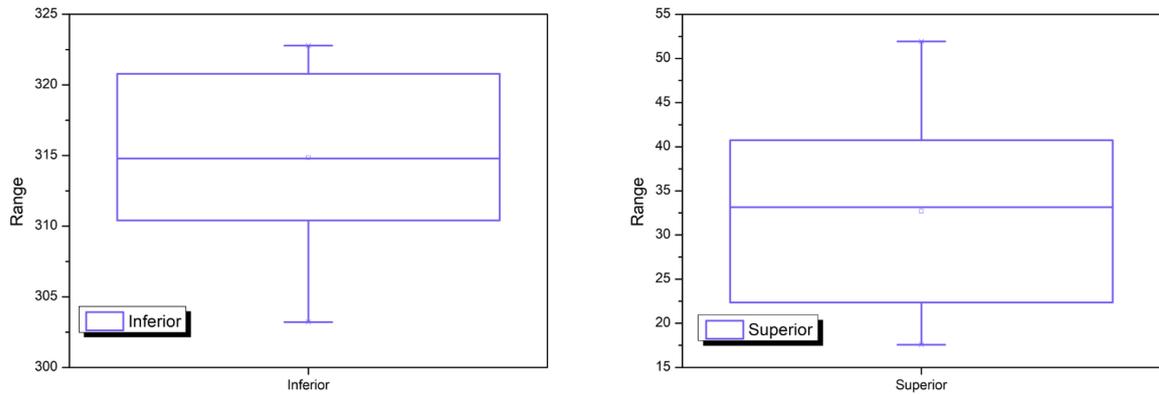


Fonte: Moretti et al. (2023).

A partir dos parâmetros descrito no artigo foi possível realizar as simulações, foram realizadas simulações para a convergência de malha, utilizando o tamanho de elemento inicial de 0.5 milímetros, e por conseguinte obtendo o *plot* de preenchimento por tempo representado pela Figura 37. A partir dela é possível concluir que qualquer uma das malhas poderiam ser usadas para a continuar os trabalhos, porém a malha escolhida foi a que tinha elementos de 0.15 milímetros, pois oferecer a melhor resolução sem um custo computacional muito grande.

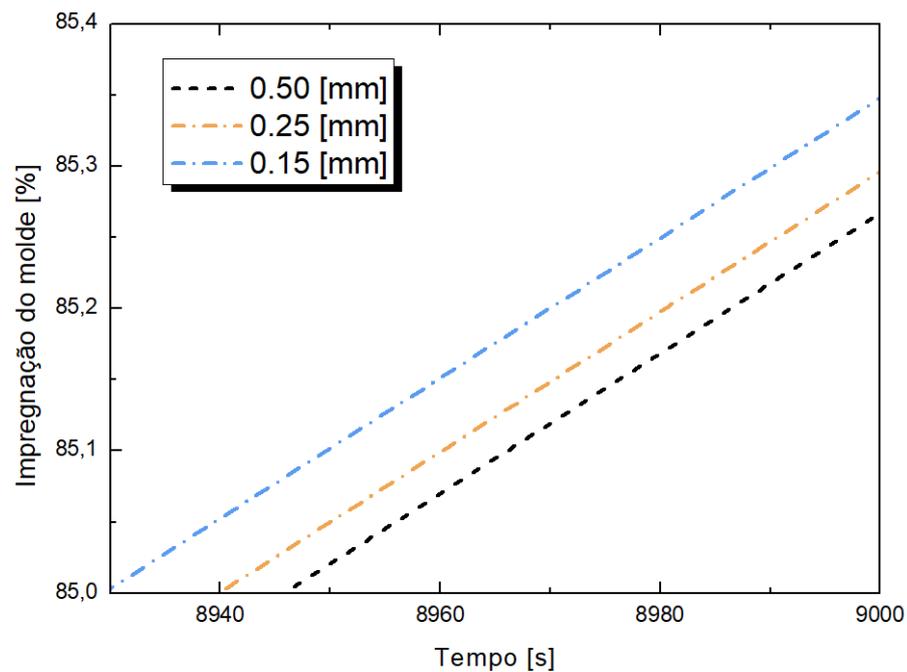
A partir disso, três geometrias foram testadas, pois os autores não descrevem o raio de saída da resina no artigo. Assim, foram propostos os raios 1.5, 3.0 e 4.5 milímetros, e foram obtidos os *plot's* de frente de fluxo por tempo representados nas Figuras 39, 40 e 41, para a Camada próxima a bolsa de vácuo, do meio e próxima ao molde, respectivamente, essas Figuras

Figura 36 – Representação gráfica das medições de espessura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Convergência de malha realizada.

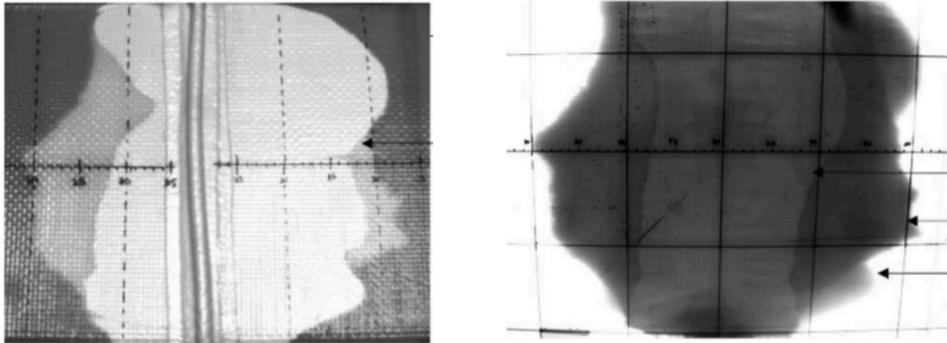


Fonte: Elaborado pelo autor.

apenas corroboram a geometria que tem 1.5 milímetros de raio, pois a partir da Figura 42 é visível que a variação do raio não implicou em grandes diferenças no tempo de preenchimento, visto que apenas para a geometria que tinha 4.5 milímetros e na camada próxima a bolsa de vácuo teve um desvio de mais de 10%. E também, é perceptível que exceto os dois primeiros pontos experimentais das curvas referentes ao molde, todas as outras curvas estão ou dentro do regime delimitado pelo erro associado a eles ou muito próximo a esse regime, da mesma forma, ou para o lado esquerdo ou para o lado direito medido no artigo. Pois, como a permeabilidade

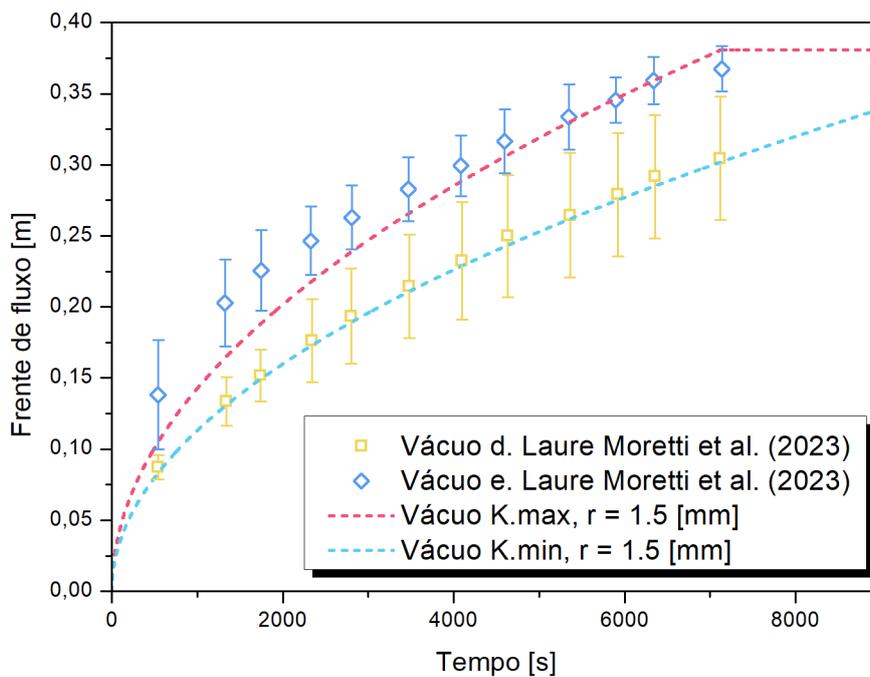
é constante em todo o meio que foi definido, não é possível capturar a diferença entre os lados sem que os autores definissem essa propriedade explicitamente no artigo, é possível ver essa diferença entre os lados na Figura 38 onde a imagem esquerda é a vista superior do experimento e a direita a vista inferior. Considerar a permeabilidade não constante dentro o meio usualmente não acontece, tal que, de toda a minha pesquisa, os artigos que define essa qualidade são os que aplicam análises estocásticas como Yun et al. (2017) e Matsuzaki e Shiota (2016). Dessa forma é possível concluir que, embora todas as simplificações, as simulações oferecem uma ótima correspondência com os dados experimentais realizados no trabalho de Moretti et al. (2023).

Figura 38 – Preenchimento do experimento realizado no artigo.



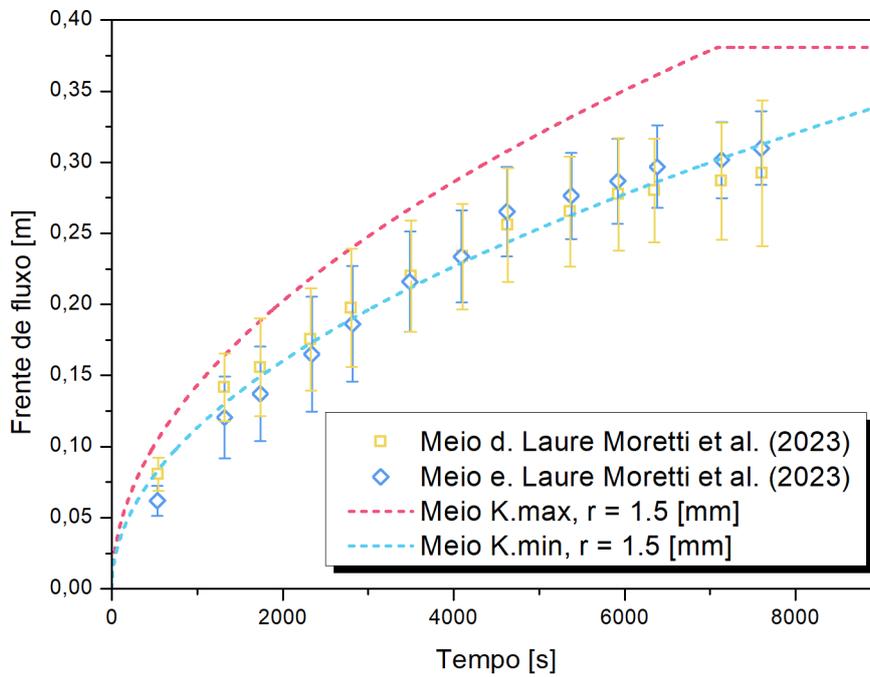
Fonte: Moretti et al. (2023).

Figura 39 – Camada próxima a bag de vácuo, raio do 1.5 mm.



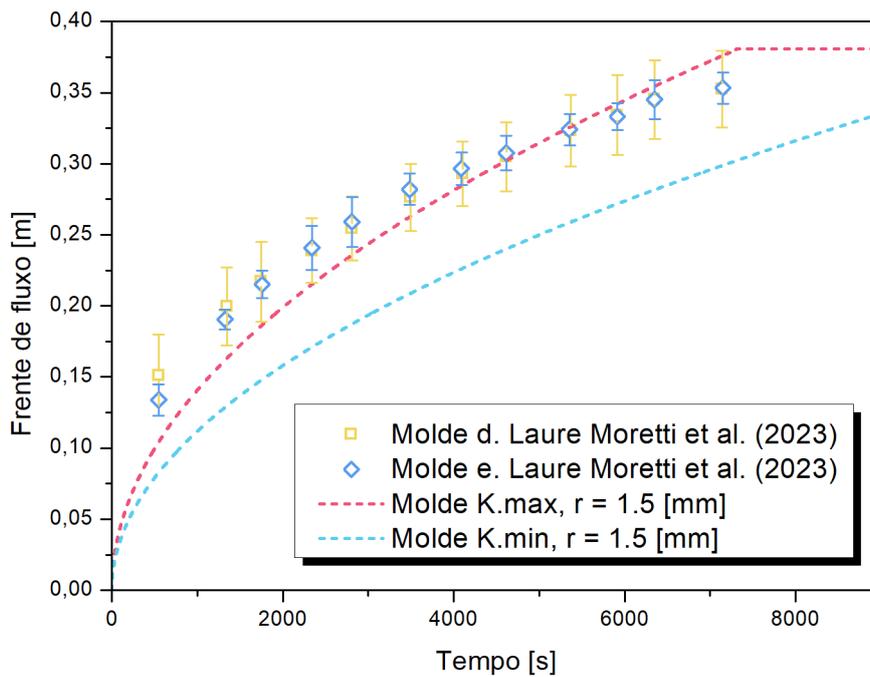
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 – Camada do meio, raio do 1.5 mm.



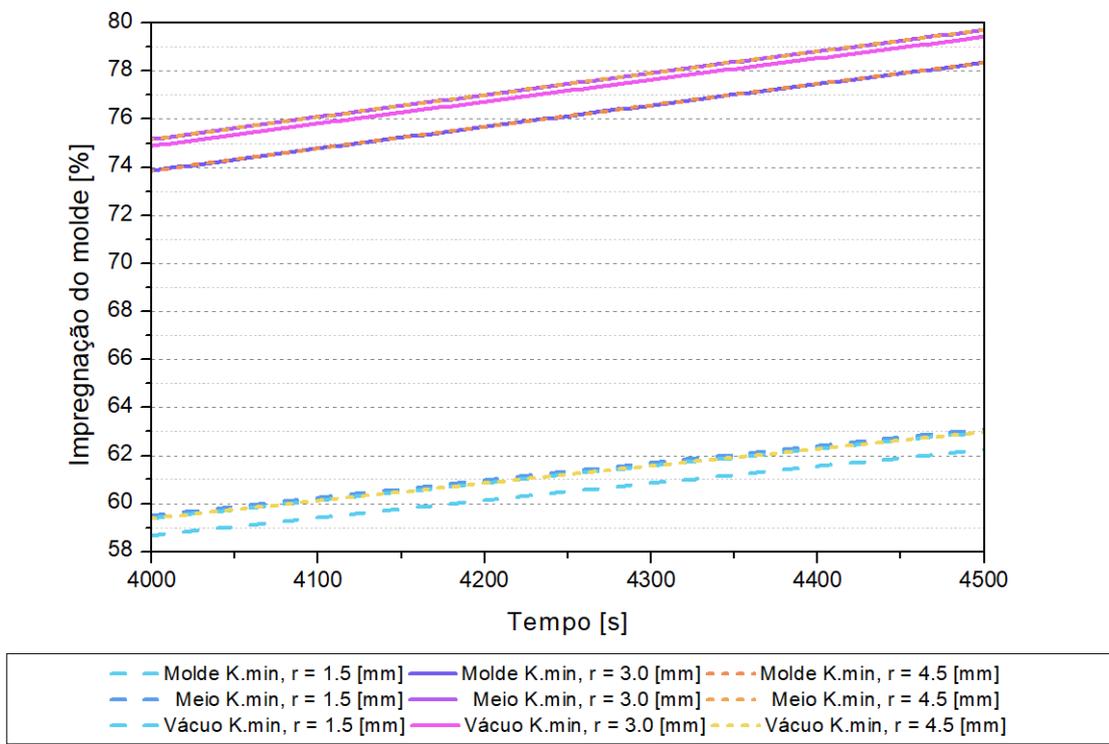
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 – Camada próxima ao molde, raio do 1.5 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 – Diferença no tempo de preenchimento das camadas para diferentes raios.

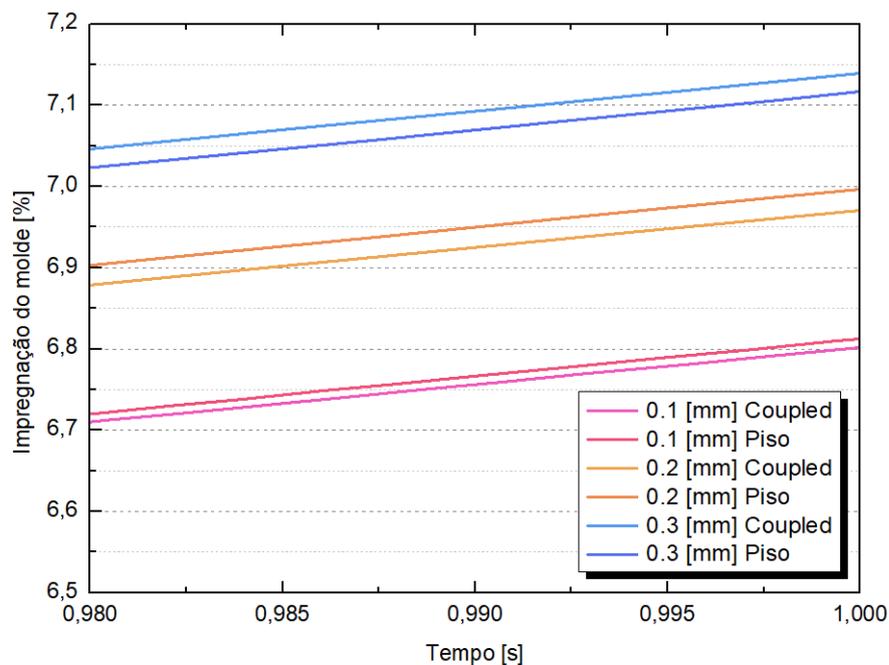


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 ESTUDO DE CASO 4

A partir dos parâmetros estipulados na Tabela 5 foram feitas simulações prévias com um tempo de 1 segundo a fim de achar um malha que será capaz de descrever precisamente os fenômenos que compõem a impregnação da resina. As malhas tem um tamanho de elemento de 0.3, 0.2 e 0.1 milímetros, tanto para o esquema Coupled quanto para o PISO, e seu *plot* de frente de fluxo pelo tempo está representado na Figura 43, a qual é possível ver que a malha com 0.3 milímetros se destaca por ter uma diferença absoluta de menos de 0.35% em relação a malha de 0.1 milímetros, está que possui um custo computacional muito maior se comparado a de 0.3 milímetros.

Figura 43 – Convergência de malha.

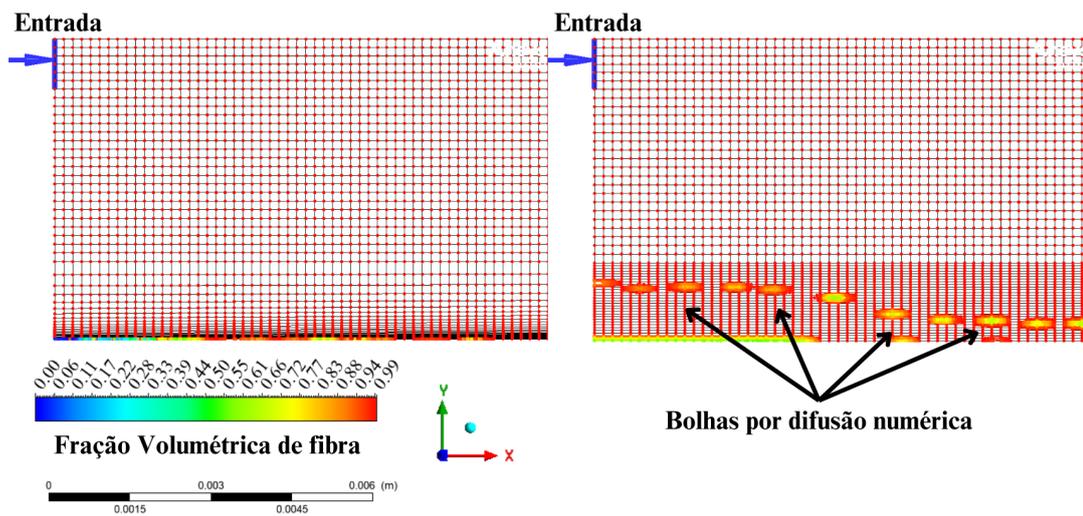


Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, como o meio de distribuição tem uma permeabilidade muito maior que o pré-formado, ocorre uma difusão numérica que se assemelha com formação de bolhas no período de injeção, o que pode acontecer na realidade, mas dentro da simulação foi representada de uma maneira incorreta, pois se trata de um erro associado aos esquemas de interpolação, que foi mitigado quando a malha foi mudada apenas na camada de baixo, representado na Figura 44, que embora essa nova malha ter mais elementos do que a malha original de 0.3 milímetros, seu tempo computacional não teve uma grande mudança pois o *time-step* adaptativo é dependente do número de *Courant*, que dentro dessa simulação é a fração da célula que está sendo preenchida pelo escoamento a cada *time-step*, como esse fenômeno ocorre na parte inferior do

pré-formado onde a velocidade de fluxo já está baixa, diferentemente das malhas com elementos menores, que tem essa característica em toda a geometria, incluindo os elementos ao entorno da entrada de resina, que devido essa condição de contorno ser uma entrada de pressão, suas velocidades de fluxo são muito altas, e por conseguinte, diminuindo o *time-step*.

Figura 44 – Correção da malha.

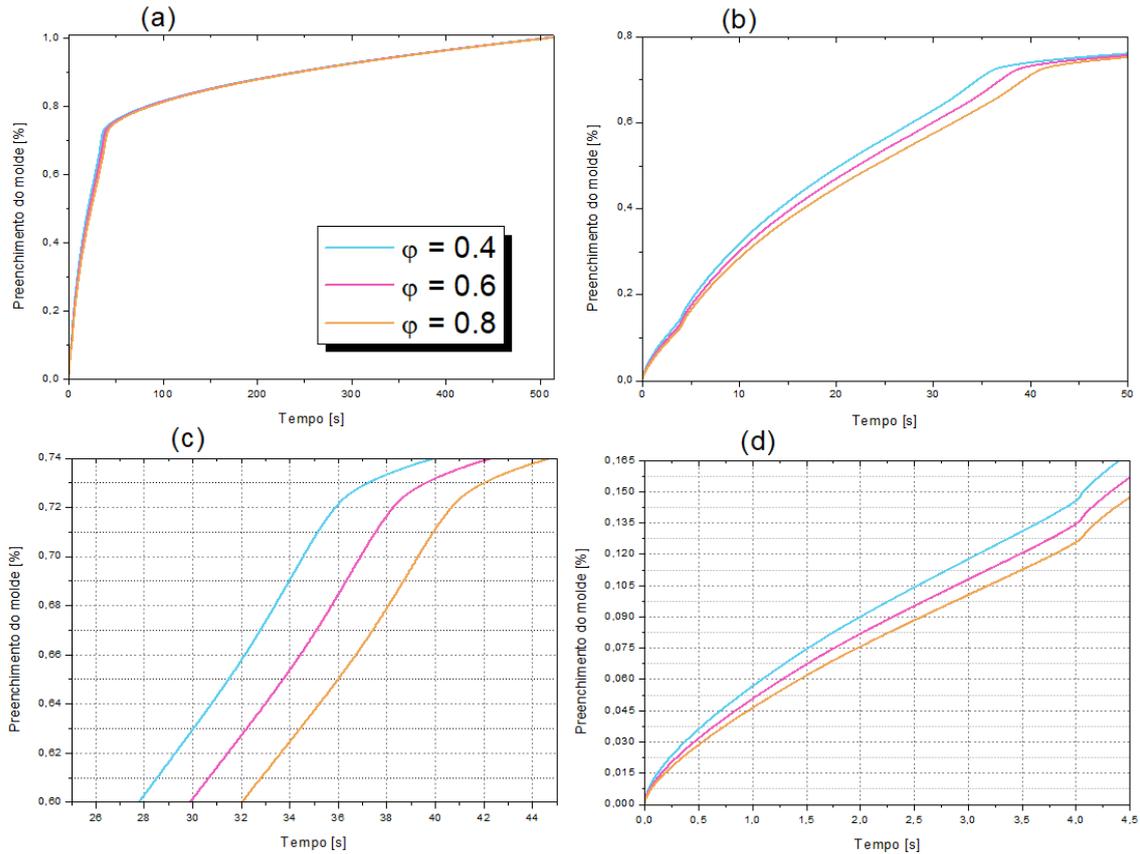


Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dessa correção foram realizadas três simulações variando a porosidade do meio de distribuição, os valores escolhidos foram 0.4, 0.6 e 0.8, o último sendo o mesmo utilizado no trabalho de Dai, Pellaton e Hahn (2003) ao qual foram retiradas todas as propriedades para fazer o meio de distribuição para o estudo de caso 4. Com essas simulações foi possível obter os *plot's* de frente de fluxo pelo tempo para cada um dos valores de porosidade escolhidos, representados pela Figura 45. Observando o tempo de preenchimento total representado pela Figura 45.(a) é possível entender que não é igual as outras curvas de preenchimento no presente trabalho, devido à entrada de resina ser apenas no meio de distribuição, bem como, ao meio de distribuição não corresponder ao comprimento total do pré-formado. O primeiro efeito corresponde a Figura 45.(d), onde até aproximadamente 4 segundos decorridos a curva de preenchimento tem um comportamento e após tem um outro, isso acontece pois a frente de fluxo atinge a camada mais abaixo do pré-formado, que corresponde ao molde ou mesa em que o pré-formado está sobre, isso implicou em uma velocidade menor de preenchimento a partir desse momento, o que indica que a resina tem mais facilidade de escoar sobre a orientação plana do que na orientação transversa, mesmo a permeabilidade sendo considerada constante sobre todo o meio, isso ocorre muito provavelmente por causa da quantidade de camadas. Já quando o meio de distribuição corresponde à 75% do comprimento total do pré-formado, ocorre a mudança na

curva referentes as Figuras 45.b e 45.c, ao contrário do efeito anterior a velocidade da frente de fluxo diminui drasticamente, o que comprova a eficiência da aplicação do meio de distribuição em um processo de VARTM. Implicando que, para a porosidade de 0.8, em 42 segundos o pré-formado estava 73% preenchido, porém demorou 511 segundos para o preenchimento completo, essa porcentagem que corresponde ao momento em que toda a região abaixo do meio de distribuição está preenchida.

Figura 45 – Curvas de Frente de Fluxo por Tempo para Diferentes Porosidades.

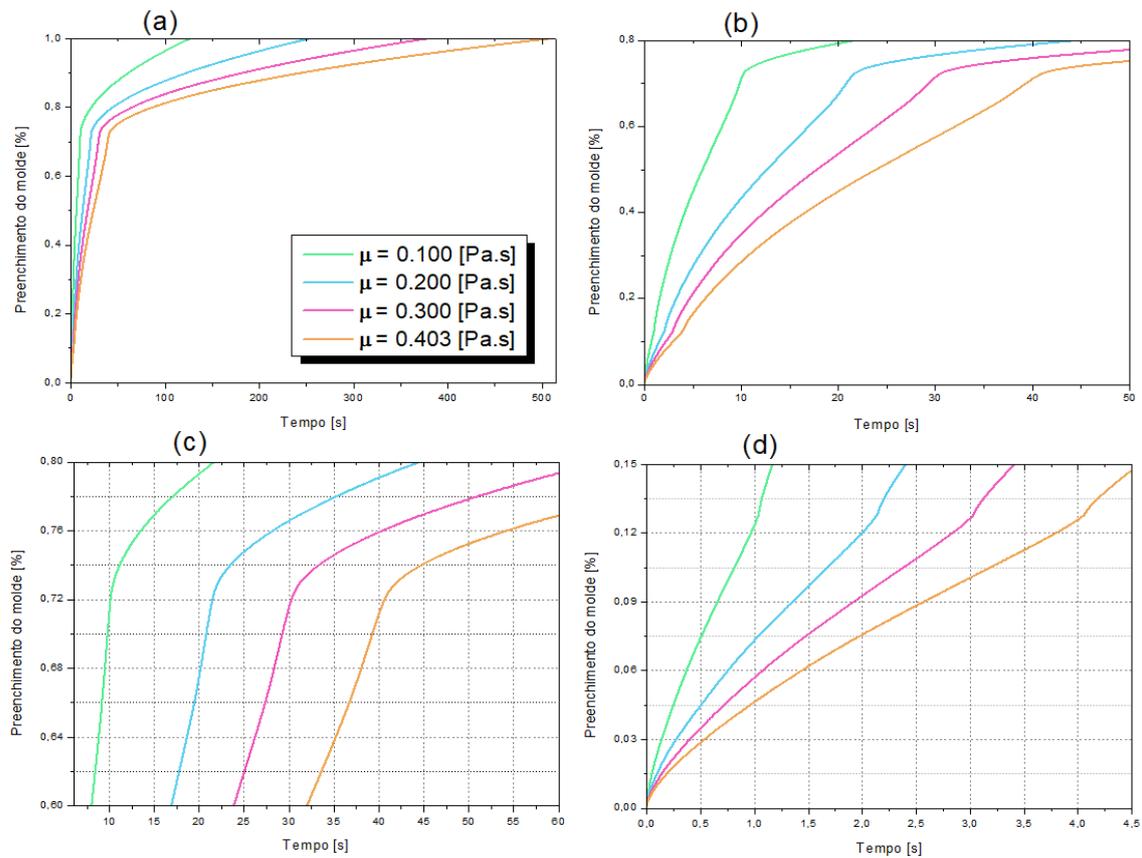


Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a diferença na porosidade do meio de distribuição os resultados são relativamente bem semelhantes, mesmo a porosidade tendo um grande aumento para cada uma das simulações. Para a primeira alteração da curva que ocorreu em 4 segundos, em relação ao ϕ de 0.6 a diferença percentual entre as outras curvas é de 8,15% e 5,19%, para à ϕ de 0.4 e 0.8 respectivamente. De maneira semelhante para a segunda alteração da curva realizada para 73%, a diferença percentual representou 5,94% e 6,14%, para à ϕ de 0.4 e 0.8 respectivamente. Bem como para o preenchimento total, 0,46% e 0,51%, também para a ϕ de 0.4 e 0.8 respectivamente, representando uma diferença drasticamente menor, o que faz sentido pois o meio de distribuição não está presente nos últimos 25% do pré-formado, porém é interessante ver que a implementação do meio de distribuição foi amortecida. Como descrito no trabalho de Naik, Sirisha e Inani (2014), a permeabilidade é uma propriedade que depende das características do reforço como a resina, condições de processamento, design do molde, geometria da peça e porosidade, que é

a propriedade testada nessas simulações. Logo, se a permeabilidade foi considerada a mesma para todas as porosidades, o resultado pode ser impreciso. Esse mesmo fenômeno também pode ocorrer nas simulações em que a variável de interesse é a viscosidade da resina, representada pela Figura 46, mas diferentemente das simulações que testaram a porosidade, os resultados foram mais diferentes entre si, embora seguindo o mesmo comportamento. A partir da Tabela 9 é possível ver que o tempo de preenchimento segue um certo padrão, aproximadamente 128.32 segundos para cada 0.100 $Pa \cdot s$, com a consideração que a permeabilidade não muda conforme a viscosidade.

Figura 46 – Curvas de Frente de Fluxo por Tempo para Diferentes Viscosidades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Comparação dos valores de tempo de preenchimento das simulações realizadas.

| Viscosidade [$Pa \cdot s$] | Tempo de preenchimento [s] | Diferença em relação ao anterior |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 0.100 | 127.16 | - |
| 0.200 | 254.78 | 127.62 |
| 0.300 | 380.75 | 125.97 |
| 0.403 | 512.11 | 131.35 |
| Média | 128.32 | |
| Desvio Médio | 2.03 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi explorado a modelagem e simulação do processo VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), uma técnica muito impactante na fabricação de compósitos. Abordou-se os fundamentos teóricos do processo, incluindo a dinâmica dos fluidos e as relações constitutivas que governam o escoamento de resina através de meios porosos. Foi investigado o papel de diferentes parâmetros que influenciam a qualidade e eficiência do processo.

Utilizando o software Ansys Fluent, foram realizadas simulações computacionais para reproduzir e analisar três estudos de caso distintos, cada um com suas particularidades em termos de geometria, materiais e condições de processo. A validação dos resultados da simulação foi realizada por meio da comparação com dados experimentais disponíveis nos artigos selecionados, demonstrando a capacidade do modelo em prever o comportamento do fluxo de resina e a formação da peça composta. Após isso foi realizado um quarto estudo de caso sendo um junção de características importantes de cada um dos estudos de caso anteriores.

No primeiro estudo de caso, a influência de camadas de alta permeabilidade (HPL) foi investigada, revelando que o modelo computacional previu com boa precisão o tempo de enchimento, mas com algumas divergências no fluxo inicial da resina. O segundo estudo de caso examinou a impregnação em um meio que pôde ser comparado com um escoamento unidimensional, mostrando boa concordância entre as simulações e os dados do artigo, especialmente no tempo total de preenchimento, mas com ligeiras diferenças na velocidade inicial do fluxo. No terceiro estudo de caso, a fabricação de compósitos com inter camadas flexíveis foi simulada, e os resultados numéricos se alinharam bem com os dados experimentais, porém, sem muita diferença quando o raio de saída da resina foi aumentado.

No quarto estudo de caso foram observados dois efeitos nas curvas de preenchimento, onde primeiro acontece quando a frente de fluxo atinge a camada mais abaixo do pré-formado, que corresponde ao molde ou mesa em que o pré-formado está sobre, isso implicou em uma velocidade maior de preenchimento a partir desse momento. Já quando o meio de distribuição corresponde à 75% do comprimento total do pré-formado, ocorre a mudança na curva onde, ao contrário do efeito anterior a velocidade da frente de fluxo diminui drasticamente, o que comprova a eficiência da aplicação do meio de distribuição em um processo de VARTM. Embora a diferença na porosidade do meio de distribuição os resultados são relativamente bem semelhantes, mesmo a porosidade tendo um grande aumento para cada uma das simulações. Embora os tempos de preenchimento tendo uma diferença quando o pré-formado estava 73% preenchido essa mesma diferença não foi replicada para o tempo total de preenchimento do molde, indicando que a implementação do meio de distribuição foi amortecida. A partir dos resultados obtidos na segunda propriedade avaliada é possível ver que o tempo de preenchimento segue um certo padrão, aproximadamente 128.32 segundos para cada $0.100 Pa \cdot s$, com a consideração que a permeabilidade não muda conforme a viscosidade.

Em conjunto, este trabalho conseguiu realizar a aplicação numérica do processo VARTM

utilizando o software Ansys Fluent, para replicar com sucesso os tempos de preenchimento, apesar de algumas discrepâncias que podem ser atribuídas a fatores como as simplificações do modelo como: análise em duas dimensões, a resistência viscosa (inverso da permeabilidade) do meio foi considerada igual para a resina usada e o ar, bem como, constante em todo o domínio. e o erro associado a coleta dos dados experimentais.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e nas limitações identificadas no presente trabalho sobre a modelagem e simulação do processo VARTM, algumas sugestões para trabalhos futuros incluem aspectos que podem melhorar os estudos nesta área:

- Implementar simulações em três dimensões, pois permitirá capturar mais fielmente a complexidade do escoamento da resina, eliminando as simplificações associadas ao modelo bidimensional.
- Investigar a influência de variações na espessura do compósito e nas geometrias do molde.
- Desenvolver modelos que considerem a variação espacial e temporal das propriedades dos materiais, como a permeabilidade e a viscosidade da resina. Avaliar como mudanças na temperatura e na pressão influenciam essas propriedades e, conseqüentemente, o processo de impregnação, pode resultar em simulações representativas das condições reais de fabricação.
- Aperfeiçoar o modelo para considerar a diferença na resistência viscosa entre a resina e o ar. Isso permitirá uma simulação do escoamento da resina em diferentes condições, refletindo melhor as variáveis do processo de VARTM.
- Integrar modelos de múltiplas escalas, que considerem as interações entre a microestrutura dos materiais e o comportamento macroscópico do escoamento. Estudar a influência das microestruturas no comportamento do fluxo de resina e na qualidade final do compósito pode apresentar informações para a otimização do processo.
- Investigar o comportamento de diferentes tipos de resinas e materiais de pré-formado, incluindo novos compósitos e resinas de alta performance, é essencial para identificar materiais que possam oferecer melhores resultados em termos de eficiência e qualidade do processo VARTM.
- Aplicar técnicas de otimização para identificar os melhores parâmetros de processo, como pressão de vácuo, temperatura e configuração do meio de distribuição, pode maximizar a eficiência e a qualidade do produto final, ou seja, utilizar algoritmos de oti-

mização para minimizar o tempo de enchimento e evitar a formação de defeitos no compósito.

- Realizar análises experimentais para aquisição de dados utilizando técnicas de medição e monitoramento, como a tomografia computacional e sensores de fluxo, pode dar suporte a modelos computacionais mais precisos.
- Estudar fenômenos transientes durante o processo VARTM, como a frente de escoamento instável e a formação de bolhas de ar, pode ajudar a desenvolver modelos que possam prever e mitigar esses fenômenos, melhorando a qualidade do compósito final.
- Explorar diferentes condições de contorno e configurações de moldes para entender como esses fatores influenciam o processo de impregnação e a qualidade do compósito.

REFERÊNCIAS

- Acheson, Jeffrey A.; Simacek, Pavel; Advani, Suresh G. The implications of fiber compaction and saturation on fully coupled vartm simulation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 2, p. 159–169, 2004. ISSN 1359-835X. Citado na página 43.
- Adhikari, Debabrata; Gururaja, Suhasini; Hemchandra, Santosh. Resin infusion in porous preform in the presence of hpm during vartm: Flow simulation using level set and experimental validation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 151, p. 106641, 2021. ISSN 1359-835X. Citado na página 24.
- Aeroengineering. **Types of Mesh Used in Computational Fluid Dynamics**. 2020. Disponível em: <<https://www.aeroengineering.co.id/2020/09/types-of-mesh-used-in-computational-fluid-dynamics/>>. Citado na página 33.
- Ansari, Md. Touhid Alam; Singh, Kalyan Kumar; Azam, Mohammad Sikandar. Fatigue damage analysis of fiber-reinforced polymer composites a review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 37, n. 9, p. 636–654, 2018. Citado na página 27.
- ANSYS, Inc. **ANSYS Theory Guide**. Canonsburg, PA, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 35, 36, 37, 38 e 39.
- Barral Jr., A. A.; Minussi, R. B.; Canhoto Alves, M. V. Comparison of interface description methods available in commercial cfd software. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 12, n. 6, p. 1801–1812, 2019. ISSN 1735-3572. Citado na página 35.
- Bayldon, John M.; Daniel, Isaac M. Flow modeling of the vartm process including progressive saturation effects. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 8, p. 1044–1052, 2009. ISSN 1359-835X. Citado na página 42.
- Bekyarova, E. et al. Multiscale carbon nanotube-carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites. **Langmuir**, v. 23, n. 7, p. 3970–3974, 2007. Cited by: 888. Citado na página 23.
- Bergheau, Jean-Michel; Fortunier, Roland. **Finite Element Simulation of Heat Transfer**. London, UK - Hoboken, EUA: Wiley-ISTE Ltd, 2008. Citado na página 32.
- Callister, William D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 10. ed. [S.l.]: Editora LTC, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 18.
- Campbell, F.C. Book. **Manufacturing Processes for Advanced Composites**. [S.l.: s.n.], 2003. 1 517 p. Citado 4 vezes nas páginas 16, 18, 19 e 20.
- Correia, N.C. et al. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. analytical formulation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, n. 12, p. 1645–1656, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 24, 25 e 26.
- Costinett, Daniel. **Power Device Library - DigiTest**. 2010. <<https://web.eecs.utk.edu/~dcostine/personal/PowerDeviceLib/DigiTest/index.html>>. Acessado em: 27 de maio de 2024. Citado 5 vezes nas páginas 48, 49, 56, 58 e 63.
- Dai, J.; Pellaton, D.; Hahn, H. T. A comparative study of vacuum-assisted resin transfer molding (vartm) for sandwich panels. **Polymer Composites**, v. 24, n. 6, p. 672–685, 2003. Citado 8 vezes nas páginas 23, 25, 48, 49, 50, 54, 57 e 69.

Dong, Chensong (Jonathan). An equivalent medium method for the vacuum assisted resin transfer molding process simulation. **Journal of Composite Materials**, v. 40, n. 13, p. 1193–1213, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 46.

Farsane, Mohamed et al. Unsaturated polyester resins: Catalysts, accelerators, and inhibitors. In: Sabu Thomas; Cintil Jose Chirayil (Ed.). **Applications of Unsaturated Polyester Resins**. [S.l.]: Elsevier, 2023. p. 25–42. ISBN 978-0-323-99466-8. Citado na página 25.

Fox, Robert W.; T., Alan. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9ª edição. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2018. Citado na página 28.

Fracassi, Fabiano T; Donadon, Maurício V. Simulation of vacuum assisted resin transfer molding process through dynamic system analysis. **Journal of Composite Materials**, v. 52, n. 27, p. 3759–3771, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 58.

Francucci, Gastón; Rodríguez, Exequiel S; Juan Morán. Novel approach for mold filling simulation of the processing of natural fiber reinforced composites by resin transfer molding. **Journal of Composite Materials**, v. 48, n. 2, p. 191–200, 2014. Citado na página 46.

Geng, Yi; Jiang, Jinhua; Chen, Nanliang. Local impregnation behavior and simulation of non-crimp fabric on curved plates in vacuum assisted resin transfer molding. **Composite Structures**, v. 208, p. 517–524, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 54.

Godbole, Mayur G. et al. Semi-analytical formulation of effective permeability of a dual scale unidirectional fabric. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 150, p. 106630, 2021. ISSN 1359-835X. Citado na página 41.

Gokce, Ali et al. Permeability estimation algorithm to simultaneously characterize the distribution media and the fabric preform in vacuum assisted resin transfer molding process. **Composites Science and Technology**, v. 65, n. 14, p. 2129–2139, 2005. ISSN 0266-3538. Citado na página 14.

Groover, M.P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470467008. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

Grujicic, M.; Chittajallu, K.M.; Walsh, Shawn. Non-isothermal preform infiltration during the vacuum-assisted resin transfer molding (vartm) process. **Applied Surface Science**, v. 245, n. 1, p. 51–64, 2005. ISSN 0169-4332. Citado na página 45.

Jhan, Yu-Ti; Lee, Ya-Jung; Chung, Cheng-Hsien. Experimental and numerical investigation of the vartm process with a sandwich structure. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 12, p. 1417–1430, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 41.

Johnson, R.J.; Pitchumani, R. Simulation of active flow control based on localized preform heating in a vartm process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 10, p. 1815–1830, 2006. Citado na página 45.

Johnson, R.J.; Pitchumani, R. Flow control using localized induction heating in a vartm process. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 3, p. 669–684, 2007. ISSN 0266-3538. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 45.

Kwon, Y.W. Computational and experimental study of composite scarf bonded joints. In: Beaumont, P.W.R.; Soutis, C.; Hodzic, A. (Ed.). **Structural Integrity and Durability of Advanced Composites**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2015, (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering). p. 659–693. ISBN 978-0-08-100137-0. Citado na página 22.

Löhner, Rainald. **Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods**. Second edition. Fairfax, Virginia, USA: Wiley, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.

Maliska, Clovis. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª edição. ed. São Paulo, SP, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2004. 472 páginas, ISBN 978-85-7669-843-7. Citado 7 vezes nas páginas 29, 30, 32, 33, 34, 39 e 40.

Maliska, Clovis. **Curso de Volumes Finitos - Prof. Maliska - 3.O Método dos Volumes Finitos**. 2019. <<https://www.youtube.com/watch?v=WZB25zY0q64&list=PLIPfGy5ZyImPkgpkbpOPXk2BT5zXb2hso&index=3>>. Vídeo online. Acesso em: 14 de abril de 2024. Citado na página 31.

Matsuzaki, Ryosuke; Shiota, Masaya. Data assimilation through integration of stochastic resin flow simulation with visual observation during vacuum-assisted resin transfer molding: A numerical study. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 84, p. 43–52, 2016. ISSN 1359-835X. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 65.

Mendonça, Paulo de Tarso Rocha de. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. [S.l.]: Manole, 2005. Citado na página 16.

Moretti, Laure et al. Behavior of perforated flexible impermeable interlayers during vartm processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 173, p. 107691, 2023. ISSN 1359-835X. Citado 7 vezes nas páginas 14, 51, 52, 53, 54, 63 e 65.

Mulbah, Christian et al. A review of vof methods for simulating bubble dynamics. **Progress in Nuclear Energy**, v. 154, p. 104478, 2022. ISSN 0149-1970. Citado na página 14.

Naik, N.K.; Sirisha, M.; Inani, A. Permeability characterization of polymer matrix composites by rtm/vartm. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 65, p. 22–40, 2014. ISSN 0376-0421. Citado 3 vezes nas páginas 14, 27 e 70.

Nik Wan, F. et al. The flexural properties of oil palm trunk (opt) impregnated with epoxy (opte) composite manufactured by vacuum-assisted resin transfer moulding (vartm) technique. **Engineering Failure Analysis**, v. 147, p. 107127, 2023. ISSN 1350-6307. Citado na página 22.

Park, Chung Hae et al. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 42, n. 6, p. 658–668, 2011. ISSN 1359-835X. Citado na página 14.

Park, Chung Hae et al. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 42, n. 6, p. 658–668, 2011. ISSN 1359-835X. Citado na página 43.

Rapp, Bastian E. Chapter 25 - numerical methods for linear systems of equations. In: Rapp, Bastian E. (Ed.). **Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics**. Oxford: Elsevier, 2017, (Micro and Nano Technologies). p. 497–535. ISBN 978-1-4557-3141-1. Citado na página 36.

Simacek, Pavel et al. Experimental validation of post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 3, p. 370–380, 2012. ISSN 1359-835X. Citado na página 44.

Trochu, François et al. Advanced numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 6, p. 890–902, 2006. ISSN 1359-835X. Selected Contributions from the 7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials held at University of Delaware, USA. Citado na página 40.

Tuncol, G.; Loos, A.C.; Cano, R.J. Simulation of resin infusion in the manufacture of fiber metal laminates by vartm. **ICCM International Conferences on Composite Materials**, 01 2011. Citado na página 14.

Ubbink, Onno. **Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces**. Tese (Doutorado) — Imperial College, London, jan. 1997. Citado na página 38.

Vernet, N. et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark ii. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 61, p. 172–184, 2014. ISSN 1359-835X. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 44.

Vo, H.N. et al. Capillary pressure contribution in fabrics as a function of fibre volume fraction for liquid composite moulding processes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 635, p. 128120, 2022. ISSN 0927-7757. Citado na página 14.

Yalcinkaya, M Akif; Caglar, Baris; Sozer, E Murat. Effect of permeability characterization at different boundary and flow conditions on vacuum infusion process modeling. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 7, p. 491–504, 2017. Citado na página 14.

Youngs, David. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. In: _____. [S.l.: s.n.], 1982. v. 24, p. 273–285. Citado na página 37.

Yun, Minyoung et al. Stochastic modeling of through the thickness permeability variation in a fabric and its effect on void formation during vacuum assisted resin transfer molding. **Composites Science and Technology**, v. 149, p. 100–107, 2017. ISSN 0266-3538. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 65.

Çengel, Yunus A.; Cimbala, John M. **Mecânica dos fluídos**. 3ª edição. ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora Ltda., 2015. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.