

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

FABIANE VALENTE HÄRTER

ESTUDO NUMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE
TRANSVERSAL EM PROCESSO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE
RESINA (RTM)

RIO GRANDE - RS

2016

FABIANE VALENTE HÄRTER

**ESTUDO NUMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE
TRANSVERSAL EM PROCESSO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE
RESINA (RTM)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza

Coorientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Rio Grande, março, 2016.

FABIANE VALENTE HÄRTER

“Estudo Numérico para a Determinação da Permeabilidade Transversal em Processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM)”

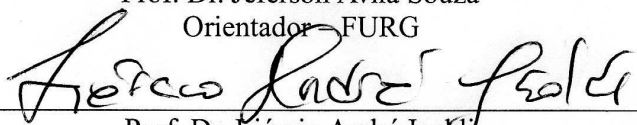
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em

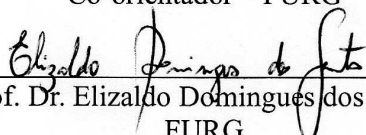
BANCA EXAMINADORA



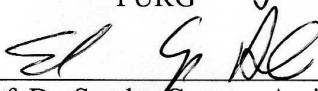
Prof. Dr. Jefferson Avila Souza
Orientador – FURG



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Co-orientador – FURG



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
FURG



Prof. Dr. Sandro Campos Amico
UFRGS

“O pensar é para o homem, o que é voar para os pássaros.”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu saúde e força para realização deste trabalho.

Ao meu admirável orientador Prof. Dr. Jeferson Avila Souza por sua orientação, dedicação, compreensão e paciência, sem os quais esse trabalho não teria sido realizado.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Liércio André Isoldi, que sempre teve disponibilidade de ajudar e pelas suas sugestões esclarecedoras para a concretização deste trabalho.

A minha mãe, meu esposo e meus filhos que sempre estiveram comigo me dando apoio, me ajudando nos momentos mais difíceis dessa trajetória. Em especial a minha incansável mãe Maria Emília pelo carinho, amor, dedicação, incentivo e cuidado para com meus filhos durante todo o tempo de minha ausência.

Ao prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos pelas suas contribuições, disponibilidade em ajudar e pela tranquilidade que me transmite.

Ao prof. Dr. Sandro Campos Amico pelas suas contribuições e pela liberação da doutoranda Clarissa Angrizani para realização de ensaios no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) da Escola de Engenharia nos dias que estive na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A Stephanie Nunes e a Clarissa Angrizani pela acolhida em seus lares durante minha estadia em Porto Alegre.

Aos meus colegas Letícia Hood, Carlos Alberto Bertin e Glauciléia Magalhães pela amizade, pelo apoio, incentivo e por compartilharem as angústias durante o curso.

Aos meus colegas de mestrado Carlos Eduardo Ferreira, Roberto Aguiar, Vanessa Oliveira, Cândila Plamer, Eliciana Aldrighi, Renata Alonso, Jaque Scotton e Gleyber Amaral pela amizade e parceria nos estudos.

Ao bolsista de Iniciação Científica Thiago Teixeira pelo auxílio nos estudos dos aplicativos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande pela oportunidade, pelo apoio e suporte prestado.

À CAPES pelo financiamento dos estudos.

E a todos que direta ou indiretamente, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O processo RTM (Resin Transfer Molding) é utilizado para a produção de materiais compósitos poliméricos de geometrias simples ou complexas em peças pequenas ou de grande porte, apresentando em todos os casos uma boa qualidade das peças produzidas. O processamento por RTM consiste no posicionamento da pré-forma dentro do molde. Esta pré-forma seca constitui um meio poroso fibroso, através do qual ocorrerá o escoamento da resina. O molde é então fechado, e em seguida a resina é injetada para o interior da cavidade do molde, até o reforço fibroso ser totalmente impregnado. Terminado o processo de cura, o molde é aberto e a peça é retirada. Para garantir a qualidade das peças produzidas, os parâmetros físicos do reforço (assim como da resina) necessitam ser corretamente avaliados, entre eles destaca-se a determinação da permeabilidade do meio. Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia numérico/experimental para a determinação da permeabilidade transversal de reforços utilizados no processo RTM. O software PAM-RTM foi usado para simular o escoamento da resina em um meio poroso. Para tanto é utilizado o método FE/CV (Finite Element/Control Volume) combinado com a técnica FAN (Flow Analysis Network). A metodologia proposta utiliza o método de estimativa de parâmetros inversos para calcular a permeabilidade transversal desconhecida. O método de Newton-Raphson foi utilizado para a solução das equações algébricas associadas a solução do problema, na qual o software PAM-RTM é utilizado para os cálculos dos tempos de injeção. Os resultados mostraram que com o conhecimento das permeabilidades no plano (k_{xx} e k_{yy}), as propriedades físicas da resina (ρ , μ), a porosidade do meio (ϵ) e o tempo total de preenchimento do molde (t), é possível prever a permeabilidade transversal de peças espessas. Neste trabalho também foi realizado um estudo numérico a fim de avaliar o comportamento da linha de frente da resina em função da variação da permeabilidade transversal do meio. Este estudo revelou que é possível prever os problemas associados com a injeção de resina na moldagem de peças espessas quando a permeabilidade transversal é muito pequena se comparada com as permeabilidades no plano. Finalmente, é possível afirmar que os resultados apresentados neste estudo mostram que o projeto do molde e a escolha correta do reforço fibroso podem ser otimizados quando técnicas numéricas são utilizadas.

Palavras chaves: Permeabilidade transversal, Newton-Raphson, RTM, PAM-RTM

ABSTRACT

Resin Transfer Molding (RTM) process is commonly used to produce high quality polymeric composites with simple or complex geometries in small to large sizes. In RTM process a preformed reinforcement is positioned inside the mold cavity. This dry reinforcement is actually a fibrous porous media whereby resin will flow. The mold is then closed and the resin is injected. After complete impregnation of the reinforcement, resin cure process takes place. Finally, mold is opened and final piece is removed. In order to guarantee the quality of the produced pieces, reinforcement (as well as resin) physical properties must be precisely evaluated. Media permeability is one of the most important parameter to be evaluated. In this work it is proposed a new numerical/experimental methodology to determine transverse permeability in reinforcements used within RTM process. PAM-RTM software was chosen to simulate resin flow through the reinforced medium by the FE/CV (Finite Element/Control Volume) method combined with the FAN (Flow Analysis Network) technique. Proposed methodology uses the inverse parameter estimation method to calculate the unknown permeability. Newton-Raphson method was used to solve the associated algebraic equation system, on which PAM-RTM software is used to calculate resin injection times. Results have shown that with previous knowledge of the in-plane permeabilities (k_{xx} and k_{yy}), physical properties of the resin (ρ , μ), medium porosity (ϵ) and total filling time (t) it is possible to estimate transverse permeability in thick pieces. It was also performed a numerical study about the influence of transverse permeability in resin flow inside the mold. This study predicted several possible problems that may occur when transverse permeability is much smaller than in-plane permeabilities. Finally, it is possible to state that results presented in this study show that mold design and proper fibrous reinforcement choice can be optimized when numerical techniques are used.

Keywords: Transverse permeability, Newton-Raphson, RTM, PAM-RTM

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Fases Constituintes dos Materiais Compósitos.....	17
1.2 Escoamento em Meios Porosos	19
1.3 Processamento de Compósitos.....	19
1.3.1 Resin Transfer Molding (RTM)	20
1.4 Motivação	24
1.5 Objetivos.....	25
1.5.1 Objetivo Geral	25
1.5.2 Objetivos Específicos	25
1.6 Organização da Dissertação.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Modelagem Computacional do Processo de RTM	29
2.2 A Permeabilidade no Processo de RTM	33
2.3 Métodos de Medição da Permeabilidade	35
2.3.1 Permeabilidade no Plano	35
2.3.2 Permeabilidade Transversal.....	40
3. MODELO COMPUTACIONAL	44
3.1 Introdução à CFD.....	44
3.2 Modelagem Matemática do Processo de RTM.....	46
3.3 Método Volume of Fluid – VOF	47
3.4 Método Finite Element / Control Volume - FE/CV com o emprego da técnica FAN (Flow Analysis Network).....	49
4. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE	52
4.1 Método de Escoamento Retilíneo	52
4.2 Método de Escoamento Radial	56
5. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO NO PAM–RTM	60
5.1 Verificação do modelo computacional no plano: Escoamento Retilíneo	60
5.2 Verificação do modelo computacional no plano: Escoamento Radial	63
6. RESULTADOS	65
6.1 Determinação da Permeabilidade: caso Retilíneo.....	65
6.2 Determinação da Permeabilidade: caso Radial.....	67
6.3 Determinação da Permeabilidade: caso Transversal.....	69
6.3.1 Estudo de Independência de Malha	69
6.3.2 Determinação de k_{zz}	72
6.4 Estudo da influência da permeabilidade transversal no processo de RTM	75
6.4.1 Análise dos Resultados.....	82

7. CONCLUSÕES.....	84
7.1 Sugestão para Trabalhos Futuros	84
REFERÊNCIAS	85
Apêndices.....	93
Apêndice A: Gerador de malha GMSH	93
Apêndice B: Criação do modelo no PAM–RTM.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Manta de fibra de vidro. Fonte: http://centralfibra.com.br	16
Figura 1.2 - Pás eólicas. Fonte: http://blogdoplastico.wordpress.com	17
Figura 1.3 - Fases de um material compósito. Adaptado de Daniel e Ishai (1994).....	17
Figura 1.4 - Meio poroso preenchido por um ou dois fluidos. (a) um fluido: ar (b) dois fluidos: ar e resina. Adaptado de Coutinho, (2013).....	19
Figura 1.5 - Esquema da moldagem por RTM (Coutinho, 2013).....	22
 Figura 2.1 - Fluxograma do algoritmo numérico. Adaptado de Oliveira (2010).	31
Figura 2.2 - Equipamentos usados no método de medição radial com pressão constante para medição da permeabilidade (Amorim, 2007).	36
Figura 2.3 - Ensaio de medição de permeabilidade no plano em um molde. a) Escoamento retilíneo b) Escoamento radial (Schmidt, 2007b).....	37
Figura 2.4 - Elipsoide tridimensional apresentando o escoamento do fluido na direção Z (Amorim, 2007).....	40
Figura 2.5 - Método de medição da permeabilidade transversal. Adaptado de Amorim, (2007).	41
Figura 2.6 - Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Drappier et al., (2002).	41
Figura 2.7 - a) Método com termistores posicionados nos eixos x, y e z para medir a permeabilidade. b) Sensores posicionados ao longo da espessura com o PAM-RTM.....	42
 Figura 3.1 - Etapas da simulação numérica (Gomes, 2010).....	44
Figura 3.2 - Interface do software GMSH.....	45
Figura 3.3 - Interface do software PAM-RTM.....	46
Figura 3.4 - Esquema do método FE/CV com a técnica FAN. Adaptado de Oliveira (2010).	51
Figura 3.5 - Determinação da linha de frente (Oliveira, 2010).	51
 Figura 4.1 - Relação entre Q e ΔP para um fluxo unidimensional a vazão constante (Liang, 2000).....	52
Figura 4.2 - Vista superior do molde para determinação da permeabilidade em fluxo unidimensional (Han, 2000).	53
Figura 4.3 - Esquema de fluxo para determinação da permeabilidade transversal (Han, 2000).	53
 Figura 5.1 - Domínio computacional: caso retilíneo	61
Figura 5.2 - Preenchimento do meio poroso: caso retilíneo PAM-RTM: $t = 5$ s, $t = 60$ s, $t = 120$ s.....	62
Figura 5.3 - Solução do escoamento retilíneo: analítica x PAM-RTM	62
Figura 5.4 - Domínio computacional: caso radial	63
Figura 5.5 - Solução do escoamento radial: analítica x PAM-RTM.....	64
Figura 5.6 - Preenchimento do meio poroso: caso radial PAM-RTM.....	64
 Figura 6.1 - Permeabilidade k_{xx} : método Newton-Raphson (Caso Retilíneo).....	67
Figura 6.2 - Permeabilidade k_{xx} : método Newton-Raphson (Caso Radial)	69
Figura 6.3 - Domínio Computacional tridimensional.....	70
Figura 6.4 - Malha gerada pelo GMSH	71
Figura 6.5 - Permeabilidade k_{zz} : método Newton-Raphson (Caso Transversal).....	74
Figura 6.6 - Domínio computacional para estudo de caso	75

Figura 6.7 - Malha construída no GMSH.....	76
Figura 6.8 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ em 4 s: (a) vista inferior (b) vista de corte.....	78
Figura 6.9 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. (a) 63 s e (b) 610 s.....	78
Figura 6.10 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. (a) 136 s e (b) 1572 s	79
Figura 6.11 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$. (a) 3097 s, (b) 3097 s e (c) 3987 s.....	80
Figura 6.12 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$: (a) 778 s, (b) 778 s e (c) 5726 s	81
Figura 6.13 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$: (a) 1530 s, (b) 1530 s e (c) 9462 s.....	82
Figura 6.14 - Posição da frente de escoamento da resina na direção Z para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Propriedades Físicas: Caso Retilíneo	60
Tabela 6.1 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Retilíneo..	66
Tabela 6.2 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Radial	68
Tabela 6.3 - Estudo de independência de malha para o PAM-RTM	71
Tabela 6.4 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Transversal	73
Tabela 6.5 - Teste de independência de malha para o estudo de casos	76
Tabela 6.6 - Propriedades Físicas: Estudo de Casos	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	Área transversal [m ²]
C_1, C_2	Constantes de Integração
$\vec{F}$	Termo de força [N]
f	Fração volumétrica
f'	Derivada da função f
$\vec{g}$	Gravidade [m/s ²]
i, j, k, l	Índices
N	Iterações
P_0	Pressão de injeção [Pa]
$Q_i(t)$	Vazão volumétrica dentro da célula i [m ³ /s]
R	Posição do escoamento radial [m]
r_0	Posição inicial do escoamento radial [m]
$\vec{v}$	Velocidade do fluido [m/s]
$\vec{\tau}$	tensor de tensões [Pa]
T	Tempo [s]
t_{ana}	Tempo analítico [s]
t_{exp}	Tempo experimental [s]
t_{num}	Tempo numérico [s]
V_i	Volume total da célula i [m ³]
$V_i^f(t)$	Volume do fluido preenchido na célula i no tempo t [m ³]
VF	Volume de fibras
X, Y, Z	Direções dos eixos x, y e z
x_f	Posição da linha de frente do fluido [m]
z_f	Posição da linha de frente do fluido na espessura [m]

Letras Gregas

ΔP	Variação da pressão [Pa]
ΔL	Variação do comprimento [m]
$(\Delta t)_{\min}$	Tempo mínimo [s]
∇P	Gradiente de pressão [Pa]
α	Coefficiente angular
ε	Porosidade
k	Permeabilidade [m^2]
k_{xx}	Permeabilidade na direção X [m^2]
k_{yy}	Permeabilidade na direção Y [m^2]
k_{zz}	Permeabilidade na direção Z [m^2]
k_{ij}	Tensor de permeabilidade
μ	Viscosidade do fluido [Pa.s]
ρ	Massa específica [kg/m^3]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
LCM	<i>Liquid Composite Molding</i> (Moldagem Líquida de Compósitos)
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
LRTM	<i>RTM Light</i>
SCRIMP	<i>Seemann's Composites Resin Infusion Molding Process</i>
SRIM	<i>Structural Reaction Injection Molding</i>
VARTM	<i>Vaccum-Assisted Resin Transfer Molding</i>
TERTM	<i>Thermal Expansion Resin Transfer Molding</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
MEF	Método de Elementos Finitos
MDF	Método de Diferenças Finitas
MVF	Método de Volumes Finitos
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
FE/CV	<i>Finite Element / Control Volume</i> (Elementos Finitos / Controle de Volume)
FAN	<i>Flow Analysis Network</i>

1. INTRODUÇÃO

Compósitos poliméricos são materiais formados por uma fase contínua polimérica denominada matriz (polímero termoplástico ou termorrígido) reforçada por uma fase descontínua, chamada de reforço, mais forte e resistente, havendo uma interface reconhecível entre eles. A fase contínua polimérica pode ser resina de poliéster, epóxi, éster vinílica entre outras. Normalmente a fase descontínua é formada por fibra de vidro (Fig. 1.1), aramida (kevlar) ou de carbono dependendo da aplicação final. As fibras naturais da bananeira, carauá, juta e sisal, por exemplo, também podem ser utilizadas como reforço. Na moldagem, as duas fases se acoplam proporcionando ao material final propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade. Leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência e adaptabilidade são algumas das propriedades dos compósitos. Devido às suas características e à variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço, os compósitos poliméricos apresentam uma excelente resistência mecânica que possibilita a sua utilização em diversas aplicações (ALMACO, 2014).



Figura 1.1 - Manta de fibra de vidro. Fonte: <http://centralfibra.com.br>

A aplicação dos materiais compósitos surgiu inicialmente na área aeronáutica devido à necessidade de diminuição de peso, preservando as propriedades mecânicas dos componentes estruturais. Uma grande variedade de peças em materiais compósitos pode ser encontrada nos aviões em substituição aos materiais metálicos, como por exemplo, fuselagem, portas de trem de aterrissagem, portas internas, entre outras. Atualmente as aplicações de materiais compósitos vão desde chassis, peças de acabamento interno de veículos a aplicações médicas (confeção de próteses ortopédicas externas e internas), passando pelas aplicações em mercados avançados como militar e espacial. Também substituem de forma crescente, os

materiais tradicionais em aplicações de engenharia como construção de plataformas off-shore e de equipamentos para a extração de petróleo em alto-mar, nos transportes e no setor de energia nas pás e torres eólicas (Fig. 1.2). O potencial de utilização dos materiais compósitos é amplo (Resende, 2000; Amorim, 2007).



Figura 1.2 - Pás eólicas. Fonte: <http://blogdoplastico.wordpress.com>

1.1 Fases Constituintes dos Materiais Compósitos

Na combinação em escala macroscópica das fases constituintes (matriz e reforço) uma fase chamada interface, aparece entre o reforço e a matriz, como ilustra a Fig. 1.3. Cada uma das fases desempenha papéis bem definidos na estrutura do material (Daniel e Ishai, 1994).

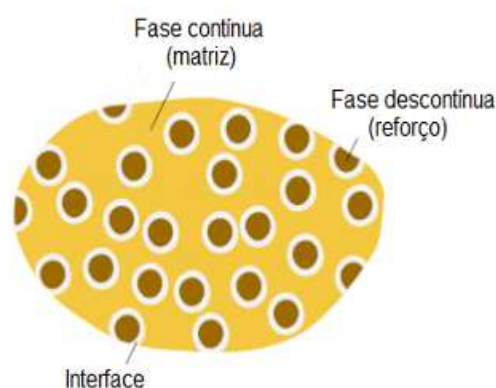


Figura 1.3 - Fases de um material compósito. Adaptado de Daniel e Ishai (1994).

A matriz é a responsável por transferir os esforços mecânicos para o reforço e por garantir maior tenacidade, resistência à fadiga e resistência à corrosão do material compósito e também proteger o reforço de agentes externos sendo estes danos físicos e ambientais. Os

reforços, constituídos por materiais sólidos, não solúveis e mais resistentes do que a matriz, têm geralmente o papel de aumentar a resistência mecânica do material e influenciar as diversas características estruturais do material produzido: a distribuição das partículas ou fibras determina a homogeneidade ou uniformidade, enquanto geometria e orientação afetam a anisotropia (Daniel e Ishai, 1994).

A interface entre fibra e matriz é o “coração” dos materiais compósitos. Sua estrutura e suas propriedades determinam o desempenho mecânico e a integridade estrutural dos compósitos reforçados por fibras. Mesmo com tamanho reduzido, pode desempenhar um papel importante nos mecanismos de falha, resistência à fadiga e no comportamento tensão-deformação do material (Daniel e Ishai, 1994).

As matrizes poliméricas em particular são bastante utilizadas, pois além de outras características, apresentam baixa densidade, boa ductilidade (propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura) e são fáceis de fabricar. Há dois tipos principais de polímeros: termorrígidos (termofixos) e termoplásticos. Os termoplásticos encontram-se em fase sólida à temperatura ambiente, tornando-se fluidos quando aquecidos a altas temperaturas e voltando a se solidificar quando resfriados. Os termorrígidos são líquidos à temperatura ambiente e se solidificam por um processo químico chamado cura, onde sofrem reações químicas irreversíveis, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se materiais rígidos, infusíveis e insolúveis (Crawford, 1998).

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos dependem de diversos fatores: como propriedades dos materiais constituintes (fibra e matriz), orientação do reforço, fração volumétrica das fases (razão entre o volume ocupado por uma fase e o volume total do compósito), geometria do reforço (forma e dimensões), processo de fabricação aplicado e principalmente a aderência entre os componentes (Nechwatal et al., 2003).

As fibras de vidro são o principal reforço utilizado em compósitos poliméricos, pois oferecem uma boa combinação de resistência, rigidez e custo. Os compósitos reforçados com fibra de carbono em geral apresentam melhores propriedades mecânicas (rigidez e resistência) do que os reforçados com fibra de vidro, porém apresentam custo mais elevado. Além disso, temos compósitos com fibra de aramida, também conhecida como kevlar, que apresentam alto custo e são muito utilizados para aplicações com alto impacto, por exemplo, na fabricação de coletes à prova de balas. Há trabalhos que envolvem a utilização simultânea de dois tipos de fibra, chamados de compósitos híbridos, proporcionando ao compósito moldado vantagens que com apenas um dos reforços não seria possível (Leitão, 2007).

1.2 Escoamento em Meios Porosos

Um meio poroso é caracterizado pela presença de espaços vazios de tamanhos e formas variadas entre as partículas sólidas que o compõem. Ao material sólido dá-se o nome de matriz sólida enquanto os espaços vazios são chamados de poros. (Muskat e Wyckoff, 1946).

Os poros podem ser preenchidos por um ou mais fluidos. A Fig. 1.4 (a) ilustra os poros preenchidos por um fluido, o ar, enquanto a Fig. 1.4 (b) ilustra os poros preenchidos por dois fluidos o ar e a resina. Kaviany (1995) afirma que só existe escoamento nos espaços vazios da matriz porosa onde existem poros interconectados, quando se formam canais por onde o fluido pode escoar.

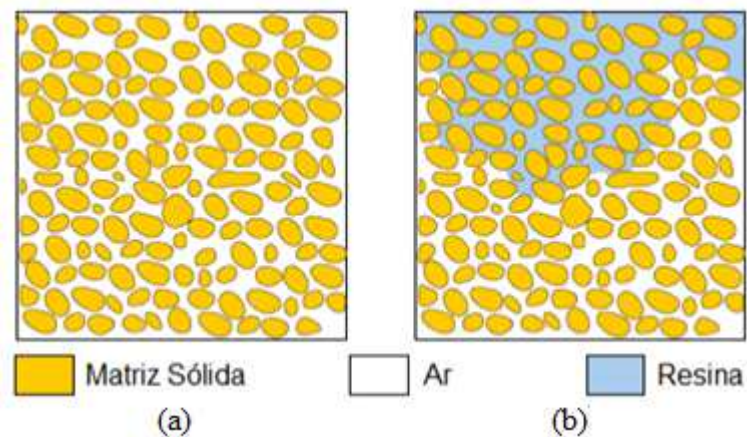


Figura 1.4 - Meio poroso preenchido por um ou dois fluidos. (a) um fluido: ar (b) dois fluidos: ar e resina. Adaptado de Coutinho, (2013).

1.3 Processamento de Compósitos

Uma vantagem dos materiais compósitos é que eles podem ser facilmente moldados em formas mais complexas que os materiais metálicos (Quilter, 2004). Existem diversos métodos de produção. A escolha deve ser feita de acordo com alguns parâmetros, como quantidade de peças a serem produzidas, geometria e acabamento desejado, tipo de aplicação etc (Vafai, 2005).

Alguns destes métodos de produção se enquadram em um grupo conhecido como Moldagem Líquida de Compósitos: LCM (*Liquid Composite Molding*), que corresponde a uma família de processos que inclui:

- *Resin Transfer Molding* (RTM);
- *RTM Light* (LRTM);
- Infusão;
- *Seemann's Composites Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP);
- *Structural Reaction Injection Molding* (SRIM);
- *Vaccum-Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM);
- *Thermal Expansion Resin Transfer Molding* (TERTM), entre outros.

Todos estes processos são baseados no mesmo princípio: uma pré-forma seca de fibra é colocada em um molde. A resina líquida termorrígida é injetada nesse molde fechado sob alguma combinação de pressão e/ou vácuo com o objetivo de saturar todos os espaços vazios (poros) e, depois de impregnar totalmente o reforço, a matriz se solidifica tomando a forma do molde. Em seguida a peça pode ser retirada (Amorim, 2007; Garay, 2010).

Em processos do tipo LCM, resinas termoplásticas são raramente utilizadas uma vez que apresentam alta viscosidade. São preferíveis as resinas termorrígidas que, devido às baixas viscosidades, mantêm as pressões de injeção em níveis moderados e facilitam o molhamento do reforço fibroso (Goodman, 1998).

Na literatura são encontrados os diversos processos de LCM. Como este trabalho se refere a RTM, apenas este processo será discutido.

1.3.1 Resin Transfer Molding (RTM)

O processo de Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (*Resin Transfer Molding*) foi impulsionado nos últimos anos pela indústria aeroespacial, automobilística, naval, civil e de materiais esportivos, entre outras, pois podem ser obtidos produtos com excelente controle de suas propriedades mecânicas, com formas complexas, com grandes dimensões a um custo mais acessível. Esta tecnologia é constituída por três etapas básicas: pré-processamento, processamento ou injeção e pós-processamento (Fig. 1.5). No pré-processamento a pré-forma, ou reforço, é cortada nas dimensões desejadas, preparada e posicionada no molde. Esta pré-forma seca constitui um meio poroso fibroso, através do qual ocorre o escoamento da resina, ou seja, a resina escoia através de rede de canais e caminhos formados pelos espaços vazios situados entre os fios das fibras (Coutinho, 2013). Em seguida, o molde é fechado e a pré-forma é comprimida. O molde de RTM deve possuir pelo menos

uma entrada, para injeção da resina, e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Na preparação do molde, antes do posicionamento das fibras dentro da cavidade, o mesmo é recoberto com um desmoldante a fim de que, após a cura da resina, o compósito acabado possa ser retirado sem nenhum prejuízo em sua estrutura.

Durante o processo, a resina é bombeada com pressão de injeção compreendida entre 1 e 10 bar, pois valores maiores podem ocasionar o arrasto das fibras (*fiber wash*), deflexão do molde/contramolde e a formação de vazios no compósito. Vazios em compósitos são prejudiciais às propriedades mecânicas do material final (Garay, 2010).

No processamento ou injeção, a resina vai preenchendo o molde e o reforço fibroso é impregnado. O controle desta etapa pode ser feito pela pressão de injeção da resina ou por sua vazão. Ainda nessa etapa deve ser feito um monitoramento do processo para verificação se que o mesmo está se desenvolvendo corretamente. Cita-se como exemplos de fatores a serem monitorados a pressão de injeção, os pontos de injeção e o acompanhamento da resina nos pontos de saída do molde, entre outros. Destaca-se que se os pontos de entrada e saída não estiverem devidamente posicionados no molde, nem todos os espaços vazios serão preenchidos e regiões do reforço ficarão secas. A resina utilizada deve ter uma viscosidade baixa (≤ 1 mPa.s) para uma boa impregnação do reforço e para que o tempo de injeção não seja elevado (Neto e Pardini 2006).

No pós-processamento, de acordo com Neto e Pardini (2006), acontece a cura da resina que é feita em *in-situ* (com molde à temperatura ambiente ou aquecido), e posteriormente o molde é aberto para a desmoldagem do compósito, que pode ainda requerer operações de acabamento.

Para que uma moldagem seja considerada adequada, é necessário que o ar do meio poroso fibroso seja totalmente eliminado, ou seja, que o meio poroso seja completamente saturado pela resina. Isso acarreta a inexistência de espaços vazios no reforço. Caso ocorra impregnação parcial do reforço pela resina, seções da pré-forma permanecerão secas o que pode resultar em defeitos no compósito moldado (Leclerc e Ruiz, 2008; Luz, 2011).

O perfil do escoamento da resina depende de fatores como a geometria do molde, propriedades dos materiais e parâmetros, como permeabilidade e porosidade do meio, a viscosidade da resina e a pressão de injeção. Os parâmetros de processo/material merecem um cuidado especial e devem obrigatoriamente ser otimizados numa etapa anterior até mesmo à de projeto e construção do molde (Shojaei et al., 2003a).

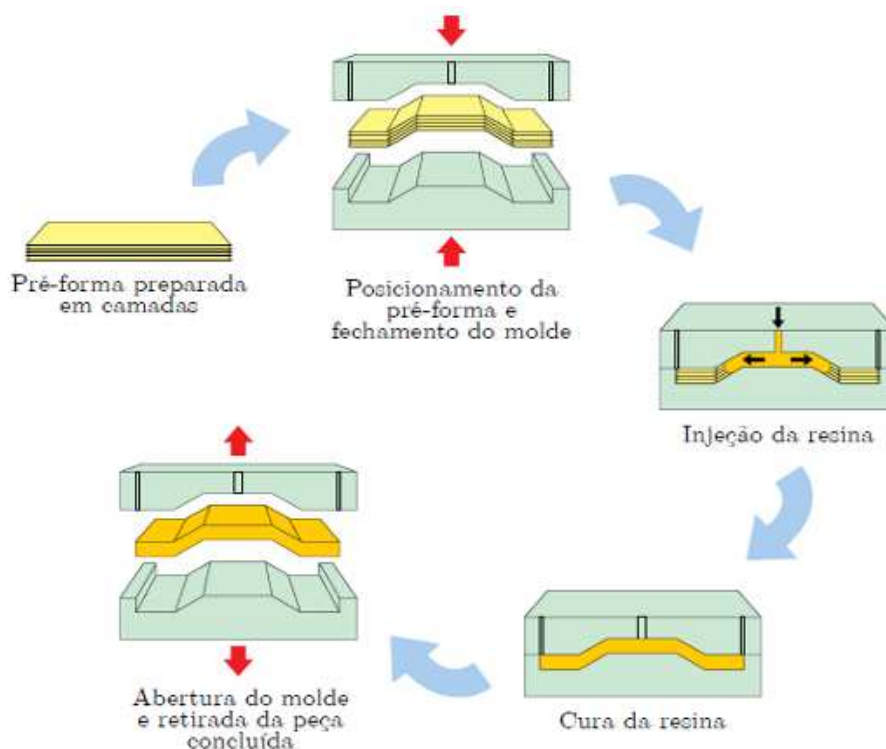


Figura 1.5 - Esquema da moldagem por RTM (Coutinho, 2013)

Alves (2006) observa que uma das principais desvantagens que o processo de RTM apresenta é a dificuldade de se projetar os moldes. Isso ocorre devido à grande dificuldade em se determinar com precisão as posições de entrada e saída da resina. Uma das ferramentas que pode auxiliar nesse procedimento é a simulação numérica do processo de injeção de resina.

Shojaei et al. (2003a) destaca que em simulações de processos de RTM, é comum estudar o escoamento apenas em escala macroscópica, onde o preenchimento do molde pela resina é analisado como o escoamento de um fluido através do meio poroso. O escoamento macroscópico é governado pelo gradiente de pressões no interior do molde e leva ao preenchimento do mesmo (Shojaei et al., 2003b).

De acordo com Oliveira et al. (2011), algumas vantagens que o processo de RTM apresenta em relação a outras moldagem de fabricação, são: baixo custo de mão de obra; ferramental simples; fabricação de estruturas complexas com qualidade; utilização de vários tipos de resina; baixa pressão de injeção; peças com as duas fases lisas; escala de produção; peças com dimensões diferentes e formas variadas; controle de processo; redução de emissão de estireno (menor impacto ambiental) e possibilidade de produzir compósito com alta fração volumétrica de fibra.

Outra vantagem do processo de RTM é que o mesmo pode ser automatizado, resultando em altos volumes de produção e menor desperdício de material. Os ciclos de injeção são curtos e rápidos, o que resulta em menor uso de mão-de-obra e menor manuseio com a resina (Beckwith e Hyland, 1999; Song, 2003; Hexcel, 2005; Davie, 2007).

Não existe uma regra única, quanto ao processo de fabricação, cada vez mais peças de diferentes geometrias podem ser fabricadas por mais de um processo. Entretanto, de maneira geral, o processo RTM é mais indicado para peças espessas maiores do que 10 mm (Berchtold, 2006; Coutinho, 2013).

As propriedades mecânicas de compósitos moldados por RTM dependem da fração volumétrica de fibras (%VF), da arquitetura da pré-forma fibrosa e do teor de vazios. Em muitos casos, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com o aumento da fração volumétrica de fibras que, entretanto, requerem maiores pressões de injeção, o que pode afetar significativamente as propriedades do compósito moldado (Olivero et al., 2004). Para conseguir o máximo de propriedades mecânicas dos compósitos produzidos por RTM, cada fibra deve estar completamente “molhada” pela resina líquida e a quantidade de vazios deve ser a menor possível (Amorim, 2007).

Segundo Shojaei et al. (2003a), falhas no processo de injeção podem levar a situações indesejadas, tais como: vazios no interior do molde, necessidade de altos níveis de pressão, tempos de injeção demasiadamente longos, deformação do molde, deslocamento e deformação da pré-forma em locais próximos aos pontos de injeção. A ocorrência ou não destas situações, bem como sua intensidade, é fortemente influenciada pelo comportamento do fluxo da resina.

O processo RTM apresenta grande dificuldade no que diz respeito ao controle de vazios durante a injeção. Isso acontece porque a impregnação das fibras ocorre durante o processo de moldagem. O controle da formação de vazios é necessário já que estes podem provocar problemas estruturais e alteração nas propriedades mecânicas dos componentes produzidos, diminuindo assim sua qualidade (Amico, 2005).

De acordo com Amorim (2007), ao se fabricar uma peça de material compósito por RTM, não se pode apenas se preocupar com o desempenho da mesma, mas também a sua possibilidade de ser processada, ou seja, não adianta apenas definir a arquitetura da pré-forma para suportar determinada carga, mas também simultaneamente definir qual a permeabilidade do meio poroso fibroso para que a peça possa ser fabricada por RTM.

De acordo com Souza et al. (2012), a modelagem computacional desenvolve papel importante no estudo do processo de RTM. Através desta é possível determinar o escoamento da resina no interior do molde, o aparecimento de regiões não-preenchidas (na verdade, bolhas de ar) e desta forma prever possíveis falhas no seu preenchimento e consequentes problemas na peça final produzida. No entanto, para que seja possível a obtenção de resultados realísticos com a modelagem computacional, são necessárias informações precisas sobre as propriedades físicas da resina e do reforço fibroso. Uma adequada determinação da permeabilidade do meio é determinante para a simulação computacional do escoamento da resina e para o processo de fabricação real, evitando assim a fabricação de peças defeituosas (Hoes et al., 2002).

A grande maioria dos modelos numéricos utilizados na modelagem do escoamento da resina em moldes de RTM baseia-se na Lei de Darcy. Desta forma torna-se necessário o conhecimento prévio da permeabilidade do meio e a viscosidade da resina. A qualidade dos resultados obtidos numericamente está diretamente associada à medição precisa destas propriedades (Souza et al., 2012).

Segundo Sharma e Siginer (2008), existe um grande número de estudos na literatura que discutem a determinação experimental da permeabilidade (k) do reforço em problemas de RTM. A maioria deles se concentra na permeabilidade no plano (k_{xx} e k_{yy}) e apenas alguns se concentram na permeabilidade transversal (k_{zz}). Esta constatação pode ser justificada pela dificuldade de medir experimentalmente essa propriedade. Em virtude disto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia que combina dados experimentais e simulações numéricas para a determinação das permeabilidades do reforço fibroso, no plano (*in-plane*), k_{xx} e k_{yy} e também transversal k_{zz} .

1.4 Motivação

A motivação do presente estudo é desenvolver uma simulação numérica capaz de representar fielmente o comportamento do fluido escoando no reforço fibroso durante o processo de RTM e utilizar esta simulação para o desenvolvimento de uma metodologia que permita determinar as permeabilidades do reforço fibroso, contribuindo para o avanço acadêmico nesta área.

Também motiva este estudo o fato de existirem um número limitado de trabalhos sobre o assunto: determinação da permeabilidade transversal em meios porosos. Além do custo e da dificuldade em medir experimentalmente esta propriedade.

Destaca-se ainda que os compósitos poliméricos são cada vez mais utilizados, crescendo também o interesse por novas tecnologias, como por exemplo, o emprego da modelagem computacional. Neste caso, a busca por novas tecnologias se dá pela possibilidade de obter modelos matemáticos que representem um determinado problema, sendo possível reduzir os custos e o tempo de produção, além da possibilidade de obter peças com melhores qualidades finais.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo científico na área de moldagem por transferência de resina de materiais compósitos, buscando propor uma metodologia alternativa para a determinação das permeabilidades (k_{xx} , k_{yy} e k_{zz}) de meios porosos utilizados no processo de RTM. Para tanto o estudo combinará resultados experimentais com o auxílio da simulação computacional usando o software PAM-RTM.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ✓ Simular numericamente como ocorre o avanço da resina dentro do molde, sendo capaz de determinar a posição de linha de frente do escoamento da resina em função do tempo;
- ✓ Determinar as permeabilidades no plano (k_{xx} e k_{yy}) a partir de dados experimentais de pressão de injeção e posição da linha de frente da resina em função do tempo de injeção;
- ✓ Determinar a permeabilidade transversal (k_{zz}) a partir de dados experimentais de pressão de injeção e posição da linha de frente da resina em função do tempo de injeção.

1.6 Organização da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida nos seguintes capítulos: Capítulo 1 - Introdução, Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, Capítulo 3 – Modelo Computacional, Capítulo 4 – Determinação da permeabilidade, Capítulo 5 – Verificação do Modelo Numérico Desenvolvido no PAM-RTM, Capítulo 6 - Metodologia e Resultados, Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros.

No presente capítulo é apresentada uma introdução sobre materiais compósitos e seu processamento, destacando o processamento por RTM, a motivação para realização deste trabalho acerca do problema de determinação da permeabilidade transversal em compósitos expondo uma justificativa. Além disso, foram traçados os objetivos que se pretende atingir e por fim apresentada a organização da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre aspectos teóricos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho. Dentre os principais temas abordados estão: modelagem computacional do processo de RTM, descrevendo os dois principais métodos numéricos de solução das equações que descrevem o escoamento da resina dentro do molde no processo de RTM, a importância da permeabilidade no processo de RTM destacando fatores que a influenciam e um levantamento dos métodos de medição da permeabilidade no plano e transversal.

O Capítulo 3 exibe uma introdução à dinâmica dos fluidos computacional, com a modelagem matemática do processo de RTM e os equacionamentos matemáticos dos métodos numéricos apresentados no capítulo 2.

O Capítulo 4 apresenta um detalhamento matemático das soluções analíticas para determinação da permeabilidade através dos métodos de escoamento retilíneo e radial.

O Capítulo 5 apresenta a verificação do modelo numérico desenvolvido no software PAM-RTM para o escoamento retilíneo e radial.

O Capítulo 6 apresenta a metodologia proposta para determinação da permeabilidade no plano e transversal e discussão dos resultados. Ainda nesse capítulo foi realizado um estudo numérico de caso a fim de avaliar o comportamento da frente de escoamento de fluido através da variação da permeabilidade transversal.

O Capítulo 7 traz as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros, visando o avanço da pesquisa sobre a permeabilidade transversal em materiais compósitos.

Além disto, são elencadas as referências utilizadas ao longo da dissertação. Como informações complementares foram dispostos dois apêndices, o primeiro sobre o gerador de malha GMSH e o segundo sobre a criação do modelo no software PAM-RTM.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Maliska (2004) afirma que o engenheiro ou projetista tem à sua disposição, fundamentalmente, três ferramentas para desenvolver seu projeto ou analisar seu problema: métodos analíticos; métodos numéricos e experimentação em laboratório.

Os métodos analíticos apresentam muitas limitações, pois só podem ser aplicados em problemas cujas hipóteses simplificadoras não os desviam demasiadamente do fenômeno físico real e em geometrias simples. No entanto, têm um papel importante no que diz respeito à verificação dos métodos numéricos (Oliveira, 2014).

Com relação à experimentação em laboratório, sua grande vantagem é o fato de tratar com a configuração real. Ela é, entretanto, normalmente de custo elevado, e muitas vezes não pode ser realizada por questões de segurança, ou pela dificuldade de reprodução das condições reais. Na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, ela é, muitas vezes, a única alternativa disponível ao projetista (Rosman, 2001). Os métodos analíticos e à experimentação em laboratório são indispensáveis para a validação dos métodos numéricos.

Os métodos numéricos são uma poderosa alternativa para soluções que exigem cálculos complexos. Antes da invenção dos computadores eletrônicos, tudo era feito manualmente. O resultado nem sempre era o esperado. Como o processo exigia a realização de uma grande quantidade de tarefas lentas e tediosas, não era incomum que um pequeno erro comprometesse toda a solução. Desde os anos 50, a crescente melhoria na capacidade de processamento e armazenamento dos computadores promoveram uma explosão no uso e desenvolvimento de métodos numéricos, possibilitando a obtenção de soluções rápidas para modelos mais fiéis aos problemas físicos estudados, sem a necessidade de introduzir tantas simplificações (Chapra e Canale, 2009).

Os métodos numéricos (ou simulação computacional) praticamente não apresentam restrições, podendo ser utilizados para resolver problemas complicados, com contornos definidos em geometrias complexas e gerar resultados em um relativo curto período de tempo, tornando-se mais rápida e econômica em relação aos outros métodos. O método numérico deve resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. As técnicas numéricas para a resolução de problemas complexos de engenharia e de física têm sido utilizadas para obter resultados satisfatórios, especialmente devido ao desenvolvimento de computadores de

alto desempenho e de grande capacidade de armazenamento (Gonçalves, 2007). O que precisa ser feito é a associação adequada da simulação numérica com experiências em laboratório. A união dessas técnicas resultará em um projeto melhor e de menor custo. Não existem dúvidas de que esse é o caminho da engenharia moderna, em que a simulação numérica desempenhará, cada vez mais, um papel decisivo nos custos e na qualidade do projeto, caminhando lado a lado com a experimentação de laboratório.

No passado resultados satisfatórios só poderiam ser obtidos pela correta escolha dos materiais, variáveis do processo e desenho do molde pelo método de tentativa e erro. Uma vez que esta abordagem era bastante morosa e que acarretava custos, foram desenvolvidos programas para a simulação do escoamento de resina que se tornaram importantes na fase do projeto. Estas simulações fornecem uma aproximação do tempo de enchimento do molde, distribuição de pressão e a previsão do caminho percorrido pelo escoamento. Também permitem prever a localização dos pontos de entrada e saída de ar, a progressão do escoamento e a localização da linha de frente do escoamento. Isto possibilita, entre outras coisas, a identificação de regiões onde possivelmente ocorrerá a formação de vazios, possibilitando assim, a fabricação do molde sem que seja necessário um número elevado de onerosos ensaios em laboratório (Silva, 2008). O rigor da simulação depende da exatidão das propriedades do material que são inseridas, em particular a permeabilidade do meio.

Para obter uma solução numericamente aproximada é necessário usar um método de discretização que aproxime as equações diferenciais através de um sistema de equações algébricas, que pode ser solucionado computacionalmente. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios no espaço e/ou no tempo, e então a solução numérica gera resultados em localizações discretas no espaço e no tempo. Assim como resultados experimentais dependem da qualidade dos equipamentos utilizados, a precisão da solução numérica é dependente da qualidade da discretização usada (Ferziger e Peric, 1997).

Segundo Versteeg e Malalasekera (1999), a análise de sistemas, através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, é conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A qual é uma ferramenta de simulação de problemas capaz de trabalhar com geometrias complexas e simular o avanço e a cura da resina dentro do molde. CFD apresenta as seguintes vantagens: redução significativa de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados.

2.1 Modelagem Computacional do Processo de RTM

Em modelagens por RTM, softwares de simulação computacional ou programas de simulação são utilizados para prever o perfil de injeção de resina e, assim, avaliar o tempo de preenchimento, além de determinar pontos de impregnação deficiente e também os pontos de injeção e de saída de resina/ar (Tan et al., 2007). Por isso, alguns parâmetros devem ser conhecidos como viscosidade da resina, permeabilidade do meio, pressão de injeção e geometria da peça (Oliveira, 2014).

Modelar o escoamento da resina num meio poroso (processo RTM) não é uma tarefa fácil. A modelagem é complexa envolvendo as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e a Lei de Darcy. A solução destas equações pode ser obtida de forma analítica (com severas simplificações) ou numérica, via softwares comerciais ou códigos desenvolvidos pelo próprio usuário (Oliveira, 2014).

Os dois métodos numéricos de solução das equações que descrevem o escoamento da resina dentro do molde no processo de RTM mais comumente utilizados são: o método de Volume de Fluido (*Volume of Fluid* - VOF) e o método de Elementos Finitos / Controle de Volume (*Finite Element / Control Volume* – FE/CV) com o emprego da técnica FAN (*Flow Analysis Network*).

O Método VOF, proposto por Hirt e Nichols (1981), resolve problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor de dois ou mais fluidos imiscíveis. É um método geral que pode ser utilizado para qualquer tipo de problema (Maliska e Vasconcellos, 1998). Considerando os problemas de RTM como bifásicos (resina/ar), então através do VOF, é possível identificar a posição da interface entre esses fluidos. As fases são bem separadas e o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra.

No método VOF, uma equação de transporte é escrita para determinar a fração de volume de cada fluido no interior dos volumes da malha. Esta equação, combinada com as equações de continuidade e de movimento formam um conjunto de equações diferenciais parciais que devem ser resolvidas simultaneamente com um MEF, MDF ou MVF (Silva, et al., 2008).

Segundo Maliska e Vasconcellos (1998), o VOF aplicado a problemas bifásicos, é um método que tem como ideia básica a resolução de uma nova equação diferencial, para a fração volumétrica, para cada volume de controle, onde o valor desta variável é igual a zero se o volume está vazio, igual a um se o volume está completo e um valor entre zero e um para os

volumes parcialmente preenchidos.

Kuan et al. (2000) realizaram uma modelagem de um escoamento bifásico em meios porosos onde o método VOF é aplicado no detalhamento do escoamento dos dois fluidos envolvidos ar e resina durante o processamento por RTM. Efetuaram ensaios utilizando resina e reforço fibroso de mantas de fibra de vidro. Os resultados obtidos com os experimentos foram comparados com os modelos numéricos desenvolvidos e mostraram uma boa concordância.

Oliveira (2010) realizou um estudo numérico do processo de RTM aplicado a problemas com uma ou mais camadas de reforço fibroso. Para este estudo desenvolveu uma metodologia para a aplicação do software FLUENT, já que este é um aplicativo geral de CFD. O método VOF foi utilizado para resolver o problema bifásico (ar/resina) no processo de RTM. A validação das soluções foram obtidas através da comparação dos resultados experimentais com soluções analíticas encontradas na literatura.

Porto (2012) propôs um modelo numérico, desenvolvido no pacote FLUENT para estudar o comportamento do escoamento da resina, onde o método VOF foi utilizado para tratar o problema do preenchimento do molde no processo de LRTM (RTM Light) aplicado em peças empregadas na área de Engenharia Naval.

Atualmente a simulação numérica é uma ferramenta fundamental na execução de um projeto de engenharia devido a suas características. Neste contexto, é possível verificar que nos trabalhos de CFD, aplicados ao processo de RTM, muitas vezes, os pesquisadores tem buscado empregar o modelo VOF em suas simulações numéricas, devido a sua capacidade de tratar adequadamente a interação entre resina e ar.

Outro método bastante utilizado para resolver problemas de moldagem por transferência de resina é o método Elementos Finitos / Controle de Volume – FE/CV. Phelan Jr. (1997), combinou a técnica FAN (*Flow Analysis Network*) com este método, que apresenta um modelo numérico, baseado na Lei de Darcy para a solução do escoamento em meios porosos. A técnica FAN, segundo Phelan Jr. (1997), foi originalmente desenvolvida por Tadmor et al. (1974) para uso com o MDF, e mais tarde modificada para uso com o MEF por Hieber e Shen (1980) e por Wang (1986).

Phelan Jr. (1997) usou a técnica com o objetivo de prever o movimento da superfície livre da resina. O MEF foi utilizado para resolver a equação de Laplace escrita para a pressão. Esta resulta da combinação da Lei de Darcy com a equação de conservação da massa para um

fluido incompressível e escoamento permanente. Neste trabalho são apresentadas vantagens importantes para a época e muito valorizadas pela comunidade científica como, por exemplo, a garantia da conservação da massa no escoamento e a simplicidade da solução. Foi demonstrada a importância da técnica através da simulação do processo de injeção em peças complexas. Estes resultados mostram o potencial do método FE/CV com o emprego da técnica FAN, a qual é capaz de prever, de forma rápida, possíveis problemas de propagação da resina no interior do molde e desta forma evitar possíveis problemas estruturais na peça final.

De acordo com Oliveira (2010), o método FE/CV com o emprego da técnica FAN consiste basicamente em resolver uma equação diferencial parcial para a pressão, determinando desta forma o gradiente de pressões e a partir deste utilizar a Lei de Darcy para determinar o campo de velocidades. São calculados também o tempo de preenchimento de pelo menos um volume de controle e o fator de preenchimento de cada volume, a cada etapa da simulação.

A técnica FAN foi descrita como sendo um processo iterativo para o rastreamento da localização da frente de escoamento em problemas de dinâmica de fluidos que envolvem o escoamento com uma superfície livre e tem a vantagem de utilizar uma malha fixa. O processo baseia-se no cálculo do escoamento e na determinação da posição da linha de frente do escoamento a cada passo de tempo. Este processo é repetido até que o molde esteja cheio. O algoritmo numérico da técnica FAN está descrito no fluxograma da Fig. 2.1 apresentado por Phelan (1997), Souza et al. (2008) e Oliveira (2010). Destaca-se que Souza et al. (2008) utilizaram o MVF para determinar o campo de pressões e Oliveira (2010) o software PAM-RTM.



Figura 2.1 - Fluxograma do algoritmo numérico. Adaptado de Oliveira (2010).

A metodologia utilizada pelo software comercial PAM-RTM, em especial, não é explicitada, não existe na literatura informações detalhadas sobre o assunto. No manual do software é informado que as simulações que envolvem a resolução da Lei de Darcy, utilizando-se elementos finitos não-conformes, que somente aceitam malhas com elementos triangulares e tetragonais (Luz, 2011). Baseado nas informações disponíveis bem como no comportamento da simulação e nas variáveis de controle utilizadas, acredita-se que a metodologia utilizada seja o método FE/CV com a técnica FAN (Oliveira, 2010; Luz, 2011).

Silva et al. (2008) descreveram uma simulação numérica do processo de RTM aplicado à modelagem do transporte de resina através de um reforço fibroso. Utilizaram dois métodos para as simulações, o VOF e a técnica FAN. A solução com o método VOF foi obtida com o software FLUENT enquanto que um MVF foi combinado com a técnica FAN. Explicaram a vantagem da utilização do MVF sendo que o mais usado é MEF. Compararam os métodos e concluíram que o método VOF por resolver um conjunto de equações diferenciais requer uma malha mais refinada do que a metodologia proposta com a técnica FAN.

Souza et al. (2011) propuseram uma metodologia para minimizar o problema da conservação de massa apresentado quando o método FE/CV é usado com MEF. A metodologia desenvolvida utiliza o método de volumes finitos para determinar os campos de pressão e a técnica FAN para detectar a frente de escoamento. Os resultados encontrados mostraram que a metodologia proposta é eficiente para determinar a frente de fluxo de resina e uma boa estimativa do fluxo de massa através das faces dos volumes, assegurando a conservação de massa, mesmo para malhas sem refinamento.

Oliveira et al. (2011) realizaram uma comparação dos métodos VOF e FE/CV aplicados à solução de problemas de RTM. Para esta comparação utilizou as soluções numéricas apresentadas pelo FLUENT e pelo PAM-RTM e obteve uma excelente concordância entre esses modelos e os resultados experimentais. Destacou que esse resultado satisfatório tem ligação direta com a consideração de variação de pressão no começo do escoamento, pois se a pressão tivesse sido erroneamente considerada constante durante todo o processo de injeção, o gradiente de pressão teria sido superestimado no início da simulação. Observou que diferentemente do método VOF, a técnica FE/CV não apresenta problemas de convergência por apresentar uma solução numérica mais simples.

Além do trabalho de Oliveira et al., (2011), outros pesquisadores também utilizaram este método FE/CV com a técnica FAN com bastante êxito, entre eles destaca-se, Bruschke e Advani (1990), Shojaei (2006), Souza et al., 2008 e Isoldi et al., (2012).

2.2 A Permeabilidade no Processo de RTM

Collins (1961) define a permeabilidade como uma propriedade intrínseca do meio poroso que indica o quão fácil é para um fluido escoar no seu interior. De forma semelhante, Barros (2008) descreve a permeabilidade (K) como um tensor que está relacionado à resistência ao escoamento do fluido no meio poroso fibroso, e indica a área da secção transversal do meio poroso por onde escoa o fluido, por isso sua unidade é em m^2 .

Amorim (2007) destaca que a permeabilidade dos materiais é provavelmente uma das mais importantes propriedades para o processamento por RTM, já que da mesma depende o tempo de enchimento do molde e consequentemente a taxa de produção. As propriedades mecânicas também estão relacionadas com a permeabilidade uma vez que a impregnação e molhamento das fibras pela resina são necessários para que se obtenha o máximo de desempenho do compósito. Schmidt et al. (2007a) destacaram que a medida de permeabilidade é fundamental para o estudo numérico de RTM pois, a partir desta informação é possível prever o avanço da linha de frente da resina dentro do molde.

Em aplicações de engenharia, dependendo de como algumas de suas propriedades variam dentro de sua estrutura, os materiais de reforço podem ser separados em três subgrupos: isotrópicos, ortotrópicos ou anisotrópicos. Um reforço é dito isotrópico, quando suas propriedades materiais são as mesmas em todas as direções. Um reforço é chamado ortotrópico quando as propriedades são simétricas em três planos perpendiculares entre si. Um reforço anisotrópico apresenta propriedades materiais diferentes em todas as direções (Case et al., 1999).

De acordo com Coutinho (2013), segundo essa classificação de anisotropia, o tensor permeabilidade (k) apresenta características distintas dependendo do tipo do material.

Em um meio anisotrópico, tem-se:

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Caso o meio seja ortotrópico, a permeabilidade é:

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Em meios isotrópicos, o tensor assume o valor de um escalar (Sharma e Siginiier, 2008).

$$k = k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} \quad (2.3)$$

onde k_{ij} são as permeabilidades nas respectivas direções.

O cálculo da permeabilidade ou sua estimativa é muito importante para o processamento de compósitos pelo processo de RTM. Dados precisos acerca da permeabilidade do meio são imprescindíveis para se alcançar resultados realísticos (Chen et al., 2010; Shojaei et al., 2003b).

A permeabilidade é influenciada por vários fatores como a arquitetura do reforço, a compressibilidade das fibras, número de camadas do reforço, a porosidade do meio e a espessura da peça.

O tipo de reforço influencia diretamente a permeabilidade, podendo aumentá-la ou reduzi-la, dependendo da maneira que as fibras estão arranjadas. É mais permeável na direção das fibras (longitudinal) que na transversal. Um reforço com mais entrelaçamento entre os fios, terá mais canais entre os feixes de fibra por onde a resina poderá fluir com maior facilidade. Quando as fibras do tecido não possuem um entrelaçamento, como é o caso de tecidos não tramados, haverá menor quantidade de canais entre os feixes de fibra, dificultando o escoamento da resina, diminuindo a permeabilidade. Em geral, quanto mais entrelaçado for o reforço, maior será a permeabilidade ao escoamento da resina e melhor será o processo de injeção da resina.

Endruweit e Ermanni (2004) mostraram em seu trabalho a influência da variação da arquitetura dos tecidos de reforço sobre a forma da frente de escoamento da resina quando a mesma é injetada sobre os tecidos. Verificaram que o tecido de cetim apresenta uma frente de escoamento de resina quase que praticamente elíptica já que o mesmo é fabricado com fibras finas garantindo uma maior homogeneidade da porosidade e consequentemente uma melhor

distribuição de permeabilidade. Com o tecido tipo de sarja observaram que não apresenta uma frente de escoamento elíptica já que o mesmo é fabricado com fibras grossas gerando uma porosidade de menor homogeneidade, consequentemente uma não homogênea distribuição de permeabilidade.

Com certeza, um dos fatores que mais influencia a permeabilidade é a compressibilidade dos tecidos já que a mesma pode alterar a porosidade da pré-forma e consequentemente o valor da permeabilidade. Quando se comprime um tecido, de uma forma geral, há o fechamento dos poros, consequentemente uma diminuição da permeabilidade (Amorim, 2007). De acordo com Prado (2009) a compressibilidade do reforço é muito importante para os processos de injeção, e afeta tanto o material como o processamento do compósito. Quando o reforço é comprimido, as fibras ficam mais compactadas e a fração de volume de fibras aumenta. Isto reduz a espessura do compósito, reduz a permeabilidade e reduz a porosidade livre da pré-forma para o escoamento da resina.

Nos processos onde o escoamento da resina ocorre através da espessura, a pressão de injeção é igual à pressão de compactação do reforço. Consequentemente, a permeabilidade e a espessura do reforço podem variar durante todo o processo e dependem da pressão que está sendo utilizada. Entretanto, aumentando a pressão do fluido aumentará a pressão de compactação e reduzirá a permeabilidade. Embora isto não ocorra com frequência, pode ser possível em certos casos, que um aumento na pressão de injeção aumenta o tempo de injeção. Para a maioria dos reforços, a redução na espessura tende a compensar uma redução na permeabilidade por meio da espessura (Masterbergen, 2004).

Com relação à porosidade do reforço fibroso, Lekakou et al. (1996) realizaram um estudo para mostrar a influência desta na permeabilidade. Verificaram que variando a espessura do molde, pode-se alterar a porosidade de uma pré-forma. Para um mesmo número de camadas e diferentes valores de espessura do molde, altera-se a porosidade e consequentemente a permeabilidade, podendo-se obter valores com uma ordem de grandeza de diferença.

2.3 Métodos de Medição da Permeabilidade

2.3.1 Permeabilidade no Plano

Sharma e Siginier (2008) destacam que os quatro tipos mais comuns de métodos de medição de permeabilidade em compósitos fibrosos que existem na literatura são: escoamento unidirecional com pressão constante, escoamento unidirecional com velocidade constante,

escoamento radial com pressão constante e escoamento radial com velocidade constante.

As permeabilidades no plano são normalmente denominadas por k_{xx} e k_{yy} . Através de experimentos é possível medir cada permeabilidade isoladamente ou as duas juntas. Na primeira situação este método é denominado de método de medição de escoamento retilíneo ou método de medição de escoamento unidirecional e na segunda, de método de medição de escoamento radial. Esses dois métodos são os mais utilizados para medir a permeabilidade no plano. Tais métodos de medição de permeabilidade requerem controlar a velocidade ou a pressão do fluido (Sharma e Siginiier, 2008).

Amorim (2007) utilizou o método de medição de escoamento radial com pressão constante para determinar a permeabilidade. Esse método faz uso de um molde onde pelo menos uma das faces é transparente. A posição da frente de escoamento da resina ou fluido é obtida pela filmagem da sua imagem se espalhando radialmente no meio poroso. A Fig. 2.2 ilustra o equipamento.

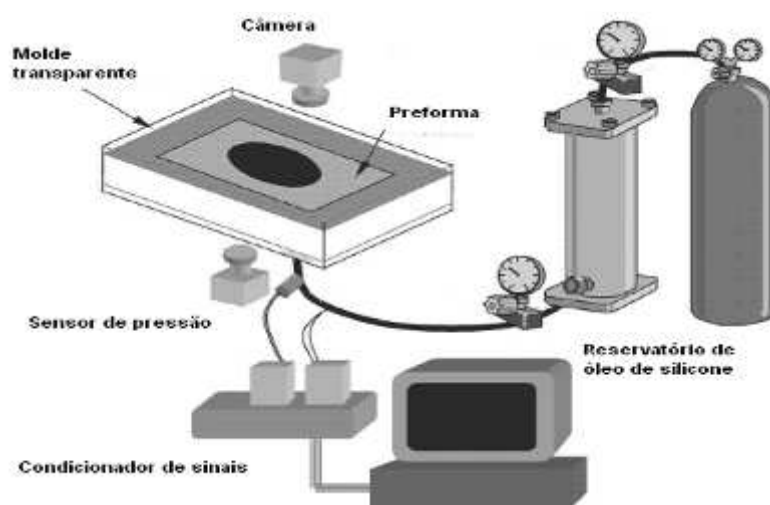


Figura 2.2 - Equipamentos usados no método de medição radial com pressão constante para medição da permeabilidade (Amorim, 2007).

O método de escoamento retilíneo consiste no posicionamento da pré-forma no interior do molde, com entrada de resina em uma das extremidades e saída de ar na outra. Já no método de escoamento radial, a injeção da resina é feita através de um ponto no centro do molde e as saídas de ar podem ser localizadas nos cantos do molde (Gauvin e Trochu, 1998). Os valores da permeabilidade são calculados a partir de dados colhidos no monitoramento do escoamento, tais como: históricos de vazão (ou pressão) de injeção, pressão no interior do molde e a progressão da linha de frente do escoamento (George, 2011). Assim, é comum a

parte superior do ferramental ser projetada de material transparente, para permitir observar o avanço da frente do escoamento enquanto transdutores medem o campo de pressão em várias posições no interior do molde (Ferland et al., 1996).

Schmidt (2007b), Garay (2010), Oliveira (2010) e Lugo (2013) realizaram ensaios de escoamento retilíneo para determinar a permeabilidade no plano. O procedimento inicia com o registro, através de uma câmera digital, do avanço da linha de frente da resina x_f . As fotos são tiradas em intervalos regulares de tempo. As leituras dos transdutores de pressão e o tempo foram sincronizados possibilitando que a permeabilidade seja determinada através da declividade da curva de ajuste linear originada no gráfico x_f^2 em função do tempo. Observaram que quanto maior a declividade, maior será a permeabilidade.

A Figura 2.3 mostra ensaios de permeabilidade através de métodos de escoamento retilíneo e radial, respectivamente, em um molde de dimensões 310 mm x 150 mm realizados por Schmidt (2007b).

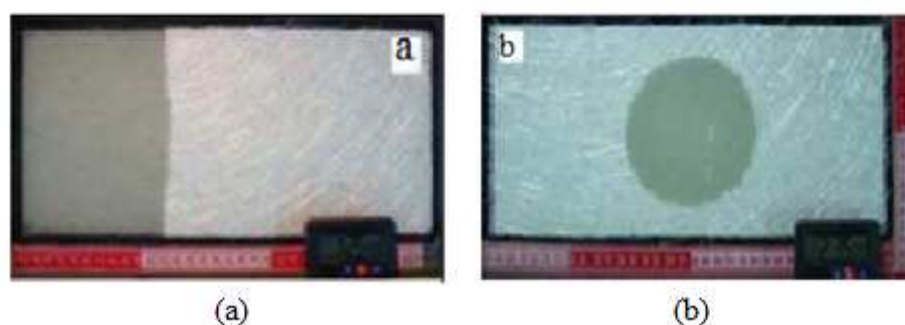


Figura 2.3 - Ensaio de medição de permeabilidade no plano em um molde. a) Escoamento retilíneo b) Escoamento radial (Schmidt, 2007b)

No método de medição de escoamento retilíneo, a linha de frente do escoamento é plana e no método de medição de escoamento radial, a linha de frente é um círculo se o meio for isotrópico ou uma elipse se o meio poroso for ortotrópico (Shojaei et al., 2003b).

Weitzenböck et al. (1999a) demonstraram a influência do diâmetro e da forma do furo de injeção no valor da permeabilidade e chegaram à conclusão de que para cada diâmetro do furo de injeção existe um faixa de tempo para que a frente de escoamento de formato elíptico se estabilize.

Weitzenböck et al. (1999b) explicaram o método de escoamento radial de medição de permeabilidade. Este estudo também explica a determinação das direções principais da permeabilidade no caso do meio poroso ser anisotrópico.

Lundström et al. (2000) realizaram um estudo para comparar diferentes técnicas de medição de permeabilidade sobre diferentes reforços. Neste estudo verificaram uma boa repetitividade, mas, ainda assim, uma grande dispersão de valores está presente, causado pelo processo de fabricação dos reforços, manuseio, preparação das amostras e taxa de compressão quando o molde é fechado.

Luo et al. (2001) determinaram através do método de medição de escoamento radial que a permeabilidade no plano de um reforço de gramatura 700 g/m^2 variou entre $14,6 \times 10^{-10}$ e $1,87 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para um volume de fibra variando entre 19 e 40%, utilizando óleo de silicone como fluido de impregnação à temperatura ambiente. Já para um reforço de gramatura 420 g/m^2 , para uma faixa de volume de fibra entre 43 e 53% a permeabilidade variou entre $4,73 \times 10^{-10}$ e $0,75 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

Hoes et al. (2002) propuseram uma ferramenta, que permite a medição de permeabilidade no plano de todos os tipos de reforços não condutores de uma maneira razoavelmente rápida. Glicose é injetada centralmente utilizando queda de pressão constante. A viscosidade precisa ser medida antes de cada ensaio, para evitar erros devido a pequenas alterações de temperatura ou desvios na concentração. Durante a medição, a queda de pressão precisa ser bem controlada. As posições da frente de fluxo em função do tempo são registradas usando sensores em várias localizações. Os sensores são orientados em diferentes direções (0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90° , 180° , 270°) para poder definir as direções principais dos reforços. Juntamente com as posições dos sensores e o tempo de chegada de resina, é possível extrair as direções principais e as respectivas permeabilidades. Com essa ferramenta, foi encontrada uma larga dispersão de valores de permeabilidade. Uma das principais razões para esta grande dispersão é o empilhamento das camadas.

Por outro lado, Shin et al. (2006) realizando ensaios de escoamento radial para medir a permeabilidade no plano de um reforço de mantas de fibra de vidro com diferentes frações volumétricas de fibra e utilizando óleo de silicone como fluido de impregnação verificaram que para a fração volumétrica de 42% a permeabilidade é $7,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ enquanto que para a fração volumétrica de 56% a permeabilidade diminuiu para $6,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

No trabalho de Schmidt et al. (2007a) foram realizados estudos sobre a medida de permeabilidade em mantas de fibra de vidro utilizando óleo de soja como fluido de impregnação do reforço. As medidas de permeabilidade foram realizadas por dois métodos de escoamento: o retilíneo e o radial. Para o escoamento retilíneo do fluido (óleo) os valores de permeabilidade estiveram entre $1,20 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ para um VF de 17,7 % a $1,80 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para um VF de 33,9 %. Já para o escoamento radial, as medidas de permeabilidade estiveram entre $5,42 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para um VF de 23,5 % a $1,78 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para um VF de 36,3 %. De acordo com os autores, pode-se constatar que, aumentando o VF e mantendo a pressão constante, acontece uma diminuição nos valores de permeabilidade, tanto nas infiltrações retilíneas como radiais.

Garay (2010) realizou ensaios de permeabilidade com o método de escoamento retilíneo sob pressão de injeção constante. Como fluido impregnante usou resina adicionada de partículas de carbonato de cálcio. Os resultados obtidos mostraram que quanto maior o teor de CaCO_3 na resina menor é a permeabilidade no plano e maior é o tempo de preenchimento do molde. Atribuiu esta diminuição à presença de CaCO_3 entre as fibras, diminuindo os vazios do meio fibroso, dificultando o escoamento da resina. Verificou também que para o VF de 20% a permeabilidade é maior que para o VF de 25 ou 30% e que o tempo de preenchimento é menor.

Souza et al. (2012) propôs uma metodologia para determinar a permeabilidade no plano de reforços em compósitos de RTM. A metodologia é genérica para n dimensões, mas neste trabalho foi aplicada a problemas 1D e 2D e validada com êxito com a solução analítica encontrada na literatura. Esta metodologia combina a solução numérica obtida através do método VOF contida no software OpenFOAM com o método de Newton-Raphson para resolver o sistema não linear de equações algébricas.

Existe na literatura um número grande de métodos para medição da permeabilidade no plano consolidados. Sharma e Siginier (2008) fizeram uma boa revisão destes métodos. Os métodos de medição de permeabilidade no plano podem ser verificados através de soluções analíticas.

2.3.2 Permeabilidade Transversal

Para caracterizar por completo um meio poroso fibroso, é necessário medir todas as componentes do tensor permeabilidade (k_{xx} , k_{yy} e k_{zz}). O desafio para medir a permeabilidade na direção da espessura ou permeabilidade transversal (k_{zz}) é que a frente de escoamento não é tão facilmente observada como a frente de escoamento de fluido no plano (George, 2011). Na Fig. 2.4 a frente de escoamento é um elipsoide tridimensional em desenvolvimento nas três direções X, Y e Z.

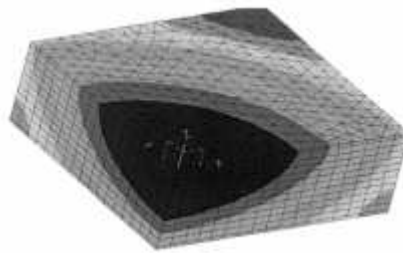


Figura 2.4 - Elipsoide tridimensional apresentando o escoamento do fluido na direção Z (Amorim, 2007)

A equação básica para medição da permeabilidade transversal é a equação de Darcy, apresentada neste trabalho pela Eq. (2.2) que agora deve ser aplicada não mais no plano mas sim ao longo da espessura. Drapier et al., (2002) descrevem a equação da Lei de Darcy como:

$$Q = \frac{-k_{zz} A \Delta P}{\mu \Delta L} \quad (2.2)$$

onde: Q é a vazão, k_{zz} é a permeabilidade transversal, A é a área da secção transversal da vazão, ΔP é a variação de pressão, ΔL é a espessura e μ é viscosidade.

Para usar a Lei de Darcy é necessário conhecer o valor da vazão do fluido e medir a diferença de pressão do escoamento da resina no interior do molde ou o inverso, conhecer o valor da diferença de pressão e medir a vazão do fluido. Diversos métodos surgiram para medição dessas grandezas físicas para, por meio da equação de Darcy, ter-se o valor de k_{zz} . A Fig. 2.5 ilustra o método de se medir a permeabilidade transversal apresentado por Drapier et al., (2002).



Figura 2.5 - Método de medição da permeabilidade transversal. Adaptado de Amorim, (2007).

Nesse método, a pré-forma fica no interior de um cilindro onde antes e depois da mesma se encontram os sensores de pressão. Aplicando a equação de Darcy, chega-se ao valor da permeabilidade transversal k_{zz} .

Um dos problemas desse método é o fato de não se ter uma maneira de se comprimir a pré-forma de forma homogênea e constante. Foi sugerido o uso de placas rígidas perfuradas para satisfazer essa função, porém a perda de carga devido ao uso dessas placas é maior que a perda de carga da pré-forma, inviabilizando assim essa ideia.

Os mesmos autores propuseram outro método para solucionar essas deficiências. Eles desenvolveram um equipamento para medição de permeabilidade transversal onde a pré-forma é fixada entre placas de alumínio alveolar e os sensores de pressão antes e depois da pré-forma continuam sendo aplicados. A Fig. 2.6 mostra o referido equipamento.

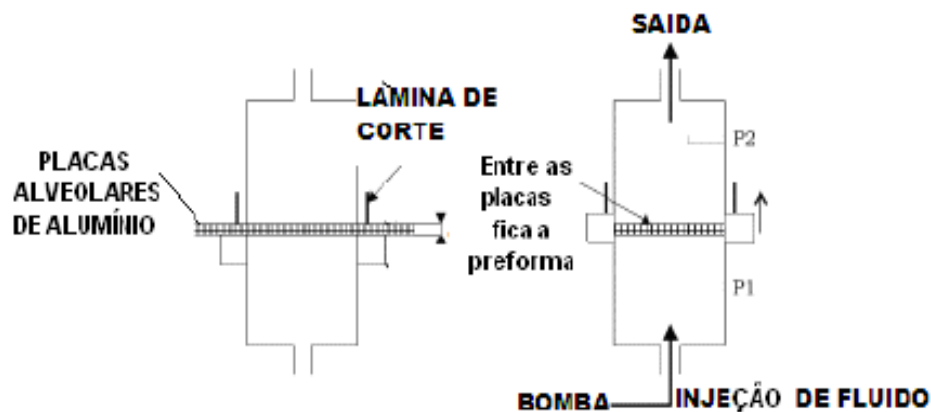


Figura 2.6 - Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Drappier et al., (2002).

Weitzenböck et al. (1998) usam termistores posicionados nos eixos x , y e z para medir a permeabilidade no plano e a permeabilidade transversal. Uma desvantagem desse método é que o sensor fica em contato direto com a resina, o que poderia interferir no resultado da medida. Cerca de 20 anos depois, esta ideia continua sendo proposta, nos projetos de simulações numéricas, especificamente no PAM-RTM, sensores são posicionados nas direções X , Y e Z para monitorar a posição da linha de frente do escoamento. Para posteriormente a permeabilidade transversal ser estimada. A Fig. 2.7 ilustra um comparativo da descrição acima.

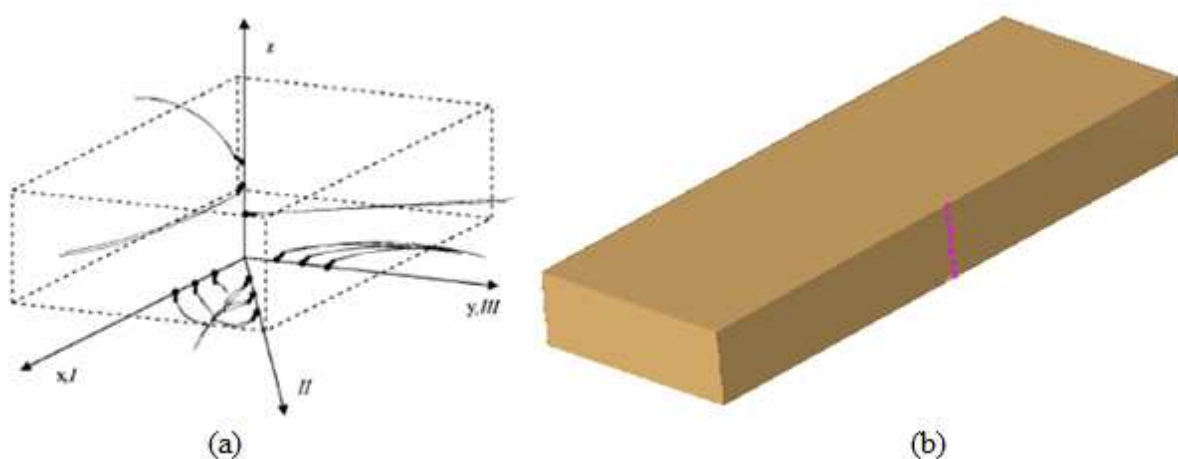


Figura 2.7 - a) Método com termistores posicionados nos eixos x , y e z para medir a permeabilidade. b) Sensores posicionados ao longo da espessura com o PAM-RTM.

Outro método capaz de acompanhar a frente de escoamento através da espessura no interior da pré-forma, que é opaca, é o proposto por Saouab et al. (2001). O método faz uso de espectroscopia de raios X , o que permite filmar a frente de escoamento no interior da pré-forma durante todo o período de injeção e em tempo real.

Woerdeman et al. (1995) apresentaram uma metodologia genérica para determinar as componentes do tensor de permeabilidade tridimensional a partir de um conjunto de experiências de fluxo unidimensional saturado. Os resultados são obtidos resolvendo numericamente seis equações algébricas altamente não-lineares, relativamente a permeabilidade efetiva para o tensor de permeabilidade.

Nedanov e Advani (2002) propuseram um método para a determinação simultânea dos principais valores do tensor de permeabilidade tridimensional de pré-formas de fibra. A montagem experimental consiste de uma balança eletrônica e uma câmera de vídeo capaz de gravar o fluxo de massa e a evolução da frente de fluxo no plano. O método de medição da Nedanov é baseado no monitoramento visual da posição da frente de fluxo no plano. A forma e tamanho da frente de escoamento no plano através da membrana transparente, bem como a quantidade de fluido no pré-molde e o tempo decorrido são registradas e permitem a caracterização da evolução da frente de fluxo tridimensional. O modelo matemático proposto, baseado na lei de Darcy, descreve o caso de um fluxo tridimensional com um ponto como porta de injeção.

Kim e Daniel (2003) apresentaram um método para a determinação da permeabilidade transversal utilizando a técnica estimativa de parâmetros inversos. O método baseia-se num procedimento de otimização que minimiza a diferença entre os tempos de injeção numéricos e experimentais medidos quando a injeção de resina atinge vários locais no interior do molde. A solução numérica foi obtida pelo método FE/CV. De acordo com os autores, o método proposto pode ser implementado facilmente e é capaz de produzir resultados confiáveis.

Turner e Hjelmstad (2005) realizaram um estudo sobre a influência de erros de medição experimental para a determinação do tensor permeabilidade. Usaram o método de Newton-Raphson para resolver o sistema algébrico de equações não lineares construído para calcular as componentes do tensor permeabilidade. Relataram vários pontos sobre a importância da inicialização correta das variáveis e também sobre a convergência do método.

Oliveira (2010) propôs uma técnica que combina dados experimentais com um procedimento numérico iterativo para o cálculo da permeabilidade transversal (k_{zz}) em problemas com reforço fibroso com múltiplas camadas obtendo resultados relevantes. Também propôs um novo equacionamento analítico bidimensional que descreve o avanço da resina em molde com múltiplas camadas.

3. MODELO COMPUTACIONAL

3.1 Introdução à CFD

De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam interfaces atrativas aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados. Para isso, estes códigos são divididos em três etapas principais: o pré-processamento, a solução (processamento) e o pós-processamento.

O pré-processamento é responsável por: definir a geometria, ou seja, o domínio computacional, dividindo-o em um número finito de subdomínios (geração da malha). Nesta etapa, as propriedades do fluido são definidas e as condições de contorno iniciais apropriadas são aplicadas.

Para segunda etapa existem três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais: o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1999).

Os pacotes de CFD estão equipados com versáteis ferramentas para a visualização dos resultados para realizar a etapa de pós-processamento (Versteeg e Malalasekera, 1999). Na Fig. 3.1 é possível observar esquematicamente as três fases de uma simulação numérica.



Figura 3.1 - Etapas da simulação numérica (Gomes, 2010)

Neste trabalho, foram utilizados dois aplicativos na modelagem computacional do processo de RTM. O GMSH para geração e discretização dos domínios computacionais (pré-processamento) e o PAM-RTM para a solução numérica e pós-processamento de modo a descrever o comportamento do escoamento da resina no interior do molde. O GMSH é um software livre (*openSource*) de fácil utilização (Geuzaine e Remacle, 2009). A construção da geometria é criada de forma interativa e apresenta uma excelente interface gráfica. A Fig. 3.2 mostra a interface do aplicativo.

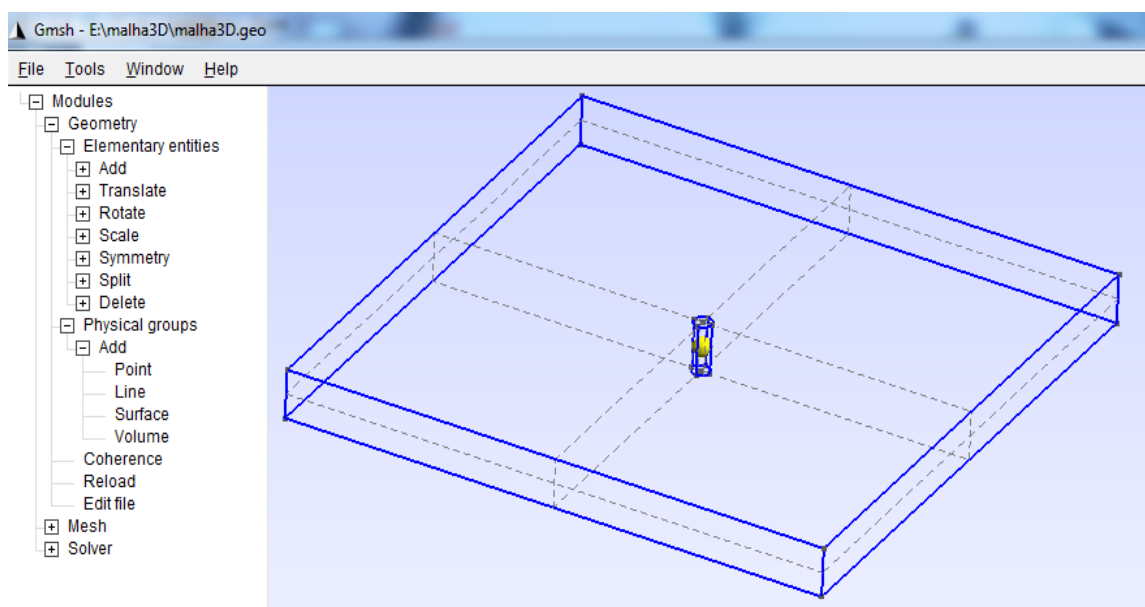


Figura 3.2 - Interface do software GMSH.

Já o PAM-RTM, é um software comercial da ESI Group (2014) comumente utilizado pela indústria porque possui uma linguagem simples e focada no processamento de RTM. Este software é dedicado exclusivamente ao estudo das moldagens de RTM. Não é necessário realizar adaptações ou implementar um sistema de carregamento de variáveis. Todos os dados da simulação são preenchidos em campos pré-determinados. Os dados gerados no processamento são carregados no próprio software. A Fig. 3.3 mostra a interface do aplicativo.

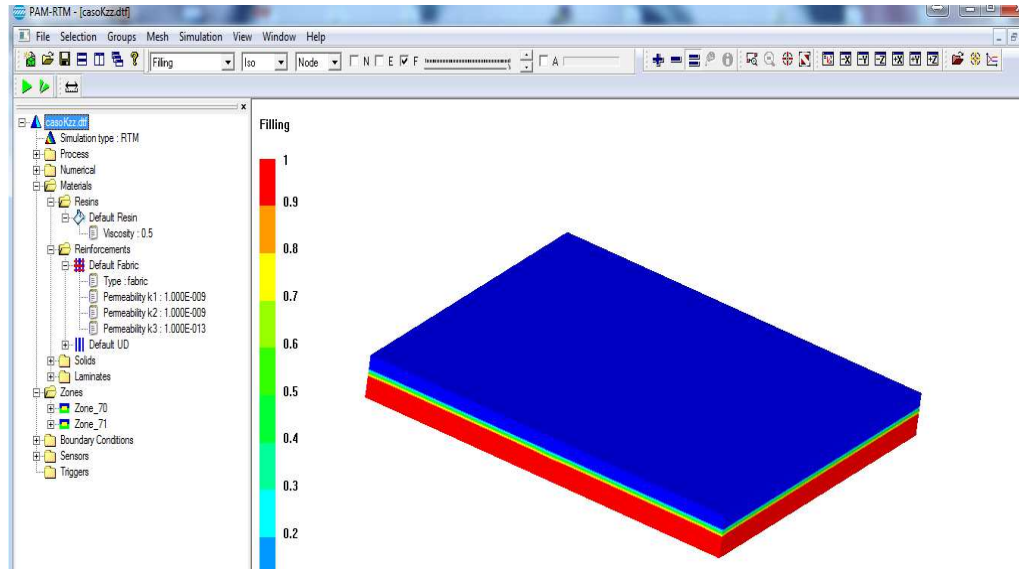


Figura 3.3 - Interface do software PAM-RTM.

Comas-Cardonaa et al. (2005) e Endruweit e Long (2011) utilizaram o PAM-RTM para simular o preenchimento do molde através de um fluxo transiente baseado na Lei de Darcy usando elementos finitos lineares não-conformes e incorporando o acompanhamento da frente de fluxo durante o processo de injeção.

3.2 Modelagem Matemática do Processo de RTM

O transporte de resina no interior do molde pode ser modelado como um escoamento em meio poroso, no qual a Lei de Darcy, que associa a velocidade do escoamento com o gradiente de pressões dentro do meio poroso pode ser utilizada como base teórica para a modelagem do problema físico (Bejan, 1995).

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (3.1)$$

onde $\vec{v}$ [m/s] é a velocidade do fluido, k [m²] a permeabilidade do meio poroso, μ [Pa.s] a viscosidade do fluido e P [Pa] a pressão.

Uma revisão de trabalhos publicados mostra que os modelos matemáticos disponíveis diferem muito em complexidade. Nestes modelos, o meio poroso é normalmente considerado homogêneo em relação à porosidade, mas eles podem ser isotrópicos, com a permeabilidade constante, ou anisotrópicos, quando a constante de permeabilidade, k , na Eq. (3.1) torna-se um tensor com componentes diferentes para cada direção.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.3 Método Volume of Fluid – VOF

Hirt e Nichols (1981) propuseram um método que resolve problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor de dois ou mais fluidos imiscíveis. Este método é denominado Volume de Fluido (Volume of Fluid - VOF). O método VOF possibilita identificar a posição da interface entre esses fluidos. As fases são bem separadas e o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra.

Considerando os problemas de RTM como bifásicos (ar/resina), para representação das fases dentro de uma célula (elemento), aplica-se o conceito de fração volumétrica f . Desta forma, o valor de f é igual a zero quando a célula estiver totalmente preenchida com ar. Se f for igual a um, a célula estará totalmente preenchida com resina. Para um valor entre zero e um, a mesma conterá as duas fases (Porto, 2012).

Neste modelo, são resolvidas, apenas, uma equação da conservação da massa e outra da conservação da quantidade de movimento, para os dois fluidos (resina/ ar) envolvidos na simulação, além da equação da fração volumétrica. A equação da conservação da massa é dada por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.3)$$

onde, ρ [kg/m³] é a massa específica.

A Eq. (3.3) representa a soma da taxa de variação de massa dentro de cada volume de controle com o fluxo de massa que cruza a superfície de controle. A Eq. (3.3) mantém o princípio de conservação da massa para problemas bifásicos e é válida para escoamentos compressíveis e incompressíveis.

A equação da conservação da quantidade de movimento, resolvida em todo o domínio computacional, é dada por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.4)$$

onde: $\vec{g}$ [g/m²] é a aceleração da gravidade, $\vec{\tau}$ [Pa] o tensor de tensões e $\vec{F}$ [N] um termo de força.

Destaca-se que o termo de força $\vec{F}$ presente na equação da quantidade de movimento, é um termo de força resistiva ao escoamento em meios porosos. A inclusão deste termo na equação possibilita simular o efeito da porosidade, na verdade este termo é a Lei de Darcy. Sua formulação é escrita como:

$$\vec{F} = \nabla P = -\frac{\mu}{k} \vec{v} \quad (3.5)$$

A equação da fração volumétrica f , em cada célula do o domínio computacional, é dada por

$$\frac{\partial(f)}{\partial t} + \nabla \cdot (f \vec{v}) = 0 \quad (3.6)$$

Com a definição da fração volumétrica, a massa específica e a viscosidade dinâmica em cada célula do domínio computacional podem ser calculadas por Srinivasan et al. (2011):

$$\rho = f\rho + (1 - f)\rho \quad (3.7)$$

$$\mu = f\mu + (1 - f)\mu \quad (3.8)$$

No método VOF, a equação da fração volumétrica combinada com as equações de continuidade e de movimento formam um único conjunto de equações diferenciais que é resolvido para os dois fluidos.

O principal objetivo do modelo VOF aplicado a problemas de RTM é determinar como ocorre o avanço da resina dentro do molde, o que fornecerá subsídios importantes para o projeto do molde que será fabricado (Oliveira, 2010).

3.4 Método Finite Element / Control Volume - FE/CV com o emprego da técnica FAN (Flow Analysis Network)

Uma das principais aplicações da simulação computacional no processo de RTM é determinar a posição da resina no interior do molde ao longo do tempo de injeção. Entre os métodos capazes de rastrear o movimento da linha de frente da resina, destaca-se o método FE/CV com o emprego da técnica FAN como sendo um dos mais utilizados.

Phelan (1997) definiu este método como sendo um método usado para determinar a localização da frente de escoamento de problemas de dinâmica dos fluidos com uma superfície livre. Esse método permite acompanhar a linha de frente do escoamento utilizando uma malha fixa, onde há uma divisão do domínio computacional em células (volumes ou elementos). Uma única equação diferencial é escrita para a pressão.

A equação diferencial para pressão que Phelan (1997) se refere é a equação de Laplace que substituindo a equação da lei de Darcy na equação da conservação da massa para fluidos incompressíveis, e considerando em uma primeira aproximação a permeabilidade do meio e a viscosidade do fluido constantes, encontramos a referida equação em função apenas do gradiente de pressões:

$$\nabla^2 P = 0 \quad (3.9)$$

O campo de pressões é obtido a partir da Eq. (3.9) e posteriormente determina-se a velocidade do fluido no meio poroso através da Eq. (3.1). Três métodos são normalmente utilizados para a solução da Eq. (3.9): Diferenças Finitas, Elementos Finitos e Volumes Finitos. Esta equação é resolvida sucessivas vezes até que todo o meio poroso fibroso esteja saturado pela resina. Detalhes deste método conhecido como FAN podem ser verificados em Phelan (1997).

Após o pré-processamento que consiste na divisão do domínio computacional em volumes de controle, o método FE/CV com FAN pode ser descrito através das seguintes etapas:

- 1ª) as condições de contorno são determinadas para o ponto de injeção e todo domínio é considerado contendo ar, a pressão atmosférica $P_0 = 0$ Pa;
- 2ª) a Eq. (3.9) é resolvida para determinar um novo campo de pressão no domínio computacional;

3ª) a Eq. (3.1) é usada para calcular o campo de velocidades e a quantidade de fluxo de massa de resina que entra nos volumes de controle;

4ª) o tempo mínimo necessário para preencher, pelo menos, um volume de controle é calculado pela Eq. (3.10);

$$(\Delta t)_{\min} = \min \left(\frac{V_i - V_i^f(t)}{Q_i(t)} \right) \quad (3.10)$$

onde V_i [m³] é volume total da célula i; $V_i^f(t)$ [m³] é o volume do fluido preenchido na célula i no tempo t; $Q_i(t)$ [m³/s] é a vazão volumétrica dentro da célula i.

Destaca-se que o tempo $(\Delta t)_{\min}$ é então utilizado para determinar a fração volumétrica da resina, um fator de enchimento, f, para cada um dos volumes de controle.

5ª) a fração volumétrica de resina em cada um dos volumes de controle é calculada pela Eq. 3.11 e os volumes de controle são avaliados como vazio, parcialmente cheio, ou completamente cheio;

$$f(t + \Delta t) = \frac{V_i^f(t) - (\Delta t)_{\min} Q_i(t)}{V_i} \quad (3.11)$$

6ª) a nova linha de frente do escoamento de fluido é estabelecida.

Estas etapas são repetidas até o preenchimento total do molde. A Fig. (3.4) apresenta a descrição esquemática das etapas discutidas anteriormente.

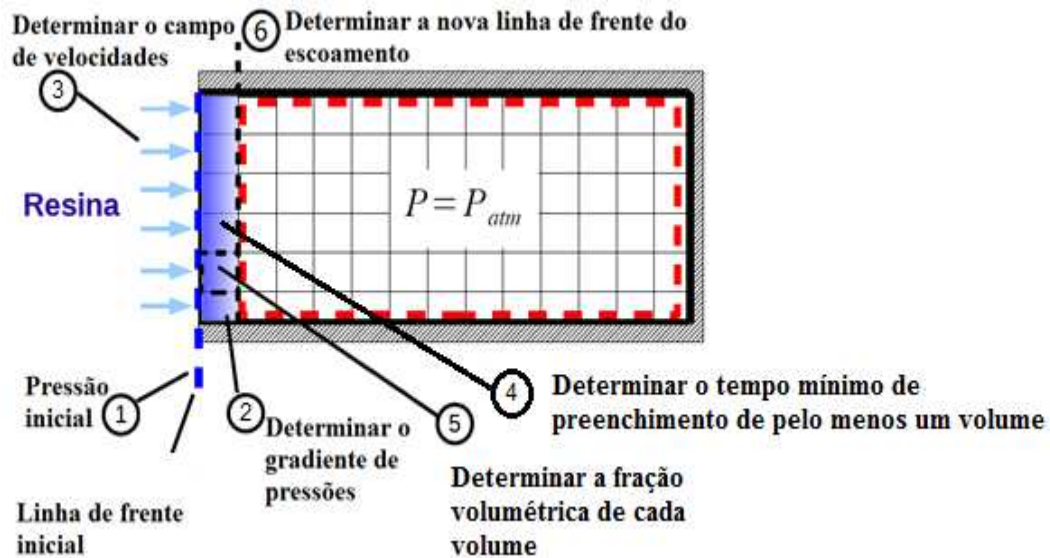


Figura 3.4 - Esquema do método FE/CV com a técnica FAN. Adaptado de Oliveira (2010).

A medida que a resina vai avançando, os volumes de controle vão sendo preenchidos, ou seja, $f = 1$, nesse momento a linha de frente será formada por esses volumes. A Fig. 3.5 mostra uma parte da malha que está sendo impregnada pela resina. Note que o volume de controle estabelecido pelos pontos i, j, k, l está completamente preenchido, $f = 1$, dessa forma os pontos j, k, l são considerados na linha de frente do escoamento e sobre eles são aplicadas as condições de contorno do problema físico.

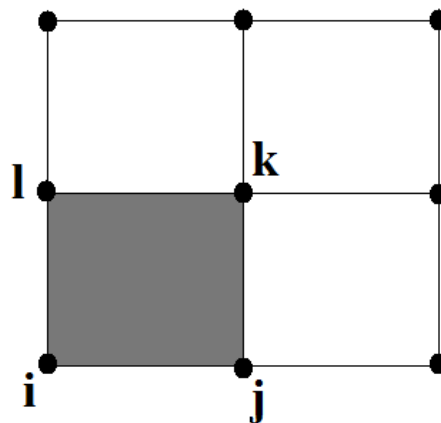


Figura 3.5 - Determinação da linha de frente (Oliveira, 2010).

4. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE

O sucesso da simulação para prever como a resina impregna o molde e o tempo que leva para que o meio poroso seja totalmente saturado depende, em grande parte, da precisão dos dados de permeabilidade.

4.1 Método de Escoamento Retilíneo

Conforme descrito anteriormente o método de escoamento retilíneo pode ser realizado sob pressão de injeção ou vazão de injeção constante (Gauvin e Trochu, 1998). A seguir será discutido o equacionamento destas duas possibilidades, primeira abordagem com vazão constante e segunda com pressão de injeção constante.

De acordo com Alves (2006), a lei de Darcy pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (4.1)$$

onde: ΔP é variação de pressão e ΔL é o comprimento do molde.

Se a lei de Darcy for válida, tem-se que:

$$\frac{Q}{\Delta P} = -\frac{k}{\mu} \frac{A}{\Delta L} = \text{constante} \quad (4.2)$$

Da Eq. (4.2) que Q e ΔP estão relacionados linearmente, conforme mostra a Fig. 4.1. A permeabilidade pode ser determinada pela inclinação da curva, pois A , μ e ΔL são conhecidos.

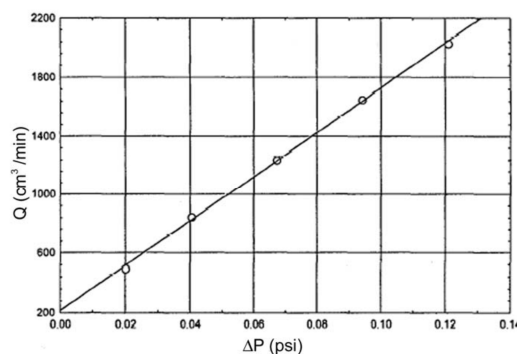


Figura 4.1 - Relação entre Q e ΔP para um fluxo unidimensional a vazão constante (Liang, 2000).

Essa medida pode ser realizada em um molde cuja região de entrada apresente a forma triangular, conforme mostra a Fig. 4.2 para que o escoamento forme uma frente plana. Além disso, a espessura da pré-forma deve ser pequena para que o escoamento na direção transversal possa ser desprezado (Alves, 2006).

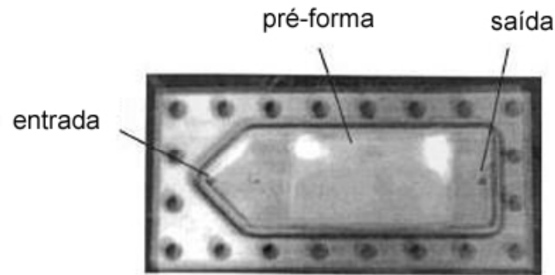


Figura 4.2 - Vista superior do molde para determinação da permeabilidade em fluxo unidimensional (Han, 2000).

Esse método pode ser utilizado para determinação da permeabilidade nas três direções principais da pré-forma, sendo necessário posicionar a pré-forma de maneira que o fluxo esteja na direção em que se deseja medir a permeabilidade. A Fig. 4.3 mostra um esquema de fluxo para determinação da permeabilidade transversal. A desvantagem desse método é a necessidade de realização de pelo menos três experimentos para determinação do tensor permeabilidade em reforços ortotrópicos (Alves, 2006)

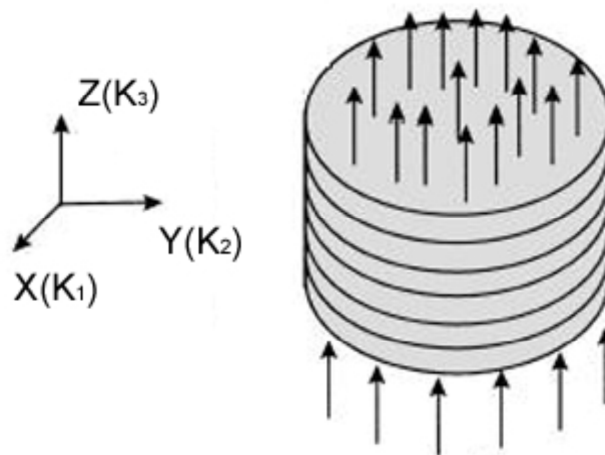


Figura 4.3 - Esquema de fluxo para determinação da permeabilidade transversal (Han, 2000).

Como descrito anteriormente a equação aceita para descrever o escoamento no plano de um fluido ou resina no processo de RTM é a Lei de Darcy que pode ser reescrita como:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (4.3)$$

Considerando a equação da conservação da massa para 1D como:

$$\frac{dv}{dx} = 0 \quad (4.4)$$

Combinando a Eq. (4.3) e a Eq. (4.4) tem-se:

$$-\frac{k}{\mu} \frac{d^2 P}{dx^2} = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{dP}{dx} = C_1 \quad (4.6)$$

Integrando a Eq. (4.6) obtém-se:

$$P = C_1 x + C_2 \quad (4.7)$$

Considerando as seguintes condições de contorno:

$$\begin{cases} x = 0 \rightarrow P = P_0 \\ x = x_f \rightarrow P = 0 \end{cases}$$

Atribuindo as condições de contorno a Eq. (4.6) encontram-se os valores das constantes C_1 e C_2 :

$$\begin{cases} P_0 = 0 + C_2 \\ 0 = C_1 x_f + C_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C_2 = P_0 \\ C_1 = -\frac{P_0}{x_f} \end{cases}$$

Voltando na Eq. (4.6) tem-se:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_0}{x_f} \quad (4.8)$$

Na frente de fluxo tem-se:

$$v = \varepsilon \frac{dx}{dt} \quad (4.9)$$

Combinando as Eq. (4.3), Eq. (4.7) e Eq. (4.8), obtém-se:

$$\varepsilon \frac{dx}{dt} = -\frac{k}{\mu} \left(-\frac{P_0}{x_f} \right) \quad (4.10)$$

Integrando a Eq. (4.9):

$$\int_0^{x_f} x dx = \frac{k}{\mu \varepsilon} \int_0^t dt \quad (4.11)$$

Da integração da Eq. (4.10) encontra-se a seguinte solução:

$$\frac{x_f^2}{2} = \frac{k}{\mu \varepsilon} P_0 t \rightarrow x_f^2 = \frac{2kP_0}{\mu \varepsilon} t \quad (4.12)$$

onde: x_f [m] é a posição da linha de frente da resina, P_0 [Pa] é a pressão de injeção, t [s] é o tempo de injeção transcorrido, ε é a porosidade do meio.

De acordo com Souza et al. (2015) os valores de x_f representam as posições da linha de frente do escoamento retilíneo em função do tempo que são obtidas experimentalmente, possibilitando calcular a permeabilidade, em uma direção, através da representação gráfica de x_f^2 em função do tempo. Uma curva de ajuste linear é obtida com coeficiente angular α .

A permeabilidade é calculada como:

$$k = \frac{\alpha \mu \varepsilon}{2P_0} \quad (4.13)$$

4.2 Método de Escoamento Radial

O cálculo para a determinação da permeabilidade no plano, sendo o meio poroso isotrópico, pode ser realizado pelo método descrito a seguir:

A Lei de Darcy pode ser reescrita como:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dr} \quad (4.14)$$

Considerando a equação da conservação da massa para 1D como:

$$\frac{dv}{dr} + \frac{v}{r} = 0 \quad (4.15)$$

Combinando a Eq. (4.14) e a Eq. (4.15) tem-se:

$$-\frac{k}{\mu} \frac{d^2 P}{dr^2} - \frac{k}{\mu r} \frac{dP}{dr} = 0 \quad (4.16)$$

Reescrevendo a Eq. (4.16):

$$\frac{d^2 P}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP}{dr} = 0 \quad (4.17)$$

Adotando:

$$\frac{dP}{dr} = z \quad (4.18)$$

Derivando a Eq. (4.18) e substituindo na Eq. (4.17) tem-se:

$$\frac{dz}{dr} + \frac{z}{r} = 0 \quad (4.19)$$

Reescrevendo a Eq. (4.19), tem-se:

$$\frac{dz}{dr} = -\frac{z}{r} \quad (4.20)$$

Separando as variáveis a Eq. (4.20), resulta:

$$\frac{dz}{z} = -\frac{dr}{r} \quad (4.21)$$

Integrando a Eq. (4.21), encontra-se:

$$\ln(z) = \ln(C_1) - \ln(r) \quad (4.22)$$

Reescrevendo a Eq. (4.22), obtém-se:

$$\ln(z) = \ln\left(\frac{C_1}{r}\right) \quad (4.23)$$

Logo da Eq. (4.23), encontra-se:

$$z = \frac{C_1}{r} \quad (4.24)$$

Substituindo na Eq. (4.18), tem-se:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (4.25)$$

Separando as variáveis na Eq. (4.25):

$$\frac{dr}{r} = \frac{dP}{C_1} \quad (4.26)$$

Integrando a Eq. (4.26), encontra-se:

$$\ln(r) = \frac{P}{C_1} + C_2 \quad (4.27)$$

Considerando as seguintes condições de contorno:

$$\begin{cases} r = r_0 \rightarrow P = P_0 \\ r = r_f \rightarrow P = 0 \end{cases}$$

Atribuindo as condições de contorno a Eq. (4.27) encontram-se os valores das constantes C_1 e C_2 :

$$\begin{cases} \ln(r_0) = \frac{P_0}{C_1} + C_2 \\ \ln(r_f) = C_2 \end{cases}$$

$$\ln(r_0) = \frac{P_0}{C_1} + \ln(r_f)$$

$$\frac{P_0}{C_1} = \ln(r_0) - \ln(r_f)$$

$$C_1 = - \frac{P_0}{\ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right)} \quad (4.28)$$

Voltando na Eq. (4.25) tem-se:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{P_0}{r \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right)} \quad (4.29)$$

Na frente de fluxo temos:

$$v = \varepsilon \frac{dr}{dt} \quad (4.30)$$

Combinando as Eq. (4.14), Eq. (4.29) e Eq. (4.30) obtém-se:

$$\varepsilon \frac{dr}{dt} = \frac{k}{\mu} \frac{P_0}{r_f \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right)} \quad (4.31)$$

Integrando a Eq. (4.31):

$$\int_{r_0}^{r_f} r_f \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) dr = \frac{kP_0}{\mu\varepsilon} \int_0^t dt \quad (4.32)$$

Da integração da Eq. (4.32) encontra-se a seguinte solução:

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{1}{4} r_f^2 + \frac{1}{2} r_f^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) \right] - \left[-\frac{1}{4} r_0^2 + \frac{1}{2} r_0^2 \ln\left(\frac{r_0}{r_0}\right) \right] = \frac{kP_0}{\mu\varepsilon} t \\ & -\frac{1}{4} r_f^2 + \frac{1}{4} r_0^2 + \frac{1}{2} r_f^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) = \frac{kP_0}{\mu\varepsilon} t \\ & \frac{1}{2} \left[r_f^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) - \frac{1}{2} r_f^2 + \frac{1}{2} r_0^2 \right] = \frac{kP_0}{\mu\varepsilon} t \\ & t = \frac{\mu\varepsilon}{2kP_0} \left[r_f^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) - \frac{1}{2} (r_f^2 - r_0^2) \right] \end{aligned} \quad (4.33)$$

onde r_f é a posição radial da frente de escoamento e r_0 é o raio da entrada da injeção.

5. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO NO PAM-RTM

A modelagem computacional bidimensional do processo de RTM, realizada com o software PAM-RTM, foi verificada através de dois problemas onde o escoamento da resina no meio poroso ocorre com comportamento retilíneo e radial. Estes problemas foram escolhidos por terem solução analítica facilmente encontrada na literatura, como, por exemplo, no trabalho de Hattabi et al, (2008).

5.1 Verificação do modelo computacional no plano: Escoamento Retilíneo

O domínio computacional deste problema, onde ocorre o escoamento retilíneo da resina em um reforço isotrópico, é apresentado na Fig. 5.1. A resina foi injetada através de toda a face esquerda e escoou até a saída na face direita de um molde retangular. Este problema pode ser considerado unidimensional desde que a linha de frente da resina esteja em movimento numa linha reta perpendicular às paredes laterais do molde (Silva et al., 2008).

As dimensões do molde bidimensional são de 0,300 m de comprimento por 0,025 m de largura. As propriedades físicas empregadas neste problema são as mesmas adotadas por Souza et al. (2012) e estão descritas na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades Físicas: Caso Retilíneo

Propriedades	Valores
Viscosidade da resina	0,06 Pa.s
Massa específica	920,00 kg/m ³
Porosidade do meio	0,70
Permeabilidade do meio	3,00 x 10 ⁻¹⁰ m ²
Pressão de injeção constante	0,50 x 10 ⁵ Pa

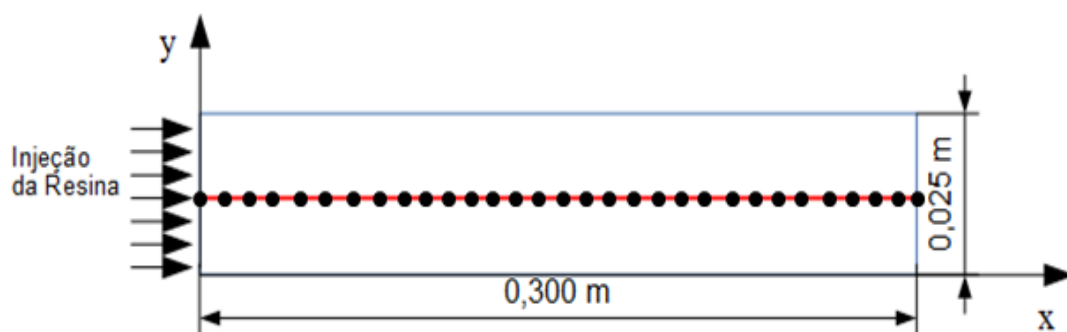


Figura 5.1 - Domínio computacional: caso retilíneo

Como a pressão de injeção é constante, a solução analítica para este problema é a Eq. (4.12). Para as propriedades referidas no problema foi calculado analiticamente um tempo total de injeção de 126,00 s, ou seja, o tempo que a linha de frente da resina percorre todo o molde até atingir a face direita.

Para verificar o resultado numérico obtido com o PAM-RTM, foi realizada a comparação com o resultado obtido analiticamente através da Eq. (4.12). O domínio computacional foi discretizado com uma malha de 1963 elementos triangulares. Através da simulação numérica foi possível fazer o acompanhamento do avanço da linha de frente da resina ao longo do tempo transcorrido. Para tal foram posicionados 31 sensores sendo o primeiro na face esquerda, ponto de injeção, de coordenadas $x = 0$ m e $y = 0,0125$ m e o último na face direita, saída, ponto de coordenadas $x = 0,300$ m e $y = 0,0125$ m. Os demais sensores foram distribuídos uniformemente com espaçamento de 0,010 m. Estes sensores originaram uma linha que proporcionou o monitoramento da posição da linha de frente da resina. A Fig. 5.1 mostra a linha originada (em vermelho) a partir da localização dos sensores no molde e a representação dos mesmos.

A Fig. 5.2 mostra a posição da linha de frente da resina para três tempos de injeção diferentes. A cor vermelha representa a resina contida no meio poroso saturado enquanto que a cor azul representa o meio poroso não saturado e as outras cores indicam a interface entre a resina e o ar.

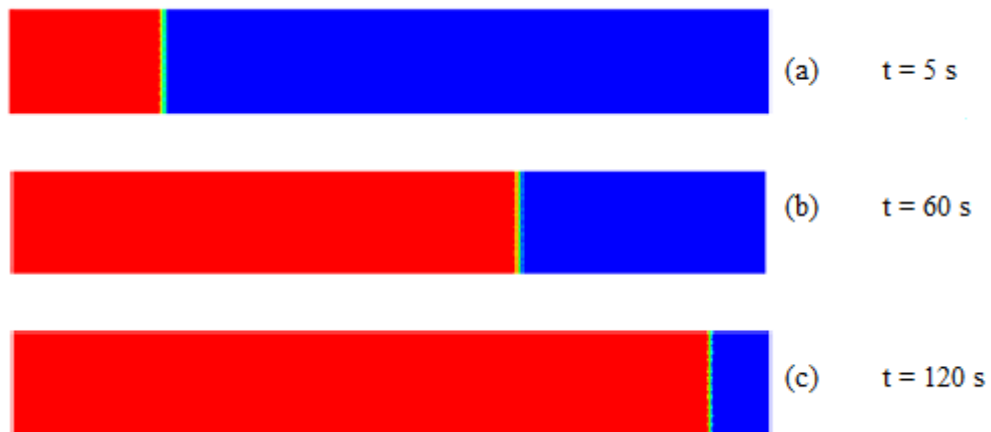


Figura 5.2 - Preenchimento do meio poroso: caso retilíneo PAM–RTM: $t = 5 \text{ s}$, $t = 60 \text{ s}$, $t = 120 \text{ s}$

O tempo final de injeção, obtido com o software PAM–RTM, no processo de RTM foi de 131,84 s. O tempo obtido com a solução analítica como informado anteriormente foi de 126 s, uma diferença de 4,63 %. A Fig. 5.4 mostra o avanço da linha de frente do escoamento em função do tempo de injeção obtido com as duas metodologias estudadas: analítica e com o software PAM–RTM. Observa-se que os resultados tiveram uma excelente concordância.

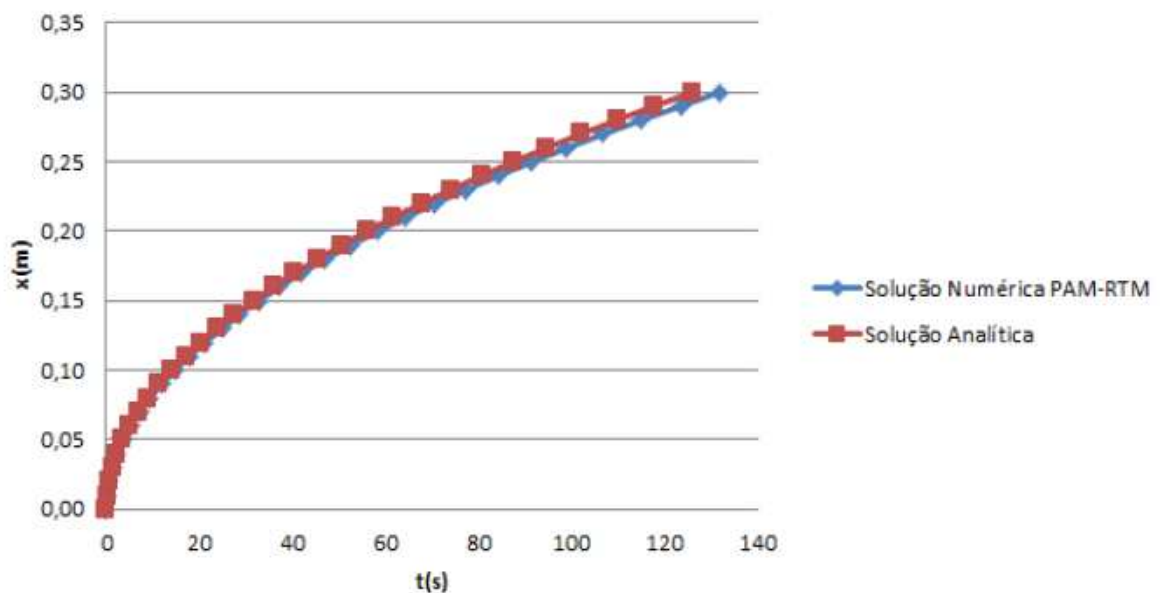


Figura 5.3 - Solução do escoamento retilíneo: analítica x PAM–RTM

5.2 Verificação do modelo computacional no plano: Escoamento Radial

O segundo problema de verificação do modelo bidimensional do processo de RTM, cujo domínio computacional é apresentado na Fig. 5.4 foi discretizado com 27965 elementos triangulares. Nesse problema, o escoamento da resina apresenta comportamento radial. O escoamento da resina avança com a mesma velocidade em todas as direções, isso se dá devido ao reforço ser isotrópico.

A injeção da resina foi feita através da aplicação de uma pressão constante de $0,50 \times 10^5$ Pa no centro da geometria. Esse ponto de injeção apresenta um raio de $3,0 \times 10^{-3}$ m. As propriedades da resina e do reforço foram as mesmas adotadas na simulação do problema de escoamento retilíneo mostradas na Tab. 5.1. Para verificar o avanço radial da resina, sendo a pressão de injeção constante, utiliza-se a solução analítica dada pela Eq. (4.33).

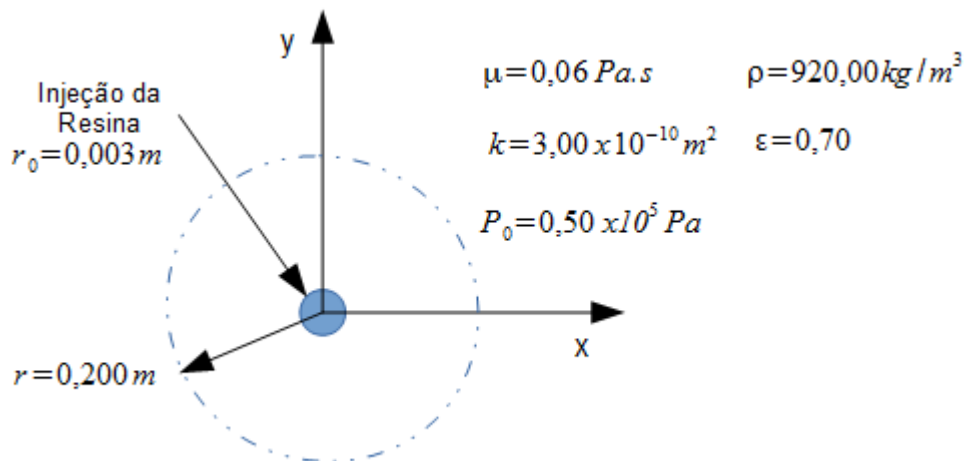


Figura 5.4 - Domínio computacional: caso radial

Para as propriedades físicas da resina e do reforço citadas anteriormente (Tab. 5.1) e o domínio computacional apresentado na Fig. 5.4, a solução analítica dada pela Eq. (4.33) determina para $r = 0,2 \text{ m}$ e $r_0 = 0,003 \text{ m}$, um tempo de preenchimento de 207,19 s, enquanto que o tempo de preenchimento obtido através do PAM-RTM foi de 202,98 s, uma diferença de 2 %.

A Fig. 5.5 ilustra o avanço da linha de frente do escoamento em função do tempo para a solução analítica e a solução numérica obtida com o software PAM-RTM. Verifica-se que os resultados tiveram uma boa concordância.

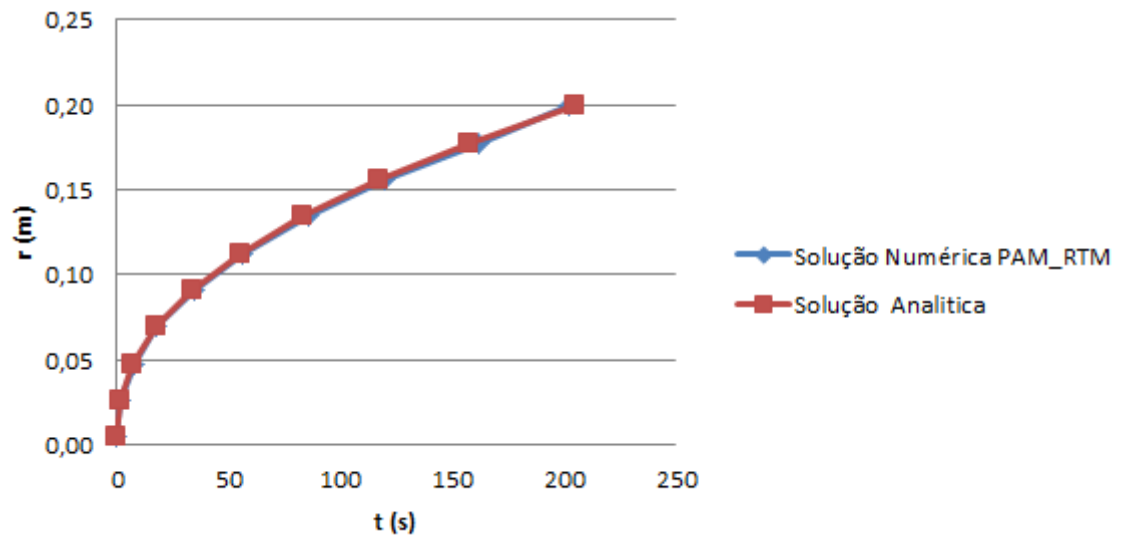


Figura 5.5 - Solução do escoamento radial: analítica x PAM-RTM

Destaca-se na Fig.5.6 o avanço da resina no meio poroso para três tempos distintos.

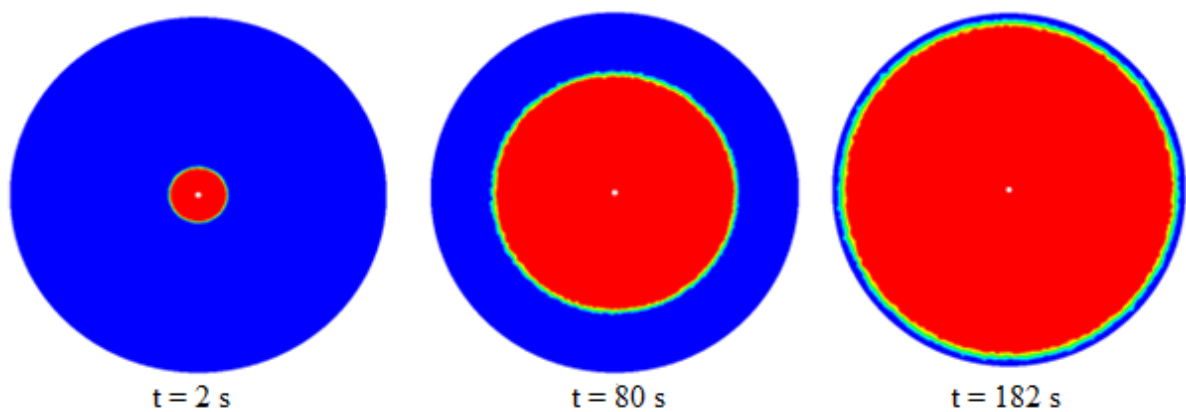


Figura 5.6 - Preenchimento do meio poroso: caso radial PAM-RTM

6. RESULTADOS

6.1 Determinação da Permeabilidade: caso Retilíneo

O domínio computacional deste problema, onde ocorre o escoamento retilíneo da resina é o mesmo apresentado na Fig. 5.1 com as mesmas características. As propriedades físicas para a resina e o reforço utilizadas estão apresentadas na Tab. 5.1.

Estando o molde completamente preenchido pela resina, foi adotado que t_{exp} é o tempo de injeção experimental. Como este problema foi considerado teórico, foi atribuído a este tempo o t_{ana} obtido através da solução analítica dada pela Eq. (4.12). Foi adotado também que t_{num} é o tempo de escoamento calculado numericamente com o software PAM-RTM. Após estas considerações foi possível escrever uma equação para o resíduo dada por:

$$f(k_{xx}, t) = t_{exp} - t_{num} = 0 \quad (6.1)$$

Na Eq. (6.1), a permeabilidade k_{xx} é desconhecida.

Usando o método de Newton – Raphson (Kincaid and Cheney, 2001), a Eq. (6.1) foi resolvida para determinar k_{xx} como:

$$k_{xx}^{n+1} = k_{xx}^n - \frac{f(k_{xx}, t)}{f'(k_{xx}, t)} \quad (6.2)$$

onde n é o número de iterações e f' é a derivada da função f .

Na Eq. (6.2), a derivada é numericamente aproximada por:

$$f'(k_{xx}, t) = \frac{\partial f(k_{xx}, t)}{\partial k_{xx}} = \frac{f(k_{xx} + h, t) - f(k_{xx}, t)}{h} \quad (6.3)$$

onde h é uma constante com valor definido neste trabalho igual a 1×10^{-15} .

O tempo final de injeção obtido com a solução analítica (t_{ana}) foi de 126 s, o qual foi utilizado na Eq. (6.1).

A Eq. (6.1) é resolvida para k_{xx} com o método de Newton – Raphson. A cada iteração um novo t_{num} é calculado com o software PAM–RTM. A convergência é mostrada na Tab. 6.1.

O procedimento numérico consiste em atribuir um valor inicial para K_{xx} que nesse problema foi definido como $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Foram necessárias 9 iterações para alcançar um erro relativo menor que 1%. O valor de k_{xx} calculada foi de $3,09 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (ver Tab. 6.1), enquanto o valor arbitrado foi de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, levando a um erro percentual de k_{xx} em aproximadamente 3%.

Tabela 6.1 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Retilíneo

Iteração	$k_{xx} \text{ (m}^2\text{)}$	Erro (%)*
1	$1,00 \times 10^{-10}$	-
2	$1,08 \times 10^{-10}$	7,34
3	$1,88 \times 10^{-10}$	42,62
4	$2,30 \times 10^{-10}$	18,31
5	$2,76 \times 10^{-9}$	16,59
6	$2,93 \times 10^{-10}$	5,90
7	$3,02 \times 10^{-10}$	2,93
8	$3,07 \times 10^{-10}$	1,60
9	$3,09 \times 10^{-10}$	0,91

*Erro = $100 \times (k_{xx}^{n+1} - k_{xx}^n) / k_{xx}^{n+1}$, onde n é o número de iterações.

A convergência neste caso é estável, para ser obtida foram necessárias apenas 10 iterações. A Fig. 6.1 apresenta como a convergência foi atingida.

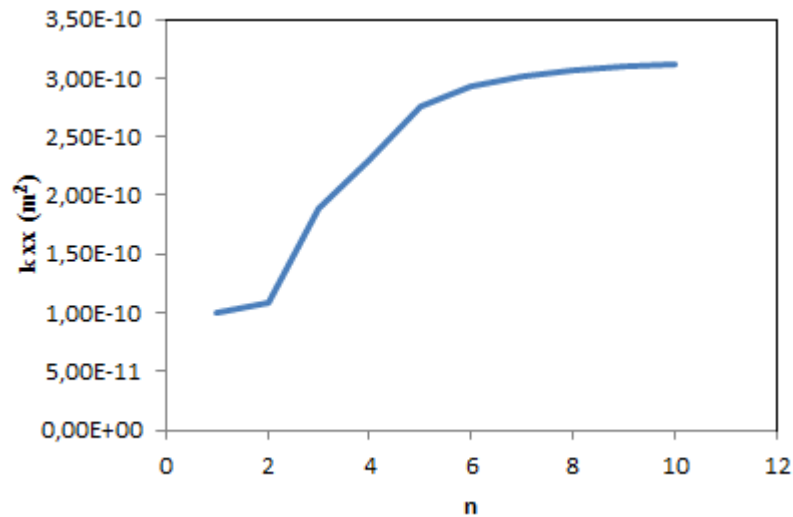


Figura 6.1 - Permeabilidade k_{xx} : método Newton-Raphson (Caso Retilíneo)

6.2 Determinação da Permeabilidade: caso Radial

O domínio computacional deste problema, onde ocorre o escoamento radial da resina é o mesmo apresentado na Fig. 5.4 com as mesmas características. As propriedades físicas para a resina e o reforço utilizadas nesse problema foram as mesmas, as quais estão apresentadas na Tab. 5.1. Destaca-se que a permeabilidade arbitrada para $k_{yy} = 3,00 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

O procedimento numérico é o mesmo adotado no caso retilíneo para determinar a permeabilidade k_{xx} . Neste caso radial o t_{ana} foi de 207,19s obtido através da Eq. (4.14), a constante h foi definida com valor igual a 1×10^{-14} . A convergência é mostrada na Tab. 6.2.

O valor inicial atribuído para k_{xx} foi $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ sendo necessárias 19 iterações para alcançar um erro relativo menor do que 1%. O valor de k_{xx} calculada foi de $2,92 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, (ver Tab. 6.2), enquanto que o valor arbitrado foi de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, levando a um erro percentual para determinar k_{xx} de aproximadamente 2,7 %.

Tabela 6.2 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Radial

Iteração	k_{xx} (m ²)	Erro (%)*
1	$1,00 \times 10^{-9}$	-
2	$9,08 \times 10^{-10}$	-10,13
3	$8,07 \times 10^{-10}$	-12,49
4	$9,28 \times 10^{-10}$	13,02
5	$9,90 \times 10^{-10}$	6,30
6	$9,46 \times 10^{-10}$	-4,68
7	$9,09 \times 10^{-10}$	-4,10
8	$1,79 \times 10^{-9}$	49,08
9	$1,93 \times 10^{-9}$	7,48
10	$2,26 \times 10^{-9}$	14,66
11	$7,59 \times 10^{-10}$	-197,99
12	$9,81 \times 10^{-10}$	22,69
13	$6,85 \times 10^{-10}$	-43,24
14	$6,33 \times 10^{-10}$	-8,15
15	$6,52 \times 10^{-10}$	2,84
16	$6,78 \times 10^{-10}$	3,88
17	$5,08 \times 10^{-10}$	-33,49
18	$2,90 \times 10^{-10}$	-75,39
19	$2,92 \times 10^{-10}$	0,19

* Erro = $100 \times (k_{xx}^{n+1} - k_{xx}^n) / k_{xx}^{n+1}$, onde n é o número de iterações.

Nota-se que a convergência neste caso foi mais difícil de ser alcançada, se comparada ao caso retilíneo, pois foram necessárias 10 iterações a mais. Observa-se que os valores de k_{xx} tiveram uma variação significativa da 8ª até a 12ª iteração o que acarretou no aumento das iterações. Salienta-se este fato como uma dificuldade para a convergência ser atingida. A Fig. 6.2 apresenta o que foi descrito acerca da dificuldade da convergência.

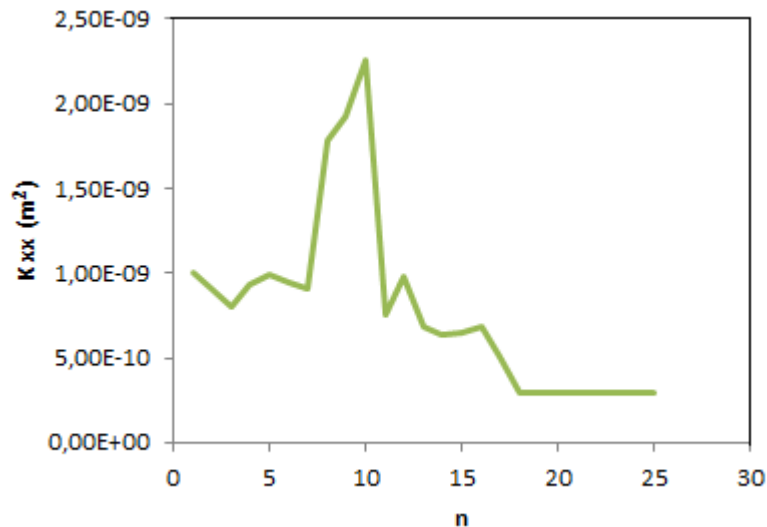


Figura 6.2 - Permeabilidade k_{xx} : método Newton-Raphson (Caso Radial)

6.3 Determinação da Permeabilidade: caso Transversal

No caso transversal não existe na literatura solução analítica e que por esta razão a verificação, como nos casos retilíneo e radial não é possível (Figs. 5.4 e 5.6). Daí tem-se a necessidade do teste de independência de malha.

6.3.1 Estudo de Independência de Malha

O domínio computacional deste problema, onde ocorre o escoamento da resina é apresentado na Fig. 6.3. Esse modelo tridimensional foi feito na forma de um hexaedro medindo 0,25 m de aresta da base e altura 0,05 m. O ponto de injeção da resina apresenta um raio de 0,005 m e foi colocado no centro da face superior do domínio. Na presente solução, os efeitos da gravidade foram desconsiderados. A malha independente utilizada em todas as simulações possui 248186 elementos tetraédricos (ver Tab. 6.3).

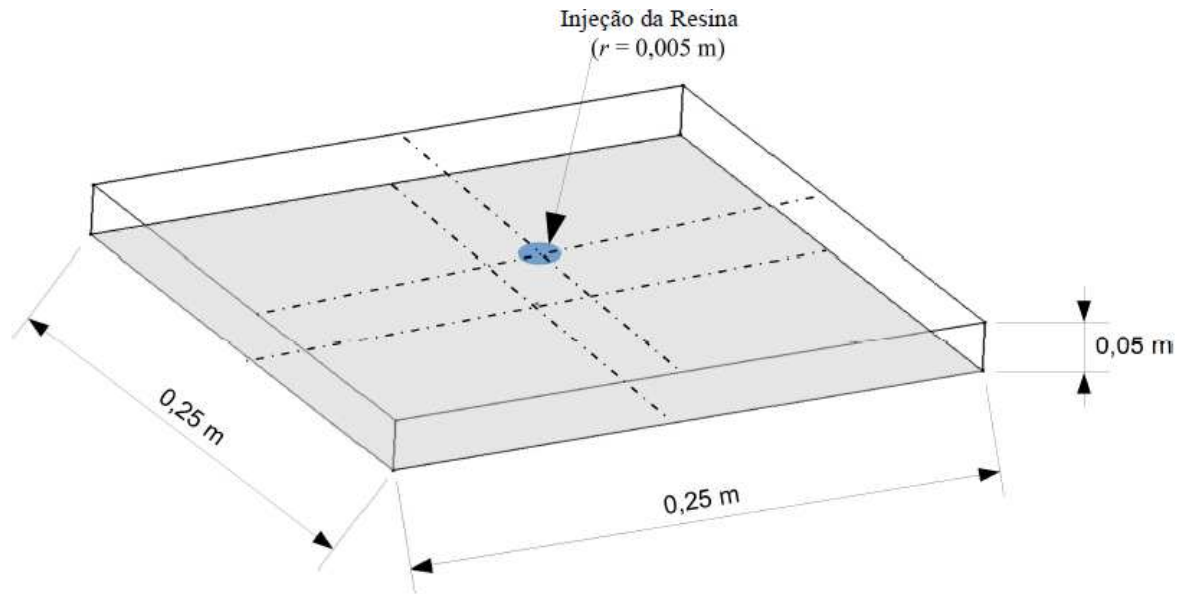


Figura 6.3 - Domínio Computacional tridimensional

No ponto de injeção da resina foi imposta uma pressão prescrita de $0,50 \times 10^5$ Pa. Para todas as demais fronteiras a derivada da pressão normal à superfície foi (dp/dn) definida como zero. Nesta formulação não existe nenhuma necessidade de especificar pontos de saída. A simulação termina quando todos os elementos da malha estão preenchidos com resina.

As propriedades físicas para o reforço e para a resina utilizadas nesse problema foram as mesmas, as quais estão apresentadas na Tab. 5.1. Destaca-se a permeabilidade no plano $k_{xx} = k_{yy} = 3,00 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. O procedimento numérico é o mesmo adotado nos casos descritos anteriormente para determinar a permeabilidade k_{zz} .

A independência de malha é obtida quando resultados obtidos para uma simulação efetuada em certa malha não variam significativamente de outra simulação efetuada utilizando uma malha com maior refino, ou seja, quando um refino na malha empregada não representa significativas mudanças nos resultados.

Um estudo de refinamento de malha foi feito para as soluções obtidas pelo software PAM-RTM. O molde utilizado na simulação tem dimensões de $0,25 \times 0,25 \times 0,05 \text{ m}$. A geração da malha foi feita através do software GMSH.

A malha pode ser observada na Fig. 6.4. Foi utilizado o tempo final de injeção da resina no molde como parâmetro de comparação dos resultados para identificar a malha independente. Estabeleceu-se que a malha independente deveria apresentar uma diferença menor que 0,5% entre os tempos finais de preenchimento.

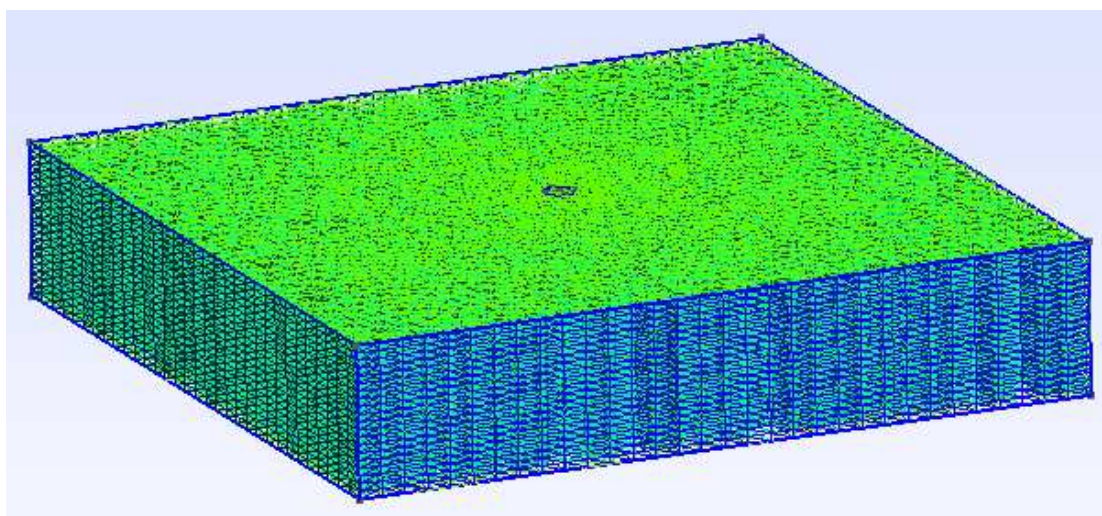


Figura 6.4 - Malha gerada pelo GMSH

Foi definido um tamanho representativo do elemento de referência definido como $E_{size} = 1,00$. A partir deste, a cada novo refinamento, o E_{size} foi definido com uma diferença de 0,1 do valor anterior. Os resultados das simulações realizadas são mostrados na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 - Estudo de independência de malha para o PAM-RTM

Caso	Tamanho dos elementos (E_{size})	Número de Elementos	Tempo de final de injeção (s)	Diferença *
1	1,00	168394	508,780	
2	0,90	203494	511,730	0,58%
3	0,80	248186	512,991	0,25%

* Diferença = $100 \times \left(\frac{t_f^{(i+1)} - t_f^i}{t_f^i} \right)$, onde t_f é o tempo final de injeção e i o caso.

Observa-se na Tab. 6.3 que os resultados obtidos pelo PAM–RTM nos casos 2 e 3 são muito parecidos no que se refere ao tempo final de injeção.

Conforme descrito anteriormente, a malha foi dita suficientemente refinada para diferença $< 0,5 \%$. Dessa forma, pode-se concluir que a malha mais adequada é a obtida no caso 3, com 248186 elementos.

6.3.2 Determinação de k_{zz}

A metodologia proposta utiliza dados experimentais, a fim de resolver a Eq. (6.1), no entanto, neste trabalho o t_{exp} foi calculado com o software PAM–RTM. Uma simulação inicial foi realizada com as propriedades mencionadas acima e com o valor atribuído a $k_{zz} = 3,00 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Esta simulação apresentou um tempo final de injeção que foi usado na equação do resíduo (Eq. 6.1), denominado t_{ana} . Este tempo foi assumido como o valor desejado para a convergência, ou seja, o valor que a permeabilidade k_{zz} deveria alcançar após a aplicação da metodologia. Este procedimento não invalida a metodologia proposta porque t_{exp} é apenas um valor de referência a que a solução da Eq. (6.1) deve convergir. Contudo é necessário lembrar que na comparação com dados experimentais existem outros erros a serem considerados: medição experimental e capacidade do modelo matemático/numérico em reproduzir os resultados experimentais.

Neste caso transversal o t_{ana} foi de 512,991 s obtido na simulação inicial. A constante h foi definida com valor igual a 1×10^{-15} . A convergência é mostrada na Tab. 6.4. O valor inicial definido para k_{zz} foi $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ sendo necessárias 21 iterações para alcançar um erro relativo menor do que 1%. O valor de k_{zz} calculada foi de $2,99 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, (ver Tab. 6.4), enquanto que o valor definido foi de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, acarretando um erro percentual de aproximadamente 0,5 %.

Tabela 6.4 - Registro da convergência para a solução do problema inverso: Caso Transversal

Iteração	k_{zz} (m ²)	Erro (%)*
1	$1,00 \times 10^{-9}$	-
2	$1,07 \times 10^{-9}$	6,66
3	$1,00 \times 10^{-9}$	-6,96
4	$9,59 \times 10^{-10}$	-4,41
5	$1,01 \times 10^{-9}$	5,01
6	$2,45 \times 10^{-10}$	-313,01
7	$3,89 \times 10^{-10}$	37,12
8	$3,75 \times 10^{-10}$	-3,61
9	$3,66 \times 10^{-10}$	-2,67
10	$3,61 \times 10^{-10}$	-1,21
11	$4,19 \times 10^{-10}$	13,89
12	$3,46 \times 10^{-10}$	-21,15
13	$3,37 \times 10^{-10}$	-2,77
14	$3,34 \times 10^{-10}$	-0,92
15	$3,09 \times 10^{-10}$	-8,08
16	$3,16 \times 10^{-10}$	2,22
17	$3,21 \times 10^{-10}$	1,56
18	$2,96 \times 10^{-10}$	-8,47
19	$3,00 \times 10^{-10}$	1,23
20	$2,99 \times 10^{-10}$	-0,23
21	$2,99 \times 10^{-10}$	0,07

* Erro = $100 \times (k_{zz}^{n+1} - k_{zz}^n) / k_{zz}^{n+1}$, onde n é o número de iterações.

Analisando a Tab. 6.4 verifica-se que a convergência é estável, embora tenham sido necessárias 21 iterações. Observa-se que os valores de k_{zz} tiveram uma variação decrescente até a convergência ser alcançada. A Fig. 6.4 apresenta como foi o declínio dos valores da permeabilidade k_{zz} .

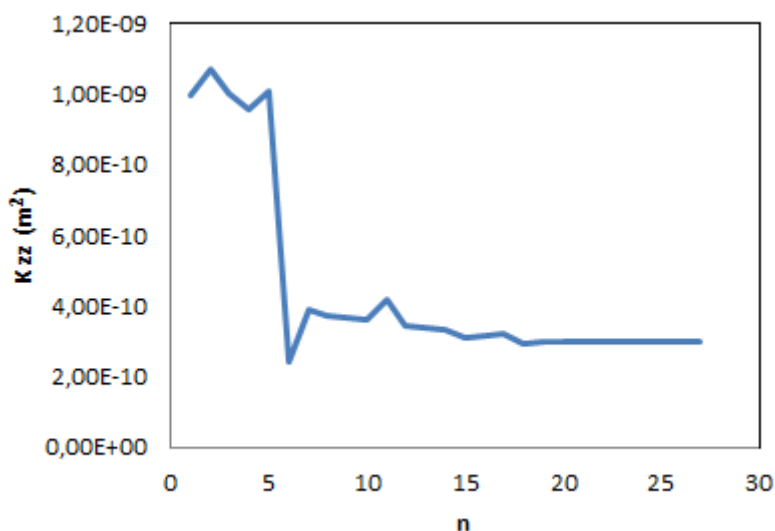


Figura 6.5 - Permeabilidade k_{zz} : método Newton-Raphson (Caso Transversal)

Destacam-se nesta metodologia proposta que são, em teoria, necessários poucos dados experimentais para a determinação da permeabilidade para cada direção (k_{xx} , k_{yy} e k_{zz}). É necessário o conhecimento de apenas um conjunto de dados (posição da resina e tempo). Obviamente, realizar o experimento e a solução numérica repetidas vezes garante uma maior precisão dos resultados.

Outro ponto importante diz respeito ao fato de que com esta metodologia é possível estimar a permeabilidade da peça acabada. Utilizando-se como dado experimental o tempo final de injeção (de uma peça qualquer) é possível, estimar uma das permeabilidades da peça produzida.

É possível ainda extrapolar a proposta e determinar simultaneamente duas ou três permeabilidades. Assim, medindo o tempo necessário para a resina atingir três pontos distintos, em teoria, seria possível determinar as três permeabilidades da peça final produzida.

6.4 Estudo da influência da permeabilidade transversal no processo de RTM

O processamento por RTM de materiais compósitos espessos nas mais diversas aplicações de engenharia é um desafio tecnológico que deve ser enfrentado (Michaud, 1998). Buscando contribuir para solucionar este desafio foi realizado um estudo de casos variando a permeabilidade transversal na simulação numérica do comportamento do avanço da linha de frente da resina permitindo assim definir a localização dos pontos de saída de ar/resina.

A geometria deste problema é apresentada na Fig. 6.6. Esse modelo de placa espessa foi feito na forma de um paralelepípedo reto medindo 0,30 m de aresta da base e uma polegada de altura (0,0254 m). O ponto de injeção da resina apresenta um raio de 0,005 m e foi situado no centro da face inferior da geometria.

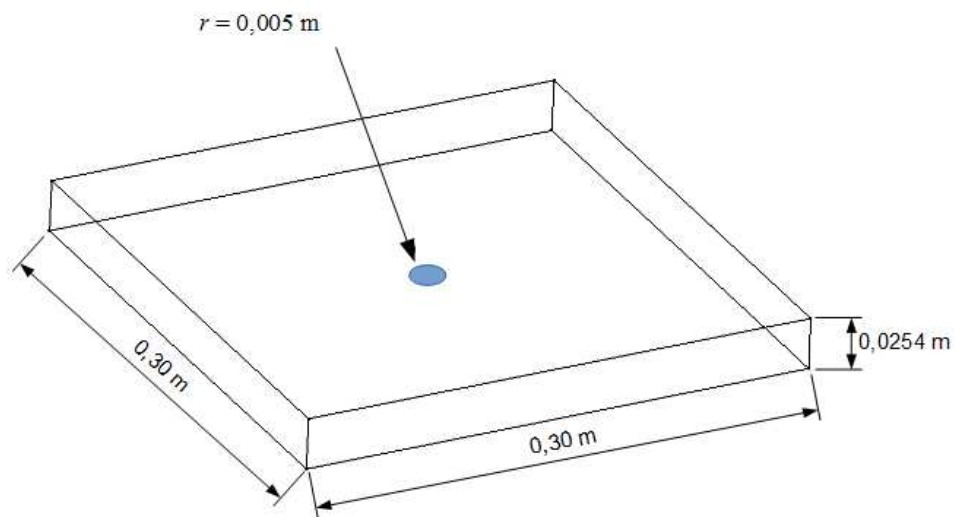


Figura 6.6 - Domínio computacional para estudo de caso

A geração da malha foi feita através do software gerador de malha adotado neste trabalho, a mesma pode ser visualizada na Fig. 6.7.

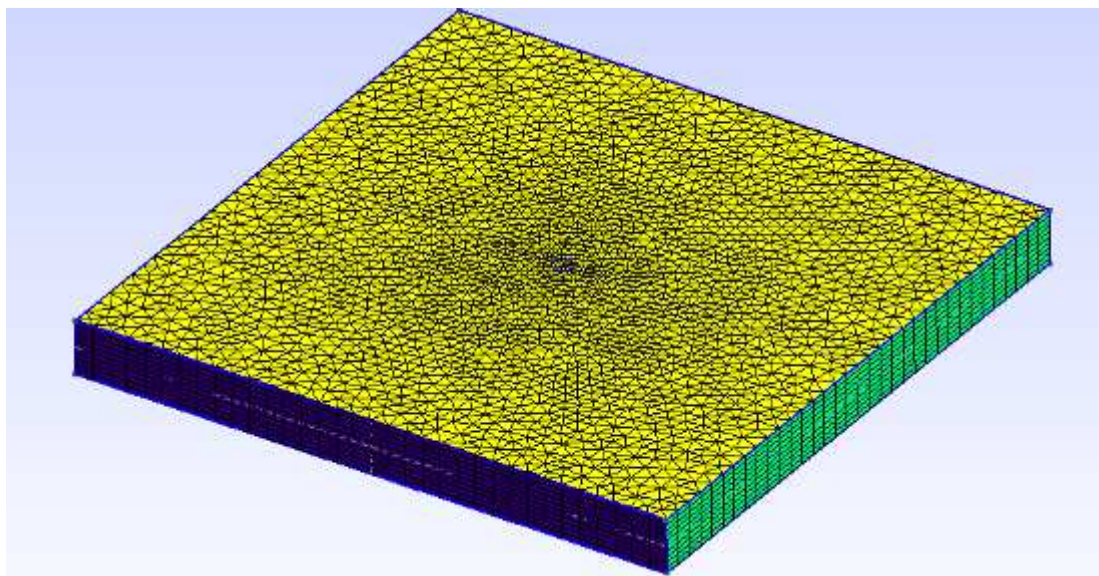


Figura 6.7 - Malha construída no GMSH

O teste de independência de malha apresentado na Tab. 6.5 resultou em uma malha independente de 57362 elementos. Foram necessário apenas quatro refinamentos para identificação da malha ideal. Destaca-se que esta foi utilizada na simulação dos 4 casos descritos a seguir.

Tabela 6.5 - Teste de independência de malha para o estudo de casos

Caso	Tamanho dos elementos	Número de Elementos	Tempo de final de injeção (s)	Diferença
1	1,00	48050	616,481	
2	0,90	57362	617,577	0,18%
3	0,80	67562	617,308	0,04%
4	0,70	80162	617,390	0,01%

Observa-se que os resultados obtidos pelo PAM-RTM nos casos dois e três são próximos no que se refere ao tempo final de injeção. A diferença relativa entre as soluções foi calculada conforme descrito anteriormente. A condição de refinamento foi também a mesma adotada para este trabalho.

As propriedades físicas estão apresentadas na Tab. 6.6, estas foram utilizadas em todos os casos estudados. Foi definido que a permeabilidade k_{zz} seria inicialmente de $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ para o Caso_1 e que para os demais casos obedeceria a regra de ser dez vezes menor que a anterior.

Tabela 6.6 - Propriedades Físicas: Estudo de Casos

Propriedades	Valores
Viscosidade da resina	0,5 Pa.s
Massa específica	920,00 kg/m ³
Porosidade no meio	0,50
Permeabilidade do plano ($k_{xx} = k_{yy}$)	$1,00 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
Pressão de injeção constante	$0,50 \times 10^5 \text{ Pa}$

Caso_1

Neste caso, o molde obedece a descrição mencionada acima, as propriedades físicas foram conservadas e a permeabilidade transversal foi definida como $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Na Fig. 6.8 a injeção da resina simulada com o software PAM-RTM é mostrada para $t = 4 \text{ s}$. Nesta figura, a cor azul indica as regiões com ar e a cor vermelha indica as que estão completamente cheias de resina. Devido à simetria da geometria, a vista de baixo do molde (Fig. 6.8a) apresenta o avanço circular da resina enquanto a secção meridiana de corte (Fig. 6.8b) mostra que o avanço da resina também é simétrico na direção Z. O formato do escoamento da resina interna no molde dá-se como uma esfera. Esse comportamento é esperado fisicamente uma vez que neste problema o reforço é isotrópico, ou seja, as permeabilidades no plano e na transversal são iguais ($k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$).

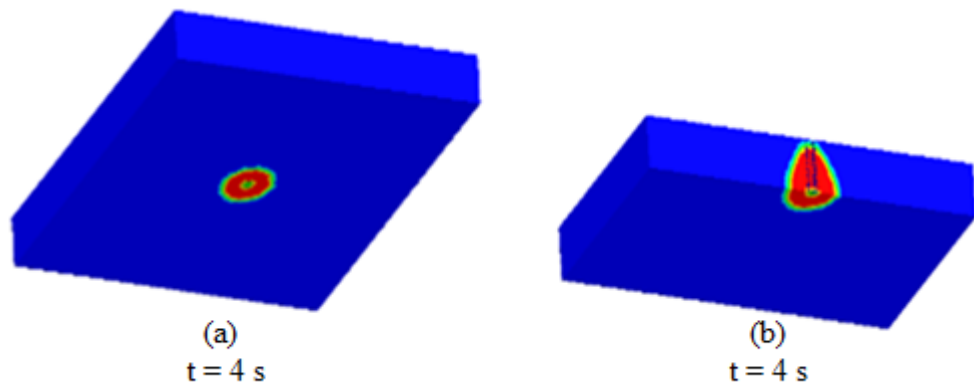


Figura 6.8 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ em 4 s: (a) vista inferior (b) vista de corte

A Fig. 6.9 mostra o avanço da resina no meio poroso para dois tempos diferentes. Nesta figura, observa-se que a velocidade da resina é a mesma em todas as direções, pois as permeabilidades são iguais. O preenchimento do molde dá-se do seu interior às extremidades, pois a resina atinge a face superior rapidamente. Se um ponto de saída fosse localizado em oposição ao ponto de injeção, ocorreria um desperdício de resina até o molde ser completamente preenchido, na verdade o molde não seria preenchido completamente, pois uma condição de equilíbrio seria atingida na qual a quantidade de resina que está entrando na face inferior seria igual a quantidade de resina que está saindo na face superior. Nesta configuração os pontos de saída ideais deveriam estar posicionados nos quatro vértices do molde.

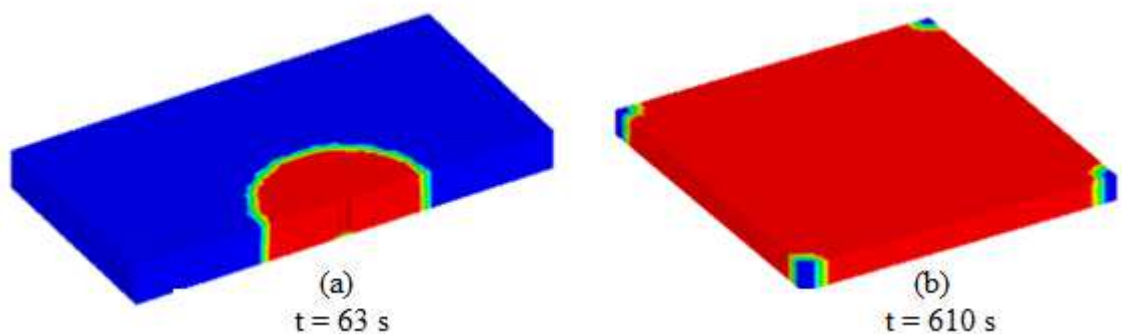


Figura 6.9 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. (a) 63 s e (b) 610 s

Caso_2

Neste caso, a permeabilidade transversal foi definida como $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Essa permeabilidade é 10 vezes menor que a permeabilidade do Caso_1. A frente de escoamento da resina não tem a forma esférica como no estudo do Caso_1, a mesma avança mais rapidamente nas direções X e Y do que na direção Z. A Fig. 6.10a mostra que o avanço da resina no plano (face inferior do molde) permanece circular pois as permeabilidades k_{xx} e k_{yy} não foram alteradas. Destaca-se que as mesmas não serão modificadas em nenhum caso, pois o objetivo neste estudo é apenas variar a permeabilidade transversal. Observa-se que neste caso a resina demorou cerca de 136 s para atingir a face superior. Comparando com o Caso_1, o tempo necessário para a resina fluir através do reforço na direção transversal foi de 34 vezes mais longo do que no caso isotrópico (Caso_1). Observa-se que, novamente, o escoamento da resina foi do centro do molde as extremidades, como pode ser visualizado na Fig.6.10b. Os pontos de saída de ar/resina poderiam ser localizados nos vértices do molde evitando desperdício de resina.

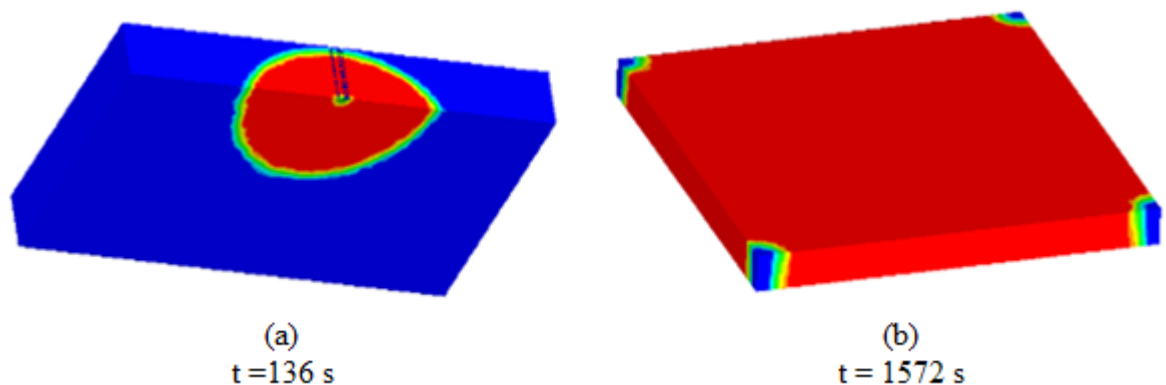


Figura 6.10 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. (a) 136 s e (b) 1572 s

Caso_3

A permeabilidade transversal foi definida como $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$. Essa permeabilidade é 100 vezes menor que a permeabilidade do Caso_1. A Fig. 6.11 mostra o avanço da resina que foi bastante diferente quando comparado aos casos anteriores simulados, pois até a resina atingir a face superior foram necessários cerca de 3097 s. Neste caso, a resina avança rapidamente a partir do ponto de injeção até as paredes do molde e começa a fluir na direção transversal quase como um escoamento unidirecional, no entanto, é possível observar nas

Figs. 6.11(a) e (b) que a forma da frente de escoamento não é plana, isto é, ainda apresenta a forma curvilínea.

A Fig. 6.11c mostra que a resina atinge o centro da face superior do molde antes de atingir os cantos superiores então com esta simulação foi possível observar que a localização dos pontos de saída ar/ resina nos cantos superiores é a mais adequada.

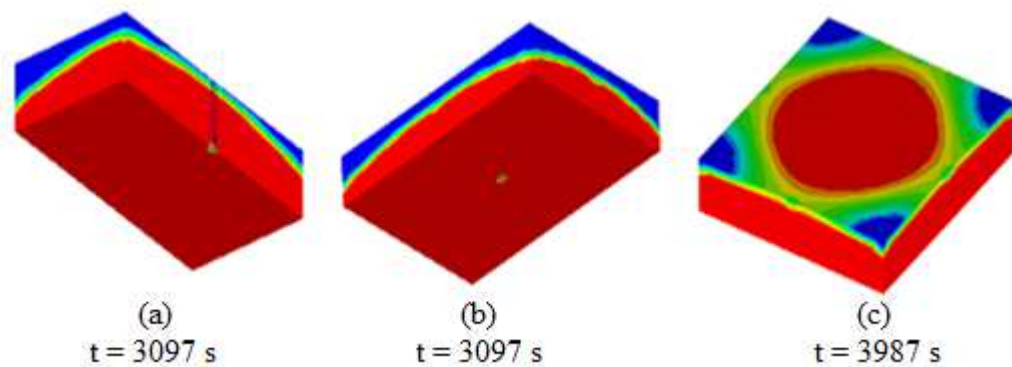


Figura 6.11 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$. (a) 3097 s, (b) 3097 s e (c) 3987 s

Caso_4

A permeabilidade transversal foi definida como sendo 1000 vezes menor que a permeabilidade do Caso_1, ou seja, $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. A Fig. 6.12 mostra o avanço da resina decorrido 778 s de simulação. A resina avança primeiro no plano, face inferior do molde, e em seguida na direção transversal. Observa-se que o escoamento é semelhante ao caso anterior simulado, porém a velocidade do escoamento da resina no plano é consideravelmente maior do que na direção Z. A Fig. 6.12c mostra que o avanço da frente de escoamento da resina na direção transversal apresenta um comportamento unidirecional e a resina atinge a face superior do molde como uma frente de escoamento plano. Novamente a posição mais adequada para os pontos de saída são os cantos superiores do molde.

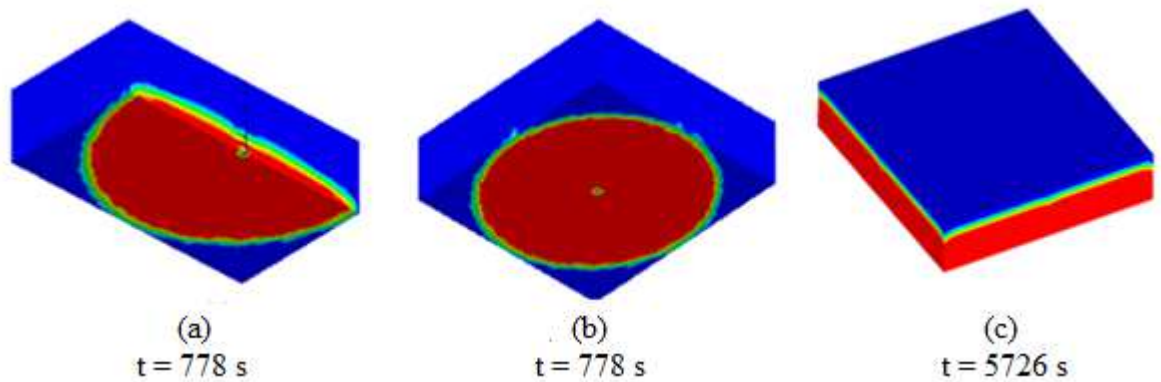


Figura 6.12 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$: (a) 778 s, (b) 778 s e (c) 5726 s

Caso_5

A permeabilidade transversal foi definida como $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Essa permeabilidade é 10000 vezes menor que a permeabilidade do Caso_1.

A Fig. 6.13 mostra que o escoamento da resina ocorreu primeiro praticamente em todo o plano inferior do molde, devido a velocidade da resina no plano ser 10000 vezes maior que a velocidade da resina na direção Z. Após decorridos 1530 s de simulação foi possível observar um escoamento unidirecional da resina na direção Z. Observa-se também que a diminuição de k_{zz} implica diretamente no aumento significativo do tempo de injeção. Para este caso, o ideal seria que toda a superfície superior fosse usada como ponto de saída, contudo experimentalmente, isto não é possível porque no processo de RTM o molde usado é fechado para comprimir o reforço. A recomendação seria colocar cinco pontos de saída um no centro e os demais nos cantos da face superior do molde.

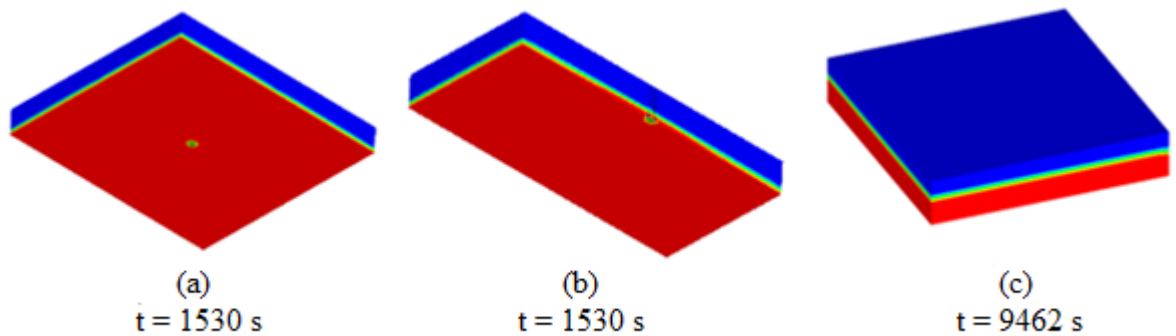


Figura 6.13 - Visualização da frente de escoamento da resina para $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$: (a) 1530 s, (b) 1530 s e (c) 9462 s

6.4.1 Análise dos Resultados

No modelo criado no PAM-RTM sensores foram localizados em uma das direções do plano e na direção da espessura para monitorar a posição da linha de frente da resina no decorrer do tempo. Foram plotados gráficos $Z_f \text{ (m)} \text{ versus } t \text{ (s)}$.

Na Fig. 6.14 a posição da frente de escoamento da resina ao longo da direção transversal (Z) é representada graficamente no tempo (t) para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. O gráfico mostra que aumentando linearmente a razão entre a permeabilidade no plano e transversal (1, 10, 100, 1000, 10000 vezes), o tempo necessário para a injeção sofre um aumento exponencial.

Observa-se que para o valor de $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, o tempo de preenchimento do molde foi praticamente o triplo quando comparado ao tempo para o valor de $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, o que acarreta em uma impregnação do reforço mais homogênea, contudo o tempo por ciclo aumenta muito, aumentando os custos de produção, além de que a resina pode entrar em cura antes da completa impregnação do molde.

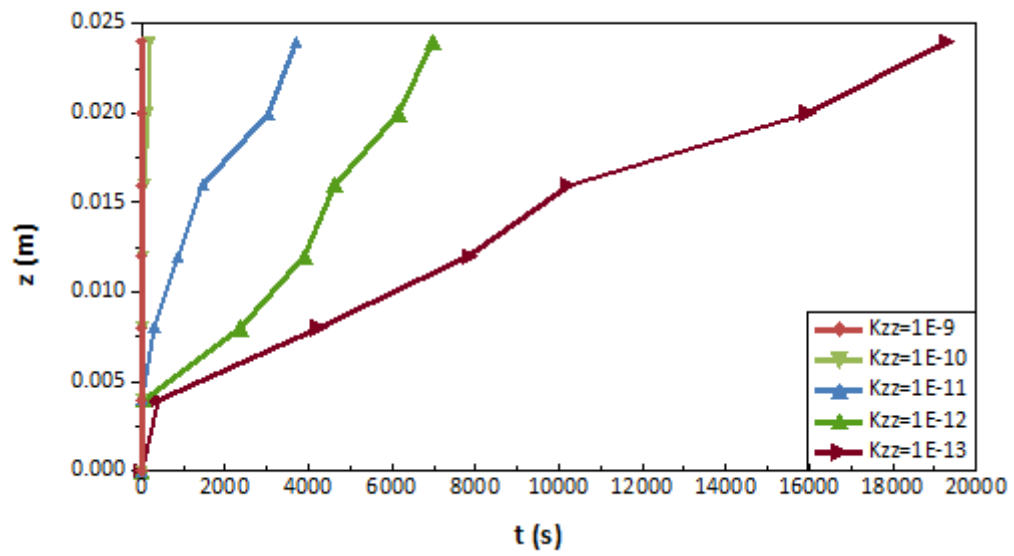


Figura 6.14 - Posição da frente de escoamento da resina na direção Z para $k_{zz} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $k_{zz} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e $k_{zz} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma metodologia simplificada para a determinação da permeabilidade transversal de reforços porosos no processo de RTM. O método combina um modelo de CFD para a injeção da resina no interior de um molde com meio poroso com a solução de uma equação algébrica não-linear. Esta equação algébrica foi formulada de tal modo que minimiza-se o resíduo entre a solução numérica e a experimental (neste caso um valor de referência foi calculado numericamente) formulada com base no tempo de preenchimento do molde.

Os resultados mostraram que com o conhecimento da permeabilidade no plano (k_{xx} , k_{yy}), as propriedades físicas (ϵ , ρ , μ), a pressão de injeção e o tempo total de enchimento do molde é possível prever a permeabilidade transversal de uma peça 3D.

Também foi realizado um estudo do efeito da variação da permeabilidade transversal em peças espessas. Este estudo resultou em recomendações teóricas a respeito do comportamento do fluxo dentro do molde e o posicionamento dos pontos de saída de resina.

A metodologia proposta não requer, necessariamente, qualquer sistema experimental. No entanto, é indispensável conhecer todas as propriedades físicas e a dependência da pressão de injeção com o tempo (se existir).

7.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Como sugestões para a continuação desse trabalho, têm-se:

- Realizar estudos desta metodologia com dados experimentais.
- Avançar na determinação da permeabilidade transversal através do emprego desta metodologia para a solução de um problema inverso multivariável, obtendo todas as três componentes do tensor da permeabilidade simultaneamente.
- Realizar estudos desta metodologia com outros softwares de simulação, como OpenFOAM e Fluent.

REFERÊNCIAS

- ALMACO, Site Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/>> Acesso em: 21/09/2014.
- ALVES, A. L. S. Processamento de Placas Compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de Seemann, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- AMICO, S. C. Novo processo de fabricação de compósitos para indústria. Revista Ciência Hoje, 219. p.55, 2005.
- AMORIM, W. F. Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem Por Transferência de Resina. Tese de Doutorado, Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, RJ, 2007.
- BARROS, P. H. L. Modelagem Analítica e Experimental da Filtração em Meios Porosos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ, 2008.
- BECKWITH, S. W.; HYLAND, C. R. Resin transfer molding: a decade of technology advances. [S. 1.]: SAMPLE International Business Office, 1999. 187p.
- BEJAN, A., 1995, Convection heat transfer, 2º ed. Durham: John wiley & Sons, Inc.
- BERCHTOLD, G. The potentials of a vacuum assisted CFC - Manufacturing process and its impact on large aircraft components. In: SAMPLE International Conference. California, 2006.
- BP, Site Blog do Plástico: Disponível em: <<http://blogdoplastico.wordpress.com/>> Acesso em: 25/02/2016.
- BRUSCHKE, M. V.; ADVANI, S. G. A Finite-Element Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous-Media, Polymer Composites, v. 11, n. 6, p. 398-405, 1990.
- CASE, J.; CHILVER, L.; ROSS, C. T. F. Strength of materials and structures. Elsevier, 4th ed., 1999.
- CERQUEIRA, J. C. M. M. Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM). Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto. 2008.
- CHAPRA, S.; CANALE, R. Numerical methods for engineers. McGraw-Hill international editions. McGraw-Hill, 6 ed., 2009.
- CF, Site Central Fibra: Disponível em: <<http://centralfibra.com.br/>> Acesso em: 01/03/2016.
- CHEN Y.; RODRIGUEZ A.; MINAIE B. A methodology to determine permeability distribution of a preform in resin transfer molding process. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 30, n. 2, p.169–178, 2010.

CHUI W. K.; GLIMM, J.; TANGERMAN, F. M.; JARDINE, A. P.; MADSEN, J. S.; DONNELLAN, T. M.; LEEK, R. Porosity Migration in RTM. in Proceedings of the 9th International Conference of Numerical Methods in Thermal Problems., p. 1323–1334, 1995.

COLLINS, R. E. 1961. Flow of Fluids Through Porous Materials. New York: Reinhold Chemical Engineering Series, Reinhold Publishing.

COMAS-CARDONAA, S.; BINETRUYA, P. G.; KRAWCZAKA, C. P. A generic mixed FE-SPH method to address hydro-mechanical coupling in liquid composite moulding processes. Composites: Part A, v. 36, n. 7, p.1004, 2005.

COUTINHO, B. G. Modelagem Matemática em Coordenadas Generalizadas e Desenvolvimento de Simulador Computacional para Aplicação em Processos de Moldagem por Transferência de Resina. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, 2013.

CRAWFORD, R. Plastics Engineering. Referex Engineering. Elsevier Science, 1998.

DANIEL, I.; ISHAI, O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press, USA, 1994.

DAVIE, A. E. Advanced resin infusion composite manufacturing processes. Comtek Advanced Struture. In: 6th CANCOM – CANADIAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITES, Winnipeg. Proceedings... Winnipeg: CANCOM, 2007.

DRAPIER, S.; PAGOT, A.; VAUTRIN, A.; HENRAT. P. Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. Composites Science and Technology, v. 62, p.1979–1991, 2002.

ENDRUWEIT, A.; ERMANNI, P. The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model, Composites: Part A, p. 439-451, 2004.

ENDRUWEIT, A.; LONG, A. C. A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements. Composites: Part A v. 42, n. 2, p. 165, 2011.

ESI Group., 2014, PAM-RTM 2014 - User's guide and tutorials, available at: www.esi-group.com.

FERLAND, P.; GUITTARD, D.; TROCHU, F. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. Polymer Composites, v. 17, n. 1, p. 149–158, 1996.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlim, 364 p. 1997.

GARAY, A. C. Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM light. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2010.

GAUVIN R.; TROCHU F. Key issues in numerical simulation for liquid composite molding processes. *Polymer composites*, v. 19, n. 3, p. 233–240, 1998.

GEORGE, A. Optimization of resin infusion processing for composite materials: simulation and characterization strategies. Tese de Doutorado, University of Stuttgart, 2011.

GEUZAIN, C.; REMACLE, J. F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and postprocessing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 79, n. 11, p. 1309–1331. 2009.

GOMES, M. N. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante para a Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2010.

GONÇALVES, N. D. F. Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

GOODMAN, S. Handbook of Thermoset Plastics. *Plastics & Elastomers*. Noyes Publications, 1998.

HAN, K. K.; LEE, C. W.; RICE, B. P. Measurements of permeability of fiber preforms and applications. *Composites Science and Technologies* v. 60, p. 2435-2441, 2000.

HATTABI, M.; ECHAABI, J.; BENSALAH, O. Numerical and experimental analysis of the resin transfer molding process. *Korea-Australia Rheology Journal*, v. 20, n. 1, p. 7-14, 2008.

HEXCEL CORPORATION. Advanced fibre-reinforced matrix products for direct processes. 2005. (Publication, n. ITA 272). Catálogo de exposição.

HIEBER, C. A.; SHEN, S. F. A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 7, p.1-32, 1980.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the dynamics of free boundaries. *Journal Computational Physics*, v. 39, p. 201-225, 1981.

HOES. K.; DINESCU, D.; SOL, H.; VANHEULE, M.; PARNAS, R. S.; LUO, Y.; VERPOEST, I. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 33, n. 7, p. 959-969, 2002.

ISOLDI, L. A. OLIVEIRA, C. P.; ROCHA, L. A.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. A. Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 34, n. 2, p. 105-111, 2012.

KAVIANY, M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. *Mechanical Engineering Series*. Springer, 1995.

KIM, S.K.; DANIEL, I. M. Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 34, n. 5, p. 421–429, 2003.

KINCAID, D. R.; CHENEY, E. W. *Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing*, Brooks Cole, 3rd ed, 2001.

KUAN, Y.; EL-GIZAWY, A.S. Numerical Characterization of Mold Injection in Resin Transfer Molding Process. *Advances in Polymer Technology*, v. 19, n. 3, p. 173–179, 2000.

LECLERC, J.S.; RUIZ, E. Porosity reduction using optimized flow velocity velocity in Resin Transfer Molding. *Composites Part A*, 39, 1859, 2008.

LEITÃO, E. S. Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, São Paulo, 2007.

LEKAKOU, C.; JOHARI, M. A. K.; NORMANN, D.; BADER. M. G. Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites: Part A*, v. 27A, p. 401-408, 1996.

LIANG, Z.; ZHANG, C.; WANG, B.; SHIH, C. In-situ measurement and monitoring of fiber preform permeability for liquid composite molding. In: *Proceedings of the 45th International SAMPE Symposium and Exhibition - Science of Advanced Materials and Process Engineering Series v. 45*, pp. 2053-2062, Long Beach, CA, May 21-25, 2000.

LUGO, J. Method to Estimate Multiple Permeability Components From a Single Rectilinear Experiment in Liquid Composite Molding Processes. 2013. 119f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) - University of Delaware, Estados Unidos.

LUNDSTRÖM, T. S.; STENBERG, R.; BERGSTRÖM. R.; PARTANEN, H.; BIRKELAND, P. A. In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*. v. 31, n. 1, p. 29-43, 2000.

LUZ, F. F. Análise comparativa do escoamento de fluido em experimentos RTM utilizando Aplicativos comerciais. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2011.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p., 2004.

MALISKA, C. R.; VASCONCELLOS, J. F. V. An unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 182, p. 401-420, 1998.

MASTERBERGEN, D. B. Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures. 2004. 154f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) – Montana State University, Bozeman

MICHAUD, D. J.; BERIS, A. N.; DHURJATI, P. S. Curing behavior of thick-sectioned RTM composites, *Journal of Composite Materials*, v. 32, n. 14, p. 1273-1296, 1998.

MUSKAT, M.; WYCKOFF, R. D. The flow of homogeneous fluids through porous media. *International series in physics*. J.W. Edwards, 1946.

NECHWATAL, A.; MIECK, K-P.; REUBMAN, T. Developments in the characterization of natural fibre properties and in the use of natural fibres for composites. *Composites Science and Technology*. 2003; v. 63, n. 9, p. 1273-1279.

NEDANOV, P. B.; ADVANI, S. G. A Method to Determine 3D Permeability of Fibrous Reinforcements, *Journal of Composite Materials*, v. 36, n. 2, p. 241-254, 2002.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C *Compósitos estruturais, ciência e tecnologia*. Ed. Blucher: São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, C. P. Modelagem Numérica do Transporte de Resinas em Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2010.

OLIVEIRA, C. P., SOUZA, J. A.; AMICO, S. C.; ISOLDI, L. A.; SILVA, R. D. S. Comparação dos métodos VOF e FE/CV aplicados à solução de problemas de RTM. *Vetor*, Rio Grande, v. 21, n. 2, p. 22-33, 2011.

OLIVEIRA, I. R. Infiltração de Fluidos Carregados em Meios Porosos via Processo RTM: Análise Teórica e Experimental. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, 2014.

OLIVEIRA, I. R.; LIMA, A. G. B.; AMICO, S. C.; BEZERRA, V. M. F.; BARCELLA, R. Investigação da infiltração de reforços fibrosos com fluidos carregados em processo RTM. *SAP – Simpósio Argentino de Polímeros*, 15 a 18 de Novembro de 2011, Bahia Blanca, Argentina.

OLIVERO, K. A. HAMIDI, Y. K.; AKTAS, L.; ALTAN, M. C. Effect of Preform Thickness and Volume Fraction on Injection Pressure and Mechanical Properties of Resin Transfer Molded Composites. *Journal of Composite Materials*, Oklahoma, US, v. 38, n. 11, p. 937-957, 2004.

PHELAN, F. R. Simulation of the injection process in resin transfer molding. *Polymer Composites*; v. 18, n. 4, p. 460-476, 1997.

PORTO, J. S. Modelagem Computacional do Processo de Moldagem por Transferência de Resina Aplicado à Engenharia Naval. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2012.

PRADO, V. J. S. Moldagem de compósitos pelo processo de infusão de resina: correlação de propriedades. Dissertação (Mestrado). Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica São José dos Campos. SP, 2009.

QUILTER, A. Composites in aerospace applications. *Aircraft Maintenance Technology*, v. 16, n. 1, p.14–16, 2004.

RESENDE, M. C. O Uso de Compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros*. v. 10, n. 2, p.1-6, 2000.

ROSSMAN, P. C. C.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G.; CAMPOS, R. O. G.; EIGER, S. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro: v. 5, 1 ed. ABRH. 2001.

SAOUAB, A.; BRÉARD, J.; LORY, P.; GARDAREIN, B.; BOUQUET, G. Injection simulations of thick composite parts manufactured by the RTM process, *Composites Science and Technology*, v. 61, p. 445-451, 2001.

SCHMIDT, T. M.; GOSS, T. M.; ORNAGHI JUNIOR, H. L.; AMICO, S. C. Determinação da permeabilidade de reforços fibrosos no processo de moldagem por transferência de resina. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARBONO (CARBONO 2007), Gramado/RS. p. 94-99, 2007b.

SCHMIDT, T. M.; GOSS, T. M.; LEKAKOU, C.; AMICO, S. C. Evaluation of the permeability of hybrid fibrous reinforcements as a function of the stacking sequence in resin transfer molding (RTM). In: International Conference on Advanced Materials and Composites (ICAMC-2007), Thiruvananthapuram, India. p. 82-89, 2007a.

SHARMA, S.; SIGINER, D. A. Permeability Measurement Methods in Porous Media: a review. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - IMECE*. Boston, Massachusetts, USA, 2008.

SHIN, K. S.; SONG, Y. S.; YOUN, J. R. Radial flow advancement in multi-layered perform for resin transfer molding. *Korea – Australia Rheology Journal*, v. 18, n. 4, p.217-224, 2006.

SHOJAEI A.; GHAFFARIAN S. R.; KARIMIAN S. M. H. Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: a review. *Polymer Composites*, v. 24, n. 4, p. 525–544, 2003a.

SHOJAEI A.; GHAFFARIAN S. R.; KARIMIAN S. M. H. Numerical simulation of three-dimensional mold filling in resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 22, n. 16, p. 1497–1529, 2003b.

SHOJAEI, A. A numerical study of filling process through multilayer preforms in resin injection/compression molding. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 11-12, p. 1546-1557, 2006.

SILVA, F. M. V.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; AMICO, S. A. Comparison of Two Numerical Methodologies for the Modelling of the RTM Process. In: ENCIT 2008 - 12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belo Horizonte, MG, 2008.

SONG, X. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM): model development and verification. 2003. 145f. Thesis (Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics) – Virginia Polytechnic Institute and University, Blacksburg, Virginia.

SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, C. P. ; AMICO, S. C. A numerical methodology for permeability determination of reinforcements for polymeric composites. 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 18 a 22 de Novembro de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

SOUZA, J. A.; KOPS, H. M. H.; TRINDADE, R. S.; AMICO, S. C. Anisotropic permeability determination: Rectilinear and radial methods comparison. In: Indo-Brazil Bilateral International Conference on Advanced Materials and Manufacturing - ICAMM, 2015, Tirunelveli-TN/ÍNDIA. Proceedings of the ICAMM 2015, 2015. v. 1. p. 1-5.

SOUZA, J. A.; NAVA, M. J. A.; ROCHA, L. A. O.; AMICO, S. C. Two-Dimensional Control Volume Modelling of the Resin Infiltration of a Porous Medium with a Heterogeneous Permeability Tensor, *Materials Research*, v. 11, n. 3, p. 261-268, 2008.

SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; AMICO, S. C.; VARGAS, J. V. C. A Numerical Investigation of the Resin Flow Front Tracking Applied to the RTM Process, *Materials Research*, v. 14, n. 3, p. 345-354, 2011.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. *Science Direct: Applied Mathematical Modelling*, v. 35, n. 8, p. 3710-3730, 2011.

TADMOR Z., BROYER E., GUTFINGER C. Flow Analysis Network (FAN) – Solving Flow Problems in Polymer Processing. *Polymer Engineering & Science*. v. 14, n. 9, p. 660 – 665, 1974.

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

TURNER, D. Z.; HJELMSTAD, K. D.; Determining the 3D permeability of fibrous media using the Newton method. *Composites Part B: Engineering*, v. 36, n. 8, p. 609–618, 2005.

VAFAI, K. *Handbook of Porous Media*, Second Edition. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, FL., 2005.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman, Malaysia, 257 p., 1999.

WANG, V. W.; HIEBER, C. A.; WANG, K. K. Dynamic simulation and graphics for the injection-molding of 3-dimensional thin parts. *Polymer Engineering*, v. 7, n. 1, p. 21– 45, 1986.

WEITZENBÖCK, J. R.; SHENOI, R. A.; WILSON, P. A. Measurement of three dimensional permeability, *Composites Part A*: v. 29, n.1-2, p. 159–169, 1998.

WEITZENBÖCK, J. R.; SHENOI, R. A.; WILSON, P. A. Measurement of Principal Permeability with the Channel Flow Experiment. *Polymer Composites*. v. 20, n. 2, p.321–335, 1999a.

WEITZENBÖCK, J. R.; SHENOI, R. A.; WILSON, P. A. Radial flow permeability measurement. Part A: Theory, Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing. v. 30, n. 6, p.781–796, 1999b.

WOERDEMAN, D. L.; PHELAN, F. R.; PARNAS, R. S. Interpretation of 3-D Permeability Measurements for RTM Molding. Polymer Composites. v. 16, n. 6, p. 470–480, 1995.

Apêndices

Apêndice A: Gerador de malha GMSH

O GMSH é um software livre, disponível para várias plataformas. Apresenta três módulos: geometria, malha e solver. A especificação de qualquer entrada para esses módulos pode ser feita de forma interativa usando a interface gráfica ou com arquivos de script oferecidos pelo GMSH. Se o usuário estiver utilizando a interface gráfica para construir a geometria e a malha, um arquivo “.geo” é automaticamente criado, podendo ser salvo, para posteriormente ser editado. Se o usuário editar este arquivo, as alterações poderão ser visualizadas pela interface gráfica. A Fig. A.1 mostra a interface deste aplicativo.

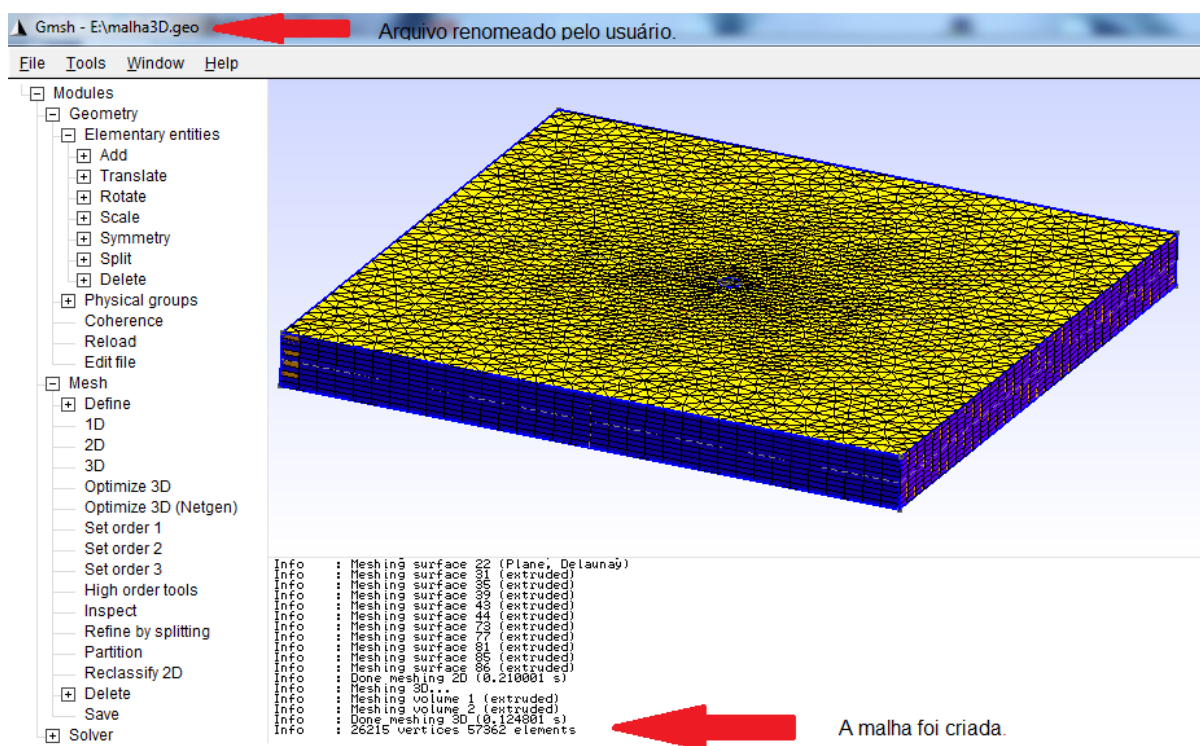


Figura A.1 - Interface do software GMSH.

As malhas podem ser exportadas em vários formatos. Neste trabalho foram exportadas no formato Nastran, ou seja, “.bdf” sendo este o formato exigido pelo PAM-RTM. A Fig. A.2 mostra como a malha deve ser exportada.

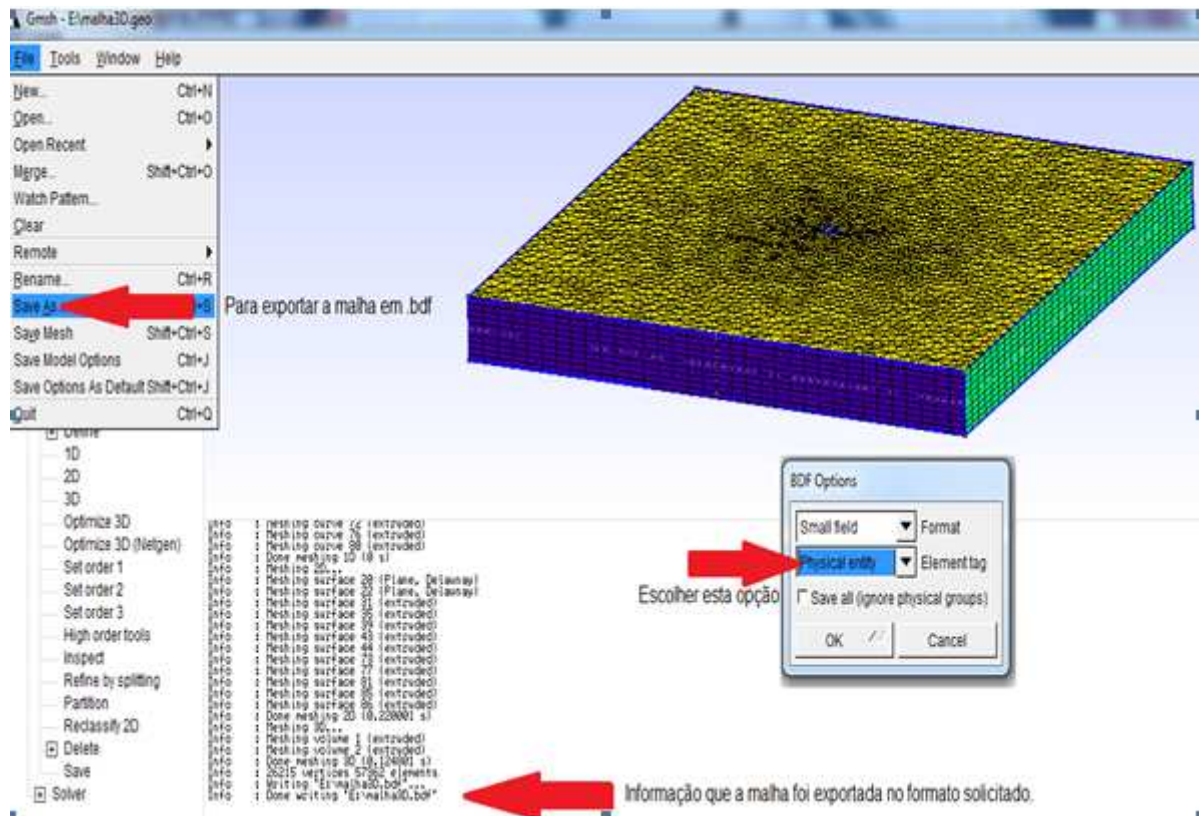


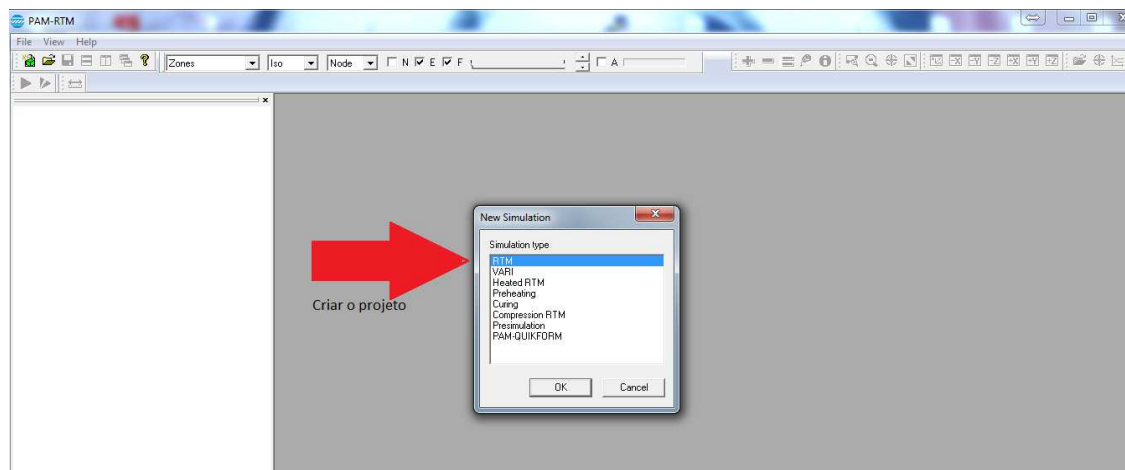
Figura A.2 – Informações de como exportar a malha para ser usada no PAM-RTM.

Apêndice B: Criação do modelo no PAM-RTM

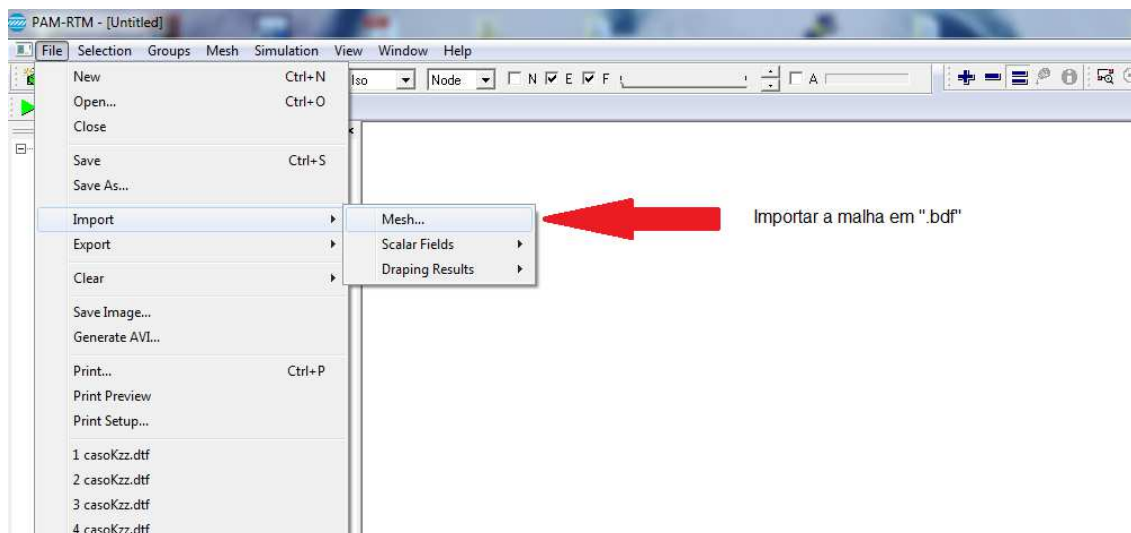
A malha gerada no GMSH é importada e as informações sobre a resina, o reforço fibroso, assim como as condições de contorno são ajustadas diretamente nos campos pré-determinados no PAM-RTM.

A seguir é descrito um passo a passo de como esses campos foram ajustados.

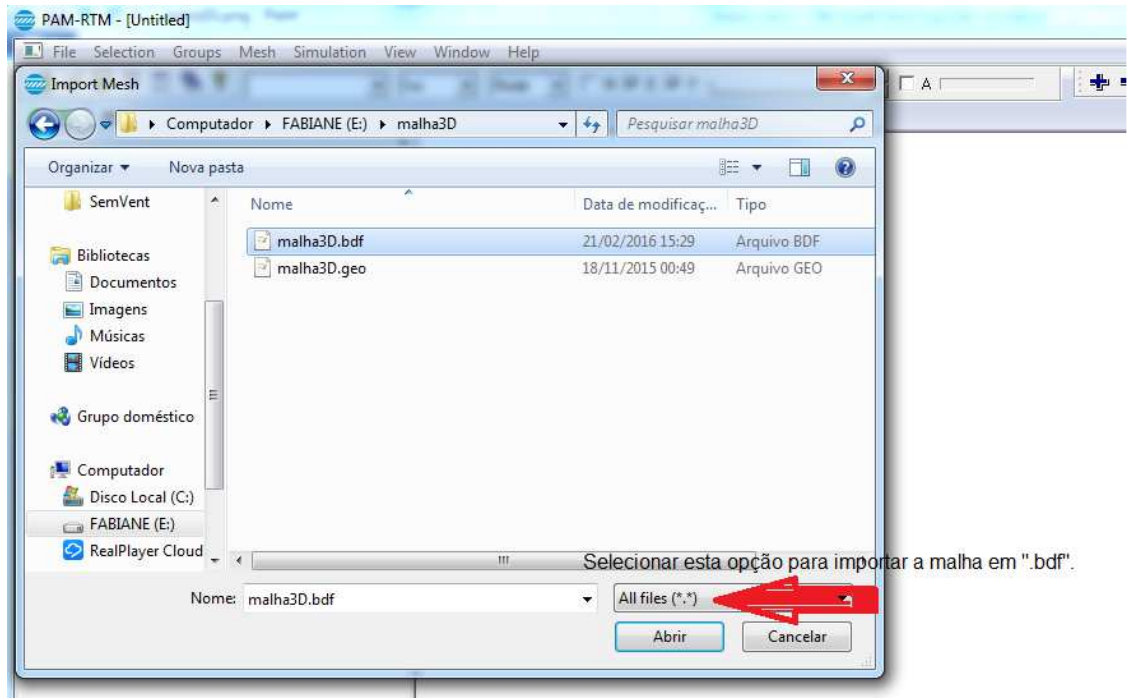
1º) Criar o projeto no PAM-RTM



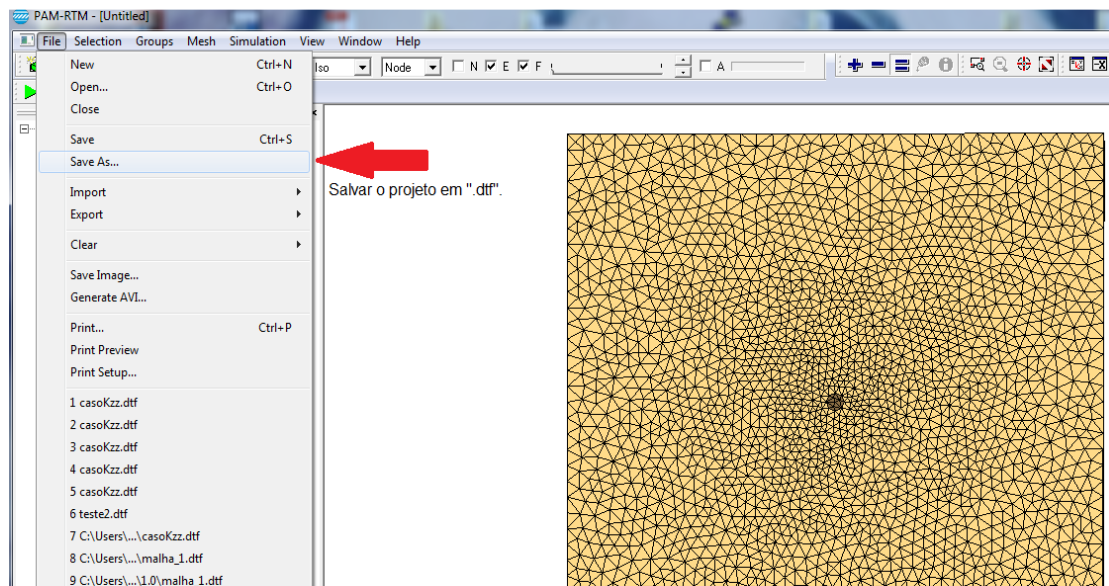
2º) Importar a malha em “.bdf”



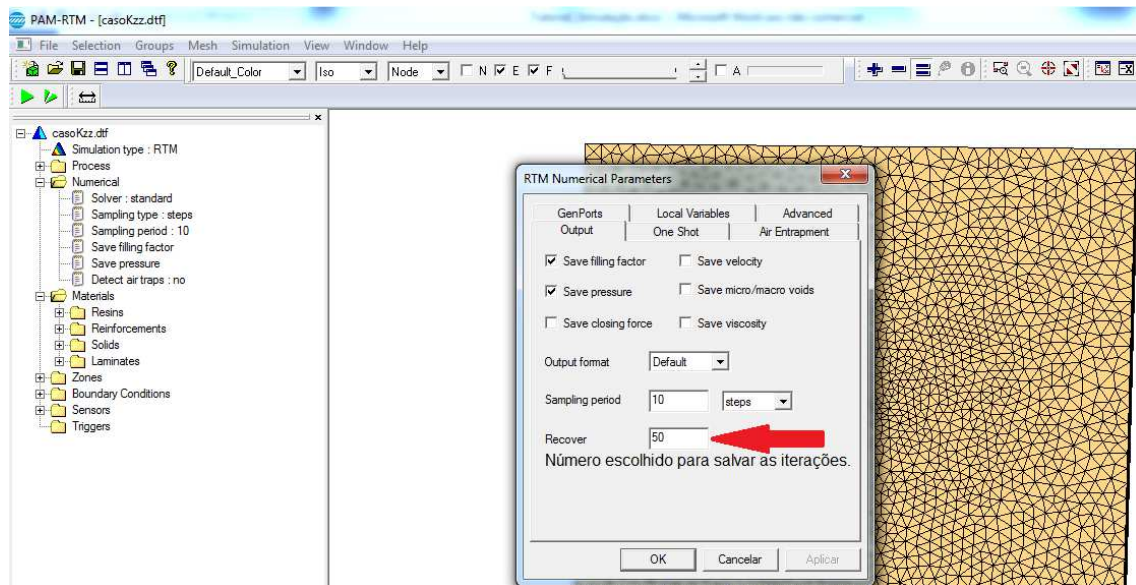
Dica:



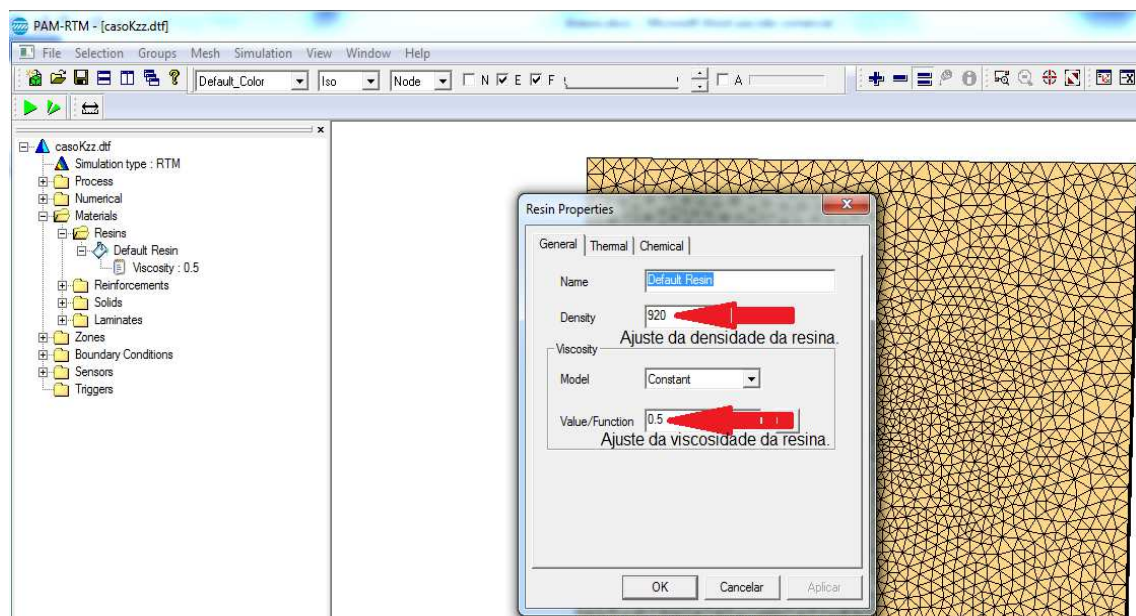
3º) Salvar o projeto.



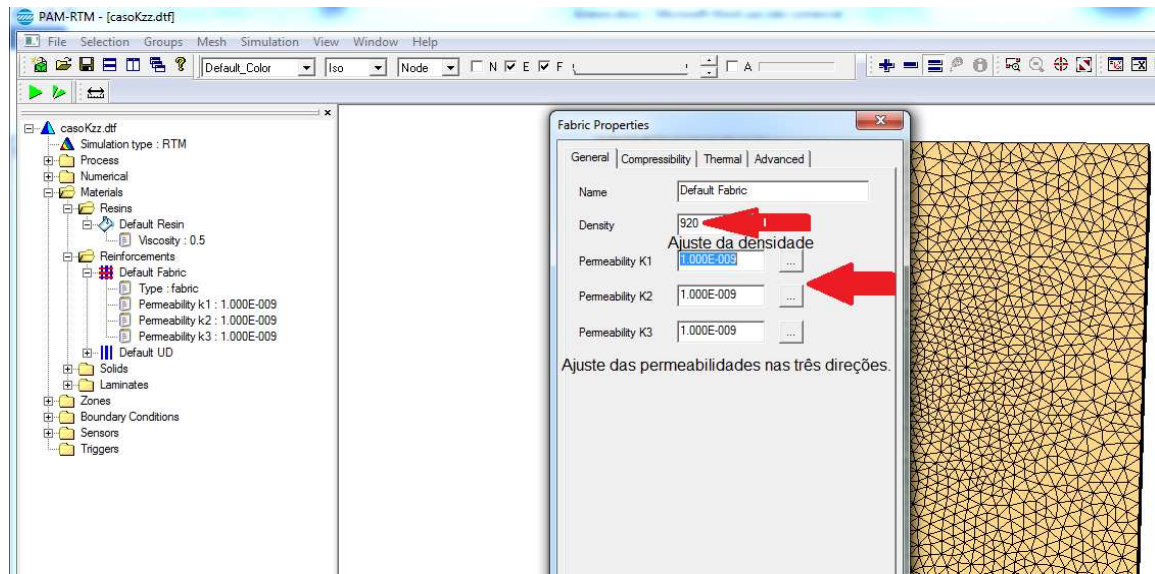
4º) Ajustar o número de iterações para o PAM-RTM fazer o salvamento durante a simulação.



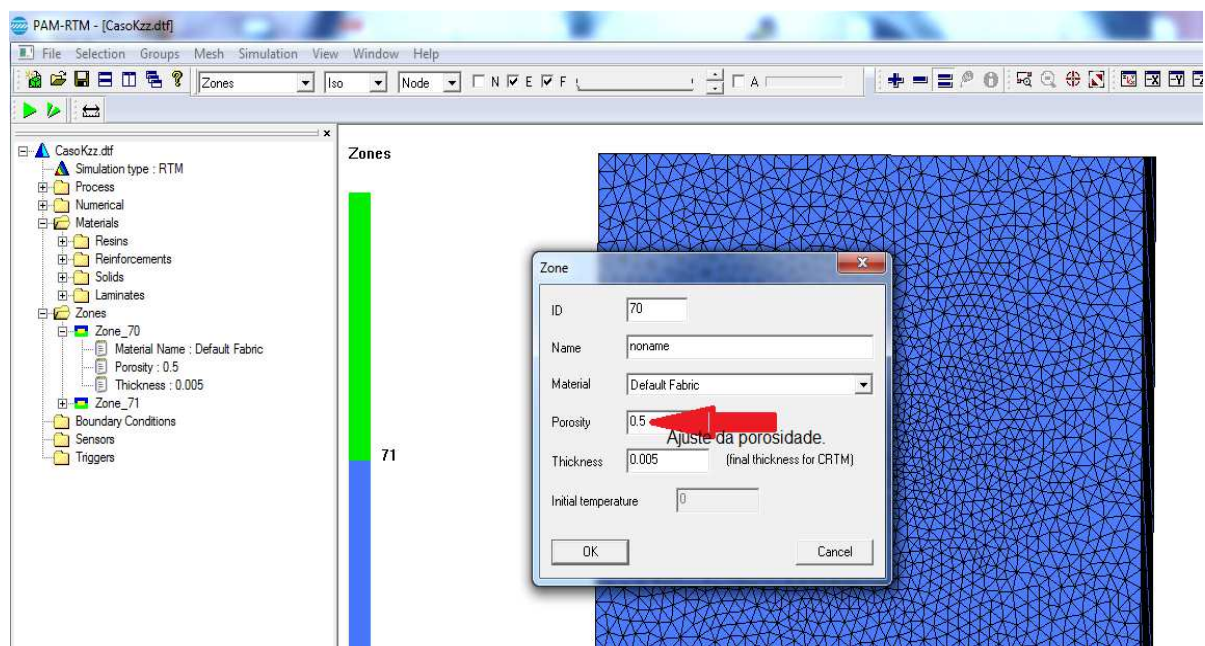
5º) Ajustar as informações sobre o fluido.

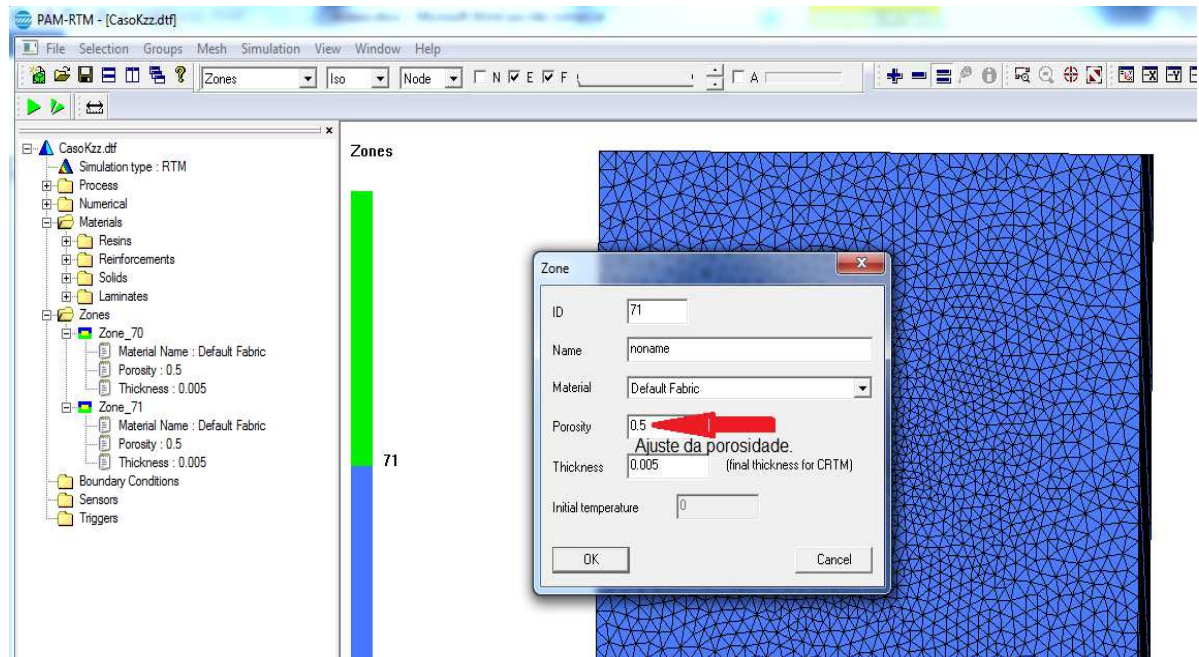


6º) Ajustar as informações da densidade e da permeabilidade do reforço.

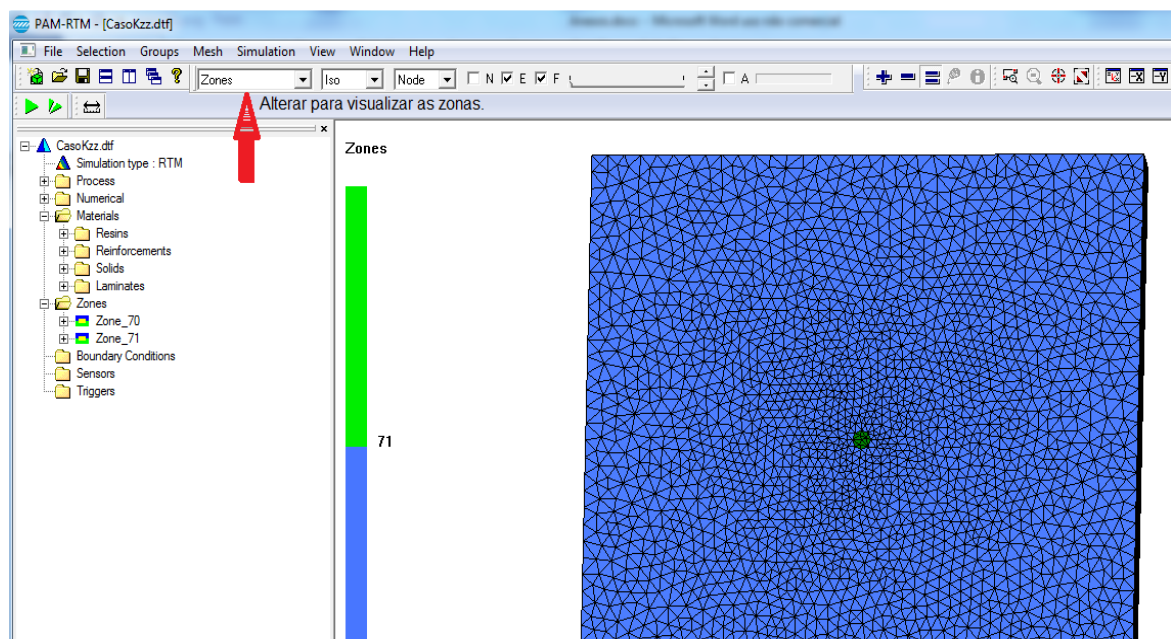


7º) Ajustar as informações da porosidade.

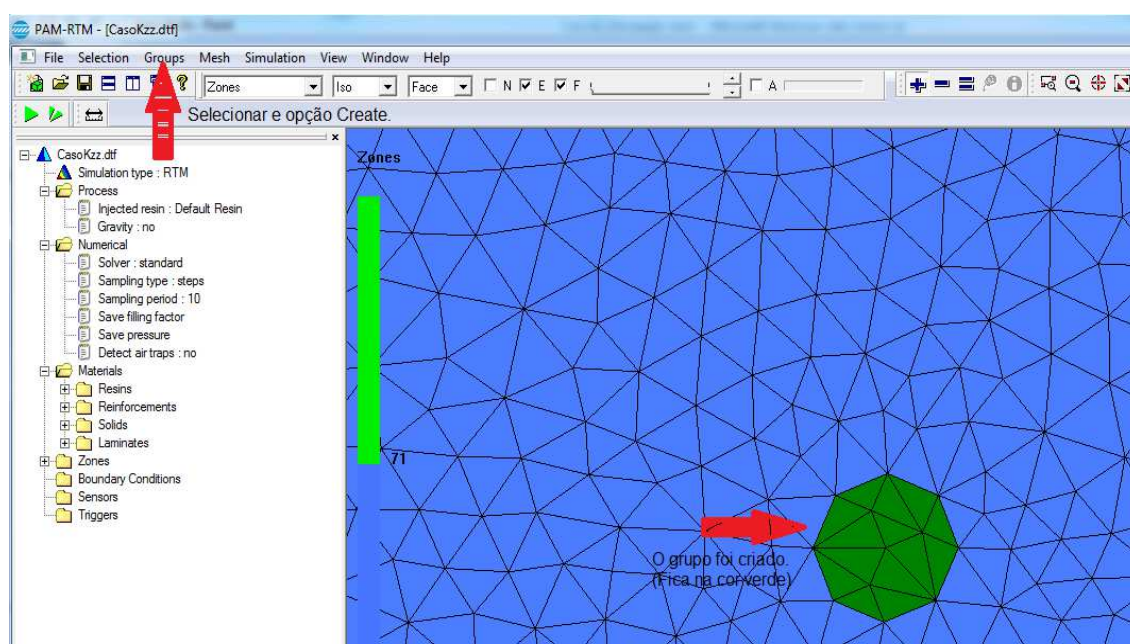
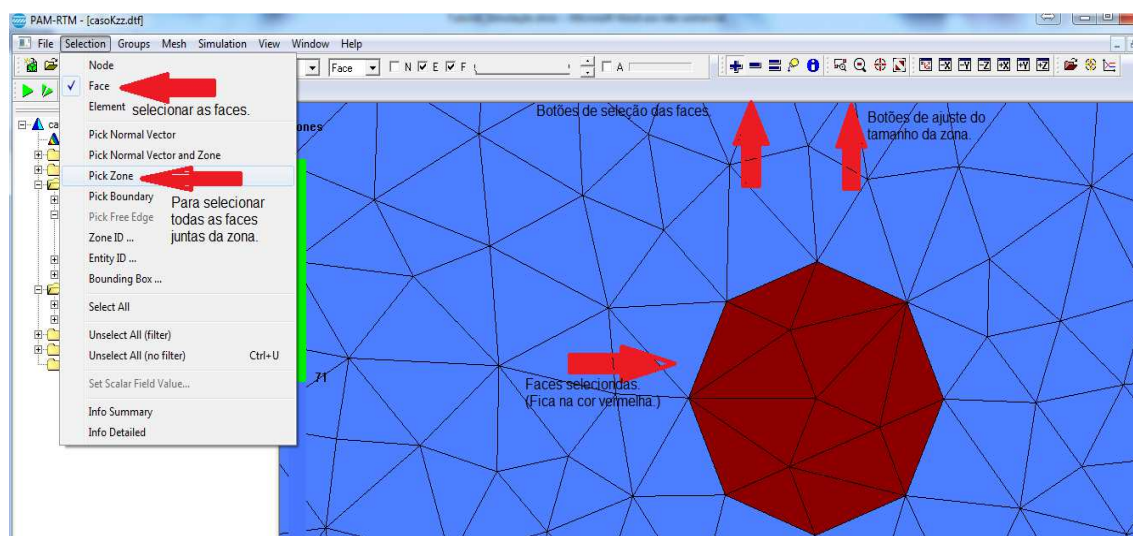


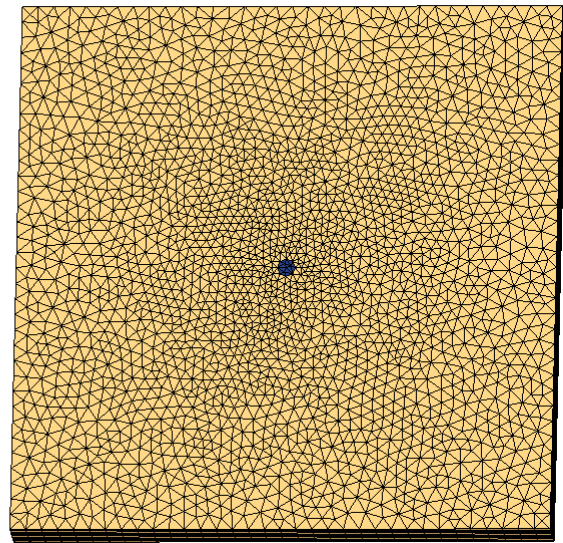
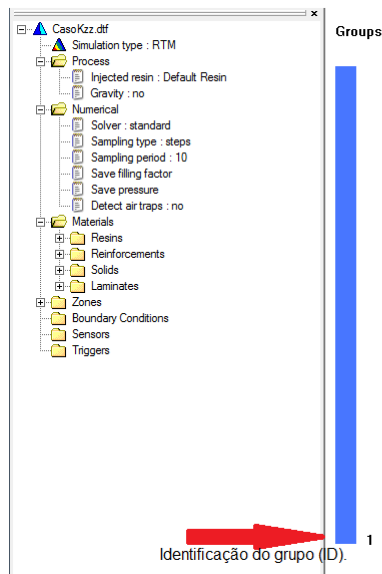


8º) Identificar a zona para criar o grupo que será o ponto de injeção.

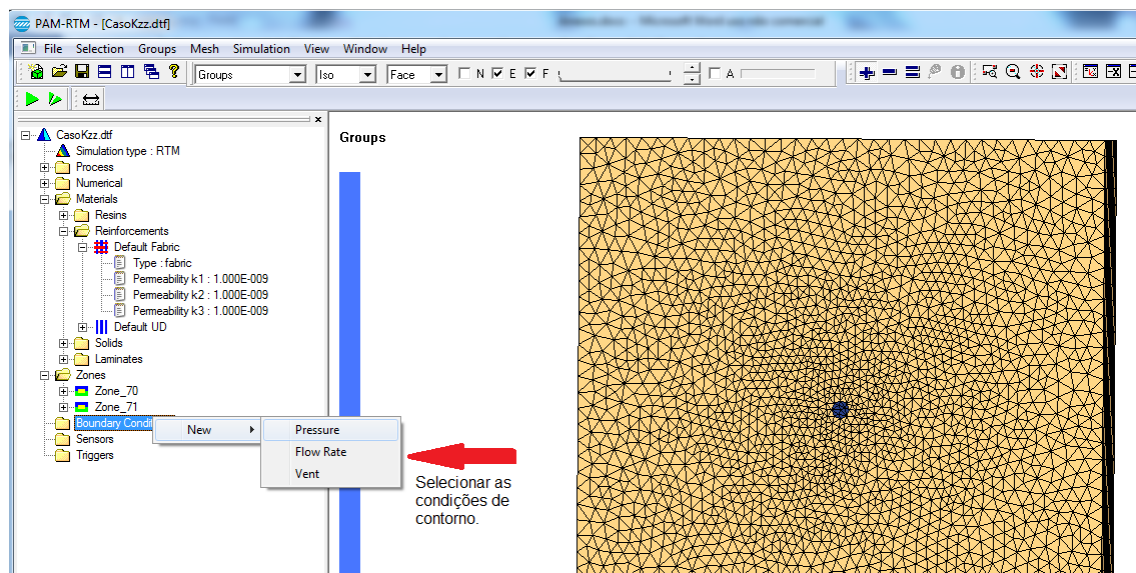


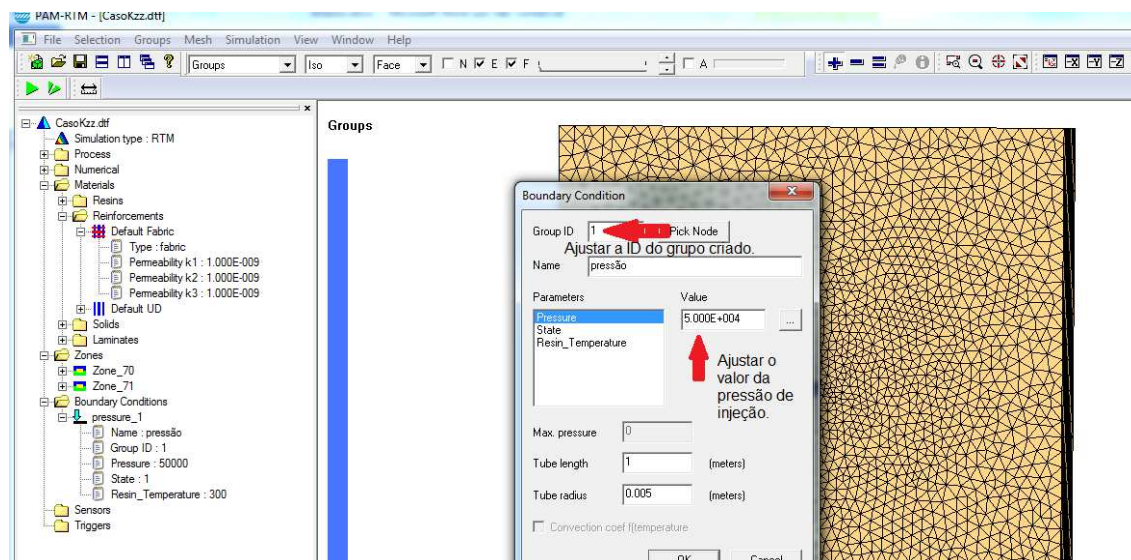
9º) Criar um grupo para ajustar a pressão de injeção.



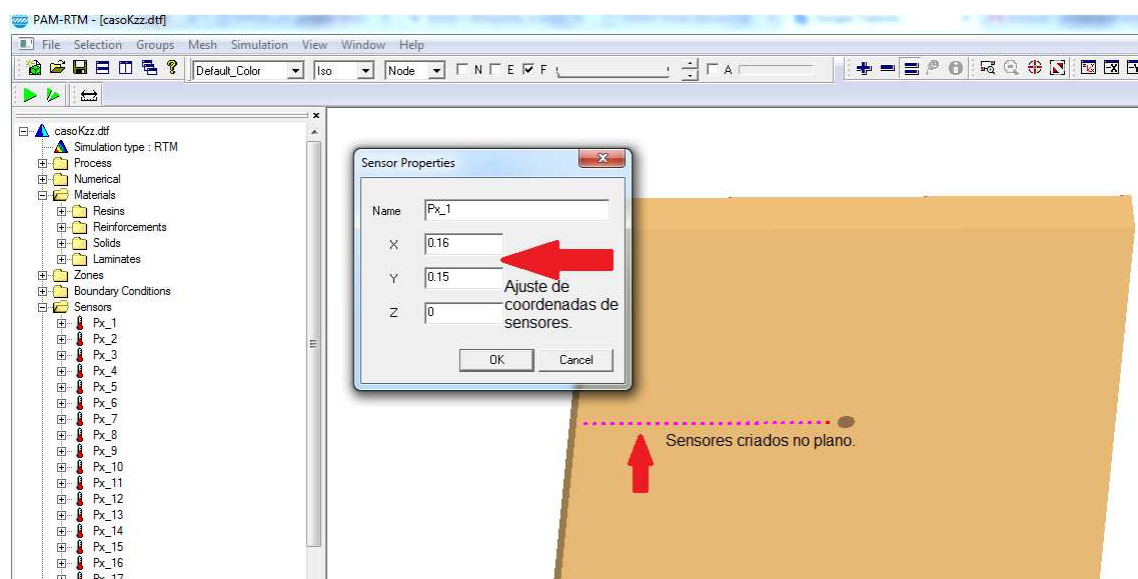


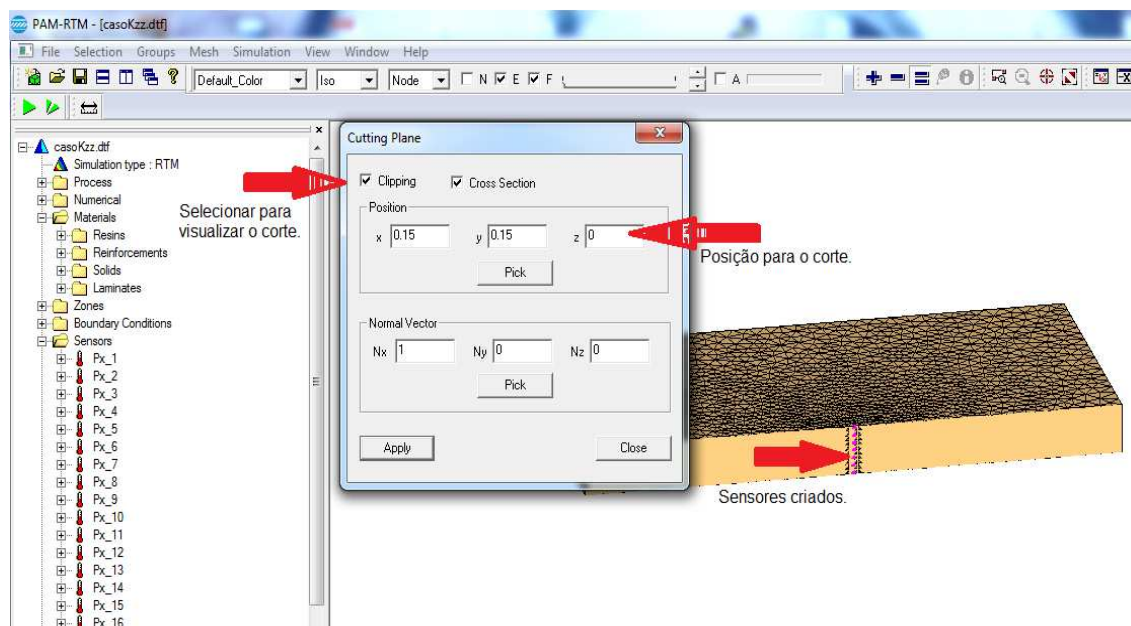
10º) Criar as condições de contorno.





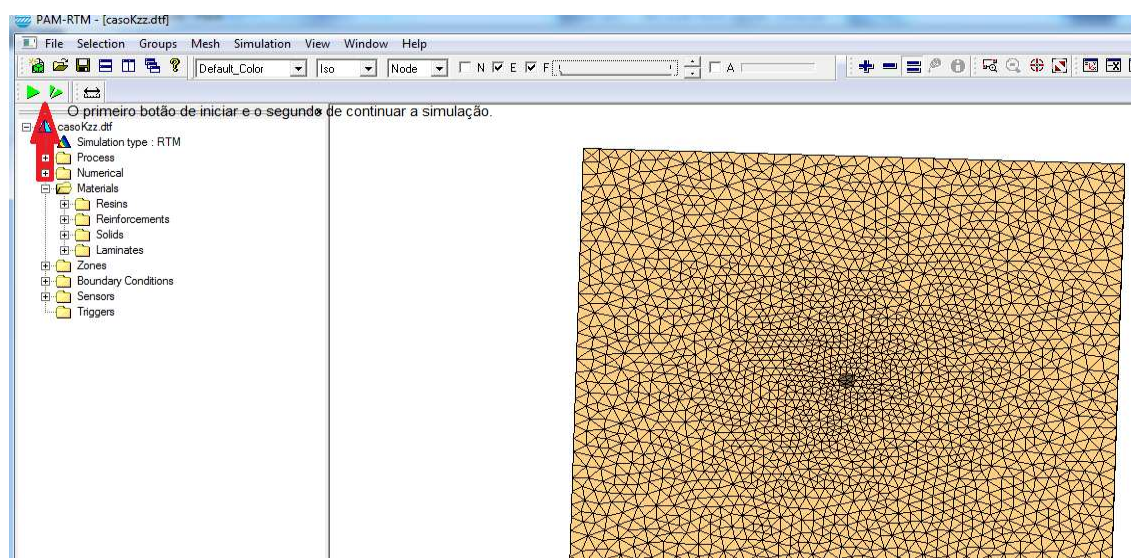
11º) Criar sensores no plano e na espessura para acompanhar o escoamento da resina.



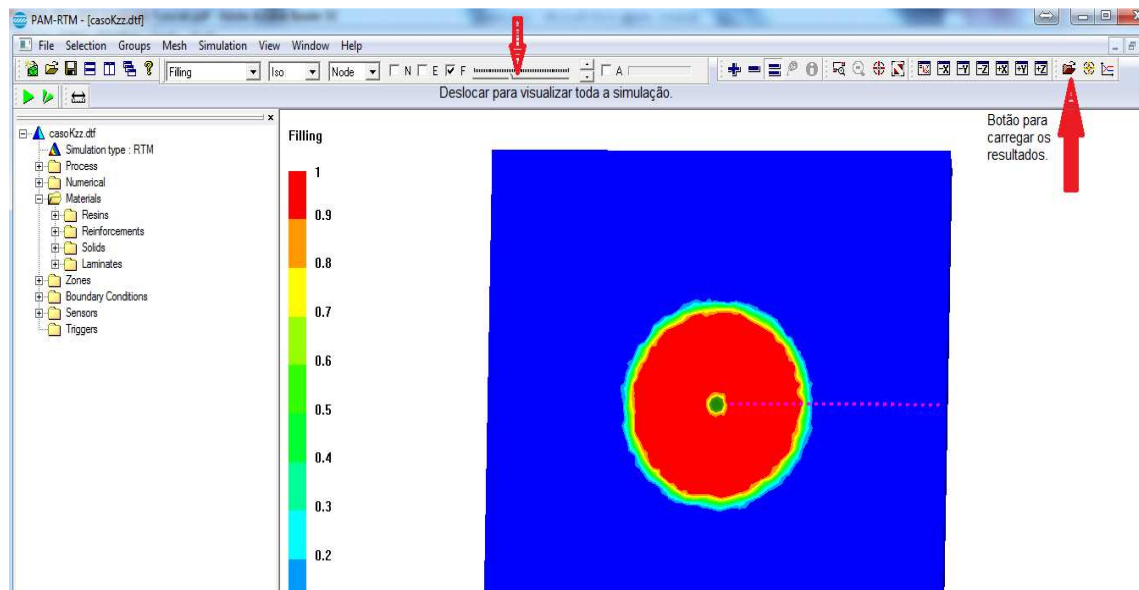


12º) Salvar o projeto novamente.

13º) Iniciar a simulação ou continuar a partir do último salvamento.



14º) Carregar os resultados após o processamento.



Após a simulação ser concluída 14 arquivos são criados. Dentre eles destaca-se o arquivo “casoKzz_Filling_Treshold.dat” que oferece informações sobre os sensores. A localização de cada um e o tempo que a resina os atinge. Este arquivo pode ser editado.

```

casoKzz_Filling_Treshold.dat
# column 1 to 3 : sensor position (x, y, z)
# column 4 : time (s)
Eixo_x
1.60000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 4.30786E-001
1.65000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 9.82912E-001
1.70000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 3.40289E+000
1.75000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 7.09337E+000
1.80000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.17144E+001
1.85000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.04310E+001
1.90000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.73865E+001
1.95000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 3.62146E+001
2.00000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 4.34049E+001
2.05000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 5.48071E+001
2.10000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 7.03459E+001
2.15000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 8.36012E+001
2.20000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 9.90938E+001
2.25000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.09258E+002
2.30000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.25944E+002
2.35000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.53208E+002
2.40000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.64376E+002
2.45000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 1.81028E+002
2.50000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.08512E+002
2.55000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.18646E+002
2.60000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.53390E+002
2.65000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.68692E+002
2.70000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 2.91511E+002
2.75000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 3.34782E+002
2.80000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 3.60511E+002
2.85000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 3.92573E+002
2.90000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 4.22429E+002
2.95000E-001 1.50000E-001 0.00000E+000 4.59542E+002
Eixo_z
1.50000E-001 1.50000E-001 1.00000E-003 3.76035E-002

```