MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE UM EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL

por

Gustavo Silva Pereira Junior

Dissertação de mestrado para obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, Janeiro de 2024

Gustavo Silva Pereira Junior

“AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE UM EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br JEFERSON AVILA SOUZA
Data: 22/01/2024 10:46:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (Orientador – FURG)

Documento assinado digitalmente
gov.br CRISTIANO PERES OLIVEIRA
Data: 19/01/2024 11:19:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Cristiano Peres Oliveira (Coorientador - UNIPAMPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 23/01/2024 19:40:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (FURG)

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO DA CUNHA DIAS
Data: 26/01/2024 08:28:42-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gustavo da Cunha Dias (FURG)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ ANTONIO FERREIRA COELHO
Data: 23/01/2024 07:58:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Luiz Antonio Ferreira Coelho (UDESC)

Rio Grande - RS
2024

Ficha Catalográfica

P436a Pereira Junior, Gustavo Silva.
Avaliação numérica de um experimento para a determinação da permeabilidade transversal / Gustavo Silva Pereira Junior. – 2024.
64 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2024.
Orientador: Dr. Jeferson Avila Souza.
Coorientador: Dr. Cristiano Peres Oliveira.

1. Placa 2. RTM 3. CFD 4. Meio Poroso 5. Reforço Fibroso I. Souza, Jeferson Avila II. Oliveira, Cristiano Peres III. Título.

CDU 004

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

RESUMO

Diversos setores, desde o transporte até a energia, necessitam do desenvolvimento de materiais mais eficientes que tenham como característica rigidez e um baixo peso. Neste ambiente, se difunde há anos o uso de compósitos poliméricos por apresentar as características necessárias. Com isto, há um aumento do interesse em melhorar os processos de fabricação e também de predição das propriedades dos materiais utilizados na fabricação destes compósitos. Na literatura, há diversos casos recentes em que relatam a necessidade de padronizar e estimar as incertezas do processo de determinação da permeabilidade transversal por se tratar de uma propriedade dependente da geometria, porosidade do material e outros fatores. Dentre os processos de mensuração da permeabilidade, é amplamente utilizado pela maior parte dos laboratórios que fazem esse tipo de ensaio, o experimento de medição da permeabilidade transversal através da indução de um escoamento de fluido em uma cavidade cilíndrica fechada e, a partir dos dados obtidos neste experimento, é calculado da permeabilidade do reforço fibroso pela lei de Darcy. A partir deste contexto, o presente trabalho, tem por objetivo avaliar arranjos entre alguns aspectos relacionados ao processo e a eficiência na correta determinação da permeabilidade transversal do meio. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia numérica baseada no método dos volumes finitos capaz de simular processos de medição das permeabilidades. Através disso, é quantificado os erros associados a aos aspectos altura do molde para 5 alturas diferentes (3,8 mm, 6,35 mm, 9,35 mm, 15,88 mm e 22,23 mm), anisotropia do material para razões entre $K_{planar}/K_{transversal}$ (10, 100, 1000 e 10000), presença da camada difusiva e desalinhamento das placas para ângulos de 0°, 30°, 45° e 60°. As geometrias foram geradas no programa Gmsh e um solucionador do programa livre *openFOAM* foi utilizado para resolver o problema. No fim, os resultados mostram que tanto a altura do molde quanto a configuração da placa perfurada podem levar à superestimação da permeabilidade (K). A utilização de uma placa difusiva é mostrada como um fator contribuinte para a redução a influência das placas perfuradas no processo e a anisotropia do material é outro fator relevante onde, materiais com permeabilidades maiores na direção planar se comportam melhor, ou seja, os erros de medição da permeabilidade de reforços com maiores anisotropia ($K_{planar} \gg K_{transversal}$) tendem a ser menores.

Palavras-chaves: Placa, RTM, CFD, Meio Poroso, Reforço Fibroso.

ABSTRACT

Various sectors, from transportation to energy, require the development of more efficient materials characterized by both rigidity and low weight. In this context, the use of polymeric composites has been widespread for years due to their necessary characteristics. Consequently, there is a growing interest in improving manufacturing processes and predicting the properties of materials used in the production of these composites. In the literature, several recent cases emphasize the need to standardize and estimate uncertainties in the process of determining transversal permeability since it is a property dependent on geometry, material porosity, and other factors. Among the permeability measurement processes, widely used by most laboratories conducting such tests, is the experiment for measuring transversal permeability by inducing fluid flow in a closed cylindrical cavity. Based on the data obtained in this experiment, the permeability of the fibrous reinforcement is calculated using Darcy's law. In this context, the present work aims to evaluate arrangements between some aspects related to the process and the efficiency in correctly determining the transversal permeability of the medium. For this purpose, a numerical methodology based on the finite volume method was developed to simulate permeability measurement processes. Through this, errors associated with aspects such as mold height for five different heights (3.8 mm, 6.35 mm, 9.35 mm, 15.88 mm, and 22.23 mm), material anisotropy for ratios between $K_{planar}/K_{transversal}$ (10, 100, 1000, and 10000), the presence of the diffusive layer, and misalignment of plates at angles of 0°, 30°, 45°, and 60° were quantified. The geometries were generated in the Gmsh program, and a solver from the openFOAM free program was used to solve the problem. In the end, the results show that both the mold height and the configuration of the perforated plate can lead to an overestimation of permeability (K). The use of a diffusive plate is shown to be a contributing factor to reduce the influence of perforated plates in the process, and material anisotropy is another relevant factor where materials with higher permeabilities in the planar direction perform better. In other words, measurement errors of permeability for reinforcements with greater anisotropy ($K_{planar} \gg K_{transversal}$) tend to be smaller.

Keywords: Plate, RTM, CFD, Porous Media, Fiber Reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Molde cilíndrico: a) corte do desenho em CAD (ESCHER, 2016), b) molde construído sendo utilizado para experimentos de permeabilidade fora do plano (OLIVEIRA, 2019).....29
Figura 4.1: Posicionamento dos furos nas placas de distribuição de fluxo.....32
Figura 4.2: Ângulo entre o desalinhamento das placas superiores e inferiores: (a) vista em perspectiva com o ângulo representativo do giro e (b) vista frontal.....33
Figura 4.3: Domínio computacional: (a) condições de contorno e (b) vista lateral do domínio.....34
Figura 5.1: Esboço análises realizadas.....38
Figura 5.2: Esquema de análise para análise das configurações das placas.....39
Figura 5.3: Erro da permeabilidade transversal calculada.....41
Figura 5.4: Corte longitudinal interno ao molde mostrando as velocidades na cavidade do molde..43
Figura 5.5: Perfis de velocidade em um corte no meio do molde.....44
Figura 5.6: Esquema de análise da anisotropia.....45
Figura 5.7: Efeito da anisotropia em função das placas utilizadas (h = 15,88mm).....45
Figura 5.8: Efeito da anisotropia em função das placas utilizadas (h = 22,23mm).....47
Figura 5.9: Esquematização da camada difusiva.....48
Figura 5.10: Esquema de análise da camada difusiva.....48
Figura 5.11: Comportamento do experimento em função da utilização de uma placa permeável....49
Figura 5.12: Perfil de velocidade na penetração de resina no corpo de prova poroso.....51
Figura 5.13: Perfil de velocidades no meio do corpo de prova com camada difusiva.....52
Figura 5.14: Esquema de análise do desalinhamento das placas.....53
Figura 5.15: Desalinhamento das placas.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Síntese dos principais trabalhos avaliados.....25
Tabela 4.1: Principais parâmetros da simulação.....35
Tabela 4.2: Malha independente na direção transversal.....36
Tabela 4.3: Independência de malha no plano.....36
Tabela 5.1: Queda de pressão calculada para simulação (Δp_{num} [kPa]).....40
Tabela 5.2: Permeabilidade transversal calculada para as simulações numéricas (Kzz,num x 10^{12} [m²]).....40
Tabela 5.3: Permeabilidade transversal calculada para as simulações numéricas com a presença da placa permeável ().....49
Tabela 5.4: Resultado da permeabilidade numérica obtido com o desalinhamento das placas ().....54
Tabela 5.5: Erro calculado para moldes com desalinhamento [%].....54
Tabela 5.6: Esforço Computacional.....55

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	*Computer Aided Design;*
EF/VC	Elementos Finitos/Volume de controle
LCM	*Liquid Composites Manufacturing;*
LaPol	Laboratório de Polímeros;
VF	Volumes Finitos;
VARTM	v*acuum assisted resin transfer molding*
VOF	*Volume of fluid*
RTM	*Resin Transfer Molding*;

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{furos} Área dos furos [m²];

A Área transversal do molde [m²];

d Diâmetro dos furos [m];

D Diâmetro do molde [m];

$\vec{F}$ Termo fonte [N];

f Fração volumétrica;

$\vec{g}$ Força gravitacional [m/s²];

h Altura do reforço fibroso [m];

h_{NDL} Altura da camada permeável [m];

K_x Permeabilidade na direção x [m²];

K_y Permeabilidade na direção y [m²];

K_z Permeabilidade na direção z [m²];

$\bar{K}$ Permeabilidade na direção do fluxo [m²];

n Número de furos;

p Pressão [Pa];

Δp Perda de carga [Pa];

t Tempo [s];

u Velocidade na direção x [m/s];

$\vec{v}$ vetor velocidade [m/s];

v Velocidade na direção y [m/s];

w Velocidade na direção z [m/s];

SÍMBOLOS GREGOS

μ Viscosidade do fluido [Pa.s];

ρ Massa específica do fluido [kg/m³];

τ Tensor de tensões [Pa];

$\dot{\forall}$ Vazão volumétrica [m³/s];

θ Ângulo de desalinhamento entre a placa superior e inferior [°];

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO....10

1.1 OBJETIVO....13

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS....13

2. ESTADO DA ARTE....14

3. MODELO NUMÉRICO....26

3.1 MODELO MATEMÁTICO....26

3.1.1 VOLUME OF FLUID (VOF)....27

3.2 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM REGIME SATURADO....28

4. MODELAGEM DO PROBLEMA....31

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO....31

4.1.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS....31

4.1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA....33

4.1.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO....34

4.2 PROCESSAMENTO....37

5. RESULTADOS....38

5.1 CONFIGURAÇÕES DA PLACA PERFURADA....39

5.2 DISTRIBUIÇÃO DAS PLACAS E A ANISOTROPIA DO MEIO POROSO....45

5.3 CAMADA DIFUSIVA....47

5.4 DESALINHAMENTO DAS PLACAS....53

5.5 ESFORÇO COMPUTACIONAL....55

6. CONCLUSÕES....56

7. TRABALHOS FUTUROS....58

REFERÊNCIAS....59

APÊNDICES....62

1. INTRODUÇÃO

Há um esforço contínuo da engenharia em aumentar a resistência e diminuir o peso dos materiais, isso porque a eficiência de um determinado elemento pode ser consideravelmente aumentada somente modificando os materiais que o compõe. Uma elevada razão entre resistência por unidade de massa é uma das vantagens encontradas na utilização de compósitos poliméricos de alto desempenho, justificando a substituição de alguns elementos metálicos nos campos aeroespacial, automobilístico e naval. Além de permitirem o aumento da eficiência e resistência, estes materiais permitem uma maior flexibilidade no design de peças e uma longa vida útil, uma vez que não são tão voláteis em frente a oxidação (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos poliméricos são constituídos de dois ou mais materiais, geralmente uma resina termofixa e um reforço fibroso construído em forma de tecidos ou mantas (CALLISTER, JR; RETHWISCH, 1996). Em suas aplicações, possuem como principal objetivo obter propriedades mecânicas, térmicas e químicas específicas para determinada aplicação. Além das vantagens citadas anteriormente, esses materiais têm como vantagem serem isolantes elétricos o que pode ser um diferencial dependendo da aplicação (WANG *et al.*, 2023).

A alta popularidade e a expansão da aplicação destes materiais são algumas das justificativas frente a diversidade de processos para fabricá-los. Os processos *Liquid Composites Molding* (LCM) (SIRTAUTAS et al., 2015) têm se destacado entre os outros à medida que os fabricantes buscam explorar os benefícios da redução de tempo, custos e energia em relação a processos mais comuns, como por exemplo o autoclave, obtendo produtos comparáveis com alto volume de fibras e baixa formação de vazios. O LCM é um termo genérico que reagrupa uma família de processos de fabricação de compósitos que tem como princípio a injeção de uma resina líquida em um molde para impregnar um reforço fibroso pré-formado a seco (ADVANI; SOZER, 2010).

Com o desenvolvimento da técnica observou-se que fazer a injeção do fluido na direção da espessura da peça, direção transversal do reforço, permitia diminuir o tempo de fabricação em relação a injeção na direção do plano (JOUBAUD *et al.*, 2005; RUBINO; CARLONE, 2018), essa observação resultou no desenvolvimento de algumas técnicas específicas como *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM), *Resin Transfer Molding* (RTM), entre outras. Essas apresentam como vantagem a diminuição dos canais de fluxo de resina, possibilitando, fabricação de materiais com grandes dimensões através de um equipamento padrão e por isso a permeabilidade transversal do reforço fibroso se torna um parâmetro importante a ser definido, tornando-se governante para a

eficiência destes processos de fabricação.

A permeabilidade é uma grandeza, proposta por Darcy (BROWN, 2002) em seus estudos sobre escoamento em meios porosos, definida como a razão da velocidade pelo gradiente de perda de carga em um corpo de prova multiplicado pela viscosidade do fluido. Em linhas gerais, esta grandeza é capaz de quantificar a facilidade que um fluido tem de atravessar os poros de um determinado meio. Podendo ser nas três direções de um plano cartesiano: K_x (na direção *x*), K_y (na direção *y*) e K_z (na direção *z*). Sendo comum utilizar K_x e K_y para permeabilidade no plano e K_z como a permeabilidade fora do plano, ou transversal.

Por ser uma propriedade dependente da geometria, porosidade do material e outras características, diversas pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas com o objetivo de padronizar os procedimentos para mensurar a permeabilidade de meios porosos, uma vez que ainda é encontrada muita variabilidade dos resultados para definir a propriedade de um mesmo material fibroso com as mesmas características. Isto ocorre pois as técnicas utilizadas dispõem de diversos parâmetros que geram incertezas. Com isso, a comunidade científica têm aumentado seus esforços para avaliar os melhores procedimentos e as melhores técnicas (YONG *et al.*, 2021).

Há duas formas de obter dados para mensurar a permeabilidade: a primeira é com o escoamento insaturado onde o avanço da resina é rastreado em tempo real através da observação do escoamento pelo reforço de fibras e, a segunda técnica obtém dados do escoamento saturado, definindo ora uma vazão fixa ora uma pressão de injeção constante durante o escoamento e, ao decorrer do experimento é mensurando a perda de carga (quando utilizado a vazão como entrada) no interior do corpo de ensaio. Para o caso onde é definido a pressão constante a variável de interesse é a vazão. Graças à facilidade de reprodução do experimento, a segunda técnica é amplamente difundida sendo a mais escolhida por diversos institutos em um estudo internacional sobre a permeabilidade transversal (YONG *et al.*, 2021).

Existem diversas técnicas para mensurar a permeabilidade no plano. Já foram realizados pesquisas levando em conta dados obtidos de diversas instituições com o objetivo de avaliar as práticas de mensuração (ARBTER *et al.*, 2011) e também estudos definindo um procedimento padrão com uniformidade na utilização de moldes com dimensões específicas e propriedades dos fluidos definidas (VERNET *et al.*, 2014), com o objetivo de avaliar se a utilização de um procedimento específico seria capaz de eliminar os erros. Em ambos foi rastreado a variabilidade nos resultados da permeabilidade no plano, identificando que com a padronização dos procedimentos é possível diminuir expressivamente a variação dos resultados, isso avaliando um mesmo produto.

As técnicas de mensuração de permeabilidade no plano têm como vantagem que as fibras geralmente possuem uma permeabilidade maior nesta direção, exigindo menores pressões de injeção e consequentemente, avaliar estes escoamentos é mais simples quando comparado com o escoamento na direção transversal. A maioria das técnicas de mensuração no plano consiste em colocar um corpo de prova entre duas placas paralelas, sendo uma transparente e a outra com um ponto de entrada para o fluido. A partir do estabelecimento do fluxo do liquido é observado o avanço da resina em função do tempo, com a observação na placa transparente e calculado a permeabilidade no plano através de uma regressão com os dados.

Quando é avaliada a permeabilidade fora do plano, foco desse trabalho, para um experimento insaturado, é necessário empilhar diversas frações de fibras tramadas e a avaliação do escoamento entre camadas teria que possibilitar a observação do escoamento interno ao molde, o que acaba por exigir equipamentos com elevado custo, que ainda apresentam limitações na obtenção de dados, avaliando somente o escoamento na camada mais externa do molde (perto das paredes) (KABACHI *et al.*, 2021). Com isso, a avaliação da permeabilidade transversal geralmente adota procedimentos saturados, o que apresenta como principal desvantagem ter de prever todas as fontes de incerteza, ora pelos equipamentos e fator humano ora pela variabilidade de fabricação dos materiais utilizados como reforço fibroso, justamente pela falta de possibilidade de correções durante o experimento.

Uma das técnicas de mensuração da permeabilidade transversal mais comum de ser encontrada pela baixa complexidade em relação às outras é a submissão de um corpo de prova a um fluxo de escoamento no interior de um molde cilíndrico. O molde nesse ensaio fica suspenso entre duas placas perfuradas, denominadas placas de distribuição de fluxo. O experimento consiste em especificar uma vazão constante, ou pressão constante, e calcular a perda de carga através da equação de Darcy. No entanto, este modelo leva em conta que o material é perfeitamente homogêneo e o escoamento tem uma forma linear, o que de fato pode não ocorrer dependendo das placas de distribuição utilizadas, variabilidade de fabricação do material ou até mesmo a não compactação homogênea (OLIVEIRA, 2019; TRINDADE *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2022).

Visto que a fabricação de materiais compósitos está crescendo notavelmente nos últimos anos (LUNETTO *et al.*, 2023), é comum que se busque o desenvolvimento de novas tecnologias visando o aprimoramento das técnicas de fabricação e o conhecimento de algumas incertezas em relação a procedimentos para definição de parâmetros nestes processos. É fundamental que pesquisadores e a indústria desenvolvam estudos com o objetivo de fornecer dados capazes de quantificar e minimizar essas incertezas.

O presente trabalho estuda, por meio de simulações numéricas, o procedimento saturado de caracterização da permeabilidade transversal em reforços fibrosos, focando em quantificar erros gerados pelas placas de distribuição de fluxo na determinação da permeabilidade fora do plano em reforços de fibras utilizados na fabricação de compósitos poliméricos. O estudo apresenta diferentes perfis de distribuição dos furos nas placas com uma razão entre a área dos furos e a área impermeável constante. Também é avaliado a correlação entre os erros de predição e a anisotropia do material. Além disso, é observado a utilização de camadas difusivas e seu emprego como minimizador aos erros provocados pelas placas de distribuição de fluxo. O desalinhamento entre as placas, superior e inferior, também é analisado com o objetivo de entender se a não congruência entre os furos causa distorções no processo de determinação da permeabilidade transversal.

1.1 OBJETIVO

Propor uma metodologia numérica para avaliação do escoamento interno em moldes cilíndricos, comumente utilizado para medição da permeabilidade transversal. Ademais, verificar aspectos relacionados ao processo, como: perfil das placas perfuradas e a distorção causada nos resultados da permeabilidade, influência da anisotropia do material nos resultados, influência da congruência entre as placas e a utilização de uma placa permeável como fator redutor dos erros obtidos no processo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma modelagem computacional capaz de reproduzir adequadamente ensaios experimentais em problemas de determinação da permeabilidade transversal;
- Desenvolver novos desenhos de placas com a mesma razão entre área de furos e área impermeável a fim de quantificar o erro gerado em decorrência da presença das mesmas no fluxo;
- Avaliar a utilização de uma camada altamente permeável (camada difusiva) na extinção da influência destas placas de distribuição de fluxo;
- Verificar a anisotropia do material e a sua influência na determinação da permeabilidade transversal do meio poroso;
- Identificar se há correlação entre o alinhamento dos furos e o aumento do erro na determinação da permeabilidade transversal.

2. ESTADO DA ARTE

Os materiais compósitos têm encontrado ampla difusão em diferentes áreas, desde o transporte até artigos esportivos, além de energia, infraestrutura e arquitetura, onde a necessidade de materiais que sejam ao mesmo tempo, rígidos e leves, está constantemente crescendo. Nos últimos anos, as tecnologias de moldagem de compósitos líquidos (LCM) se desenvolveram significativamente, tornando-se uma opção eficaz para a produção de alta qualidade em comparação com o processamento em autoclave (MICHAUD, 2016).

De uma maneira geral, é possível definir o processo RTM, como um processo em molde fechado onde este é preenchido com um reforço fibroso pré-formado, geralmente uma fibra de vidro ou de carbono. Em seguida, resina líquida é injetada no molde sob pressão para preencher e impregnar completamente o reforço. O molde é mantido fechado até que a resina seja curada, resultando em uma peça composta final com propriedades mecânicas específicas (CAIRNS; HUMBERT; MANDELL, 1999).

Segundo KONSTANTOPOULOS *et al.* (2019) a técnica de moldagem por injeção utilizada para fabricação de compósitos se torna atraente devido ao seu potencial para otimização de processos sendo capaz de produzir peças com alta precisão dimensional, acabamento de superfície excelente e propriedades mecânicas superiores em comparação com outros métodos de fabricação de compósitos e, por isto, vem se tornando mais difundido na produção de compósitos poliméricos.

Apesar das grandes vantagens na aplicação do RTM como processo de fabricação, autores citam que um dos maiores desafios do processo de fabricação RTM são os defeitos induzidos pelo fluxo de resina no reforço fibroso (FACCIOTTO *et al.*, 2021). Dentre os defeitos induzidos, o mais comum é a formação de vazios na peça final em macroescala, aquelas provenientes do não preenchimento com resina que são facilmente visíveis. Já nos defeitos em meso ou micro-escala, onde são necessárias ferramentas especiais para avaliação dos defeitos. Um exemplo da preocupação com este tipo de defeito é a norma americana da aviação (CHUNG HAE PARK; WOO, 2011); A mesma estipula que elementos mecânicos fabricados com compósitos poliméricos obtendo em sua estrutura mais de 2% de vazios não devem ser utilizados na aplicação aeronáutica, isso porque comprometem a segurança do equipamento onde o compósito está sendo utilizado.

Diante a crescente e relevante aplicação de compósitos poliméricos, aumentam os interesses da indústria e do meio acadêmico no estudo dos processos de fabricação e nas formas de aumentar sua eficiência. Segundo LUNETTO *et al.* (2023) existem 5 processos de fabricação de compósitos que são responsáveis por mais de 80% do volume de compósitos poliméricos produzidos, sendo

eles: laminação, moldagem por injeção, moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina e filamento contínuo. Visto que, o sucesso industrial depende principalmente da capacidade de oferecer um produto de qualidade ao consumidor, ter uma boa eficiência operacional e capacidade de flexibilizar-se às novas tecnologias, pode-se destacar o processo RTM (*Resin Transfer Molding*) com um alto potencial para dominar a indústria destes materiais.

O autor (CHUNG HAE PARK; WOO, 2011) alerta que os defeitos do tipo vazio são criados por diversos mecanismos: aprisionamento mecânico de ar, nucleação, vazamento, cavitação, cura desigual da resina, entre outros. Em seu trabalho, é destacado que o aprisionamento mecânico do ar é a principal causa da criação de vazios no processo de moldagem por transferência de resina (RTM) e, para garantir uma boa qualidade da peça final é necessário prever o aparecimento destes defeitos para que se possa levar à extinção do problema.

Na pesquisa de LAURENZI *et al.* (2014), é realizado o processo de simulação numérica da fabricação de uma viga com potencial para ser empregada em aviações. No trabalho os autores empregam uma abordagem numérica para avaliar três possíveis formas de realizar a injeção de resina no molde da viga e o objetivo principal é evitar a formação de defeitos. A disposição dos furos na qual a maior parte da peça era impregnada na direção da espessura obteve os melhores comportamentos. Uma peça foi fabricada adotando o modelo de injeção que previa um melhor preenchimento do molde. Ao fim, o autor conclui que não há a formação de macro-vazios e o tempo de preenchimento do molde é similar ao tempo simulado, assim como o modelo previa.

Os estudos de (MAGAGNATO *et al.*, 2018) avaliam a interação do escoamento de resina e a inserção de uma pastilha no interior do molde. O objetivo é de prever a formação de vazios que podem enfraquecer as propriedades mecânicas da peça fabricada. O autor utiliza o método numérico de simulação EF/VC (Elementos Finitos/Volume de Controle) além de uma outra abordagem utilizando VF (Volumes Finitos) que apresenta boa concordância com os resultados experimentais com o auxílio de tomografias computadorizadas. Os autores concluem, através da análise numérica, que uma baixa fração volumétrica ao redor destas pastilhas provocam uma aceleração da resina e, "estrias", aparecem ao redor desse obstáculo, capazes de comprometer a peça final. O modelo numérico é utilizado então para gerar uma otimização da estrutura de pastilha que terá o objetivo de diminuir os potenciais danos na peça que será fabricada, mostrando o alto potencial da análise numérica para avaliação destes processos de fabricação.

As pesquisas referentes à formação de poros abrangem diversas variáveis dos processos de moldagem líquida, incluindo a projeção apropriada dos pontos de entrada e saída da resina, a pressão de injeção, a velocidade do fluxo e o tensor de permeabilidade. Devido a essas variáveis, o processo de fabricação se torna complexo, despertando grande interesse na comunidade científica

para trabalhos que se baseiam principalmente em estudos experimentais para investigar a influência desses fatores na produção de compósitos poliméricos (OLIVEIRA, 2019). Entretanto, os testes experimentais são, em geral, muito dispendiosos, o que motiva a utilização de métodos práticos aliados a métodos numéricos, capazes de fornecer informações relevantes para a identificação das causas da formação de vazios nas peças. Diante disto, a engenharia tem explorado com êxito o uso da análise numérica para prever e extinguir a formação de defeitos, são exemplos disto os estudos a seguir.

Os pesquisadores ZHAO *et al.* (2019) reforçam a necessidade de prever vazios diante o aumento da complexidade dos moldes utilizados para a produção de compósitos. Em seu trabalho fazem uso do método VOF (*Volume of fluid*) para modelar um problema. Os resultados apontam uma convergência entre a solução numérica e as experimentais na predição da formação de vazios, provando a acuracidade dos resultados numéricos frente aos experimentais.

A técnica numérica se mostra satisfatória nos trabalhos de observação representando uma forma menos complexa e onerosa financeiramente quando comparada aos ensaios experimentais, sendo usadas principalmente na otimização e previsão de incertezas nos processos, o que justifica seu uso no presente trabalho. Ainda, a técnica numérica além de ser empregada na análise dos possíveis erros de fabricação, é empregada para avaliar propriedades relativas do material utilizado na produção tal como a permeabilidade do reforço (foco deste trabalho e com grande influência no aparecimento dos erros induzidos pelo fluxo), viscosidade do fluido, além de avaliar o próprio molde de injeção e/ou resistência da peça finalizada.

Com o desenvolvimento da técnica de injeção de resina em molde fechado, surgiu necessidade de padronizar e prever parâmetros importantes não só do processo de fabricação como também do reforço fibroso e/ou fluido do processo. Para isso, técnicas de previsão da permeabilidade foram desenvolvidas a fim de contribuir e ajudar na otimização de projetos de materiais compósitos.

Assim como o RTM, outras técnicas derivadas do LCM foram concebidas para atingir espessuras em vez da impregnação de resina no plano, isso ocorre pelo fato de os caminhos de fluxo de resina serem consideravelmente diminuídos possibilitando a fabricação de compósitos de grandes dimensões com equipamento de injeção padrão. Nestes novos processos, a determinação da permeabilidade transversal também é crucial, governando a eficiência de fabricação e qualidade final da peça.

A essência da permeabilidade como fator determinante para o avanço de resina em reforços fibrosos é relatado em referências mais antigas, onde a mesma é caracterizada como uma indicação da facilidade relativa com que o fluido atravessa pelos poros, sendo quantificada nas três direções

de um plano cartesiano de uma pilha de laminados. Basicamente podendo ser diferenciadas entre duas permeabilidades: planar e transversal (fora do plano) (RUDD *et al.*, 1997). A propriedade foi identificada pela primeira vez por Darcy (BROWN, 2002) em 1856 com base em observações da água fluindo através de uma coluna vertical de areia. Uma correlação conhecida como a lei de Darcy foi definida como:

$$v = \frac{\bar{K}}{\mu} \nabla P \tag{1}$$

onde $\vec{v}$ é a velocidade [m/s], $\bar{K}$ é a permeabilidade [m²], μ é a viscosidade [Pa.s] e ∇Pé o gradiente de pressão [Pa/m].

A necessidade de padronizar os procedimentos para avaliar a permeabilidade em reforços de fibras também fora tratada em um *benchmarking* (VERNET *et al.*, 2014) que reuniu dados de 12 instituições para elencar boas práticas e principais dificuldades na determinação da permeabilidade no plano. Para o estudo foi desenvolvido um documento de orientação com base em um primeiro *benchmarking* (ARBTER *et al.*, 2011); os participantes tiveram como desafio mensurar a permeabilidade no plano de um corte de tecido em três direções: 0°, 45° e 90°.

Um estudo internacional publicado em 2016 pelo Departamento de Física do Reino Unido (AKTAS *et al.*, 2016) reiterou a necessidade de melhorar e padronizar os processos para mensuração da permeabilidade em reforços fibrosos. O estudo faz um levantamento com dados de diversos institutos de pesquisa pelo mundo com objetivo de avaliar quais técnicas e fluidos são mais utilizados, quais os principais problemas afetam as medições além de propor outras análises. A necessidade de um projeto de molde apropriado e a deflexão do reforço no interior dos moldes é apontado como os problemas mais críticos nos processos de mensuração.

Uma revisão com dados entre os anos de 1991 e 2017, apontam que nos últimos anos há um crescimento nas pesquisas em que abordam modelos para observar o escoamento em processos de fabricação LCM, mas não se percebe a mesma tendência de crescimento nos estudos publicados para rastrear a variação da permeabilidade em reforços pré-moldados (BODAGHI *et al.*, 2019).

Em sua maioria, pela facilidade do experimento em rastrear a frente de fluxo, os participantes adotaram o método de rastreamento visual do avanço de resina e fizeram medições em diversos pontos para reduzir a dispersão. A exceção se dá a um dos participantes que utilizou o método de medição em regime saturado, onde o participante define uma vazão constante e mensura a perda de carga e, a partir disso calcula a permeabilidade através da Lei de Darcy. Este método não permite nenhuma correção como nos métodos aplicados pelos outros participantes. Os resultados obtidos nessa segundo estudo de *benchmarking,* obtiveram sucesso em relação a ter uma menor

variação nos resultados, porém ainda foi encontrado algumas divergências no cálculo da permeabilidade.

Uma revisão das técnicas de mensuração da permeabilidade admite que são duas as principais formas de análise (SHARMA and SIGINER, 2008): em regime insaturado, onde é imposto um fluxo de resina e é rastreado a linha de frente da resina em função do tempo e a permeabilidade é calculada com auxílio da solução exata da equação de Darcy para o escoamento retilíneo e, em regine saturado, onde a perda de carga e a vazão são utilizadas para calcular a permeabilidade do meio através da equação de Darcy.

Uma conclusão importante obtida pelo primeiro *benchmarking* (ARBTER *et al.*, 2011) foi de que o principal fator apontado como fonte de erro na determinação da permeabilidade do plano é o fator humano, como: erro na preparação das amostras e/ou obtenção e análise dos dados. Dos doze participantes, apenas nove seguiram rigorosamente os procedimentos padronizados definidos no início da pesquisa, dentre estes, apenas duas obtiveram valores de permeabilidade com divergência de 1,5 vezes maior que em relação aos demais. Ademais, um dos procedimentos que não seguiram a técnica padronizada, adotou para cálculo a utilização do método saturado e obteve uma divergência de até três vezes maior do que as demais, mas os dados em geral apresentaram pouca variabilidade quando comparada com o primeiro estudo. Concluindo com esse novo estudo que o fator humano parece insignificante frente as condições de teste.

Ainda mais atual, um estudo em busca de elencar as melhores práticas para mensurar a permeabilidade, agora fora do plano, uniu dados de 26 instituições de diversos locais do mundo (YONG *et al.*, 2021). Os participantes deste estudo receberam de uma empresa duas amostras de tecido fibroso e foram livres para usar o procedimento experimental e a configuração de sua escolha para realizar medições de permeabilidade fora do plano. Em sua maioria, os procedimentos adotados para realizar as medições foram em condições saturadas, com a técnica onde um reforço fibroso é posicionado no interior de um molde circular, em um dos lados é imposta a entrada do fluido e no lado adjacente há a descarga e a mensuração de parâmetros (pressão ou vazão); o procedimento é descrito esquematicamente por WU *et al.* (1994). Os pesquisadores obtiveram erros de até duas ordens de grandeza utilizando o mesmo material e fluido de teste. Os autores concluem que com os valores de permeabilidade transversais obtidos não é possível avaliar com clareza quais são os parâmetros que estão associados com as incertezas obtidas nos resultados.

Experimentos para estimar a permeabilidade no plano são mais fáceis de ser realizados, uma vez que o escoamento nesta direção geralmente demandam pressões menores, além disso por ser uma observação do plano, a maioria dos experimentos utiliza placas transparentes, facilitando a observação do escoamento de resina. O mesmo não ocorre na direção transversal, a permeabilidade

fora do plano na maioria das vezes é menor que em outras direções, consequentemente a pressão de injeção deve ser maior e, para haver um rastreio do avanço de resina, são necessários equipamentos específicos, de difícil construção, fazendo com que a determinação da permeabilidade, na maioria das vezes, seja realizada em regime saturado.

Na literatura, são elencadas como principais desafios os seguintes problemas:

a - Desigualdade do volume de fibras: o volume de fibras pode ter uma variação no interior da cavidade, onde é imposto o reforço devido à deflexão das placas perfuradas quando submetidas ao fluxo de resina, ou essas disparidades podem ser obtidas até mesmo no fechamento do molde;

b - Lacunas de fluxo: podem se formar perto da parede do molde, devido à má preparação da amostra, lacunas onde há um escoamento artificial induzindo a um erro na perda de carga observada;

c - Padrões de fluxo: quando calculado através da lei de Darcy, presume-se que a amostra é homogênea e o fluxo atravessa de forma completamente unidirecional pelo molde. Porém, se não forem utilizadas as placas perfuradas as amostras não têm capacidade de auto sustentar-se e a inclusão das mesmas provoca um distorcimento no escoamento de resina;

d - Queda de pressão em vazio: erros provocados pela perda de carga do molde sem a amostra. É importante que a influência do molde seja suficientemente baixa para ser desprezada;

e - Arquitetura têxtil: até agora, pouca atenção foi dada para investigar a anisotropia do material, ou seja, a influência da permeabilidade no plano nas medições da permeabilidade fora do plano. No entanto, a capacidade de permeabilidade no plano do reforço fibroso pode desempenhar um papel para reforços têxteis anisotrópicos devido ao fluxo não unidirecional provocado pela presença das placas perfuradas.

Assim sendo, reconhecer a importância de diferentes fatores de incerteza para os resultados de permeabilidade e incluir essas variáveis nas simulações de fluxo de resina, pode ser a solução para encontrar condições de processamento mais estáveis e confiáveis, prevendo variações em uma futura padronização dos procedimentos de determinação da permeabilidade fora do plano.

Muitas questões sobre a criação de um experimento de permeabilidade transversal são relatadas na literatura. Rastreamento de fluxo, fluxo unidirecional não homogêneo e problemas de efeito de pressão de injeção são alguns deles discutidos no trabalho de MERHI *et al.* (2007). Neste estudo, em vez de usar placas perfuradas, foram utilizados favos de mel para aproximar o avanço do

escoamento como um escoamento unidimensional dentro da cavidade do molde, porém a efetividade deste método não foi discutida. Enfim, o autor propõe uma equação analítica para avaliar a permeabilidade transversal no molde proposto no trabalho.

Em um outro trabalho, pesquisadores propõem um experimento para medir a permeabilidade transversal usando fluxo gasoso e líquido SCHOLZ *et al.* (2007). Os autores desenvolveram uma configuração onde duas placas perfuradas são usadas para sustentar o reforço de fibras na cavidade do molde. Foi relatado que o fluxo retilíneo (uma dimensão) difere do experimento real em dois fatores: I) influência das placas perfuradas e II) o fluxo preferencial criado nas paredes do molde. No entanto, nenhuma investigação foi realizada para quantificar a influência da geometria da placa perfurada na permeabilidade. O trabalho também investigou a influência da altura do molde no processo de mensuração da permeabilidade e observou que esses erros podem ser diminuídos aumentando a altura do corpo de prova.

A necessidade de incluir na determinação da permeabilidade o erro dos processos também é indicada por (CHAE; *et al.* 2007), o qual publicou um dos seus trabalhos já denotando que placas com diferentes áreas de injeção apresentam resultados de permeabilidade diferentes, uma vez que a própria placa oferecia uma resistência ao escoamento. Em seguida, seu estudo faz análises experimentais e numéricas, que tinham como principal objetivo estudar cinco diferentes materiais e a relação entre o número de camadas empilhadas e a permeabilidade transversal dos reforços. A conclusão tirada pelos pesquisadores mostra que um maior empilhamento de fibras no interior do molde diminui a porosidade e acaba por diminuir expressivamente a permeabilidade transversal, resultados que foram reafirmados na literatura conforme o estudo que será mostrado a seguir.

Placas perfuradas foram usadas para montar um experimento de permeabilidade transversal por SWERY *et al.* (2016). Neste trabalho os autores resolvem o problema de fluxo preferencial nas paredes do molde vedando a borda com graxa de silicone. O método se mostrou eficiente para diminuir a influência dos escoamentos preferenciais nas áreas periféricas do molde, porém poucas informações são fornecidas sobre as placas perfuradas e sua influência na permeabilidade.

A variabilidade da permeabilidade em função da organização das fibras foi estudado por TRINDADE *et al.* (2019). Os pesquisadores analisaram seis materiais diferentes capazes de oferecer diferentes perfis de organização das fibras, sendo quatro tecidos (fibras organizadas) e duas mantas (fibras desorganizadas). Nos estudos foram desenvolvidos experimentos para avaliar a permeabilidade transversal e planar. O experimento da permeabilidade transversal baseou-se em submeter um volume de fibras aprisionados entre duas placas perfuradas em molde cilíndrico e avaliar a correlação entre o volume de fibras e os materiais utilizados e a permeabilidade transversal. O trabalho mostra um padrão no comportamento da permeabilidade transversal em

relação ao volume de fibras para todos os materiais, porém este padrão não é observado quando se analisa a permeabilidade no plano. Os autores concluíram que o volume de fibras tem um efeito marcante na permeabilidade transversal e planar: quanto maior o volume de fibras menor será a permeabilidade do reforço. Também concluíram que mantas com fibras aleatórias tem uma permeabilidade maior do que aquelas que tem as fibras organizadas.

Um novo método experimental para caracterizar a compactação e a permeabilidade fora do plano de forma insaturada é apesentada no trabalho de KABACHI *et al.* (2021). A técnica de medição baseia-se no rastreamento visual das posições frontais de fluxo e na compactação durante a impregnação, usando uma câmera e um molde rígido equipado com um sensor de pressão e um orifício transparente. A estratégia utilizada permite que a compactação do leito de fibra induzida por fluxo seja considerada nas medições de permeabilidade insaturada, fornecendo permeabilidade em diferentes frações de volume de fibra, ao mesmo tempo em que fornece curvas de compactação seca e úmida. A comparação dos resultados experimentais com os analíticos, além da comparação com resultados já apresentados na literatura mostraram uma boa concordância, indicando que o método é capaz de incluir no procedimento de mensuração da permeabilidade o fator de compactação induzida pelo fluxo. Uma desvantagem do novo método é a difícil construção do equipamento e o mesmo só permite o rastreamento do fluxo na parede de um molde circular, impossibilitando reconhecer o que acontece no interior do molde.

Uma avaliação numérica e experimental dos moldes cilíndricos comumente encontrados em dispositivos de teste unidimensional para mensurar a permeabilidade transversal foi estudada por (YANG *et al.*, 2022). Os autores discutem uma constante denominada *filling coefficient* (coeficiente de preenchimento) para avaliar a influência das placas perfuradas no escoamento unidimensional. Os pesquisadores apontam estudos indicando que o volume de fibras tem um impacto significativo na permeabilidade fora do plano e por isso é necessário que a amostra tenha um volume de fibras homogêneo, portanto é importante evitar que a pressão de injeção, fechamento do molde e essas placas tenham rigidez suficiente para não afetar a compactação não homogênea do corpo de ensaio. Ainda neste estudo, foram realizadas simulações numéricas para avaliar a espessura da placa, deflexão média e a razão entre furos e a área total da placa. Também foi utilizado o estudo numérico para avaliar as correlações: (1) coeficiente de preenchimento e número de furos na placa, (2) coeficiente de preenchimento e altura do corpo de prova e (3) coeficiente de preenchimento com a permeabilidade de uma camada altamente permeável. Os autores obtiveram bons resultados e indicam que um maior número de furos aliado a uma altura relativamente grande (maior que 30 *mm*) do corpo de prova pode diminuir os erros relativos ao processo na determinação da

permeabilidade, e a utilização de uma placa altamente permeável eleva consideravelmente a eficiência do uso desses moldes.

Um estudo mais recente publicado pelos mesmos autores (YANG *et al.*, 2023) reitera que a maioria dos procedimentos utilizados na mensuração da permeabilidade unidirecional é utilizando moldes cilíndricos, onde o reforço fibroso é posicionado entre duas placas perfuradas. Os autores indicam a necessidade de localizar e quantificar as fontes de erro na permeabilidade calculada. São citadas duas como as principais fontes: uma relacionada ao molde de teste, análise de dados e diretrizes operacionais e a outra relacionada à variabilidade dos materiais. O objetivo principal do trabalho foi de desenvolver um coeficiente para calibrar moldes cilíndricos. O autor ainda indica que as placas perfuradas oferecem duas principais desconfianças: (a) uma queda de pressão induzida pelas placas e (b) um fluxo limitado entre o fluxo livre e o corpo de prova devido à utilização das placas. A queda de pressão das placas é facilmente desconsiderada como fonte de erro, uma vez que para desconsiderá-la o autor realizou testes com a presença das placas e sem as mesmas, obtendo pouca variação na perda de carga pela presença das placas. Ainda neste trabalho, os autores desenvolvem um estudo adotando um coeficiente de descarga como forma para corrigir erros induzidos pelas placas perfuradas. Também foram avaliados dois casos: um no qual as placas inferior e superior estão alinhadas e outro, onde a superior tem um giro de 30º, mas nenhuma diferença foi registrada para o molde utilizado. O pesquisador faz uma análise baseada em dados obtidos em um *benchmarking* recente (YONG *et al.*, 2021) e conclui que o modelo do coeficiente de descarga é promissor para melhorar a consistência da medição entre as configurações da placa perfurada.

Técnicas de predição com base em simulações numéricas estão também em desenvolvimento, se mostrando uma alternativa rápida, barata e eficaz, pois muitos são os pontos de incerteza tanto na técnica numérica quanto nos experimentos.

Um estudo utilizando técnicas computacionais é aplicado com o objetivo de avaliar a variabilidade do tecido de fibras por MAGAGNATO *et al.* (2018) no interior de uma cavidade cilíndrica sem simplificar as fibras como um meio poroso homogêneo. Destaca-se neste trabalho o método para determinação da geometria tão complexa como é a distribuição de fibras em um corpo de ensaio, para isto, os autores fizeram o rastreamento de tecidos reais aplicados em modelos experimentais utilizando uma técnica de varredura microtomográfica de raio-x para avaliar precisamente a distribuição dos fios em 2D, logo após utilizaram um *software* de modelagem têxtil para determinação da geometria em 3D. Ademais, o autor aplica uma técnica numérica que permite não só avaliar o escoamento na escala dos mesoporos (só entre as fibras), como também permite incluir o efeito do aninhamento entre as fibras e uma camada mais permeável utilizada para

homogeneização do escoamento. O modelo é validado com os resultados experimentais, apresentando pouca variação com resultados presentes na literatura. Porém, neste modelo não são avaliados outros parâmetros capazes de influenciar na determinação da permeabilidade fora do plano em moldes circulares.

Ademais, um estudo recente teve como objetivo avaliar a abordagem numérica para experimentos virtuais para determinar a permeabilidade transversal, ao mesmo tempo que fornece *insights* sobre os parâmetros dominantes do processo de medição, inicialmente em escala microscópica. Para conseguir isso, foi realizado um *benchmark* (SYERKO *et al*., 2023), no qual 16 instituições abordaram o mesmo problema de determinação da permeabilidade tridimensional nos poros das fibras têxteis. Cada participante poderia usar a formulação de variável física escolhida, modelo de fluxo, método numérico e discretização. A maioria dos participantes do estudo empregou métodos baseados em geometria para discretização de malhas, utilizando o modelo de fluxo de Stokes junto com o método de volumes finitos (FVM) através de softwares como OpenFOAM e ANSYS. De modo geral, os resultados mostraram uma variação de 14% na abordagem da permeabilidade planar e de 25% na permeabilidade transversal, sendo observadas as diferenças mais significativas.

As técnicas numéricas se mostraram satisfatórias nos trabalhos de observação representando uma forma confiável, pouco dispendiosa em relação a outras técnicas e mais rápida, sendo usadas principalmente na otimização e previsão de incertezas nos processos, o que justifica seu uso no presente trabalho. Como foi visto, há ainda lacunas a serem conhecidas para otimizar o processo de determinação da permeabilidade transversal em reforços fibrosos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de mensuração contribuindo com a obtenção de mais dados acerca da utilização de moldes cilíndricos no experimento saturado.

Na Tabela 2.1 é apresentado uma síntese dos principais trabalhos encontrados na literatura com o resumo dos avanços na área de determinação da permeabilidade transversal que, de alguma forma, contribuíram para o presente trabalho.

Tabela 2.1: Síntese dos principais trabalhos avaliados.

Autor	Ano	Resumo
Chae *et. al*	2007	O autor publicou um estudo em que afirmava que as placas tinham influência no processo de determinação da permeabilidade transversal. Contudo, não houve uma quantificação desse erro. Em seguida, o autor faz uma análise acerca do volume de fibras no interior da cavidade e conclui que quanto maior o número de

		camadas fibrosas no interior do molde, menor será a permeabilidade do fluido.
Scholz *et. al*	2007	Os autores desenvolveram uma configuração onde duas placas perfuradas são usadas para sustentar o reforço de fibras na cavidade do molde. Foi relatado que o fluxo retilíneo (uma dimensão) difere do experimento real em dois fatores: I) influência das placas perfuradas e II) o fluxo preferencial criado nas paredes do molde. Também foram realizadas análises em relação a altura do corpo de prova.
Arbter	2011	*Benchmark* internacional com o objetivo de avaliar as técnicas empregadas na determinação da permeabilidade planar em reforços fibrosos. Em um primeiro momento o trabalho elencou as principais técnicas utilizadas e, como consequência, obteve-se uma alta variabilidade nos resultados.
Vernet *et. al*	2014	Trabalho baseado em um primeiro *benchmark* onde foi padronizado o método de mensuração da permeabilidade transversal. O fator humano foi apontado como a principal fonte de erros no processo. Os resultados obtiveram menor variação que o primeiro *benchmark* e serviu como base para determinar alguns parâmetros essenciais a serem seguidos para melhorar a acurácia do processo. Contudo, o autor conclui que o estudo ainda deve ser melhorado em versões posteriores.
Aktas *et. al*	2016	Síntese acerca de uma pesquisa mundial sobre os principais métodos e materiais utilizados no processo de determinação da permeabilidade transversal, além de pontuar quais as dificuldades mais frequentes.
Magagnato *et. al*	2018	Nesse trabalho os autores desenvolveram simulações numéricas para determinar a permeabilidade em reforços fibrosos reais. Foram utilizadas técnicas de processamento de imagem para avaliar a distribuição das fibras através de uma microtomografia de raio X. O modelo foi comparado com resultados experimentais e obteve uma boa convergência.
Oliveira	2018	O trabalho teve por objetivo principal desenvolver uma análise numérico-experimental acerca da determinação da permeabilidade transversal em reforços fibrosos, além do desenvolvimento de um estudo a respeito de um molde com dois tipos de material diferente. Os resultados entre análise experimental e numérico se mostraram convergentes.
Yong *et. al*	2021	O trabalho teve como objetivo fazer um compilado das atuais técnicas de predição da permeabilidade transversal. Para isso, 26 instituições de diferentes locais do mundo foram envolvidas. Os participantes receberam uma amostra de tecido fibroso e aplicaram as técnicas comumente utilizadas pela instituição para aferir a permeabilidade transversal. Em sua maioria, as técnicas utilizadas foram: condições saturadas com moldes circulares.
Kabachi *et. al*	2021	Os autores desenvolveram um molde com um orifício transparente com o objetivo de rastrear a frente de fluxo da resina no interior do

		molde. O trabalho permitiu determina a permeabilidade em função da compressão das fibras durante o escoamento.
Yang *et. al*	2022	Os autores discutem um coeficiente (coeficiente de enchimento) com o objetivo de corrigir erros na aferição da permeabilidade transversal. É destacado no trabalho que o volume de fibras deve ser homogêneo na cavidade e, para isso, a pressão de injeção e a placa perfurada devem ser projetadas de forma a não mudar a configuração das fibras no interior da cavidade.
Yang *et. al*	2023	O estudo reitera que a maioria dos procedimentos utilizados na mensuração da permeabilidade unidirecional é utilizando moldes cilíndricos onde o reforço fibroso é posicionado entre duas placas perfuradas. Os autores indicam a necessidade de localizar e quantificar as fontes de erro na permeabilidade calculada. São citadas duas como as principais fontes: uma relacionada ao molde de teste, análise de dados e diretrizes operacionais e a outra relacionada à variabilidade dos materiais. O objetivo principal do trabalho foi de desenvolver um coeficiente para calibrar moldes cilíndricos. Os autores ainda indicam que as placas perfuradas oferecem duas principais desconfianças: (a) uma queda de pressão induzida pelas placas e (b) um fluxo com deformidades pela pressão não uniforme provocado pelas placas na área e injeção.
Syerko *et. al*	2023	Um *benchmark* recente teve como objetivo analisar técnicas virtuais de determinação da permeabilidade transversal. No estudo participaram 16 instituições de diferentes lugares do mundo que tiveram como objetivo utilizar técnicas numéricas para obter resultados de permeabilidade planar e transversal em uma geometria previamente discretizada. As instituições utilizaram softwares como openFoam e Ansys. O trabalho serviu para fornecer parâmetros para o desenvolvimento desse tipo de estudo.

3. MODELO NUMÉRICO

A fundamentação teórica do presente trabalho é desenvolvida em três partes e tem por objetivo apresentar algumas referências utilizadas para o desenvolvimento das simulações numéricas. Na primeira, é apresentado o modelo matemático e as equações que descrevem o problema estudado, no segundo é descrito o procedimento de análise da determinação da permeabilidade transversal em regime saturado e, na terceira parte é apresentado um coeficiente de enchimento do molde que tem por objetivo avaliar a eficiência das placas perfuradas.

3.1 MODELO MATEMÁTICO

O escoamento de resina em moldes utilizados no processo de fabricação de moldagem por transferência de resina assume, geralmente no âmbito da simulação numérica, que no escoamento a permeabilidade é perfeitamente homogênea. Assim, os problemas de moldagem líquida são modelados através da utilização da Lei de Darcy (1856), a qual faz uma correlação entre a velocidade média de um fluido escoando em um meio poroso e o gradiente de pressão no interior do mesmo, conforme mostra a Eq. (1).

A permeabilidade do reforço presente no interior do molde pode ter um comportamento: (a) isotrópico onde a grandeza tem um mesmo valor para todas as direções ou (b) anisotrópico, quando a permeabilidade é diferente em cada uma das direções. Em geral, na literatura os problemas de moldagem líquida são abordados como meios porosos anisotrópicos, com o seguinte tensor de permeabilidade

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu}\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{2}$$

onde K_{xx} e K_{yy} são as permeabilidades planares nas direções x e y [m^2], K_{zz} é a permeabilidade na direção transversal [m^2]. Já a permeabilidade nos outros planos é desconsiderada pois é considerado que há um alinhamento do tensor com as direções principais de permeabilidade.

Entretanto, apenas a Lei de Darcy não é suficiente para resolver o problema de escoamento em processos de moldagem líquida. Sendo assim, são necessárias outras equações para compor o

modelo matemático, que serão mostradas na próxima seção. Além de eleger o modelo matemático para descrever o problema, se faz necessário escolher um método capaz de solucionar o conjunto de equações formado.

Em virtude do exposto, são somados ao modelo matemático a equação da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e da fração volumétrica, como será apresentado na seção 3.1.1. Para solucionar o problema, é utilizado o *software openFoam* (WELLER H,; DE ROUVRAY C.; GREENSHIELDS C) que tem implementado através do método de volumes finitos em um de seus solucionadores a técnica VOF (*Volume of fluid),* a mesma é utilizada para modelar problemas envolvendo escoamento de dois ou mais fluidos imiscíveis.

3.1.1 VOLUME OF FLUID (VOF)

O VOF é uma técnica numérica, proposta por (HIRT and NICHOLS, 1981), capaz de modelar problemas multifásicos de transferência de calor e mecânica dos fluidos onde os fluidos envolvidos são imiscíveis. Através dessa metodologia, são resolvidas as equações da conservação da massa, da quantidade de movimento e da fração volumétrica, como são definidas nas equações a seguir:

$$\nabla.(\rho\vec{v})=0 \tag{3}$$

onde ρ é a massa específica [kg/m^3], $\vec{v}$ é o vetor velocidade [m/s] e t é o tempo [s].

$$\frac{\partial \rho\vec{v}}{\partial t}+\nabla.(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\bar{\tau}+\rho\vec{g}+\vec{F} \tag{4}$$

onde $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões [Pa], $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade [m/s^2], $\vec{F}$ é o termo fonte [N/m^3].

Nos problemas de moldagem líquida, o termo fonte é a própria Lei de Darcy, a partir do isolamento da pressão na Eq. (1) esta pode ser substituída na Eq (4), obtendo:

$$-\mu\frac{\vec{v}}{K}=\nabla P \tag{5}$$

A equação da fração volumétrica é dada por:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t}+\nabla.(\rho f\vec{v})=0 \tag{6}$$

em que f é a fração volumétrica da fase.

Na modelagem de problemas de moldagem líquida, o método aplica o conceito de fração volumétrica para representação das células do domínio computacional sendo representada por dois fluidos: resina e ar. Sendo assim, quando a célula está preenchida totalmente com ar tem-se que f = 0 e quando temos f = 1, significa que há somente a presença de resina. Ademais, nas células que o valor de f está entre zero e um, tem-se os dois fluidos ocupando o mesmo volume.

Neste modelo, as propriedades massa específica e a viscosidade são calculadas ponderando a fração presente de cada um dos fluidos em cada célula do domínio computacional, da seguinte forma:

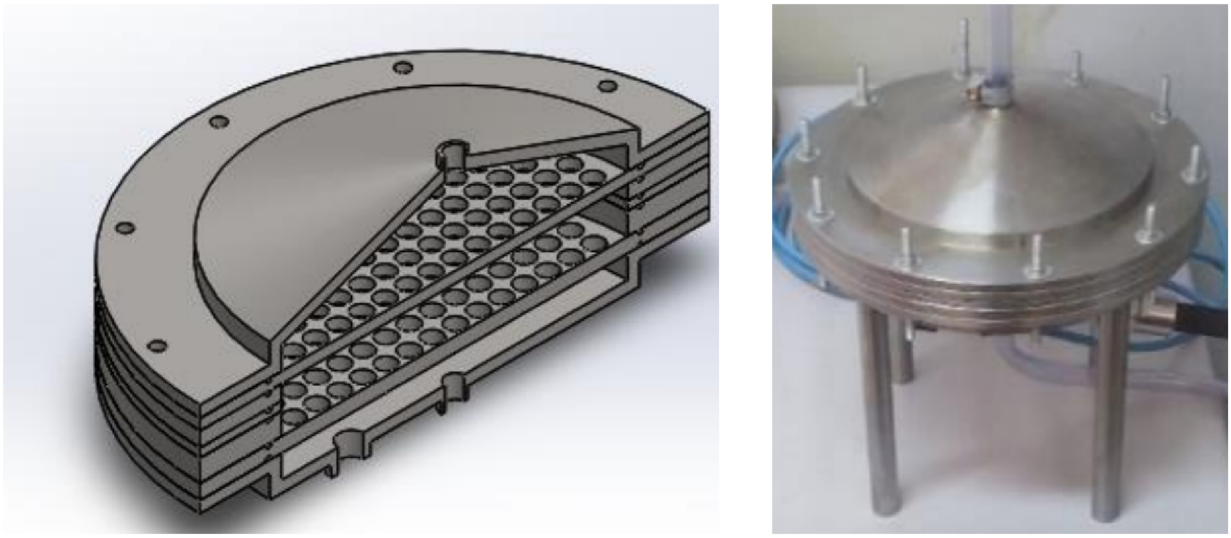
$$\rho=f\,\rho_{resina}+(1-f)\,\rho_{ar} \tag{7}$$

$$\mu=f\,\mu_{resina}+(1-f)\,\mu_{ar} \tag{8}$$

3.2 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM REGIME SATURADO

O procedimento de determinação da permeabilidade transversal pode se dar de forma insaturada e saturada, cada qual com suas vantagens e desvantagens descritas na seção 2 deste trabalho. Os ensaios experimentais para a determinação da permeabilidade transversal realizados no LaPol/UFRGS, descritos no trabalho de OLIVEIRA (2019), foram usados como instrução para o desenvolvimento do modelo computacional do presente trabalho. Este experimento, graças a sua simplicidade, é amplamente utilizado para este tipo de análise e tem como princípio forçar um escoamento unidirecional através de um corpo de prova (reforço fibroso) introduzido na cavidade de um molde cilíndrico.

A geometria do molde é mostrada na Fig. 3.1. A vista interna do molde pode ser vista na Fig. **3.1**(a) onde é possível ver a posição das placas perfuradas. O corpo de prova é colocado entre as duas placas e a resina é injetada sob pressão pelos furos inferiores, ou seja, é forçada a passar pela sua direção transversal.



(a) (b)

Figura 3.1: Molde cilíndrico: a) corte do desenho em CAD (ESCHER, 2016), b) molde construído sendo utilizado para experimentos de permeabilidade fora do plano (OLIVEIRA, 2019).

O líquido de ensaio entra em uma porta inferior, flui através dos orifícios de placas perfuradas (também chamadas de placas de distribuição de fluxo) e, em seguida sai do corpo de provas pelos furos da placa superior. A vazão de injeção na cavidade é constante e, através de transdutores são recolhidos os dados de perda de carga gerado no escoamento interno à cavidade.

De posse dos valores para vazão e perda de carga (Δp), a equação de Darcy pode ser aproximada como

$$\dot{\forall} \approx \frac{K A}{\mu} \frac{\Delta p}{h} \tag{9}$$

Assim, isolando a permeabilidade na Eq. (9), temos

$$K = \frac{\dot{\forall} \mu h}{A \Delta p} \tag{10}$$

onde h é a espessura do molde [m], A é a área da seção transversal do molde [m^2], $\dot{\forall}$ a vazão volumétrica [m³/s] e K é a permeabilidade na direção do fluxo [m²].

Neste experimento específico utilizado por OLIVEIRA, (2019), há a possibilidade de realizar procedimentos com corpos de prova de diferentes alturas, permitindo uma maior

variabilidade na obtenção dos dados. Neste sentido, o presente trabalho também avaliará placas para diferentes alturas de reforços fibrosos.

Recorrendo-se à literatura, há estudos indicando que a presença das placas no interior do molde geram incertezas nos resultados da permeabilidade, porém estas incertezas não são quantificadas.

4. MODELAGEM DO PROBLEMA

Esta seção será desenvolvida conforme as duas primeiras etapas de uma simulação numérica, apresentando o pré-processamento do problema onde serão discutidas as hipóteses simplificadoras, condições de contorno, desenvolvimento das novas placas perfuradas, desenvolvimento das malhas, e o respectivo teste de independência de malha. No processamento é apresentado o solucionador e o *software* que foi utilizado nas simulações, especificações e dados do esforço computacional.

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta seção são apresentadas as novas placas desenvolvidas, descrição do problema e um teste de independência de malha.

4.1.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

A Figura 4.1 apresenta as cinco geometrias estudadas para as placas perfuradas. Na Fig. 4.1(a) não há nenhuma placa, a seção transversal está totalmente aberta com o objetivo de modelar a situação de escoamento unidirecional perfeito que é descrito por Darcy. Experimentalmente, esta geometria não pode ser recriada e nesse trabalho foi utilizada apenas para os testes de independência de malha e verificação da solução numérica.

As Figuras 4.1b a 4.1e mostram as configurações possíveis, aqui analisadas, em seção de entrada e saída. Em todos os casos a área por onde se dá o acesso de resina (área dos furos) é mantida constante e igual à 19,5 cm^2 sendo diferenciadas somente pelo número de furos (n), diâmetro (d) e a distribuição dos mesmos na placa. As placas foram desenvolvidas levando em conta descrever uma estimativa em que a placa da Fig. 4.1(e) é uma configuração ruim, onde é previamente esperado resultados ruins pela má distribuição dos fluxos na placa, a configuração 4.1(b) é uma configuração melhor por apresentar maior número de furos e uma melhor distribuição (ESCHER, 2016). As configurações da Fig. 4.1(c~d) são intermediárias.

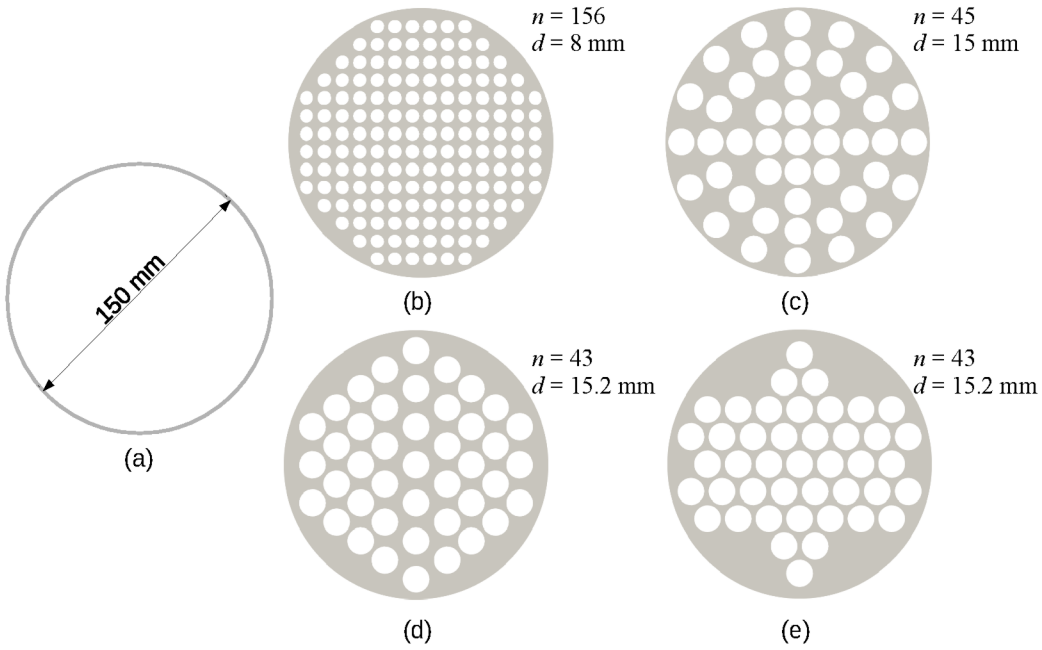
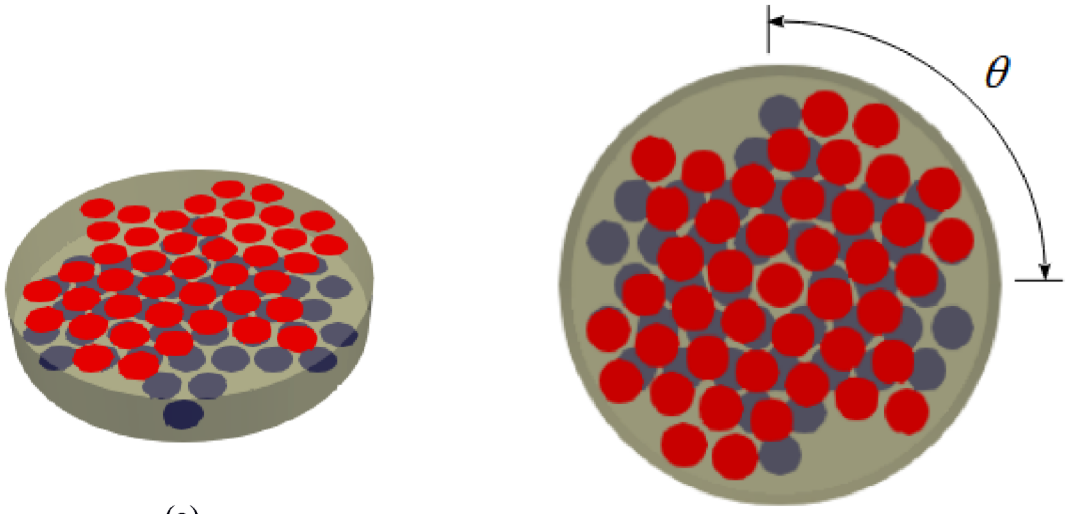


Figura 4.1: Posicionamento dos furos nas placas de distribuição de fluxo.

Durante o desenvolvimento do estudo também serão avaliados outros parâmetros geométricos, como a altura do corpo de prova com cinco valores distintos: 3,8 *mm,* 6,35 *mm*, 9,35 *mm*, 15,8 *mm* e 22,23 *mm.*

A Figura 4.2 apresenta um esquema para avaliar também a correlação entre o alinhamento da placas perfuradas inferior e superior determinação da permeabilidade fora do plano. O desalinhamento tem como objetivo identificar se as placas com melhor distribuição também conseguem evitar o escoamento cruzado, onde o fluido tenderá de escoar em outras direções no corpo de prova para conseguir cruzar a placa superior. Para isso, foram desenvolvidas simulações com três valores para o ângulo de desalinhamento: 30º, 45º e 60º.



(a) (b)

Figura 4.2: Ângulo entre o desalinhamento das placas superiores e inferiores: (a) vista em perspectiva com o ângulo representativo do giro e (b) vista frontal.

Como é possível observar na Fig. 4.2, um giro nas placas permite uma maior cobertura do corpo de prova com furos (avaliando a entrada e saída), por consequência há a garantia que o corpo de prova será impregnado em todas as suas partes, entretanto para diferentes perfis de placas a incerteza obtida na determinação da permeabilidade transversal em decorrência do não alinhamento das placas é diferente, pois geometrias distintas geram fluxos distintos. O que se quer minimizar quando se projeta as placas perfuradas para experimentos de permeabilidade fora do plano é o fluxo em direções planares .

4.1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho a solução numérica é uma representação virtual dos experimentos em laboratório. A permeabilidade é obtida através de um experimento em regime permanente onde a pressão e a vazão não variam em relação ao tempo.

No experimento numérico, apenas o corpo de prova (reforço fibroso) é modelado, como é possível observar na Fig. 4. No modelo, a influência das placas é introduzida ao modelo computacional considerando a entrada de resina pelo fluxo das placas e o molde é tratado aqui, como um meio poroso. A simplificação tem por objetivo aproximar a solução numérica com a solução algébrica dada pela Eq. 8.

Nesse caso, a diferença entre os dados obtidos experimentalmente e através das simulações numéricas é devido apenas à influência dos furos e altura (distância entre as placas) do molde. Com

este domínio simplificado, a solução analítica pode ser alcançada substituindo as placas perfuradas por superfícies livres e os resultados obtidos devem apresentar pouca divergência.

Na Figura 4.3 (a) é possível observar as condições definidas para a solução do problema: I) na entrada de resina é prescrita uma vazão volumétrica constante de resina e uma fração volumétrica f=1, II) na saída dos fluidos (ar e resina) é definida a pressão nula e derivada nula para f e III) velocidade nula com derivada nula para f nas superfícies da parede. Os detalhes das condições de contorno definidas no *software openFoam* podem ser encontrados no apêndice deste trabalho.

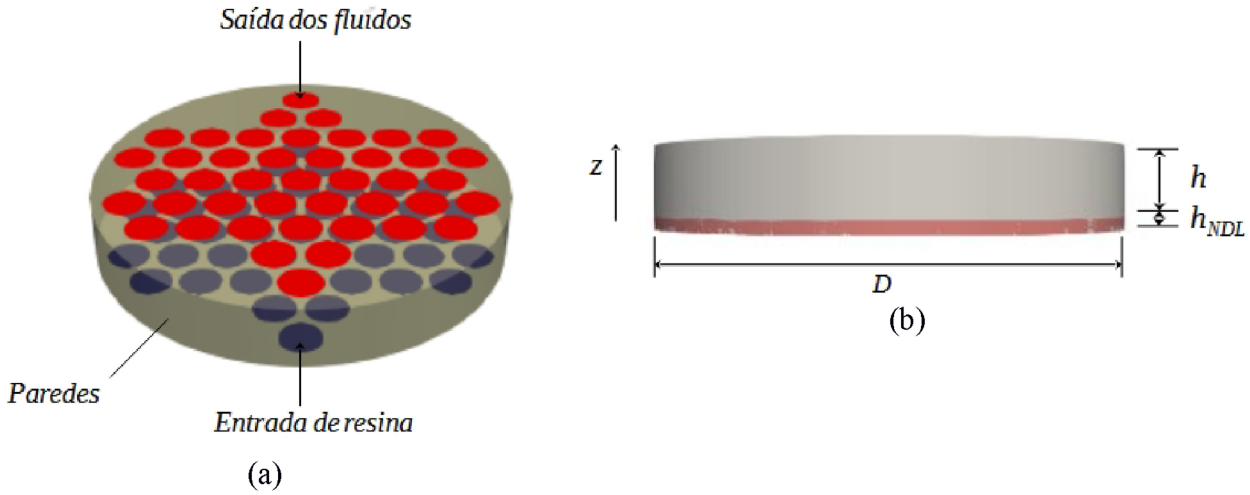


Figura 4.3: Domínio computacional: (a) condições de contorno e (b) vista lateral do domínio

Na Figura 4.3(b) são apresentadas as configurações geométricas do molde, onde D é o diâmetro do cilindro, h_{NDL} é a altura de uma superfície altamente permeável utilizada para homogeneização do escoamento antes de permear o reforço fibroso (utilizada em algumas simulações) e, nesse trabalho, assume o valor de 4 mm para os experimentos em que há a presença de uma camada difusiva e zero, quando em sua ausência.

4.1.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O problema numérico é resolvido para a geometria apresentada na Fig. 4.3(a) a fim de obter uma verificação do modelo proposto. As propriedades físicas e as condições operacionais utilizadas nas simulações estão resumidas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Principais parâmetros da simulação.

Propriedade	Símbolo	Valor
Vazão volumétrica [m³/s]	$\dot{\forall}$	$1{,}39 \times 10^{-7}$
Altura do molde[mm]	h	3,8 – 6,35 – 9,53 – 15,88 – 22,23
Diâmetro do molde [m]	D	0,15
Área da secção transversal do molde [m²]	A	0,01767
Área total dos furos [m²]	A_{furos}	0,0079
Desalinhamento entre as placas [º]	Θ	0º - 30º – 45º – 60º
Altura da camada permeável [mm]	h_{NFL}	4
Massa específica da resina [kg/m³]	ρ	920
Viscosidade da resina [Pa s]	μ	0,9936
Permeabilidade fora do plano do reforço [m²]	K_{zz}	$2{,}5189 \times 10^{-12}$
Razão entre as permeabilidades	K_{xx}/K_{zz}	10, 100, 1000, 10000

A vazão é prescrita e é mensurado a perda de carga para diferentes malhas. Foram avaliados os refinamentos na direção transversal e na direção do plano. Conforme mostrado nas Tabs. 4.2 e 4.3, respectivamente. A malha independente é selecionada quando há uma variação menor ou igual a 2% da perda de carga no interior do molde.

A variação é calculada a partir da seguinte equação

$$Var[\%]=\frac{\Delta p^{i+1}-\Delta p^{i}}{\Delta p^{i+1}} x 100 \tag{11}$$

onde *var* é a variação [%] e *i* é o índice da malha, representada na primeira coluna das tabelas.

Todas as malhas foram geradas no *software* Gmsh (GEUZAINE; REMACLE, 2009). Em sua maioria, os volumes gerados são hexaedros com exceção de alguns tetraedros que foram gerados nas áreas com curvas perto dos furos das placas.

Tabela 4.2: Malha independente na direção transversal.

	Número de volumes		
Malha	**Total**	***Δp* (Pa)**	***Var* (%)**
1	42750	1138,82	5,46
2	63924	1204,53	4,23
3	149409	1257,67	1,22
4	273878	1273,14	~

A partir dos resultados da Tab. 4.2, a malha 3 foi selecionada como malha independente e previamente candidata a ter um refinamento no plano. Para isso, foram desenvolvidas simulações com malhas mais grosseiras e malhas mais refinadas. O objetivo é de avaliar se a malha 3 da Tab. 4.2 já está suficientemente refinada na direção do transversal ou se ainda seria necessário diminuir ou aumentar a quantidade de volumes.

Tabela 4.3: Independência de malha no plano

Malha	**Número de volumes**	***Δp* (Pa)**	***Var* (%)**
4	57492	1097.00	3,67
5	80655	1138.82	4.23
3	149409	1257.67	0,00
6	298818	1257.65	-

Como é possível ver na Tab. 4.3, a malha 3 já estava suficientemente refinada uma vez que variações, quando há um refinamento maior na direção do plano, não se apresentam alterações e quando a malha perde volumes nesta direção a tendência é diminuir a precisão dos resultados.

A partir disto definiu-se, por serem desenvolvidas diversas simulações em diferentes geometrias de placas, as malhas geradas deverão ter no mínimo 150 mil volumes para as alturas de 22,23 mm havendo pouca ou nenhuma variação da perda de carga quando a quantidade de volumes em que a malha foi discretizada chega a 300 mil, ou até mais. Para as demais alturas, foram adotadas quantidades de elementos proporcionais, assumindo um tamanho de elemento

proporcional aos contidos no teste de independência de malha.

4.2 PROCESSAMENTO

A geometria apresentada na Fig. 4.3 foi modelada de acordo com a malha independente apresentada na seção anterior para cada uma das configurações de distribuição de furos apresentadas na Fig. 4.1. As simulações foram realizadas com um solucionador multifásico que, no presente caso, são modelados o ar e a resina. Com esse modelo, podemos reproduzir não só o experimento saturado descrito na seção 3.2, mas também o experimento insaturado que possibilita o rastreamento do fluxo no interior da cavidade.

O experimento saturado é reproduzido numericamente assumindo que o molde já está completamente preenchido com resina ($f = 1$) e os resultados são coletados quando a simulação entra em regime permanente, ou seja, a simulação é executada até que a queda de pressão entre a entrada e saída pare de variar.

Quando avaliado o experimento insaturado, usado para prever o comportamento do fluido dentro da cavidade do molde, a cavidade está inicialmente preenchida pelo ar ($f = 0$) e conforme há a injeção de resina na parte inferior da cavidade, o ar vai dando espaço à resina. Neste caso, a solução da equação da fração volumétrica (Eq. 5) é utilizada para rastrear o avanço de resina.

O sistema de equações resolvidos já foi discutido na seção 3.1. A formulação utilizada é o método VOF que assume um campo de velocidade para descrever o movimento de dois ou mais fluidos.

A solução numérica é obtida utilizando o *software openFoam* (WELLER H,; DE ROUVRAY C.; GREENSHIELDS C, 2023) usando a técnica de volumes finitos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O solucionador utilizado é o *interFoam*, uma das aplicações do programa que permite solucionar problemas de escoamento multifásico de fluidos imiscíveis. A solução é obtida com uma integração variável no tempo em que o passo de tempo da simulação é controlado limitando o número de Courant (Co) a 1. Os termos de gradiente foram discretizados com esquema de diferenças centradas para os termos de segunda ordem, enquanto que foram utilizados esquemas *upwind* para discretização dos termos de primeira ordem. Mais informações sobre o solucionador e os esquemas de interpolação podem são apresentados nos apêndices A2 e A3, respectivamente.

5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados divididos em quatro etapas: I) 25 resultados referentes a arranjos entre as diferentes configurações de placas perfuradas e as alturas de corpos de prova II) 32 resultados referentes a arranjos entre anisotropia do material e as diferentes configurações de placas para 2 alturas diferentes; III) 20 resultados com objetivo de avaliar as 4 diferentes placas perfuradas com a presença da camada difusiva para as 5 alturas de corpo de prova propostas e IV) a questão do desalinhamento das placas, onde foram analisados 3 desalinhamentos para as placas “c”, “d” e “e”.

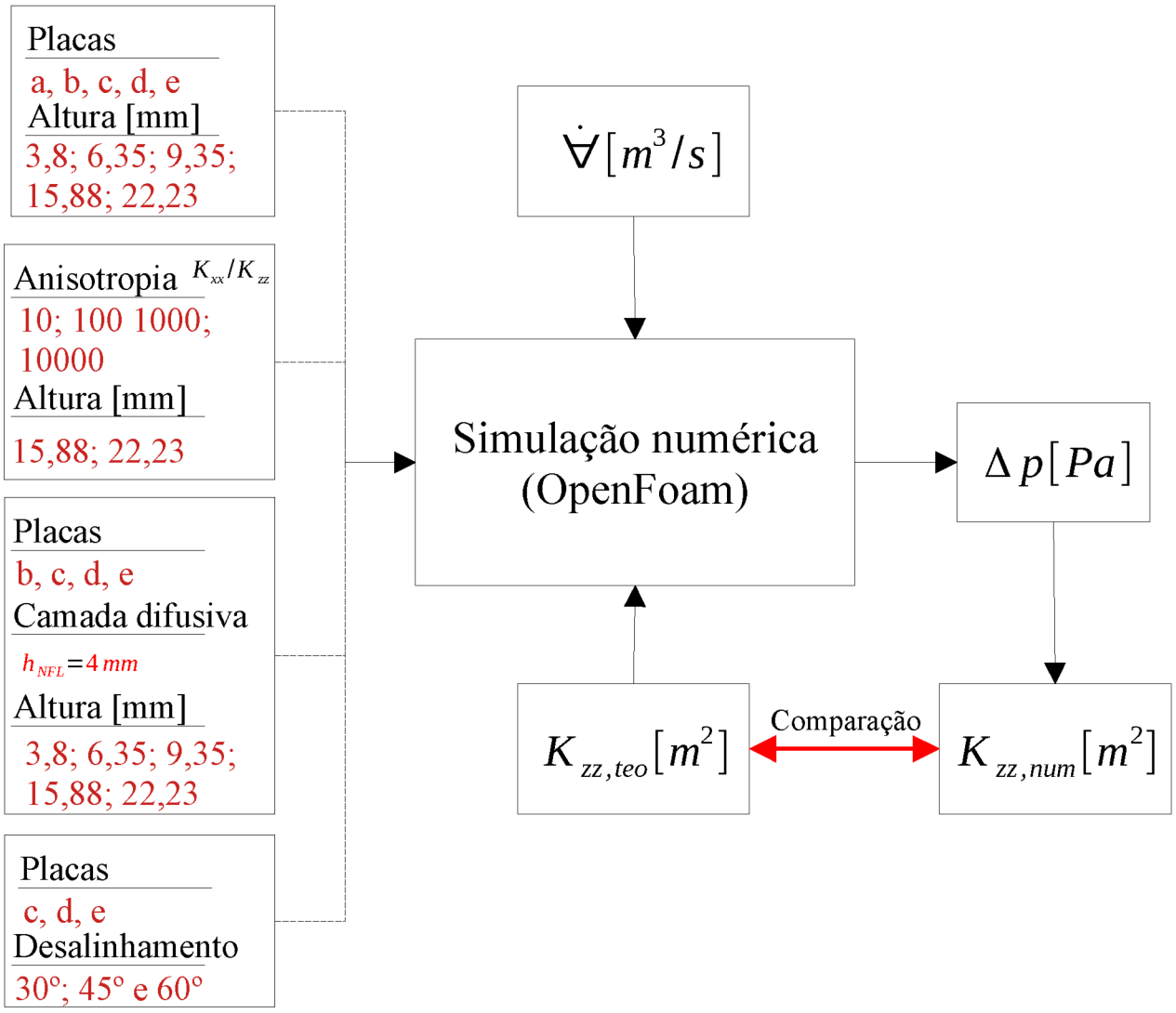


Figura 5.1: Esboço análises realizadas.

Para cada um dos arranjos realizados foram analisados os resultados qualitativos e

quantitativos, onde a análise quantitativa baseou-se na comparação entre a permeabilidade teórica (aquela definida no software exposto na Tab. 4.2) e a permeabilidade numérica, calculada a partir da lei de Darcy.

5.1 CONFIGURAÇÕES DA PLACA PERFURADA

Nesta seção, são analisadas os resultados das simulações onde foram analisadas os resultados obtidos para os 25 arranjos entre o caso das placas "a", "b", "c", "e" e "e" e as 5 diferentes alturas de corpo de prova: 3,8 mm, 6,35 mm, 9,35 mm, 15,88 mm e 22,23 mm. Conforme é exposto o exposto na Fig. 5.2.

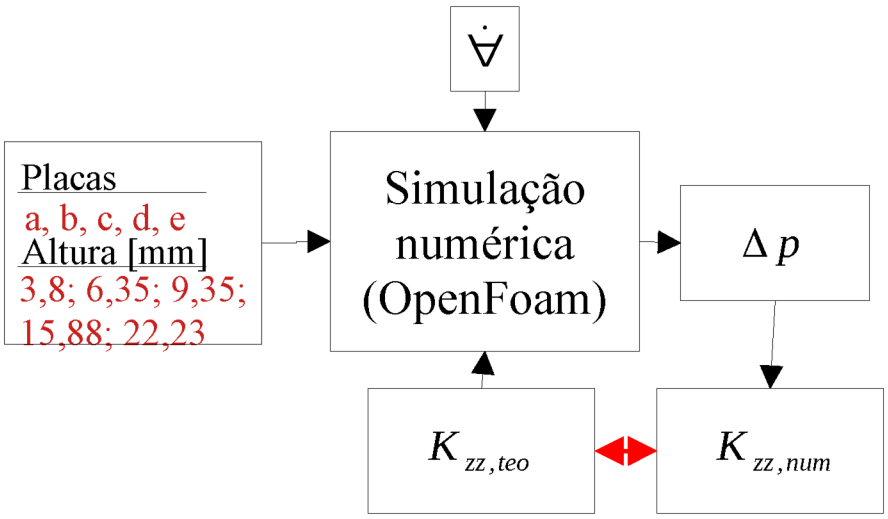


Figura 5.2: Esquema de análise para análise das configurações das placas

Para cada uma das cinco placas perfuradas mostradas na Fig. 5.2, foram simulados cinco alturas, resultando em um total de 25 simulações. Em cada uma das simulações foi calculado a perda de carga entre a entrada e saída de resina, como mostrado na Tab. 5.1. O escoamento no meio poroso é imposto pelo gradiente de pressão ($\Delta p/h$), portanto espera-se que a queda de pressão varie com a altura do molde, como pode ser visto na Tab. 5.1, contudo o gradiente de pressões não deveria variar quando alturas iguais são comparadas. Portanto, assumindo que a Lei de Darcy descreva corretamente o escoamento na cavidade, independentemente da geometria da placa perfurada, é de se esperar que uma queda de pressão (para uma mesma altura h) tenha a mesma intensidade para todas as placas testadas. Entretanto, se pode notar comparando os resultados, por exemplo, da placa *e* com a placa *a (*mesma altura), que se obtém variações maiores que 20%. O que indica a influência das placas perfuradas.

Tabela 5.1: Queda de pressão calculada para simulação (Δp_{num} [kPa]).

	Geometria	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*
h (mm)	**3,80**	11,43	16,28	18,05	18,96	19,68
	6,35	19,23	24,28	26,32	27,99	29,84
	9,53	28,86	33,43	35,13	37,32	40,24
	15,88	48,41	53,25	54,97	57,68	61,88
	22,20	68,19	73,03	74,77	77,64	82,23

A permeabilidade do meio poroso é calculada com a Eq. 10 e mostrada na Tab. 5.2. A diferença entre o menor e o maior valor de permeabilidade obtidos é superior à 70%. Analisando os resultados da Tab. 5.2 é possível constatar que ambos os parâmetros, altura do molde e configuração das placas, possuem uma forte influência nos resultados de permeabilidade.

Tabela 5.2: Permeabilidade transversal calculada para as simulações numéricas ($K_{zz,num} \times 10^{12}$ [m²]).

	Geometria	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*
h (mm)	**3,80**	2,60	1,82	1,65	1,57	1,51
	6,35	2,58	2,04	1,89	1,77	1,66
	9,53	2,58	2,23	2,12	2,00	1,85
	15,88	2,56	2,33	2,26	2,15	2,01
	22,20	2,54	2,38	2,32	2,23	2,11

Um erro relativo é definido com o objetivo de comparar os resultados das placas e definir qual seria a melhor combinação entre os dois parâmetros e obter resultados precisos. O erro consiste em relativizar a permeabilidade obtida através das simulações numéricas ($K_{zz,num}$) e a permeabilidade (K_{zz}) do meio poroso definida no *software*, como mostra a seguinte equação.

$$Erro[\%] = \frac{K_{zz} - K_{zz,num}}{K_{zz}} \tag{12}$$

A Fig. 5.3 apresenta o erro calculado para cada um dos casos e, estão organizados de acordo com a cor representativa de cada configuração. A primeira conclusão é que tanto a altura do molde quanto a configuração dos furos na placa tem influência na correta determinação da permeabilidade

transversal. O erro tende a diminuir em decorrência do aumento da altura do corpo do molde, como já fora previsto na literatura (TRINDADE *et al.*, 2019), e quando os furos têm uma melhor distribuição na placa.

Quando o meio poroso é muito fino, mesmo para o caso base (*a*) o qual tem uma melhor representação para o fluxo retilíneo, obtemos um erro de 3%. Esse erro é reduzido à 1% quando aumentamos a altura para 22,23 mm, sendo este a melhor representação da Lei de Darcy, não sendo possível de reproduzir experimentalmente. Os erros aqui relatados são relativos apenas ao escoamento de fluido no interior do molde induzidos pela placa perfurada.

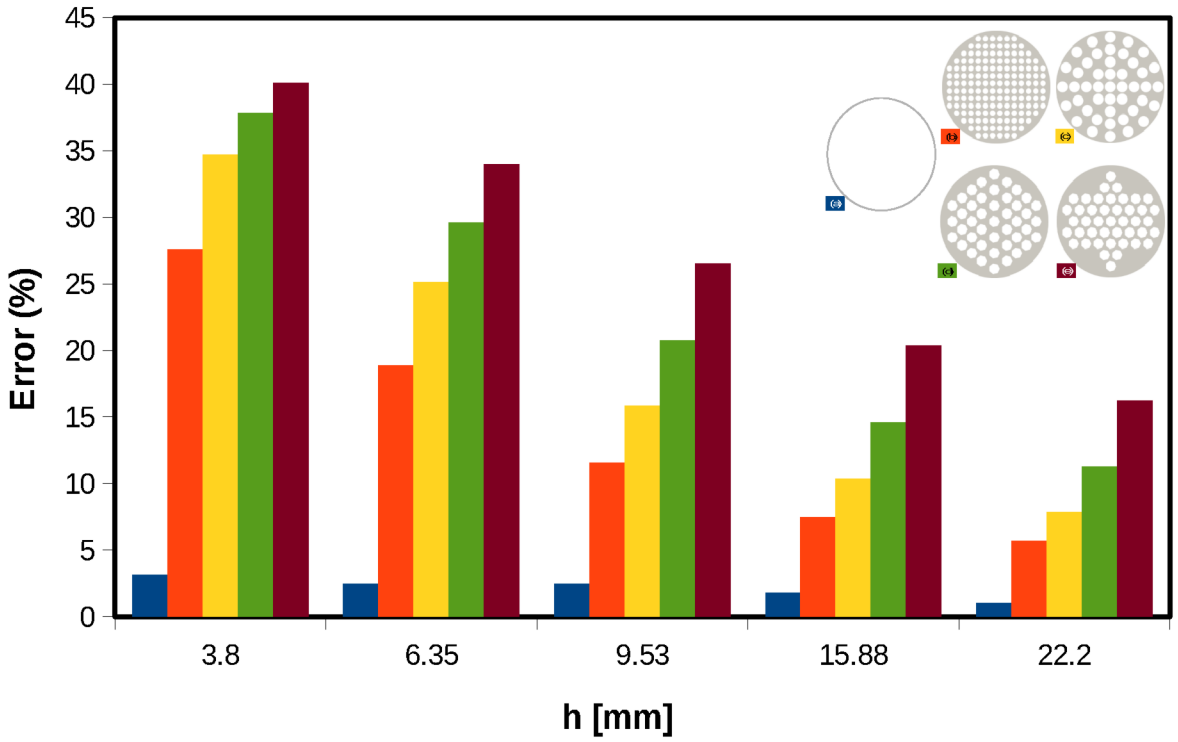


Figura 5.3: Erro da permeabilidade transversal calculada.

Os perfis de velocidade são plotados nas Figs. 5.4 e 5.5 para as quatro placas perfuradas estudadas. A geometria em que descreve a situação ideal (caso *a*) mostraria um perfil de velocidades constante e, por ser um caso teórico é utilizado apenas para verificar a solução numérica, não é mostrado.

A configuração das placas é construída para reproduzir, da forma mais realista possível, o comportamento de fluxo descrito pela Lei de Darcy, ou seja, um fluxo constante e homogêneo dentro da cavidade. Qualquer desvio desta condição resulta em incertezas na determinação da

permeabilidade transversal. A partir das Figs. 5.4 e 5.5 pode-se concluir que nenhuma das placas atende perfeitamente a reprodução da equação analítica. São observados gradientes de velocidade em todas as distribuições e, os melhores resultados são obtidos com alturas maiores e distribuição mais homogênea dos furos.

A Fig. 5.4 mostra os perfis de velocidade ao longo da direção longitudinal (alinhados com a direção do fluxo). Para a melhor configuração (placa *b*), os gradientes de velocidade são mais suaves e apresentam diferenças apenas nas regiões perto dos furos. Também é possível observar que com o aumento da altura do molde a condição de suavidade se fortifica. Em todas as outras geometrias são observados pontos de alta velocidade (região em vermelho) e também há regiões de estagnação de fluido (região em azul forte). Para os piores casos também é notável que o escoamento se concentra nas regiões centrais da cavidade do molde. Em algumas situações, como a do caso de altura 3,8 mm e 6,35 mm das distribuições "*c*" e "*e*", é possível observar que há uma zona preferencial de escoamento do fluido, conectando a entrada e saída.

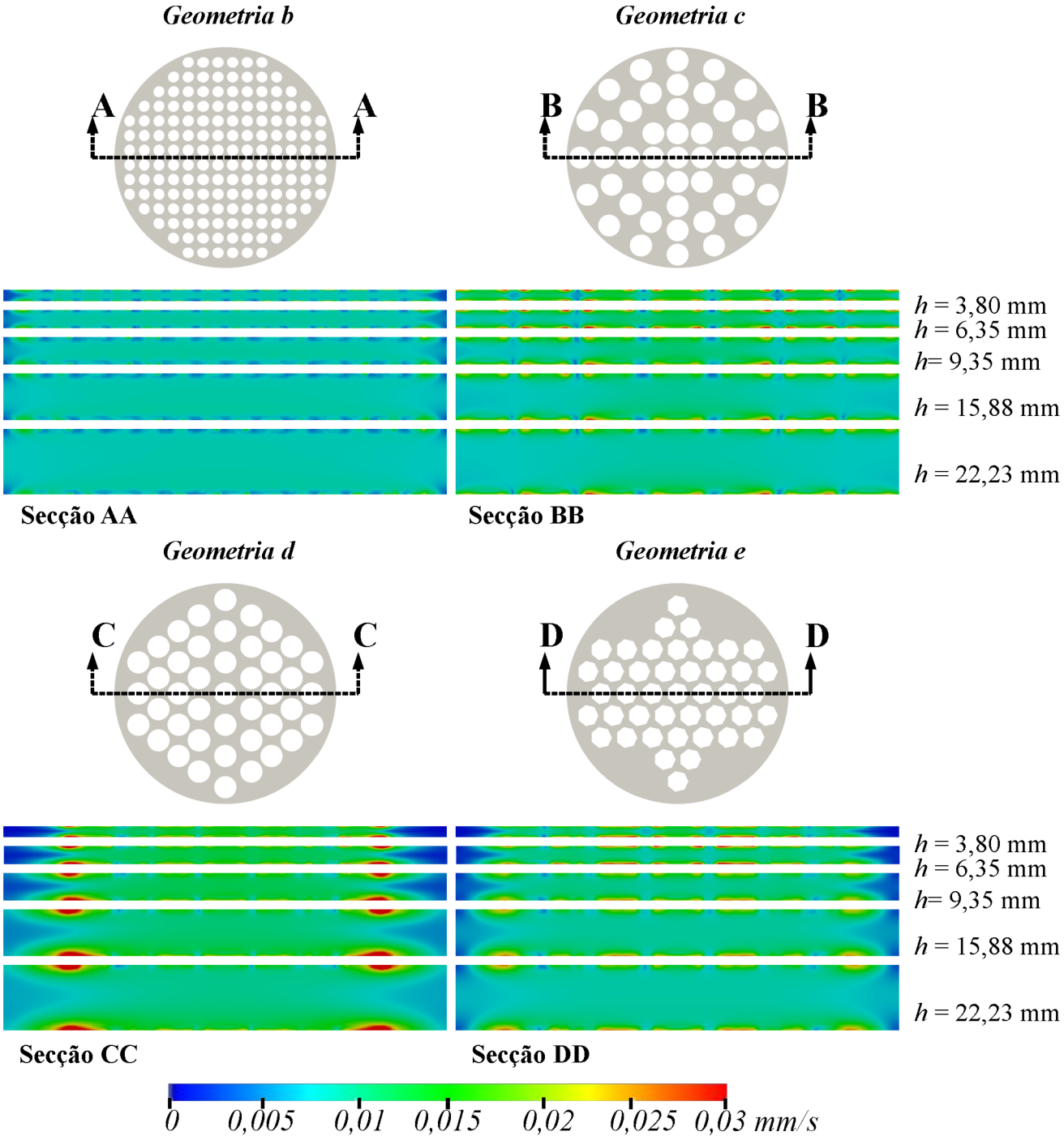


Figura 5.4: Corte longitudinal interno ao molde mostrando as velocidades na cavidade do molde.

Combinando os resultados qualitativos das Figs. 5.4 e 5.5, além dos resultados apresentados na Fig. 5.3, se chega a conclusão de que apenas a geometria *b*, com a alturas de molde de 22,23 mm e 15,88 mm, e também a geometria *c* com altura de 22,23 mm poderiam ser utilizadas para a distribuição de fluxo para determinação da permeabilidade transversal, pois estas tiveram uma melhor confiabilidade, obtendo erros menores que 8%.

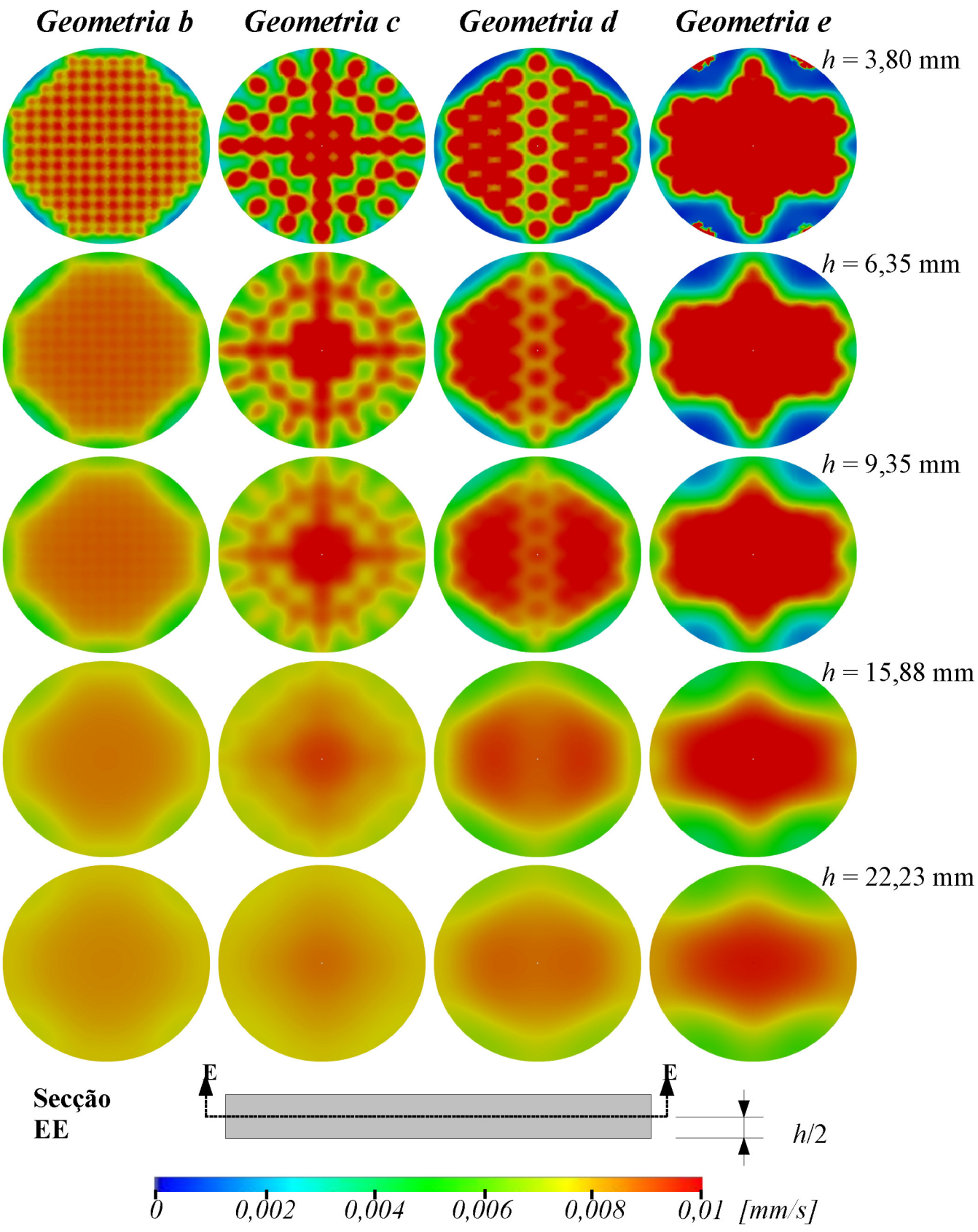


Figura 5.5: Perfis de velocidade em um corte no meio do molde.

5.2 DISTRIBUIÇÃO DAS PLACAS E A ANISOTROPIA DO MEIO POROSO

Um segundo parâmetro avaliado foi a confiabilidade do procedimento em função da isotropia do material observado. Nesse sentido, as alturas dos melhores resultados da seção anterior foram utilizados para avaliar diferentes razões entre permeabilidade planar e permeabilidade transversal (Kxx/Kzz). O esquema de análise mostrando as propriedades analisadas nessa seção estão expostos na Fig. 5.6.

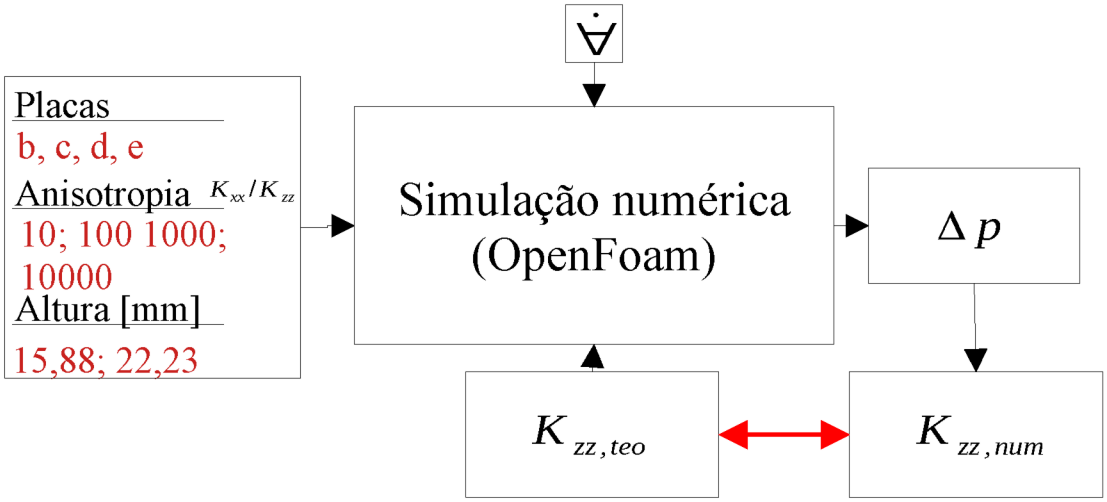


Figura 5.6: Esquema de análise da anisotropia

Usualmente esses valores estão entre 10 e 100, conforme o ensaio realizado para um determinado material (SYERKO *et al.*, 2023), podendo chegar a valores maiores ou menor dependendo do material que está sendo avaliado. Os resultados obtidos para a altura de 15,88 mm estão expostos na Fig. 5.7.

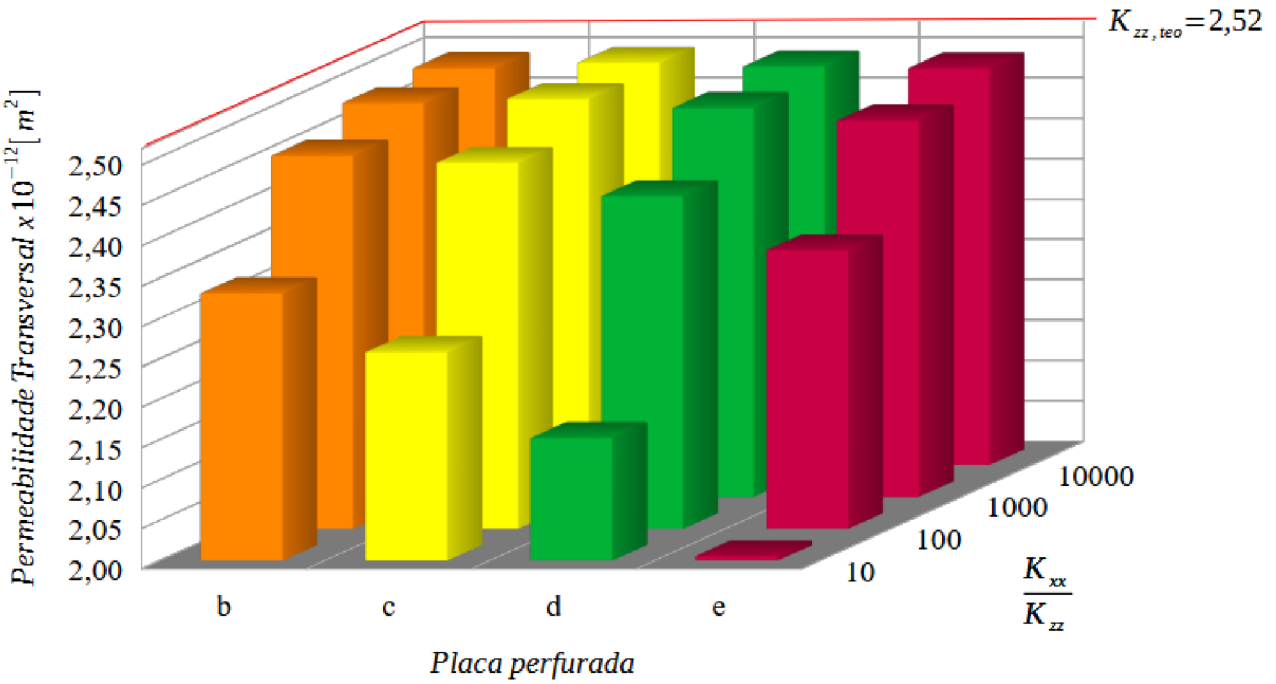


Figura 5.7: Efeito da anisotropia em função das placas utilizadas (h = 15,88mm)

A Figura 5.7 apresenta a permeabilidade obtida através da simulação numérica para cada uma das placas perfuradas simuladas com a altura de 15,88 mm em 4 diferentes razões de permeabilidade planar e permeabilidade transversal: 10, 100, 1000 e 10000. Assim, quanto maiores distâncias entre a permeabilidade transversal exposta no gráfico e o valor de $2,52\,x10^{-12}$ (definida como permeabilidade do meio poroso), menor é a confiabilidade do procedimento utilizando a placa para daquele tipo de material.

Nota-se que em razões baixas, onde a permeabilidade transversal é no máximo 10 vezes menor que a permeabilidade planar, os erros obtidos são maiores e conforme essa razão aumenta o procedimento obtém valores mais próximos ao que se era esperado. Mesmo em situações em que a placa perfurada tem um desempenho não muito bom, como é o caso da placa "*e*" e uma razão 10, em *Kxx*/*Kzz* maiores que 100 já são obtidos valores de permeabilidade mais próximos aos reais valores do material que está sendo verificado.

Além disso, a placa perfurada reduz seu efeito expressivamente quando a permeabilidade planar é muito maior que a permeabilidade fora do plano. Uma vez que as componentes criadas nas direções que não são de interesse, geram pouca resistência ao escoamento e corroboram para menores influências na perda de carga. Logo, a permeabilidade transversal é aferida de forma mais homogênea com pouca influência das permeabilidades em outras direções.

A Figura 5.8 apresenta resultados em consonância com o exposto anteriormente para os valores obtidos com a altura do corpo de prova de 22,23 mm e as diferentes placas perfuradas.

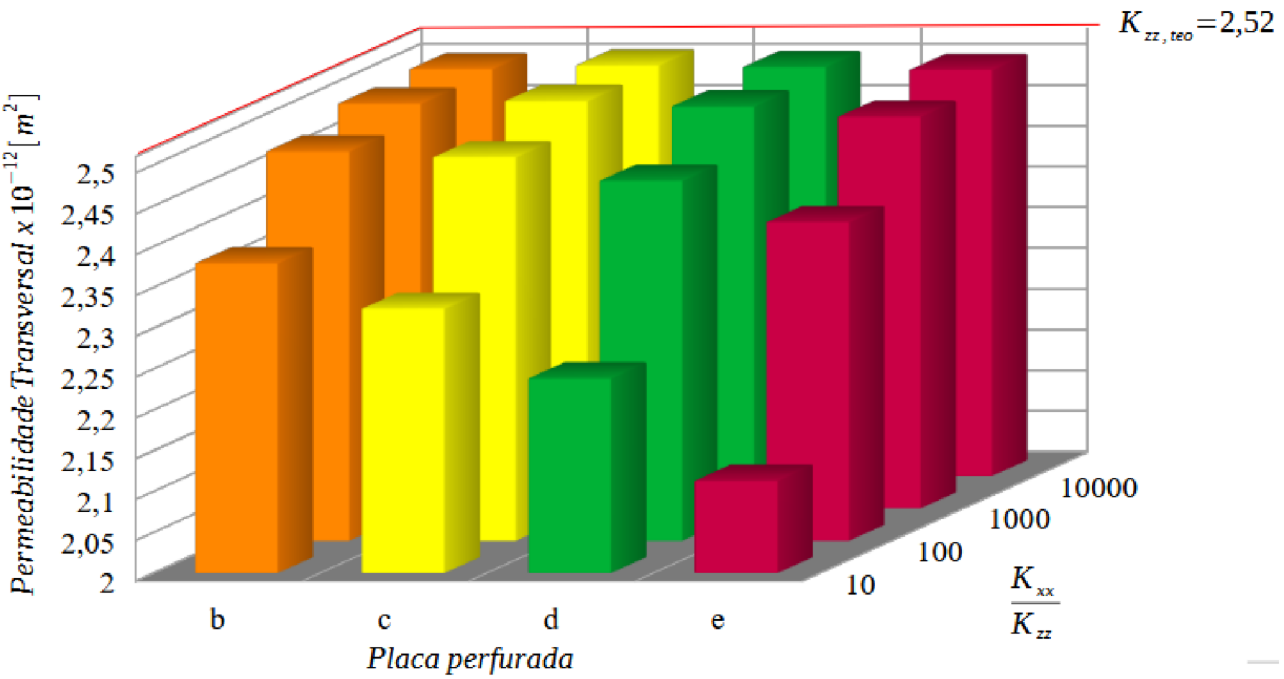


Figura 5.8: Efeito da anisotropia em função das placas utilizadas (h = 22,23mm)

Independente da placa perfurada observada, os resultados para as diferentes alturas são aparentes na razão *Kxx*/ *Kzz* de 10. Isso fica notável ao comparar o comportamento semelhante entre a Fig. 5.7 e a Fig. 5.8. A partir de uma razão maior que 10, há uma redução da influência das placas, sendo ínfima em razões maiores que 1000 onde aparentemente as componentes de velocidade nas direções planares inferem perdas de carga reduzidas em relação à componente principal. Além disso, observa-se que os valores de permeabilidade obtidos para as diferentes alturas são semelhantes em razões maiores que 100, indicando que não só as placas passam a reduzir a sua influência como também a altura do corpo de prova.

Dessa forma, conclui-se que materiais com maiores anisotropias têm um melhor desempenho, independente da placa a ser utilizada e, materiais com permeabilidades mais próximas tendem a observar maiores influências externas como é o caso de placas perfuradas diferentes e/ou corpos de provas com diferentes alturas.

5.3 CAMADA DIFUSIVA

A inserção de uma camada homogênea de alta permeabilidade (camada difusiva) na região mais próxima da região de injeção de resina, é citada por alguns autores como uma opção para reduzir as interferências induzidas pelas placas perfuradas no procedimento de determinação da

permeabilidade transversal. Pois, assim, antes da penetração da resina no corpo de prova, há uma prévia reorganização das linhas de corrente em uma camada com permeabilidade alta e, por consequência o fluido atravessa o meio poroso com velocidade majoritariamente na direção de interesse (axial à organização das fibras).

Nesse trabalho, foram novamente simuladas todas as situações propostas na seção 5.1, com todos os parâmetros e níveis que lá foram utilizados. Dessa forma, além da altura do corpo de prova com a permeabilidade definida no software, foi adicionada uma região altamente permeável (vazia), suficiente para não oferecer resistência ao escoamento em nenhuma direção, afim de obter uma organização do escoamento em uma camada de difusão do fluido anterior ao corpo de prova com altura denominada h_{NDL}, como mostra a Fig. 5.9.

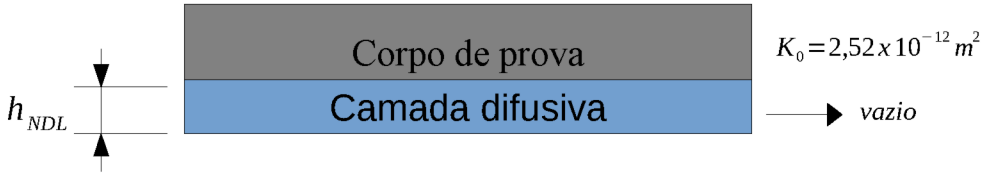


Figura 5.9: Esquematização da camada difusiva

A figura 5.10, apresenta um diagrama das variáveis principais envolvidas na análise da camada difusiva. Foram simuladas arranjos entre placa (“b”, “c”, “d” e “e”), altura (3,8 mm, 6,35 mm, 9,35 mm, 15,88 mm e 22,23 mm) e a presença da camada permeável. As simulações foram realizadas e foi obtido a perda de carga no interior da cavidade do molde, que nesse caso, tem a altura do corpo de prova somado a altura da camada difusiva (altamente permeável). Com a perda de carga, foi calculado a permeabilidade transversal através da Eq. 10.

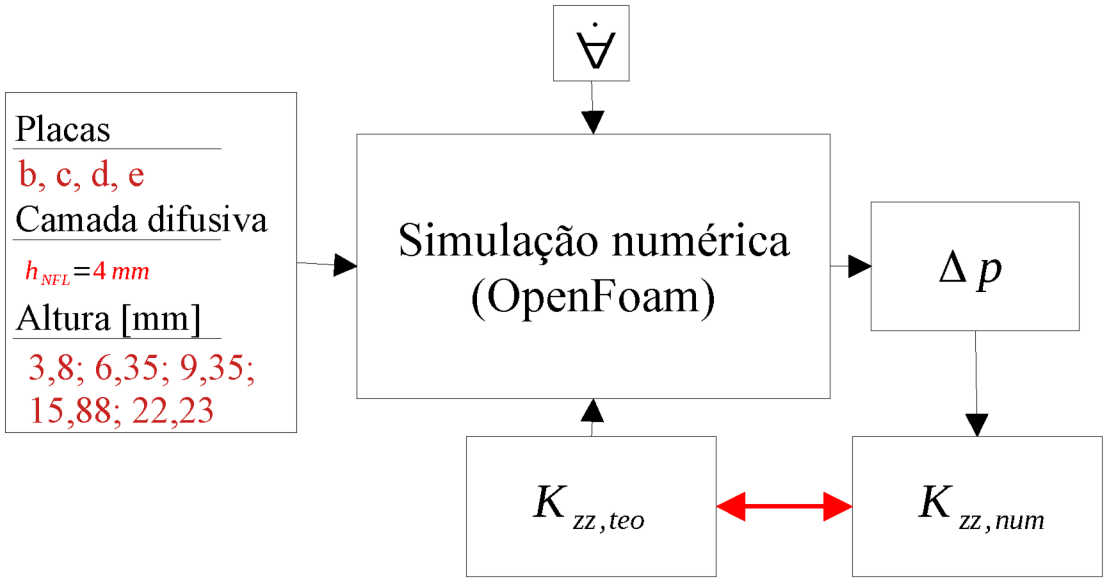


Figura 5.10: Esquema de análise da camada difusiva

Os resultados estão expostos a seguir na Tab 5.3.

Tabela 5.3: Permeabilidade transversal calculada para as simulações numéricas com a presença da placa permeável ($K_{zz,num} x10^{-12}[m^2]$).

Geometria		*b*	*c*	*d*	*e*
h [mm]	**3,80**	2,17	2,08	1,97	1,88
	6,35	2,28	2,21	2,11	2,00
	9,53	2,39	2,35	2,26	2,16
	15,85	2,41	2,38	2,32	2,25
	22,23	2,42	2,41	2,37	2,31

A partir dos resultados expostos na Tab. 5.3, foi calculado o erro conforme a Eq. 13 e de forma a facilitar a visualização, os resultados obtidos estão expostos na Fig. 5.11 em contraste com os resultados obtidos na seção 5.1. O gráfico de barras apresenta o erro obtido em função de cada placa (b até e) e as 5 alturas de corpo de prova observadas. As barras com cores mais fortes representam os resultados obtidos para experimentos onde não foram utilizados as camadas permeáveis, ou seja, são os mesmos resultados da seção 5.1 e, os gráficos com cores mais brandas representam a utilização da camada.

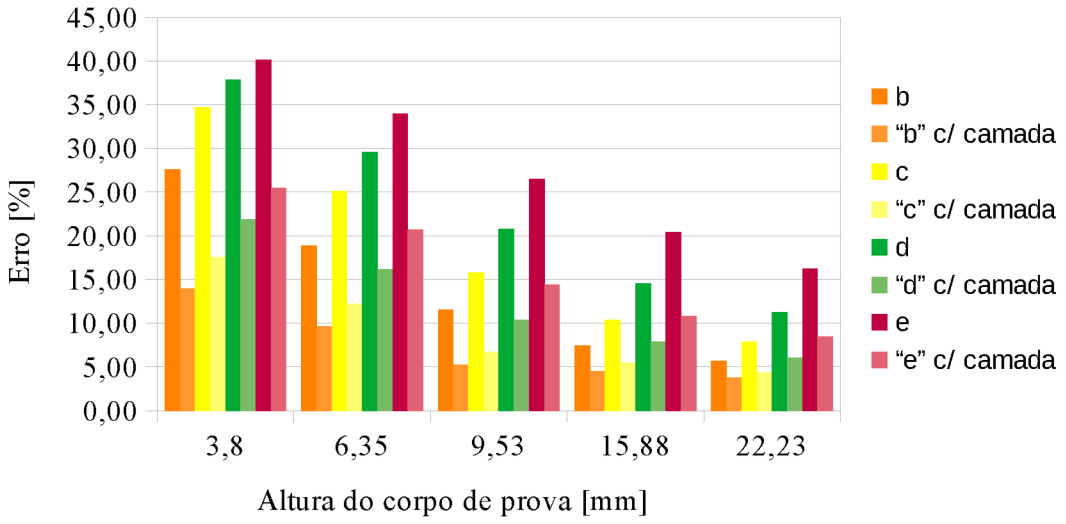


Figura 5.11: Comportamento do experimento em função da utilização de uma placa permeável

De uma forma geral, os resultados mostram que a utilização da placa permite obter melhor acuracidade em relação a experimentos onde não há utilização dessa estrutura. Ao comparar resultados para uma mesma placa e diferentes alturas, nota-se um comportamento decrescente no erro relativo, ora para os casos com a camada de difusão, ora para os sem a camada difusiva. Contudo, nos casos com a camada de difusão, se obtém valores mais próximos aos desejados, melhores do que quando não há a utilização. Por exemplo, os resultados para a placa "*c c/ camada*" com corpo de prova de altura 3,8 mm são melhores que os resultados da placa "*c*" sem camada com altura de 6,35 mm, isso progressivamente até as alturas de 22,23 mm.

Nesse contexto, essas camadas difusivas contribuem para a utilização de um corpo de prova com altura menor. Indicando que os resultados melhores em estruturas de altura maior são obtidos devido a possibilidade que o escoamento tem de se organizar no interior da estrutura em uma região onde a permeabilidade é alta. Logo, em estruturas com altura pequenas, o escoamento se torna insuficiente de forma a atravessar o molde na direção transversal sem molhar totalmente as áreas mais periféricas do molde. Fato que pode ser revertido quando há a utilização de uma camada permeável anterior ao molde. Sendo os resultados da altura 9,35 mm iguais ou melhores aos resultados para a altura de 22,23 mm.

Outra melhora significativa na utilização da estrutura está na melhor distribuição das velocidades no interior do molde. A Figura 5.12 apresenta o perfil de velocidades dos fluidos durante a penetração ao corpo de prova com altura de 22,23 mm, ou seja, na Fig. 5.12 é exposto um corte na altura bem próximo às placas para os casos onde não há a camada difusiva e na altura de $h_{NDL}=4\,mm$ para os casos em que a camada está presente. Nota-se que o fluido tem magnitudes de velocidades mais brandas e homogêneas na penetração do corpo de prova quando se introduz a uma zona vazia. No caso da placa "*e*" e "*d*", é notável a melhora da homogeneização da distribuição das velocidades e isso gera também um impacto positivo na determinação da permeabilidade transversal, conforme mostra a Fig. 5.11, em que os erros obtidos para a altura de 22,23 mm dessas placas se tornam superiores em até 9% em questão de confiabilidade.

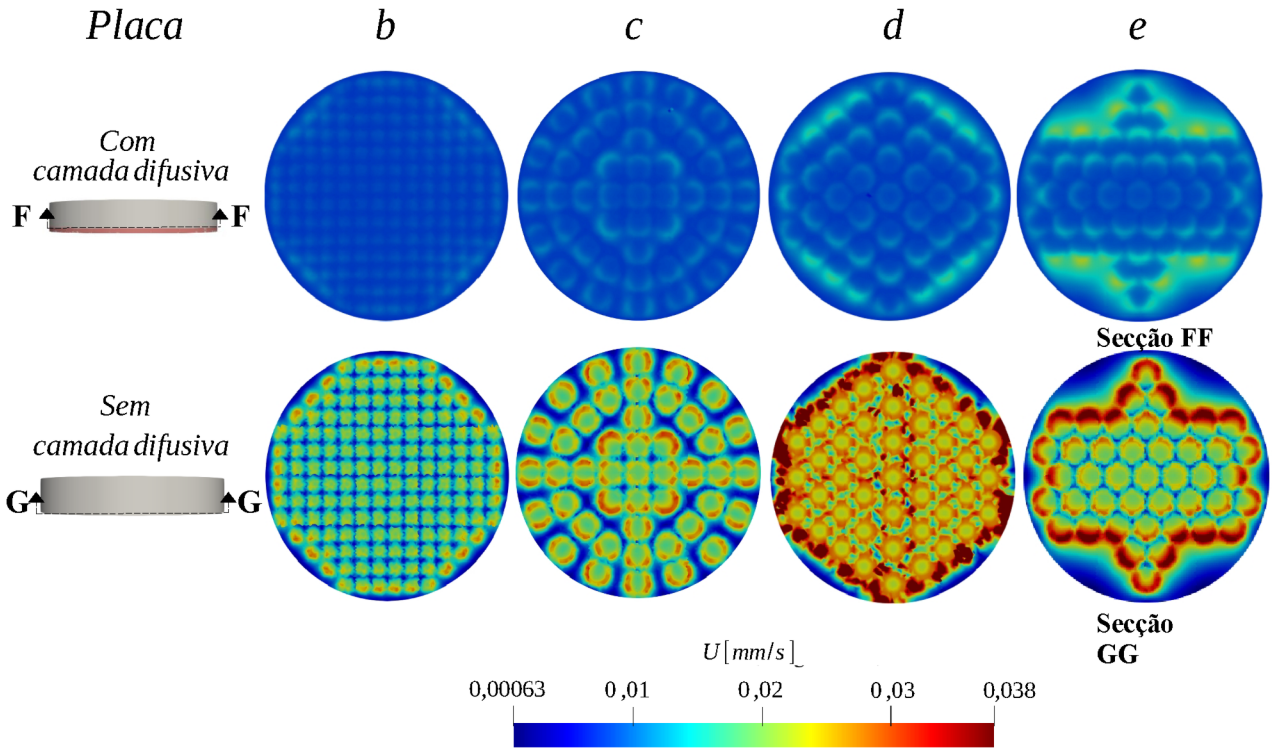


Figura 5.12: Perfil de velocidade na penetração de resina no corpo de prova poroso

A Figura 5.13 apresenta o perfil de velocidades em uma secção realizado no meio do corpo de prova poroso, semelhante ao mostrado na Fig. Erro: Origem da referência não encontrada. Entretanto, nesse caso há a presença da camada difusiva. É possível inferir, que as velocidades na presença da camada difusiva se tornam homogêneas, já nos corpos de prova com alturas relativamente pequenas, como de 9,35 mm e 15,88. Enquanto que, para os casos onde não há a camada difusiva esses perfis só são atingidos para alturas de 22,23 mm.

Ademais, nota-se para os casos com baixas velocidades que há uma redução das regiões em que, sem a presença da camada difusiva, havia estagnação de fluido. Isso também é um dos fatores que contribui para a redução do erro na determinação da permeabilidade transversal e pode ser constatado na visualização da Fig. 5.13.

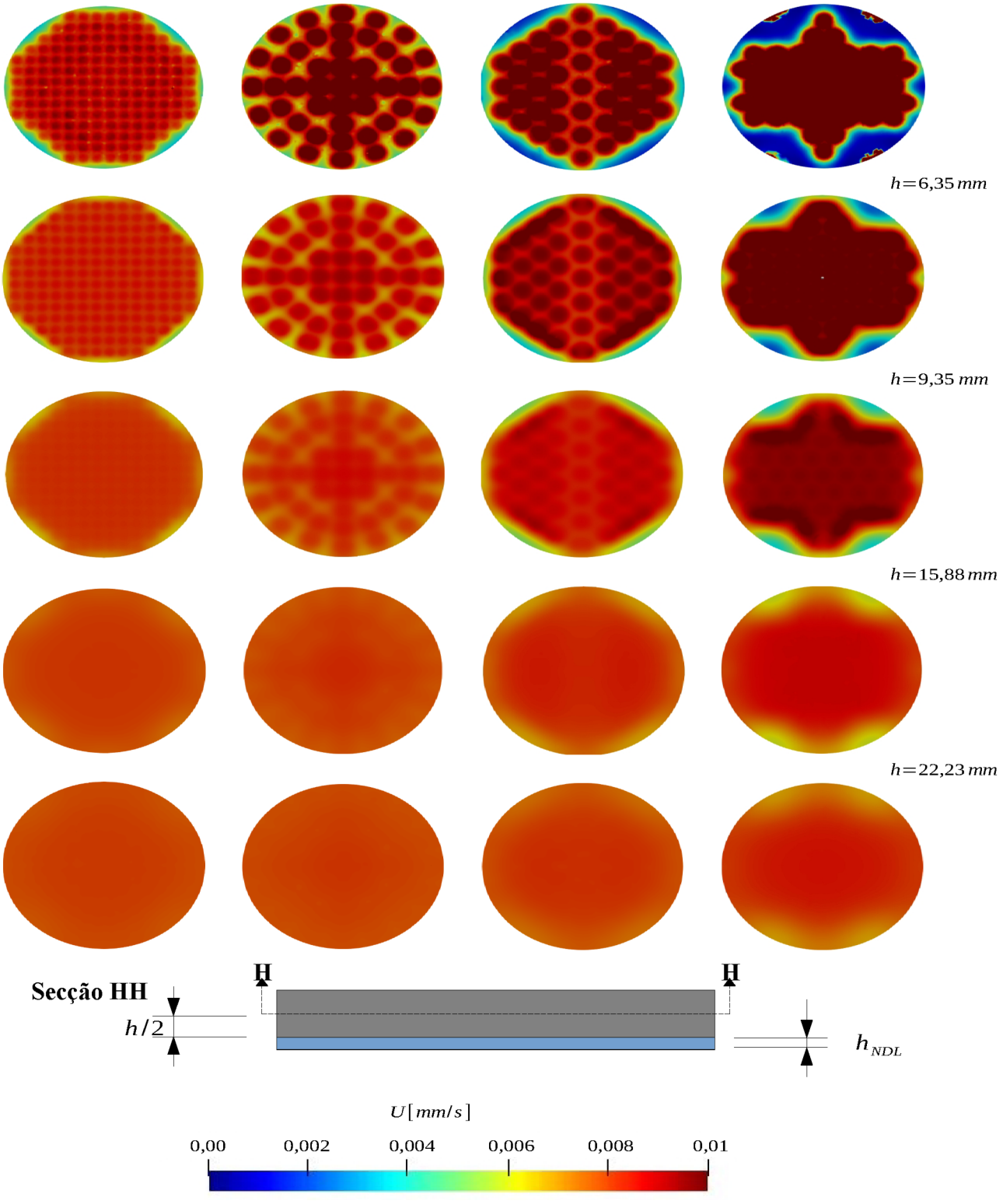


Figura 5.13: Perfil de velocidades no meio do corpo de prova com camada difusiva

Entretanto, a utilização dessas estruturas na prática ainda são complexas, uma vez que diante da possibilidade de usá-las, as mesmas não teriam uma permeabilidade alta suficiente de forma a

não oferecer nenhuma resistência ao escoamento, isso só ocorreria se fosse possível a flutuação do corpo de prova no molde. Algumas soluções como grades ou colmeias, são alternativas utilizadas na literatura para a aplicação do método, e de certa forma são eficientes e oferecem uma alta permeabilidade, porém ainda interferem no processo de determinação da permeabilidade. Contudo, os resultados aqui obtidos indicam que, de fato, a camada permeável não só é eficaz na melhora dos resultados como também contribui para a não necessidade de um corpo de prova tão espesso.

5.4 DESALINHAMENTO DAS PLACAS

Com o objetivo de avaliar a influência da congruência entre as placas inferiores e superiores, foram realizadas simulações considerando um desalinhamento entre os furos de entrada e saída de fluidos. O desalinhamento entre as placas teve como valores ângulos de 30°, 45° e 60°, e somente as placas *"c"*, *"d"* e *"e"* com altura de 22,23 mm. O esquema de análise está exposto na fig. 5.14.

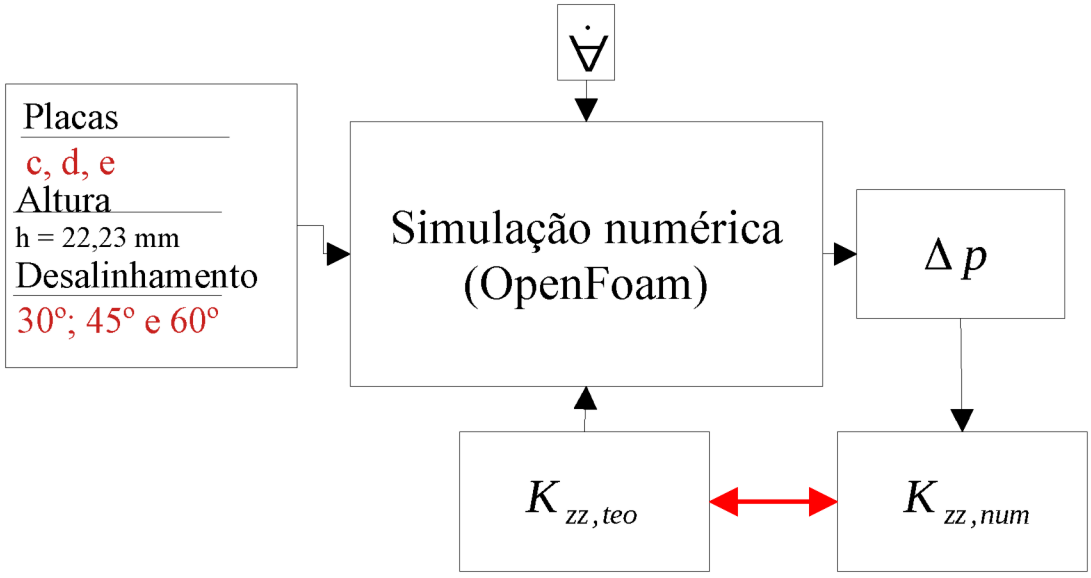


Figura 5.14: Esquema de análise do desalinhamento das placas

Essas placas foram selecionadas por terem sido desenvolvidas exclusivamente para esse trabalho e apresentarem resultados: bom, médio e ruim, respectivamente, na primeira análise. A Figura 5.15 mostra, em perfil, o desalinhamento entre a placa superior e inferior, os furos em azul representam os locais por onde a resina é injetada e os vermelhos a saída.

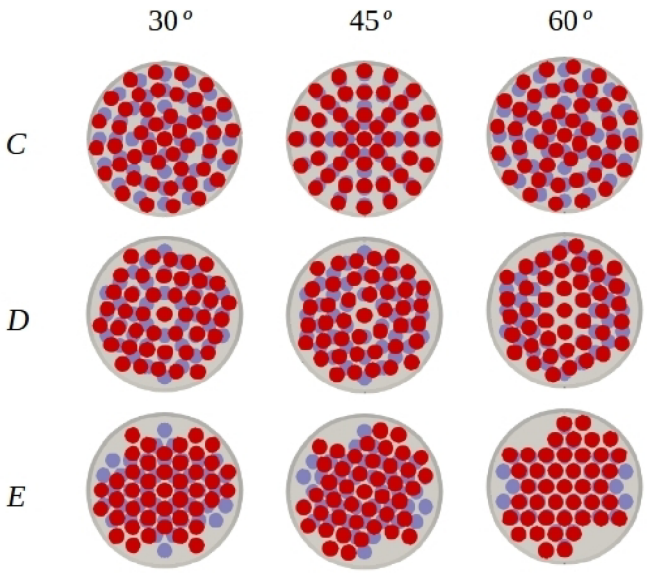


Figura 5.15: Desalinhamento das placas

A metodologia utilizada foi a mesma. Foram desenvolvidas as geometrias no software, onde, nesse modelo as placas apresentavam desalinhamento. Foi realizada a simulação e obtido a perda de carga no interior da cavidade e com ela calculado a permeabilidade através da Eq. 10. Os resultados são apresentados na Tab. 5.4

Tabela 5.4: Resultado da permeabilidade numérica obtido com o desalinhamento das placas ($K_{zz,num} x10^{-12}$).

Ângulo		**0º**	**30º**	**45º**	**60º**
Placa	***c***	2,32	2,28	2,28	2,29
	d	2,23	2,21	2,20	2,21
	e	2,11	2,09	2,09	2,08

A partir dos resultados expostos na Tab. 5.4 foram calculados os erros relativos, com a Eq. 13. Obtendo os seguintes valores.

Tabela 5.5: Erro calculado para moldes com desalinhamento [%].

Ângulo		**0º**	**30º**	**45º**	**60º**
Placa	***c***	7,87	9,29	9,35	9,25
	d	11,28	12,29	12,64	12,36
	e	16,24	17,09	17,12	17,30

A partir dos resultados obtidos e, comprando com os resultados para as mesmas placas com altura de corpo de prova de 22,23 apresentado na seção 5.1, é possível inferir que há um acréscimo

no desempenho do experimento (diminuição no erro do cálculo da permeabilidade). O fato está de acordo com o observado na seção anterior, onde as placas altamente permeáveis ajudavam a reduzir os erros. Nesse caso, observa-se que a não congruência entre a placa superior e inferior gera componentes de velocidade fora da direção de interesse (direção *z*), reafirmando a hipótese da seção anterior, que reduzir o efeito das velocidades na direção planar implicará na redução do erro na determinação da permeabilidade transversal. Já o desalinhamento das placas se mostra ineficaz na redução do erro, pois, apesar de melhorar a distribuição do fluxo no interior da cavidade força o fluido desviar-se na direção planar durante o escoamento no molde e isto, mesmo que de forma sutil, gera maior interferência na perda de carga provenientes de direções, que não a de interesse. Dessa forma, o desalinhamento da placa não se mostra eficaz na redução do erro.

Nesse sentido, a partir dos resultados obtidos nessa seção, conclui-se que a não congruência entre as placas não gera uma melhora significativa nos resultados. Ademais, o grau de congruência (ângulo de desalinhamento) tão pouco influencia, visto que os erros obtidos tendem a se uniformizar para os ângulos de 30°, 45° e 60°.

5.5 ESFORÇO COMPUTACIONAL

Para a obtenção dos resultados supracitados, foram utilizados um computador com processador Intel Core i7-6800K CPU @ 3.4 Ghz e 16 gb de memória RAM. Na tabela a seguir, é exposto o tempo médio, desvio padrão e a quantidade de simulações realizadas cada resultado das seções anteriores.

Tabela 5.6: Esforço Computacional

Ítem	Descrição	Quant. simulações	Tempo médio unit. [min/cada]
1	Placas + Alturas	25	$99{,}6 \pm 81{,}2$
2	Placas + Anisotropia	20	$170 \pm 3{,}45$
3	Placas + Alturas + Camada Difusiva	16	199 ± 143
4	Placas + Desalinhamento das placas	9	$1557 \pm 32{,}6$

6. CONCLUSÕES

Diante da importância de um correto dimensionamento da geometria do molde em experimentos de determinação da permeabilidade, além das recentes iniciativas mundiais expressando a necessidade de padronização das técnicas, é importante reconhecer todas as fontes de incerteza referente aos processos usualmente utilizados. É conhecido na literatura técnica, que não só o posicionamento dos furos na placa de distribuição de fluxo como também a altura dos moldes, são parâmetros importantes. Contudo, não foi encontrada nenhuma análise quantitativa de quanto é esta influência na determinação da permeabilidade fora do plano.

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo numérico para simular a determinação da permeabilidade utilizando a Lei de Darcy como base teórica, a qual assume fluxo retilíneo dentro da cavidade do molde. É importante dizer que essas hipóteses são usadas nos experimentos de laboratório. As condições de laboratório podem ser reproduzidas numericamente e a análise feita pode avaliar erros de previsão associados apenas ao comportamento do escoamento no interior da cavidade.

Os resultados mostram que se o projeto da placa perfurada não prever uma distribuição homogênea dos furos na placa, podem ser obtidos erros de até 40% na previsão da permeabilidade. Além disso, os resultados indicaram que a altura do molde é um fator importante também na prevenção de fluxos preferenciais, quanto maior a altura da cavidade, menor serão as zonas de estagnação de fluido.

Ademais, a um aumento da relação entre a permeabilidade planar e a permeabilidade transversal contribui para a redução significativa do erro na predição da permeabilidade fora do plano. Com razões $Kxx/Kzz > 10$, a perda de carga no interior da cavidade tende a se tornar dependente somente a permeabilidade na direção axial do molde, obtendo uma melhor aferição da propriedade desejada.

Além disso, a utilização de uma camada difusiva se mostra eficiente na redução dos erros obtidos durante o processo. Isso porque, a estrutura contribui para uma melhor homogeneização das velocidades no interior da cavidade reduzindo as regiões onde, sem a estrutura, havia pontos de estagnação de fluido. Utilizando o componente, foi possível obter uma redução nos erros de até 15% para uma situação com mesmas placas e alturas de corpo de prova.

A congruência entre a placa superior e inferior não se mostrou um fator determinante, uma vez que para todos os ângulos (30°, 45° e 60°) obteve-se uma redução do erro de no máximo 2%. mantendo-se estável. Isso indica que as linhas de fluxo no interior da cavidade se mantém estáveis

com o desalinhamento das placas.

Logo, o presente trabalho contribui com dados sobre o processo de determinação da permeabilidade transversal indicando, através de um estudo numérico, o comportamento de algumas variáveis do processo. Nesse sentido, é importante atenção do pesquisador em relação ao material que está sendo utilizado. Para os casos em que são utilizados moldes cilíndricos, o perfil de distribuição dos furos de entrada e saída. A camada permeável, apesar de não extinguir o erro, se mostra satisfatória na redução do erro da permeabilidade transversal.

7. TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção, são propostas duas continuidades do estudo em relação da permeabilidade transversal. A primeira aborda a compressibilidade do material e a questão do uso de placas perfuradas e, a segunda, aborda a questão da distribuição das fibras no interior da cavidade e como isso se comporta com as propriedades do escoamento.

A primeira possibilidade de continuidade dos estudos em permeabilidade transversal é a questão da compressibilidade do reforço fibroso. Durante o fechamento do molde em experimentos físicos, algumas regiões ficam mais comprimidas que outras em função do uso de placas perfuradas, dificultando uma homogeneização do volume de fibras no interior da cavidade. Nesse sentido, é preciso avaliar o quanto essa diferença das propriedades no interior da cavidade interferem nos resultados da permeabilidade transversal do reforço em geral.

A segunda compreende a organização das fibras no interior da cavidade e como isso implica no aumento da perda de carga. As fibras tendem a se organizar de forma aleatória. Contudo, alguns autores pelo mundo estão tentando prever como se dá a organização de arranjos de fibras e como isso impacta na permeabilidade transversal do reforço fibroso.

REFERÊNCIAS

ADVANI, S. G.; SOZER, M. **Process modeling in composites manufacturing, second edition**. [s.l: s.n.]. p. 611

AKTAS, A. et al. **Survey of procedures in use for permeability measurements in liquid composite moulding processes.** Report/Guide. Disponível em: <https://eprintspublications.npl.co.uk/7091/>. Acesso em: 18 abr. 2023.

ARBTER, R. et al. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 42, n. 9, p. 1157–1168, set. 2011.

BODAGHI, M. et al. On the variability of permeability induced by reinforcement distortions and dual scale flow in liquid composite moulding: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 120, p. 188–210, maio 2019.

BROWN, G. O. Henry Darcy and the making of a law: HENRY DARCY AND THE MAKING OF A LAW. **Water Resources Research**, v. 38, n. 7, p. 11-1-11–12, jul. 2002.

CAIRNS, D. S.; HUMBERT, D. R.; MANDELL, J. F. Modeling of resin transfer molding of composite materials with oriented unidirectional plies. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 30, n. 3, p. 375–383, mar. 1999.

CALLISTER, JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: AN INTRODUCTION**. [s.l.] Wiley, 1996. v. 10

CHAE, H.; SONG, Y.; YOUN, J. Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding. **Korea-australia Rheology Journal**, 2007.

CHUNG HAE PARK; WOO, L. Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: a survey and review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 11, p. 957–977, jun. 2011.

ESCHER, M. PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL DE PROFORMAS FIBROSAS. 2016.

FACCIOTTO, S. et al. Modeling of anisotropic dual scale flow in RTM using the finite elements method. **Composites Part B: Engineering**, v. 214, p. 108735, jun. 2021.

GEUZAINE, C.; REMACLE, J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities: THE GMSH PAPER. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 10 set. 2009.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981.

JOUBAUD, L.; ACHIM, V.; TROCHU, F. Numerical simulation of resin infusion and reinforcement consolidation under flexible cover. **Polymer Composites**, v. 26, n. 4, p. 417–427, ago. 2005.

KABACHI, M. A. et al. Concurrent characterization of through-thickness permeability and compaction of fiber reinforcements. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 141, p. 106203, fev. 2021.

KONSTANTOPOULOS, S. et al. Liquid composite molding reproducibility in real-world production of fiber reinforced polymeric composites: a review of challenges and solutions. **Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science**, v. 5, n. 3, p. 85–99, 3 jul. 2019.

LAURENZI, S. et al. Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p. 47–55, fev. 2014.

LUNETTO, V. et al. Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 85, p. 858–874, jan. 2023.

MAGAGNATO, D. et al. Experimental and numerical study of the influence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding. **Composite Structures**, v. 198, p. 135–143, ago. 2018.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MERHI, D. et al. Transverse permeability of chopped fibre bundle beds. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 3, p. 739–746, mar. 2007.

MICHAUD, V. A Review of Non-saturated Resin Flow in Liquid Composite Moulding processes. **Transport in Porous Media**, v. 115, n. 3, p. 581–601, dez. 2016.

OLIVEIRA, C. P. **DETERMINAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE TRANSVERSAL DE COMPOSTOS HÍBRIDOS UTILIZADOS EM PROCESSOS DE MOLDAGEM LÍQUIDA**. , 1 dez. 2019.

RUBINO, F.; CARLONE, P. A Semi-Analytical Model to Predict Infusion Time and Reinforcement Thickness in VARTM and SCRIMP Processes. **Polymers**, v. 11, n. 1, p. 20, 24 dez. 2018.

RUDD, C. D. et al. **Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques**. [s.l.] Elsevier, 1997.

SCHOLZ, S.; GILLESPIE JR, J. W.; HEIDER, D. Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow. **Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow**, p. 2034–2040, 3 maio 2007.

SHARMA, S.; SIGINER, D. A. **Permeability Measurement Methods in Porous Media: A Review**. Volume 10: Heat Transfer, Fluid Flows, and Thermal Systems, Parts A, B, and C. **Anais**... Em: ASME 2008 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION. Boston, Massachusetts, USA: ASMEDC, 1 jan. 2008. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2008/48715/179/332146>. Acesso em: 20 abr. 2023

SIRTAUTAS, J.; PICKETT, A. K.; GEORGE, A. Materials Characterisation and Analysis for Flow Simulation of Liquid Resin Infusion. **Applied Composite Materials**, v. 22, n. 3, p. 323–341, jun. 2015.

SWERY, E. E. et al. Efficient experimental characterisation of the permeability of fibrous textiles. **Journal of Composite Materials**, v. 50, n. 28, p. 4023–4038, dez. 2016.

SYERKO, E. et al. Benchmark exercise on image-based permeability determination of engineering textiles: Microscale predictions. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 167, p. 107397, abr. 2023.

TRINDADE, R. S. et al. Experimental investigation of transverse permeability applied to liquid molding. **Polymer Composites**, v. 40, n. 10, p. 3938–3946, out. 2019.

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, jun. 2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2nd ed ed. Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd, 2007.

WANG, L. et al. Advances in polymers and composite dielectrics for thermal transport and high-temperature applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 164, p. 107320, jan. 2023.

WELLER H,; DE ROUVRAY C.; GREENSHIELDS C,. **OpenFOAM | Free CFD Software | The OpenFOAM Foundation**. Disponível em: <https://openfoam.org/>. Acesso em: 7 maio. 2023.

WU, C.-H.; JAMES WANG, T.; JAMES LEE, L. Trans-plane fluid permeability measurement and its applications in liquid composite molding. **Polymer Composites**, v. 15, n. 4, p. 289–298, ago. 1994.

YANG, B. et al. On the design of test molds based on unidirectional saturated flows to measure transverse permeability in liquid composite molding. **Polymer Composites**, v. 43, n. 4, p. 2234–2251, abr. 2022.

YANG, B. et al. Performance evaluation of unidirectional molds used for measuring saturated transverse permeability of engineering textiles. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 169, p. 107524, jun. 2023.

YONG, A. X. H. et al. Out-of-plane permeability measurement for reinforcement textiles: A benchmark exercise. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 148, p. 106480, set. 2021.

ZHAO, C. et al. Three-Dimensional Numerical Simulation of Meso-Scale-Void Formation during the Mold-Filling Process of LCM. **Applied Composite Materials**, v. 26, n. 4, p. 1121–1137, ago. 2019.

APÊNDICES

As condições de contorno utilizadas no programa OpenFOAM são descritas na Tab. A1.

Tabela A1 - Nomeclatura das condições de contorno no OpenFOAM .

Superfície	Variável	Condições de contorno
Entrada de resina	U	FlowRateInletVelocity
	p_rgh	fixedFluxPressure
	α	fixedValue
Saída dos fluidos	U	pressureInletOutletVelocity
	p_rgh	totalPressure
	α	zeroGradient
Paredes	U	noslip
	p_rgh	fixedFluxPressure
	α	zeroGradient

Parâmetros de controle do solucionador e esquema de interpolação são mostrados na Tab. A2.

Tabela A2 - Parâmetros de controle do OpenFOAM .

Variável	Parâmetro
Software version	8
Algorithm	PIMPLE
Solver	interFoam
maxCo	1

Esquemas de interpolação são apresentados na Tab. A3.

Tabela A3 - Esquemas de interpolação.

Esquema	Parâmetro
Região do fluido	
ddtSchemes	
default	Euler
gradSchemes	
default	Gauss Linear
divSchemes	
div(rhoPhi,U)	Gauss linearUpwind grad(U)
div(phi,alpha)	Gauss interfaceCompression vanLeer 1
div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))	Gauss linear
laplacianSchemes	
default	Gauss linear corrected