

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ANNA CAROLINA ZORNITTA LISTON**

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA MISTURA DE MEG EM ÁGUA EM  
UM CANAL CONFINADO**

**CURITIBA**

**2025**

**ANNA CAROLINA ZORNITTA LISTON**

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA MISTURA DE MEG EM ÁGUA EM  
UM CANAL CONFINADO**

**Experimental and numerical study of MEG mixing in water in a confined  
channel**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales

Coorientador(a): Prof. Dr. Henrique Stel de Azevedo

**CURITIBA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Curitiba**



ANNA CAROLINA ZORNITTA LISTON

## **ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA MISTURA DE MEG EM ÁGUA EM UM CANAL CONFINADO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Engenharia Térmica.

Data de aprovação: 07 de Julho de 2025

Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Alencar Schneider, Doutorado - Faculdades Integradas do Brasil (Unibrasil)

Dr. Moises Alves Marcelino Neto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 07/07/2025.

Dedico este trabalho à minha família, por ter  
sido minha base.  
E aos meus amigos, por terem sido minha família  
quando a minha estava longe.

## **AGRADECIMENTOS**

Essa dissertação foi um trabalho de muitos anos, onde passei por muitas situações difíceis e diante disse alguns agradecimentos se fazem necessários.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rigoberto Eleajar Melgarejo Morales, por me apoiar e incentivar mesmo quando as coisas pareciam impossíveis.

Ao meu coorientador, Dr. Henrique Stel de Azevedo, sem o qual o vasto conhecimento em CFD não teria sido possível esse trabalho.

A Stephanie Goulart e Henrique Higashi, por me mostrarem que eu era capaz desse desafio e pelo auxílio durante esse período.

As minhas melhores amigas, Caroline Casacurta e Ana Laura Gomes da Costa, por me mostrarem o tempo todo que eu conseguiria e serem meu apoio maior durante toda a vida.

Aos meus amigos do Rolê Clandestino e dos Engenheiros Reclamões, Ana Letícia, Guilherme Antunes, José dos Santos, João Duarte, Caroline Politta, Daniela Wipieski, Dylan Oliani, Nathan Albrecht, Laura Beatriz, Benjamin Nicolau, Tenshi Eckstein, Giuliano Bryan, Camilla Verbiski, Juliano Milher e Rafael Hadas, vocês são minha família e os momentos de descontração com todos vocês foram essenciais para poder seguir em frente.

Quero agradecer imensamente aos colegas por todo apoio e ajuda das mais variadas formas: Carolina Cimarelli, Tiago Dalcuche, Luiz Fernando, Elcilane Freitas, Rômulo, Gabriel Torelli, Pedro Machado e Edgar Ofuchi.

Mas acima de tudo, quero agradecer aos meus pais, Neiva Zornitta Liston e João Miguel Liston, e a minha cachorrinha, Cora, por serem minha base e me apoiarem por toda a minha vida, sem esse imenso apoio na vida, eu não teria alcançado nada.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP - Gestão FINEP, Convênio N° 0.1.19.0240.00, Ref 0431/19 - PRH21-UTFPR.

The path to heaven runs through  
Miles of clouded hell right to the top  
“Imagine Dragons”

## RESUMO

A exploração marítima de petróleo tem se expandido para regiões de águas cada vez mais profundas, as quais possuem condições propícias para a formação de sólidos cristalinos conhecidos como hidratos, trazendo esses uma série de problemas técnico-econômicos, ambientais e principalmente de segurança. Dessa forma, busca-se evitar sua formação, sendo uma maneira para tal a utilização de inibidores termodinâmicos de hidratos, em específico o Monoetilenoglicol (MEG). Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma comparação entre estudo experimental e numérico do processo de mistura de dois fluidos miscíveis, MEG e água. De modo geral, o estudo consiste em misturar numa geometria confinada, inicialmente preenchida por água, um segundo líquido miscível em água, o MEG, sob diferentes taxas e volumes de injeção, analisando-se no processo a evolução da mistura do fluido secundário em meio ao primário, sendo para esse fim, utilizada uma geometria confinada *quasi* 2D. Numericamente, o problema é resolvido pelo Método dos Volumes Finitos através do conceito de fluido de composição variável, com auxílio do programa comercial ANSYS® CFX®. Os resultados numéricos obtidos foram comparados aos resultados experimentais, porém não foi possível a criação de um modelo numérico que representasse satisfatoriamente os resultados obtidos de maneira experimental. Ao final ressalta-se a importância de um estudo utilizando diferentes correlações para a difusividade.

Palavras-chave: hidratos, MEG, mistura, líquidos miscíveis, experimental, numérico.

## ABSTRACT

The offshore oil extraction has been working progressively into deep water region, which have favorable conditions for crystallin solids formation called hydrates, constituting not only economic and environmental issues, but also of safety ones. Therefore, it is sought to avoid its formation, being one way the use of thermodynamic hydrate inhibitors, ethylene glycol in specific. In this sense, the present work aims to make a comparison between the numerical and experimental analysis of the mixing of miscible fluids, MEG and water. In general, the study consists in mixing, inside a confined geometry initially filled with tap water, a second liquid miscible in water, ethylene glycol (MEG), under different rates and total volume of injection, analyzing during the process the mixing evolution for the secondary fluid into the primary one, being used, to this end, a confined *quasi* 2D geometry. Numerically, the problem is solved by the Finite Volumes Method through the concept of variable composition fluid, with the commercial software ANSYS® CFX®. The numerical results obtained were compared to the experimental ones, however the creation of a numerical model which could represent satisfactorily the results obtained experimentally was not possible. By the end it is emphasized the importance of a study using different diffusivity correlations.

Keywords: Hydrates, MEG, mixture, miscible liquids, experimental, numerical.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geometria utilizada para realização de testes experimentais e numéricos com a injeção de MEG durante determinado instante de tempo. ....	13
Figura 2 - Gráfico de temperatura e pressão para um hidrato de gás natural típico, com indicação das regiões de interesse de formação de hidratos.....	16
Figura 3 – Gráfico de pressão-temperatura com curvas de formação de hidratos para as concentrações de 0%, 10% e 20% de metanol (MeOH). ....	19
Figura 4 – Gráfico de pressão-temperatura com uma região sem formação de hidratos (em branco) e uma região formadora de hidratos (em cinza) com curvas de formação de hidratos sem adição de MeOH e com a adição de 10%, 20% e 30% de MeOH com relação à curva (em negrito) do escoamento em regime permanente da linha de produção com marcação das distâncias (em milhas) até a cabeça de poço .....	20
Figura 5 - Esquema dos experimentos realizados por Debacq et al. (2003) .....	29
Figura 6 - Comparativo dos testes experimentais com as simulações CFD ao longo do tempo. ....	31
Figura 7 - Perfil de fração mássica de MEG ao longo do tempo. ....	33
Figura 8 - (a) Esquemático do experimento realizado após a abertura da válvula. (b) Variação dos ângulos de realização dos experimentos.....	36
Figura 9 - Geometria da bancada experimental piloto composta de duas seções verticais e uma seção horizontal, com os pontos de injeção demarcados por A, B e C. ....	39
Figura 10 – Bancada em vista isométrica com identificação dos diferentes pontos de injeção e amostragem presentes no canal confinado e a largura de 6mm dessa.....	39
Figura 11 - Injeção de MEG com anilina em um instante de tempo para melhor visualização .....	41
Figura 12 - Pontos de retiradas de amostras.....	42
Figura 13 - Volume de controle formado pelos centros dos elementos finitos.	49
Figura 14 - Geometria utilizada para solução numérica onde são apresentadas as condições de contorno utilizadas: (a) condição de não deslizamento na	

parede; (b) plano de simetria; (c) tubo de injeção, entrada A e drenos; (d) entrada C e (e) entrada B.....	51
Figura 15 - Curva da viscosidade em função da fração mássica de MEG .....	54
Figura 16 - Curva da densidade em função da fração mássica de MEG .....	55
Figura 17 - Malha numérica sendo (a) vista geral da malha; (b) vista aumentada da região de entrada A e refino realizado, (c) vista aumentada da região de entrada C e refino realizado, (d) vista aumentada da região de entrada B e refino realizado e (e) vista aumentada do alívio realizado na malha.....	56
Figura 18 - Localização do ponto de medição da concentração de MEG para os testes de malha .....	58
Figura 19 - Gráfico representativo da fração volumétrica de MEG em função da malha utilizada.....	59
Figura 20 - Localização dos pontos de retiradas de amostras para casos experimentais e numéricos .....	62
Figura 21 - Localização dos planos de medição para análises numéricas .....	63
Figura 22 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 2s .....	73
Figura 23 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 5s .....	74
Figura 24 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 17s .....	75
Figura 25 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 34s .....	76
Figura 26 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 35s .....	77
Figura 27 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 70s .....	78
Figura 28 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 100s .....	79
Figura 29 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 334s .....	80
Figura 30 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 2s .....	82
Figura 31 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 5s .....	83

<b>Figura 32 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 17s .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 33 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 34s .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 34 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 35s .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 35 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 70s .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 36 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 100s .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 37 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 334,25s .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 38 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 2s .....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 39 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 15s .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 40 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 35s .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 41 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 68s .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 42 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 135s .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 43 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 136s .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 44 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 200s .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 45 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 435,75s .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 46 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 2s .....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 47 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 35s .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 48 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 68s .....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 49 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 134s .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 50 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 267s .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 51 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 268s .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 52 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 300s .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 53 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 567,75s .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grade de testes para análise experimental e numérica .....	43
Tabela 2 - Características das malhas utilizadas no teste de malhas, levando em consideração número de elementos, concentração de MEG e diferença percentual para a malha mais refinada .....	57
Tabela 3 - Grade de testes experimentais e numéricos .....	61
Tabela 4 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 1, 2 e 3 para local de injeção A.....	67
Tabela 5 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 4, 5 e 6 para local de injeção B.....	68
Tabela 6 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 7, 8 e 9 para local de injeção C.....	69
Tabela 7 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 1, 2 e 3 para local de injeção A .....	70
Tabela 8 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 4, 5 e 6 para local de injeção B .....	70
Tabela 9 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 7, 8 e 9 para local de injeção C .....	71
Tabela 10 - Parâmetros adimensionais para os casos simulados .....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	- <i>Anti-agglomerants</i>
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
CFD	- <i>Computational Fluid Dynamics</i>
KHI	- <i>Kinectic hydrate inhibitors</i>
LDHI	- <i>Low Dosage Hydrate Inhibitors</i>
MEG	- Etileno glicol
NUEM	- Núcleo de Escoamento Multifásico
SST	- <i>Shear Stress Transport</i>
THI	- <i>Thermodynamic hydrate inhibitors</i>
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas

	Descrição	Unidade
$j_A$	Fluxo mássico difusivo do componente A	$\frac{kg}{s \cdot m^2}$
$D_{AB}$	Coeficiente de difusividade de uma espécie A difundindo em B	$[m^2/s]$
$m_A$	Fração mássica do componente A	$\frac{kg}{m^3}$
$\bar{c}$	Velocidade média das moléculas do gás	$[m/s]$
$p$	Pressão	$[Pa]$
$T$	Temperatura	$[K]$
$r$	Raio da partícula	$[m]$
$V_A$	Volume molar do soluto A	$[cm^3/mol]$
$N_A$	Transferência de massa molar da espécie A medida relativa a coordenadas espaciais fixas	$\frac{mol}{m^2 s}$
$k_c$	Coeficiente de transferência de massa por convecção	$[m/s]$
$c_A$	Concentração da espécie A	$[mol/m^3]$
$v$	Velocidade	$[m/s]$
$L$	Comprimento característico do tubo	$[m]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[m^2/s]$
$D$	Diâmetro externo do tubo	$[m]$
$d$	Diâmetro interno do tubo	$[m]$
$C_0$	Concentração inicial	$[\%]$
$\vec{V}$	Vetor velocidade média de Reynolds	$[m/s]$
$t$	Tempo	$[s]$
$S_\phi$	Termo fonte volumétrico	$\frac{kg}{m^3 s}$
$D_\Phi$	Difusividade cinemática para o escalar	$[m^2/s]$
$k$	Energia cinética turbulenta	$[m^2/s^2]$
$P_k$	Produção de energia cinética turbulenta devido ao cisalhamento	$[kg/ms^3]$
$F_1$	Função de mistura que alterna entre os modelos $k - \omega$ e $k - \varepsilon$	
$CD_{k\omega}$	Termo relacionado à correlação cruzada entre $k$ e $\omega$	
$a_1$	Constante do modelo que define a viscosidade turbulenta	
$F_2$	Função da mistura que suaviza a transição entre diferentes regimes de escoamento	
$\omega_{up}$	Valor da variável em um nó à montante	
$\vec{r}$	Vetor posição do nó à montante do ponto de integração	
$x$	Fração mássica de MEG	$[\%]$

$m_{MEG}$	Massa do MEG	[kg]
$Vol_{MEG}$	Volume do MEG	[m <sup>3</sup> ]
$m_{H_2O}$	Massa da água	[kg]
$Vol_{H_2O}$	Volume da água	[m <sup>3</sup> ]
$D_{AB}^{\circ}$	Coefficiente de difusão binário em diluição infinita	[m <sup>2</sup> /s]

## Letras Gregas

	Descrição	Unidade
$\rho$	Densidade da mistura	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_A$	Densidade do componente A	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_B$	Densidade do componente B	$\frac{kg}{m^3}$
$\lambda_{lpm}$	Caminho livre médio das moléculas	[m]
$\kappa$	Constante de Boltzmann	[J/K]
$\mu_B$	Viscosidade do solvente	[Pa/s]
$\mu_{H_2O}$	Viscosidade da água	[cP]
$\rho$	Densidade	$\frac{kg}{m^3}$
$\mu$	Viscosidade	[Pa/s]
$\rho_1$	Densidade do fluido mais pesado	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_2$	Densidade do fluido mais pesado	$\frac{kg}{m^3}$
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu_q$	Viscosidade do fluido quiescente	[Pas]
$\mu_i$	Viscosidade do fluido injetado	[Pas]
$\beta$	Ângulo em relação à horizontal	[°]
$\mu_{eff}$	Viscosidade efetiva	[Pas]
$\varphi$	Concentração por unidade de massa	
$\Phi$	Concentração volumétrica	$\frac{kg}{m^3}$
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	[Pas]
$\varepsilon$	Dissipação turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\omega$	Taxa de dissipação específica	[s <sup>-1</sup> ]
$\sigma_{k3}$	Constante do modelo relacionada à difusão de $k$	
$\beta^*$	Constante do modelo de transporte de energia cinética turbulenta $k$	
$\omega$	Taxa de dissipação específica	[s <sup>-1</sup> ]
$\sigma_{\omega 3}$	Constante do modelo relacionada à difusão de $\omega$	
$\alpha_{\omega 3}$	Contante do modelo de transporte da taxa de dissipação específica $\omega$	
$\sigma_{\omega 2}$	Contante do modelo de transporte da taxa de dissipação específica $\omega$	

$\beta_{\omega 3}$	Contante do modelo de transporte da taxa de dissipação específica $\omega$	
$\delta_w$	Distância à parede mais próxima	$[m]$
$\Omega_{SST}$	Magnitude do tensor de taxa de deformação	$[s^{-1}]$
$\bar{\omega}_{up}$	Valor da variável em um nó à montante	
$\kappa_{HR}$	Coefficiente de interpolação	
$\rho_{MEG}$	Densidade do MEG	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_{H_2O}$	Densidade da água	$\frac{kg}{m^3}$
$\mu_m$	Viscosidade da mistura	$[Pas]$
$\rho_m$	Densidade da mistura	$\frac{kg}{m^3}$

## Números adimensionais

$Re$	Número de Reynolds
$At$	Número de Atwood
$Sc$	Número de Schmidt
$Le$	Número de Lewis
$Fr$	Número de Froude
$Pe$	Número de Péclet
$AR$	Razão de aspecto
$D_r$	Razão de diâmetro
$Sc_t$	Número de Schmidt turbulento

## Subscritos e sobrescritos

$A$	Componente A
$B$	Componente B
$c$	convecção
0	Inicial
$\vec{V}$	Vetor velocidade média de Reynolds
$t$	Tempo
$\varphi$	Volumétrico
$\Phi$	Relativo ao escalar
$k$	Energia cinética turbulenta
$k$	Relativo à enérgica cinética turbulenta
$k\omega$	Relativo à $k$ e $\omega$
$up$	Nó à montante
$MEG$	MEG
$H_2O$	Água
1	Fluido mais pesado

2	Fluido mais leve
<i>q</i>	Fluido quiescente
<i>i</i>	Fluido injetado
<i>eff</i>	Efetiva
<i>W</i>	Parede mais próxima
<i>m</i>	Mistura

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Formação de hidratos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Gerenciamento da formação de hidratos</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Inibidores termodinâmicos de hidratos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Gerenciamento de hidratos através do uso de inibidores termodinâmicos</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Transferência de massa</b> .....	<b>22</b>
2.5.1	Coeficiente de difusividade.....	23
2.5.2	Transferência de massa por convecção .....	24
<b>2.6</b>	<b>Números adimensionais</b> .....	<b>25</b>
<b>2.7</b>	<b>Estudos existentes sobre o processo de mistura de dois fluidos miscíveis</b> .....	<b>28</b>
<b>2.8</b>	<b>Considerações finais</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Aparato experimental</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimento experimental</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise de concentrações</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Grade de testes</b> .....	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Considerações finais</b> .....	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelagem matemática</b> .....	<b>44</b>
4.1.1	Modelagem da turbulência em escoamento monofásico.....	45
<u>4.1.1.1</u>	<u>Modelo SST de Menter</u> .....	<u>46</u>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem numérica</b> .....	<b>48</b>
4.2.1	Condições de contorno.....	50
<u>4.2.1.1</u>	<u>Equações para as propriedades da mistura</u> .....	<u>53</u>
4.2.2	Malha numérica .....	56
<b>4.3</b>	<b>Fechamento do capítulo</b> .....	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Grade de testes e pontos de análises</b> .....	<b>61</b>

<b>5.2</b>	<b>Comparação dos resultados experimentais e numéricos .....</b>	<b>63</b>
<b>5.3</b>	<b>Comparativo entre escoamento experimental e numérico .....</b>	<b>72</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise do escoamento numérico .....</b>	<b>81</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise adimensional.....</b>	<b>105</b>
<b>5.6</b>	<b>Fechamento do capítulo .....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>108</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestão para trabalhos futuros .....</b>	<b>109</b>
	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O começo da exploração de petróleo no mar se deu nas costas marítimas da Califórnia, na última década do século XIX. A partir da Califórnia, o investimento foi redirecionado para outras regiões, como Venezuela e Golfo do México. No Brasil, a exploração marítima de petróleo começou na região nordeste do país a partir de 1968, e a exploração em águas profundas e ultra profundas se deu na Bacia de Campos, a partir da década de 1970 (MORAIS, 2013).

Segundo o Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural da Agência Nacional de Petróleo (ANP), no ano de 2024, a média anual de produção de petróleo do Brasil foi de 3,358 MMbbl/d (milhões de barris por dia) e 153 MMm<sup>3</sup>/d (milhões de m<sup>3</sup> por dia) para gás natural, sendo que 78,29% da produção nacional em óleo equivalente foi proveniente do pré-sal, enquanto as produções pós-sal e terrestre representam 16,33% e 5,38%, respectivamente, portanto é tido que a maior parte da produção se dá em campos marítimos ou também *offshore* (ANP, 2024).

Contudo, as produções *offshore* de óleo e gás ocorrem em regiões com condições de temperatura e pressão propícias à formação de hidratos (ADISASMITO; PARUBAK, 2019). Segundo De Vasconcelos et al. (2022), hidratos são estruturas cristalinas que encapsulam moléculas hóspedes em diferentes tipos de estruturas. Um problema associado à presença de hidratos diz respeito à formação de *plugs*, sendo um problema recorrente na produção de óleo e gás e que pode acarretar bloqueios nas linhas, causando perdas financeiras e problemas de segurança.

Dessa forma, prevenir a formação de hidratos nas linhas de transporte é essencial para a produção de óleo e gás (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005). Existem diferentes formas de se evitar a sua formação, entre elas uso de isolamento térmico, uso de inibidores químicos, aquecimento/despressurização e uso de inertes (VALIM, 2018).

Especificamente, os inibidores químicos podem ser ainda divididos em inibidores termodinâmicos (*Thermodynamic hydrate inhibitors* - THIs), inibidores cinéticos (*Kinectic hydrate inhibitors* - KHIs) e anti-aglomerantes (*Anti-agglomerants* - AA), sendo os dois últimos conhecidos como inibidores de baixa dosagem (*Low Dosage Hydrate Inhibitors* - LDHIs). Em geral, os LDHIs possuem elevado custo em relação aos THIs (KELLAND, 2014).

Segundo Sloan, Koh e Sum (2011), os inibidores termodinâmicos têm como objetivo que pressões mais altas ou temperaturas mais baixas sejam necessárias para a formação de hidratos. Os THIs mais utilizados para essa finalidade são álcoois, glicóis e sais, sendo o metanol e o etileno glicol (MEG) amplamente utilizados. Apesar do baixo custo do metanol, sua impossibilidade de reutilização torna o uso do MEG nas linhas de produção mais economicamente atrativo (KELLAND, 2014), além das dificuldades de manuseio do metanol, que fazem com que o uso do MEG seja preferido em diversas regiões do mundo (SLOAN; KOH; SUM, 2011).

Contudo, para que haja uma inibição de hidratos efetiva, é necessário que uma quantidade suficiente de inibidor seja injetada na linha de produção, visto que sistemas com baixas quantidades desses são mais favoráveis à formação de hidratos que sistemas sem esses (YOUSIF, 1998). Dessa forma, Kelland (2014) frisa a importância de se injetar a dosagem correta de THIs, para que esse não promova a formação de hidratos.

Como pode ser observado em Valim (2018), os estudos sobre o processo de mistura (*mixing*), volume e local de injeção de MEG, e outros THIs, são incipientes, havendo pouca literatura existente que apresente todos os três temas. Diante de tal lacuna, é possível observar a necessidade de um estudo que aborde tanto o volume a ser injetado, bem como o local de injeção de MEG em uma tubulação - sendo também observado como ocorre o *mixing* do inibidor na água ao longo do tempo.

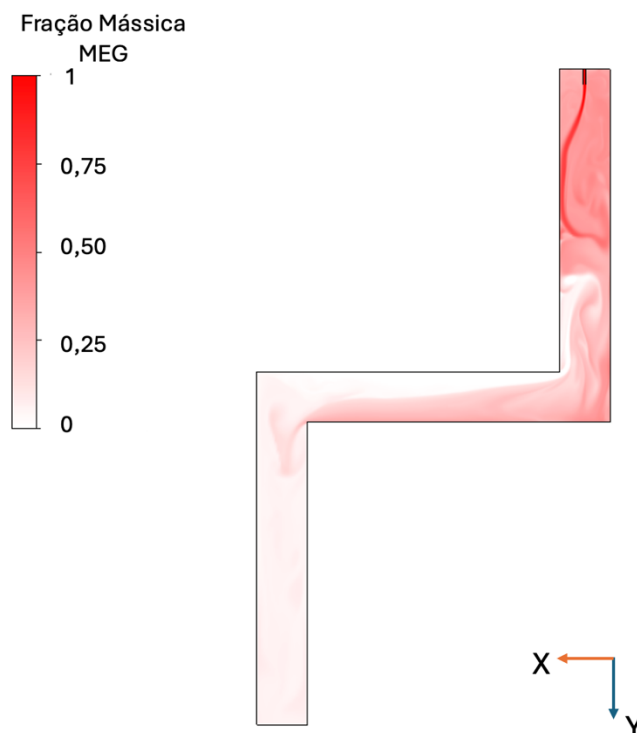
## 1.1 Objetivos

No presente trabalho é desenvolvido um estudo experimental e numérico que permita analisar o processo detalhado da mistura de dois líquidos miscíveis em uma geometria confinada. Busca-se avaliar, para diferentes taxas e volumes de injeção, a eficiência de mistura (*mixing*) de um inibidor termodinâmico (primariamente MEG) através de solvente (água pura) que, inicialmente, preenche toda a geometria de interesse.

Para atingir esses objetivos, aborda-se o problema numérica e experimentalmente assumindo-se uma geometria simplificada *quasi* 2D, cuja geometria pode ser visualizada na Figura 1, que apresenta a injeção de MEG durante determinado instante de tempo, pensada para facilitar a visualização experimental do

*mixing* e que seja de baixo custo computacional para possibilitar simulações de dinâmica dos fluidos computacional em tempo não proibitivo.

**Figura 1 - Geometria utilizada para realização de testes experimentais e numéricos com a injeção de MEG durante determinado instante de tempo.**



**Fonte: Autoria própria.**

Como objetivos específicos, busca-se encontrar as configurações ideais, bem como a definição dos pontos de injeção para o processo de mistura. Além disso, a busca pelo desenvolvimento da melhor metodologia para o estudo numérico e a definição de uma relação entre o volume de fluido injetado com a eficiência do processo.

Para que esses objetivos possam ser alcançados, foi construída uma célula *Hele-Shaw* em acrílico com mudança de direção para visualização do processo de mistura. Já para o modelo numérico, a mesma geometria foi desenvolvida para comparação com os testes físicos.

## 1.2 Justificativa

A demanda energética global tem feito com que novas estratégias de exploração de recursos sejam visadas, sendo destaque a exploração de petróleo

*offshore*. Porém, a extração de petróleo em águas profundas possui certos desafios, como a formação de hidratos devido às condições propícias de temperatura e pressões encontradas.

A presença de hidratos nas linhas de produção é preocupante devido à possibilidade de ocorrência de bloqueios nas mesmas e os problemas associados a isso. Dessa forma, evitar a formação de hidratos tem se tornado um problema de crescente interesse, sendo um modo muito utilizado para isso a injeção de inibidores termodinâmicos, como metanol e etileno glicol, nas tubulações.

Apesar do uso de etileno glicol ser uma prática bastante difundida, existe uma lacuna na literatura sobre seu processo de mistura, tanto das partes experimental como numérica. Dessa forma, no presente trabalho é visado o preenchimento dessa lacuna através de um estudo sobre *mixing* de dois fluidos miscíveis, sendo os fluidos escolhidos para tal MEG e água. Com isso, o estudo poderá auxiliar a determinar as melhores condições para injeção do inibidor, bem como os locais de injeção ideais para se obter a melhor mistura dos dois fluidos, de modo a não apenas complementar a literatura atual como também podendo fornecer dados úteis para operações reais em cenários de produção *offshore*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica com os principais temas relacionados com o presente estudo. Ela aborda desde as condições necessárias para formação de hidratos, os perigos que a existência desses podem acarretar, o gerenciamento de hidratos, os inibidores termodinâmicos, como eles atuam e seu uso para evitar a formação de hidratos, além de abordar sobre a transferência de massa a alguns números adimensionais que podem descrever o problema. Por fim, é realizado um levantamento dos estudos presentes sobre o processo de mistura de fluidos miscíveis, bem como as lacunas ainda existentes na literatura.

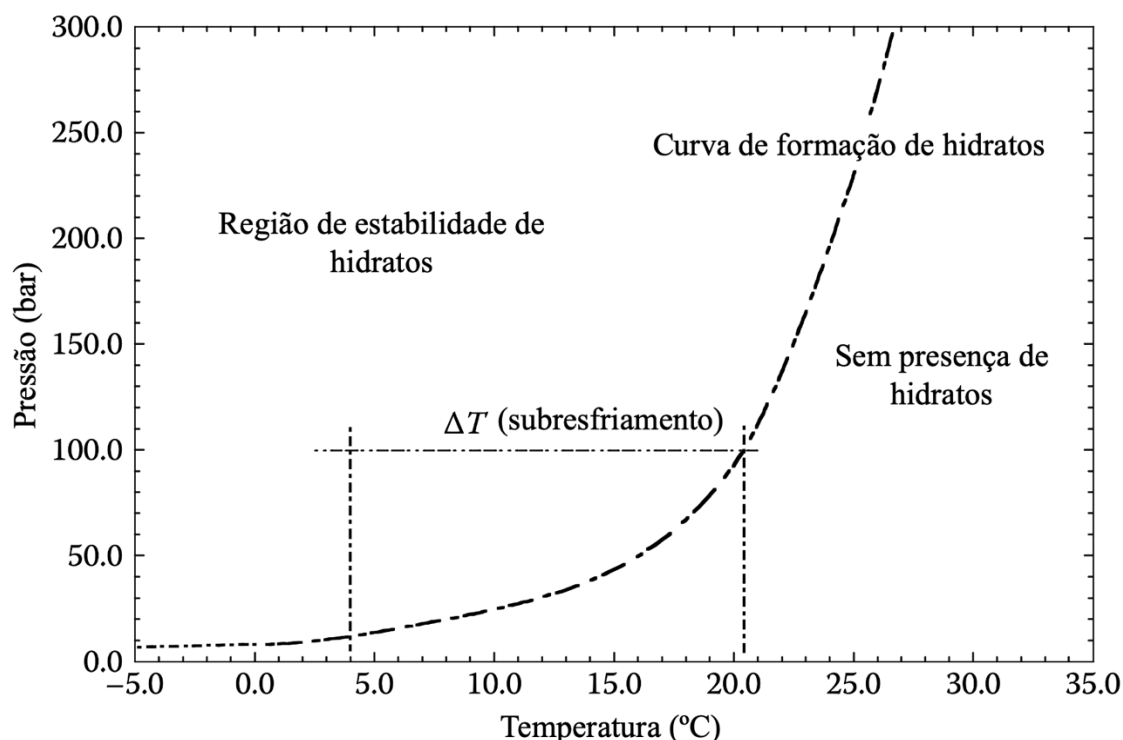
### 2.1 Formação de hidratos

Hidratos de gás são sólidos cristalinos compostos por moléculas de hidrocarbonetos encapsuladas em cavidades de água conectadas por ligações de hidrogênio (SLOAN; KOH, 2008; KELLAND, 2014)). Sua formação se dá quando ocorre a combinação de baixas temperaturas e altas pressões, preferencialmente na interface hidrocarboneto-água, sendo dessa forma comumente encontrados em tubulações submarinas com escoamentos multifásicos (SLOAN; KOH; SUM, 2011; KELLAND, 2014).

Segundo Katz (1945), havendo quantidade suficiente de água, todo gás formará hidratos a dada pressão com sua temperatura correspondente. Já Koh et al. (2002) afirmam que para temperaturas abaixo de 25°C e pressões acima de 1,5Mpa haverá formação de hidratos de gás natural. Porém, Katz (1945), naquele momento, entendia a necessidade de se obter curvas que possibilitem a predição de formação de hidratos.

Kelland (2014) propõe a curva exposta na Figura 2, a qual apresenta um gráfico de pressão e temperatura onde é destacada uma curva dividindo esse em duas regiões, uma formadora de hidratos e outra sem formação de hidratos. Essa curva, chamada de curva de formação de hidratos, explicita o conjunto de pressão-temperatura necessário para formação desses sólidos cristalinos. É possível observar, por exemplo, que a elevadas pressões, as temperaturas para sua formação podem chegar até 25°C.

Figura 2 - Gráfico de temperatura e pressão para um hidrato de gás natural típico, com indicação das regiões de interesse de formação de hidratos.



Fonte: Adaptado de Kelland (2014).

Iyowu (2010) explica sobre a existência natural de hidratos ocorrendo nas regiões de *permafrost*, e ainda que sejam vistos como futuro potencial energético. Hatzikiriakos & Englezos (1994) dissertam que sua dissociação poderia ser uma fonte significativa do aumento de metano na atmosfera, podendo acarretar o aumento do efeito estufa.

Outro problema advindo dos hidratos ocorre nas linhas de produção de petróleo, onde *plugs* de hidratos costumam ocorrer em operações atípicas como paradas e repartições (SLOAN; KOH; SUM, 2011). O bloqueio das tubulações por hidratos é um dos problemas principais na indústria de óleo e gás, e a retirada dos *plugs* da linha além de ser uma questão de segurança (PERRIN; MUSA; STEED, 2013), é ainda um problema econômico (VALIM, 2018) e ambiental (SLOAN; KOH; SUM, 2011).

Com a formação dos *plugs* de hidratos nas operações normais das linhas de produção, surge também a necessidade de sua remoção. Isso pode ser feito de diversas formas, como despressurização e aquecimento das tubulações (KELLAND, 2014). Levantando as questões de segurança que envolvem a remoção de hidratos,

Sloan, Koh & Sum (2011) trazem alguns relatos de casos de remoção que acarretaram perdas fatais de operadores.

Outra maneira de se abordar o controle de hidratos consiste na sua prevenção ao evitar a sua deposição, como forma de minimizar o uso de métodos corretivos, como a remoção dos *plugs* (IYOWU, 2010). Dessa forma, uma das maiores preocupações do desenvolvimento de linhas de produção em águas profundas tem sido prevenir o bloqueio por hidratos (KELLAND, 2014).

## 2.2 Gerenciamento da formação de hidratos

O termo “garantia de escoamento”, traduzido para o inglês como *flow assurance*, foi criado pela Petrobras em meados da década de 1990 (VALIM, 2018). Ele é explicado por Iyowu (2010) e Valim (2018) como sendo um escoamento bem-sucedido de fluidos de um ponto a outro, abrangendo diversos aspectos de um sistema de produção de petróleo. Dentre tais tópicos, explica Iyowu (2010), podem estar as técnicas para prevenção de fatores que impeçam um escoamento otimizado através do gerenciamento de depósitos sólidos, como hidratos, parafinas, asfaltenos e outros.

Havendo um estudo de garantia de escoamento em uma linha de produção, é possível reduzir a incidência de depósitos de hidratos (IYOWU, 2010). Valim (2018) explica que esses depósitos, também chamados bloqueios, ocorrem devido às trocas de calor, onde os fluidos acabam por adentrar a região de formação de hidratos, acontecendo quando não existem medidas preventivas adotadas.

Existem diversas medidas preventivas a fim de se evitar a formação de um bloqueio (VALIM, 2018), contudo, outra forma de se abordar o gerenciamento de hidratos é através de métodos corretivos onde ocorre a remoção periódica de depósitos de hidratos. Alguns desses métodos envolvem o controle de pressão, onde o sistema é mantido a pressões baixas suficientes para se manter os fluidos fora do envelope de formação de hidratos. Por sua vez, um método corretivo consiste na inserção de *pigs* no interior da linha para raspagem de qualquer sólido existente. Já o método de isolamento térmico se dá através do isolamento da tubulação buscando-se aumentar a temperatura dos fluidos. Por fim, os métodos químicos envolvem a injeção de inibidores nas linhas de produção (IYOWU, 2010).

Manter o sistema a baixas pressões continuamente diminui as taxas de produção, sendo economicamente inviável. O uso dos *pigs* é inviável em operações *offshore*, devido a questões de acessibilidade e complexidade das operações (IYOWU, 2010). Já o método de isolamento acaba por ser custoso e não funciona para situações em que ocorram paradas prolongadas (IYOWU, 2010; KELLAND, 2014).

Dessa forma, o uso de inibidores de hidratos em operações *offshore* é considerada técnica muito atrativa para prevenção da formação de hidratos (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005). Os inibidores químicos de hidratos são divididos em duas classes: os inibidores termodinâmicos de hidratos (*thermodynamic hydrate inhibitors – THIs*) e os inibidores de hidratos de baixas dosagens (*low-dosage hydrate inhibitors – LDHIs*) (SLOAN; KOH; SUM, 2011).

Os LDHIs englobam os inibidores cinéticos (*kinetic hydrate inhibitors – KHIs*) e os anti-aglomerantes (*anti agglomerants – AAs*). Ambos compostos atuam retardando a formação de hidratos para períodos maiores que o tempo de residência do gás na seção propícia à formação de hidratos na tubulação (KOH et al., 2002). Apesar da necessidade de baixas dosagens, os LDHIs são mais custosos que os THIs, além de possuírem limitações para linhas de produção longas e em regiões profundas, com menores temperaturas e pressões mais elevadas, sendo também limitados a situações não críticas (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005; IYOWU, 2010; KELLAND, 2014).

Portanto, os THIs são vistos como uma forma robusta para usos em linhas de produção extensas onde há condensação de gases (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005). Atualmente, esse é o método mais utilizado na produção de petróleo para a prevenção de bloqueios, sendo os inibidores termodinâmicos mais utilizados o metanol (MeOH) e o etileno glicol (MEG) (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005; KOH et al., 2002).

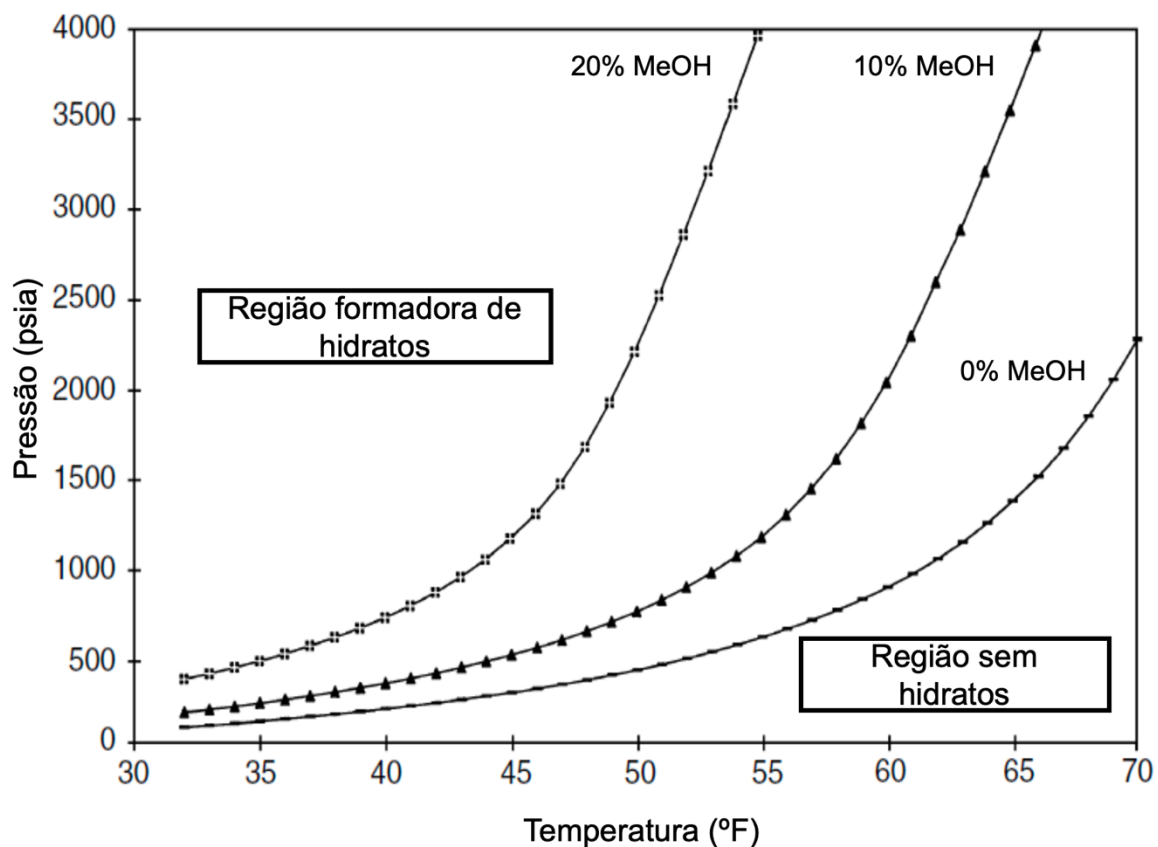
### **2.3 Inibidores termodinâmicos de hidratos**

Os inibidores termodinâmicos são químicos utilizados para evitar a formação de hidratos (KELLAND, 2014). Ao serem injetados, as ligações de hidrogênio dos inibidores se unem às ligações de hidrogênio das moléculas de água, reduzindo a

atividade da água e exigindo, para formação de hidratos, maiores pressões e menores temperaturas (CHRISTIANSEN, 2012).

A Figura 3 apresenta um gráfico de pressão-temperatura com curvas para diferentes concentrações de metanol (MeOH), sendo essas curvas nas fronteiras entre as regiões sem hidratos e de formação de hidratos chamada de curva de formação de hidratos. É possível observar que conforme o MeOH, é adicionado, essa curva tende a se movimentar para a esquerda, fazendo com que as condições necessárias para formação de hidratos sejam com menores temperaturas e/ou maiores pressões (BAVOH et al., 2018).

**Figura 3 – Gráfico de pressão-temperatura com curvas de formação de hidratos para as concentrações de 0%, 10% e 20% de metanol (MeOH).**

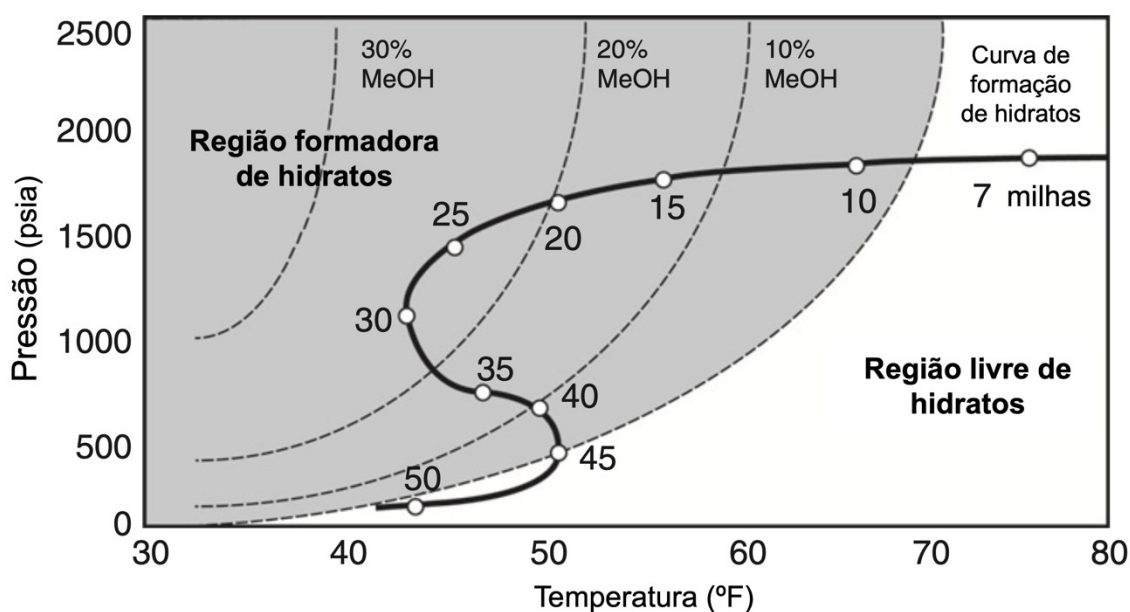


Fonte: Adaptado de Bavoh et al. (2018).

Já na Figura 4 apresenta um gráfico de pressão-temperatura com curvas de formação de hidratos para diferentes concentrações de MeOH (em tracejado), além de mostrar as condições de escoamento em regime permanente para a linha de produção nas distâncias de 7 a 50 milhas da cabeça de poço (na linha preta em negrito, com círculos para cada uma das distâncias).

Nessa Figura 4, Sloan, Koh & Sum (2011) exibem o efeito das diferentes concentrações de metanol (MeOH) na curva de formação de hidratos, sendo a primeira, à direita, uma representação dessa sem a atuação de MeOH. Essa linha é deslocada para a esquerda conforme a concentração de MeOH na água é aumentada. Com isso, são necessárias pressões cada vez maiores e temperaturas menores.

**Figura 4 – Gráfico de pressão-temperatura com uma região sem formação de hidratos (em branco) e uma região formadora de hidratos (em cinza) com curvas de formação de hidratos sem adição de MeOH e com a adição de 10%, 20% e 30% de MeOH com relação à curva (em negrito) do escoamento em regime permanente da linha de produção com marcação das distâncias (em milhas) até a cabeça de poço**



Fonte: Sloan, Koh & Sum (2011).

Ainda na Figura 4, na primeira marcação, a sete milhas da cabeça de poço, é possível observar que essa se encontra na região branca não formadora de hidratos, e isso ocorre devido ao calor advindo dos reservatórios ainda estar presente no escoamento, evitando sua formação. Contudo, conforme a distância aumenta, as temperaturas vão diminuindo por conta da troca de calor entre as linhas de produção e o oceano (4°C), entrando então na região formadora de hidratos. Dessa forma, com a ação dos inibidores, é possível notar que a adição de 30% de MeOH possibilita que o escoamento, ao longo de toda a linha, não adentre a região formadora de hidratos, prevenindo a ocorrência de bloqueios (SLOAN; KOH; SUM, 2011).

Segundo Hemmingsen, Li & Kinnari (2008), existem dois tipos de inibidores termodinâmicos: sais e álcoois/glicóis. Contudo, os sais não costumam ser injetados

devido ao impacto na corrosão e a necessidade do uso da água como solvente. No entanto, como a água produzida é salgada, ela já tem um certo nível de inibição natural pelo sal. Já De Vasconcelos (2021) afirma que os inibidores termodinâmicos do tipo álcoois conseguem inibir permanentemente os hidratos, sendo os mais utilizados metanol (MeOH) e etileno glicol (MEG) (HEMMINGSEN; LI; KINNARI, 2008).

O metanol é um álcool simples, volátil e com baixa massa molecular, sendo assim, vaporizado na fase gasosa, escoando misturado nessa fase até o ponto existente de acúmulo de água (IYOWU, 2010; SLOAN; KOH; SUM, 2011). Seu uso varia para além da prevenção de formação de hidratos nas linhas de produção e plataformas – utilizado normalmente nessa função quando ocorrem paradas, sendo utilizado, também, para deslocamento de fluidos nesses cenários (IYOWU, 2010).

Contudo, o metanol é altamente inflamável e tóxico. E devido à volatilidade dos glicóis, principalmente do MeOH, esse acaba por contaminar a fase gasosa, além de ser dificilmente regenerado na prática, situação contrária ao MEG que é altamente regenerado e, desse modo, tem se tornado cada vez mais preferível (BRUSTAD; LØKEN; WAALMANN, 2005; SLOAN; KOH; SUM, 2011).

A possibilidade de recuperação do MEG ocorre devido a sua elevada massa molecular, a qual o torna mais denso, sendo necessário que sua injeção seja realizada na fase aquosa dentro da tubulação (SLOAN; KOH; SUM, 2011). Dessa forma, como afirma Christiansen (2012), MEG é uma escolha mais adequada que MeOH, principalmente como um inibidor para tubulações de longa distância com escoamentos multifásicos.

#### **2.4 Gerenciamento de hidratos através do uso de inibidores termodinâmicos**

Segundo Adisasmito & Parubak (2019), é de extrema importância a existência de estratégia para gerenciamentos de hidratos tanto para operações normais, como para situações de parada. Nessas situações, Christiansen (2012) explica que, como o fluido fica estagnado, ocorre um resfriamento do sistema até a temperatura do ambiente que o cerca. Da mesma forma, devido à perda de pressão do sistema, apenas a pressão da coluna hidrostática permanece, e como consequência a pressão na cabeça de poço aumenta. A combinação de baixa temperatura e elevada pressão leva o sistema para dentro do envelope de formação de hidratos logo após a repartida (CHRISTIANSEN, 2012; HEMMINGSEN; LI; KINNARI, 2008).

Apesar das linhas de produção serem projetadas para operar sem o risco de formação de hidratos, situações como as de paradas não programadas e repartidas podem ocorrer, fazendo o sistema adentrar o envelope de formação de hidratos, caso tal situação não seja adereçada corretamente (KELLAND, 2014). Segundo Valim (2018), existem procedimentos operacionais que costumam ser adotados para prevenção de formação de hidratos. No entanto, há cenários onde esses não são suficientes, sendo, então, optado pelo uso de injeção de inibidores termodinâmicos (THIs).

Contudo, para que uma inibição de hidratos eficiente seja alcançada, uma quantidade correta de THI deve ser injetado nas linhas de produção, a fim de que a curva de formação de hidratos seja deslocada para a esquerda (YOUSIF, 1998). Quando uma quantidade abaixo do nível necessário é injetada nas linhas de produção, o sistema passa a ser chamado de subinibido, o que pode ocorrer por falhas nos equipamentos, limitações temporárias de fornecedores ou operacionais (HEMMINGSEN; LI; KINNARI, 2008).

Contudo, Yousif (1998) afirma que, conforme observado em experimentos de campo, sistemas subinibidos tendem a uma maior formação de bloqueios do que aqueles sem injeção de qualquer inibidor. Mais detalhes sobre o assunto podem ser vistos em Chapoy et al. (2008) e Østergaard et al. (2002). Dessa forma, como cita Christiansen (2012), o projeto dos sistemas de produção precisa ser capaz de calcular a quantidade necessária de inibidores para que haja completa inibição da formação de hidratos.

## **2.5 Transferência de massa**

Segundo Bergman et al. (2014) e Welty et al. (2008) quando existe um gradiente de concentração em uma espécie química de uma mistura, naturalmente ocorre transferência de massa, cujo objetivo é minimizar a diferença de concentrações dentro do sistema. Esse gradiente de concentração é tido como a força motriz para que ocorra o transporte de um componente a uma determinada região. Para Bird, Stewart e Lightfoot (2002) e Bergman et al. (2014) é dado o nome de difusão molecular ao transporte molecular de uma substância relativa a outra, a qual é regida pela lei de Fick, onde para a transferência do componente A em uma mistura binária entre os componentes A e B pode ser descrita na forma vetorial como:

$$j_A = -\rho D_{AB} \nabla m_A \quad (1)$$

sendo  $j_A$  ( $kg/(s \cdot m^2)$ ) o fluxo mássico difusivo do componente A, descrevendo a quantidade do componente A transferida por difusão por unidade de tempo e por unidade de área perpendicular à direção do fluxo. Essa grandeza é proporcional à densidade da mistura  $\rho = \rho_A + \rho_B$  ( $kg/m^3$ ) e ao gradiente da fração mássica do componente  $m_A = \rho_A + \rho$ .

### 2.5.1 Coeficiente de difusividade

Conforme Bergman et al. (2014), a lei de Fick possui um fator de proporcionalidade  $D_{AB}$ , conhecido como coeficiente de difusividade de uma espécie A difundindo em B. Esse coeficiente possui para o comportamento de gás ideal a seguinte equação que o rege:

$$D_{AB} \approx \frac{1}{3} \bar{c} \lambda_{lpm} \sim p^{-1} T^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

com T sendo expressa em Kelvin. A concentração de  $\bar{c}$  cresce com o aumento da temperatura e com a diminuição da massa molar, por consequência, a difusividade mássica também se eleva à medida que a temperatura sobe e a massa molar diminui. Já  $\lambda_{lpm}$  é inversamente proporcional à pressão do gás, dessa forma a difusividade mássica diminui com o aumento da pressão.

É sabido que para pequenas concentrações de A (soluto) em B (solvente),  $D_{AB}$  cresce com o aumento da temperatura, sendo os valores para o coeficiente de difusividade geralmente maiores para gases (entre  $5 \times 10^{-6}$  e  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/s$ ) do que para líquidos (entre  $10^{-10}$  e  $10^{-9} \text{ m}^2/s$ ) (BERGMAN et al., 2014; WELTY et al., 2008).

Bergman et al. (2014) e Welty et al. (2008) afirmam que, apesar de ser possível determinar com certa facilidade o coeficiente de difusividade para gases, devido a consideração de comportamento de gás ideal, o mesmo não pode ser feito para líquidos. Isso se deve ao fato de não haver uma teoria da estrutura e características de transporte adequadas para tal. Contudo a teoria hidrodinâmica afirma que o coeficiente de difusividade para líquidos está relacionado à mobilidade

da molécula de soluto. Dessa forma, a partir dessa teoria foi desenvolvida a equação de Stokes-Einstein

$$D_{AB} = \frac{\kappa T}{6\pi r \mu_B} \quad (3)$$

onde  $D_{AB}$  é a difusividade de A em solução diluída de B,  $\kappa$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura absoluta,  $r$  o raio da partícula, e  $\mu_B$  a viscosidade do solvente. Essa equação consegue descrever a difusão de partículas coloidais ou grandes moléculas redondas através de um solvente que se comporta como contínuo relativo à espécie difundida e se aplica a sistemas macroscópicos (POLING et al., 2001; WELTY et al., 2008).

Contudo, no que diz respeito a uma solução binária do soluto A no solvente B, o coeficiente de difusão  $D_{AB}^\circ$  de A em uma solução infinitamente diluída de A em B significa que cada molécula de A está em um ambiente quase totalmente composto por B. Com isso, considerando o caso de diluições infinitas, Hayduk e Minhas propuseram em 1982 uma correlação para o coeficiente de difusão binário de diluição infinita, sendo ela:

$$D_{AB}^\circ = 1,25 \times 10^{-8} (V_A^{-0,19} - 0,292) T^{1,52} \mu_{H_2O}^{\varepsilon^*} \quad (4)$$

onde  $D_{AB}^\circ$  é dado em  $cm^2/s$ ,  $V_A$  é o volume molar do soluto A na temperatura de ebulição ( $cm^3/mol$ ), a temperatura  $T$  é dada em Kelvin,  $\mu_{H_2O}$  é a viscosidade da água ( $cP$ ) e  $\varepsilon^* = (9,58/V_A) - 1,12$ . Essa relação é capaz de prever  $D_{AB}^\circ$  com um desvio de aproximadamente 10% (POLING et al., 2001).

### 2.5.2 Transferência de massa por convecção

Bergman et al. (2014) mostra que, quando se trata dos modos de transferência de massa, é possível traçar um paralelo com os modos de transferência de calor, sendo a transferência de massa por difusão comparada à transferência de calor por condução. Da mesma forma, é possível fazer uma analogia da transferência de massa por convecção com a transferência de calor por convecção.

A transferência de massa por convecção é o nome que se dá à transferência de massa entre um fluido em movimento e uma superfície ou entre fluidos imiscíveis em movimento separados por uma interface móvel (podendo ser interação gás/líquido ou líquido/líquido). Esse tipo de transferência está normalmente relacionado às características dinâmicas do fluido em movimento, além de ser dependente também das propriedades de transporte (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002; WELTY et al., 2008).

Segundo Bergman et al. (2014), na transferência de massa por convecção o movimento global do fluido se une com a difusão a fim de facilitar o transporte de uma espécie da qual existe um gradiente de concentração. E tal qual a transferência de calor, a transferência de massa por convecção também pode ser dada de maneira natural ou forçada.

De maneira análoga à lei de resfriamento de Newton, a equação da taxa de transferência de massa por convecção pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_A = k_c \Delta c_A \quad (5)$$

onde  $N_A$  é a transferência de massa molar da espécie A medida relativa a coordenadas espaciais fixas,  $k_c$  é o coeficiente de transferência de massa por convecção e  $\Delta c_A$  é a diferença de concentração entre a camada superficial e a concentração média do fluxo de fluido da espécie difusiva A. o coeficiente  $k_c$  é definido em termos do fluxo mássico e da diferença de concentração do começo ao fim do percurso de transferência de massa (WELTY et al., 2008).

## 2.6 Números adimensionais

Ruzicka (2008) definiu números adimensionais como expressões algébricas, sendo mais especificamente frações, onde tanto o numerador como o denominador são potências das quantidades físicas com a dimensão física total igual à unidade.

O número de Reynolds leva em conta as forças inerciais e viscosas e pode ser calculado genericamente pela equação abaixo

$$Re = \rho \frac{vL}{\mu} \quad (6)$$

onde  $\rho$  e  $\mu$  são a densidade e viscosidade do fluido, respectivamente, e  $v$  e  $L$  são a velocidade e comprimento característico do tubo, respectivamente. Para elevados valores do número de Reynolds, os efeitos viscosos podem ser desprezados na maioria dos escoamentos, enquanto para baixos valores do número de Reynolds, os efeitos viscosos são dominantes (FOX et al., 2010).

Já o número de Atwood define uma diferença de densidades adimensional, a qual é dada pela seguinte equação:

$$At = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{(\rho_1 + \rho_2)} \quad (7)$$

sendo  $\rho_1$  e  $\rho_2$  as densidades dos fluidos mais pesado e mais leve, respectivamente (BANERJEE; KRAFT; ANDREWS, 2010).

O número de Schmidt é a razão entre a difusividade de momento e a difusividade de massa e representa a relativa facilidade de transferência de massa, sendo definido como:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (8)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido a qual se associa à taxa de difusão de momento do fluido e  $D_{AB}$  é a difusividade de massa. O número de Schmidt pode ser analisado da seguinte forma: quando  $Sc > 1$ , a difusão de quantidade de movimento ocorre mais rapidamente que a difusão de massa; quando  $Sc < 1$  o oposto ocorre, sendo a difusão mássica mais rápida que a difusão de quantidade de movimento, e quando  $Sc \approx 1$  ambas as difusões ocorrem na mesma taxa (BERGMAN et al., 2014; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002).

O número de Lewis é tido como a razão entre as difusividades térmica e mássica, sendo uma medida das espessuras relativas de suas camadas limite, e pode ser expresso da seguinte forma:

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (9)$$

sendo  $\alpha$  a difusividade térmica e  $D_{AB}$  a difusividade mássica. O número de Lewis também pode ser dado pela razão de  $Sc/Pr$  (BERGMAN et al., 2014).

Segundo Fox et al. (2010), o número de Froude é utilizado para descrever um regime de escoamento, e para isso usa de uma razão das forças inerciais e gravitacionais através da equação:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (10)$$

onde  $v$  é a velocidade do fluido,  $g$  é a gravidade e  $L$  é o comprimento característico descritivo do escoamento. Para  $Fr < 1$ , têm-se um escoamento subcrítico, onde este é dominado pela gravidade; para  $Fr = 1$  têm-se escoamento crítico dado pelo equilíbrio entre as forças inerciais e gravitacionais e, por fim, para  $Fr > 1$  têm-se um escoamento supercrítico, o qual é dominado pelas forças inerciais.

Para Akbari e Taghavi (2020); Bergman et al. (2014); Bird, Stewart e Lightfoot (2002) o número de Péclet pode ser dado tanto para a transferência de calor como para a transferência de massa, sendo esse uma razão entre o transporte de calor ou massa por convecção e o transporte de massa. Analisando no âmbito do transporte de massa, tem-se a seguinte definição:

$$Pe = \frac{Lv}{D_{AB}} \quad (11)$$

sendo  $L$  um comprimento característico,  $v$  a velocidade do fluido e  $D_{AB}$  a difusividade mássica do fluido. Para  $Pe \ll 1$  o transporte por difusão é dominante em relação ao transporte por convecção;  $Pe \gg 1$  o contrário ocorre, o transporte por convecção é dominante em relação à difusão, e por fim quando  $Pe = 1$  ambos os tipos de transporte possuem a mesma importância no transporte de massa.

Machado et al. (2023) propõem outros parâmetros adimensionais que podem ser utilizados para descrever o comportamento da injeção de um fluido em outro,

sendo eles a razão de aspecto, a razão de diâmetro e a razão de viscosidades, o quais podem ser analisados pelas equações que seguem, respectivamente:

$$AR = \frac{L}{D} \quad (12)$$

$$D_r = \frac{d}{D} \quad (13)$$

$$m = \frac{\mu_q}{\mu_i} \quad (14)$$

onde  $L$  é o comprimento da tubulação,  $d$  o seu diâmetro interno,  $D$  o diâmetro externo e  $\mu$  a viscosidade do fluido, sendo o subscrito  $i$  referente ao fluido injetado e o subscrito  $q$  referente ao fluido quiescente.

## 2.7 Estudos existentes sobre o processo de mistura de dois fluidos miscíveis

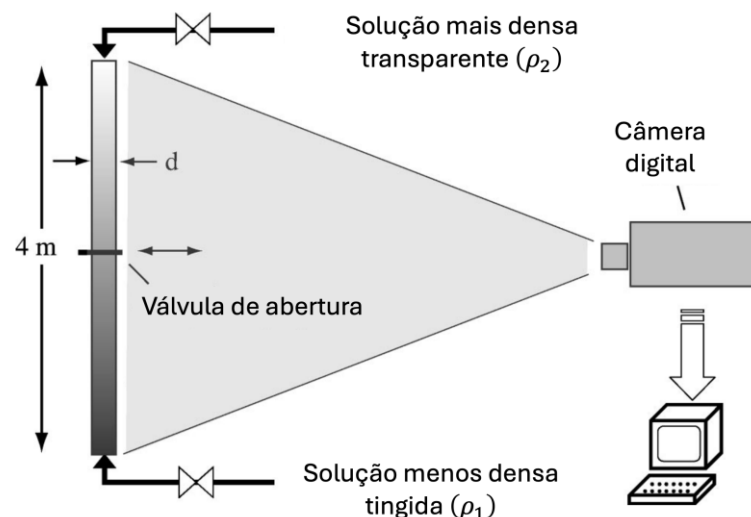
Lu et al. (2018) afirmam que, para que não ocorra a formação de hidratos, é esperado que ocorra um processo de mistura apropriado entre a água e o inibidor, tendo a diferença de densidades e viscosidades atuação importante para determinação se o sistema está misturado de maneira suficiente. Contudo, eles mencionam sobre a necessidade de um melhor entendimento sobre como esse processo ocorre e como se dão as interações entre as fases.

Em seu trabalho, Debacq et al. (2001) estudaram os perfis de concentração que são criados a partir do processo de mistura (*mixing*) dinâmico de dois fluidos miscíveis em tubo vertical longo, sendo o fluido mais leve água com nigrosina como corante e o fluido mais pesado uma solução de água com sal de  $\text{CaCl}_2$  – com concentrações variando entre 0,05 e 300g/L. O aparato experimental consistia em um tubo transparente de 4 m de altura e diâmetro interno de 20 mm, com uma válvula de abertura deslizante no meio. Cada uma das metades era preenchida com uma solução leve e outra solução pesada, sendo então aberta a válvula para que o processo de mistura ocorresse. Os resultados mostraram que o processo de mistura induzido pela gravidade em tubos horizontais é representado por baixos valores do número de Atwood, sendo o coeficiente de difusividade macroscópico determinado por

movimentos locais relativos de pequenos volumes de fluidos de diferentes concentrações.

Posteriormente, Debacq et al. (2003) trabalharam novamente com o processo de mistura induzida pela gravidade de dois fluidos miscíveis, porém agora como função do número de Atwood, viscosidade do fluido e diâmetro interno do tubo. Para esse trabalho, a geometria utilizada se assemelha a anterior, porém sendo variado o diâmetro interno de 2 a 44 mm, com os dois fluidos de densidades diferentes se encontrando após a abertura da válvula encontrada no meio da tubulação vertical de 4 m de altura. O par de fluidos utilizados era formado por um fluido mais leve composto de uma solução de água e glicerol, tingido por nigrosina, e o fluido mais denso era uma solução de água ou água e glicerol e sal de  $\text{CaCl}_2$  com concentrações variando entre 0,05 e 300g/L. O esquema dos experimentos realizados pode ser visto na Figura 5. Qualitativamente, com baixos contrastes de densidades existem faixas definidas que correspondem a flutuações de concentração se movendo à velocidade constante por toda região. A viscosidade das misturas não varia consideravelmente, porém seu aumento acarreta a mudança do regime de escoamento. Contudo, a variação do diâmetro influencia drasticamente no processo de mistura, e sua redução acarreta a mudança do tipo de escoamento observado.

**Figura 5 - Esquema dos experimentos realizados por Debacq et al. (2003)**



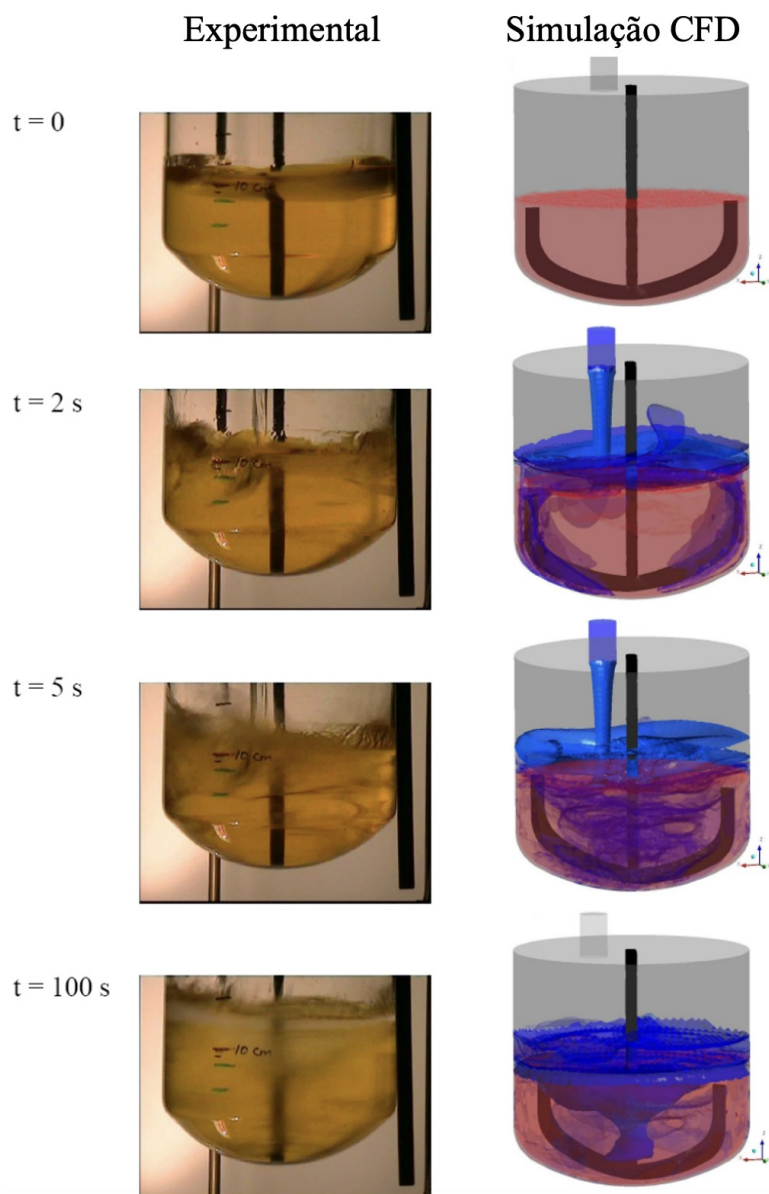
**Fonte: Adaptado de Debacq et al. (2003).**

Já o trabalho de Séon et al. (2004) estudou experimentalmente o *mixing* de dois fluidos miscíveis – sendo o fluido leve água tingida por nigrosina e o fluido mais denso uma solução de água e sal de  $\text{CaCl}_2$ , como função do ângulo de inclinação com

a vertical, do número de Atwood e a viscosidade. A geometria utilizada para o experimento consistia em uma tubulação de 4 m de comprimento e 20 mm de diâmetro interno e válvula deslizante no meio dessa, sendo que a geometria pode ser inclinada de 0° a 90° com a vertical. Os resultados experimentais demonstraram a influência do *mixing* local transversal em processos de misturas dinâmicos, sendo esses altamente influenciados pela inclinação da tubulação. Com o aumento do ângulo de inclinação o *mixing* transversal devido a atuação do empuxo é reduzido e a interface entre os fluidos é estabilizada. O aumento da viscosidade do fluido acarreta tanto no aumento do coeficiente de difusividade quanto na redução da faixa de observação do regime difusivo.

Através de simulações de CFD, Al-Qaessi; Abu-Farah (2009) buscaram medir o comportamento do processo de mistura de dois fluidos miscíveis, etanol e glicerol, em reatores fechados e semifechados, sendo investigadas as diferenças de densidade e viscosidade na dinâmica do comportamento do processo de mistura entre os fluidos para ambos os casos. Foram testados diferentes modelos para validação das simulações, e com isso foi possível observar que os tempos de *mixing* e as viscosidades dinâmicas dependentes do tempo puderam ser previstas através de simulações CFD com boa concordância com o modelo experimental, para melhor visualização, a Figura 6 apresenta o comparativo entre os testes experimentais e as simulações realizadas.

Figura 6 - Comparativo dos testes experimentais com as simulações CFD ao longo do tempo.

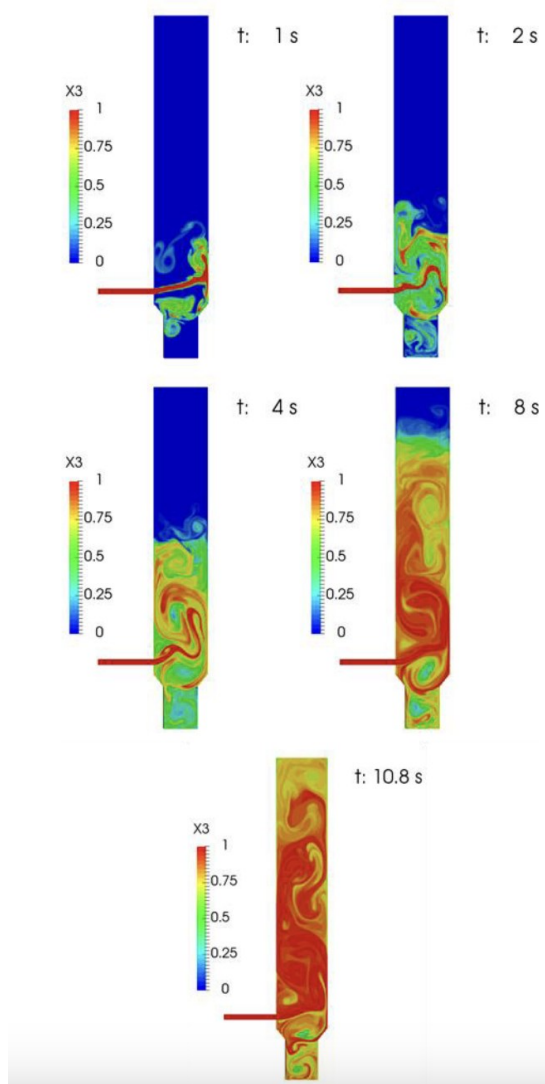


Fonte: Adaptado de Al-Qaessi e Abu-Farah (2009).

Xu et al. (2010) investigaram as características do processo de mistura térmico de dois fluidos miscíveis – água deionizada e uma solução com Rodamina B, em um micro canal em formato de T. A fim de se obter um estudo qualitativo dessas características, foram realizadas análises numérica, experimental e analítica. O experimento apresentou a formação de contornos de temperatura, indicando que um processo de mistura térmico extensivo havia ocorrido nos braços de injeção. Isso se deve ao fato de a difusividade térmica ser uma grandeza de três ordens maior que a difusividade mássica. Os modelos analíticos, bem como o numérico, corresponderam aos resultados experimentais.

O estudo de Valim (2018) buscou a compreensão da distribuição de inibidor termodinâmico na água após sua injeção, a fim de que pudesse ser mais bem entendido o seu processo de mistura na água. Para alcançar esse objetivo, foi construída uma bancada experimental vertical com redução de diâmetro, injeção lateral e possibilitando sua inclinação, além de simulação numérica da geometria, sendo utilizados como inibidores injetados para ambos os casos etanol e MEG. Resultados da simulação numérica da injeção de MEG ao longo do tempo podem ser vistos na Figura 7 a seguir. Por se tratar de uma geometria vertical de injeção na região inferior, MEG tendeu a se depositar nas regiões inferiores, deslocando água para o topo, o que provocou altas concentrações desse na região inferior e baixas concentrações no topo. Já para o etanol, foi observada maior homogeneidade por toda a coluna, sendo, no entanto, observadas maiores concentrações no topo, quando inclinada a 4°.

**Figura 7 - Perfil de fração mássica de MEG ao longo do tempo.**



**Fonte: Valim (2018).**

Truzzolillo & Cipelletti (2018) fizeram uma revisão referente aos mecanismos gerais que governam as instabilidades hidrodinâmicas em fluidos miscíveis, com ênfase nas consequências advindas da falta de uma verdadeira interface de equilíbrio. Foram também apresentadas as diferenças entre interfaces miscíveis e imiscíveis, sendo discutidos os problemas teóricos causados pelo processo de mistura dos fluidos. Como resultados, eles levantaram um panorama das instabilidades hidrodinâmicas mais comuns que podem ocorrer na interface de fluidos miscíveis.

No estudo apresentado por Lu et al. (2018), buscou-se apresentar resultados experimentais com relação aos inibidores usados (MEG e metanol), a taxa de injeção e salinidade da água salgada. Os experimentos foram realizados num *jumper* de 3", tendo a mesma geometria sido utilizada para simulações e escoamento multifásico

1D transiente. Em testes variando a salinidade, foi possível observar um melhor *mixing*, porém ainda assim foi observado uma estratificação do metanol injetado. Já as simulações 1D não foram capazes de reproduzir o processo de mistura do metanol.

Já o trabalho de Acharya, Mishra e Patel (2021) apresentou uma revisão dos trabalhos existentes para micro misturadores de fluidos miscíveis. Os trabalhos apresentados foram comparados segundo variações no *design* dos misturadores, como por exemplo: o processo de mistura com uma obstrução no escoamento, posição da corrente, parâmetros de escoamento e variação da geometria. Como conclusão, os autores sustentam a ideia de que o processo de mistura de fluidos deve ser rápido e efetivo afim de se obter uma mistura homogênea, sendo necessário para esse objetivo a utilização de micro misturadores. Os autores reforçam que cada método apresentado na revisão possui qualidades e defeitos, sendo preferível conforme a demanda, não existindo um método que contemple todos os requerimentos segundo o estudo apresentado.

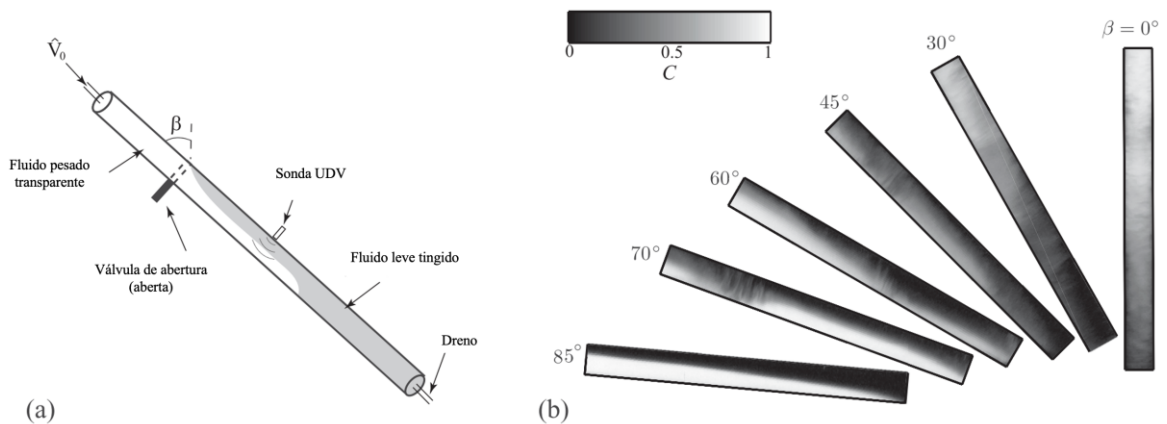
O estudo apresentado por Akbari e Taghavi (2020) consiste na injeção de um fluido pesado, sendo esse uma solução de água salgada com NaCl (cloreto de sódio) como aditivo, através de uma tubulação de 1,27cm de diâmetro interno em uma tubulação de diâmetro interno de 3,81cm preenchida por um fluido leve, sendo esse a água. O estudo promove sua contribuição através da quantificação do comportamento de diferentes escoamentos desta injeção através da análise das velocidades e do processo de mistura entre os fluidos. Através deste estudo foi possível observar que a maior parte do processo de mistura ocorre nos estágios iniciais do escoamento, próximo da entrada do escoamento, sendo a extensão do trabalho reduzida pela redução do ângulo de inclinação ou pela diferença de densidades.

Já no estudo de Akbari e Taghavi (2021), foi realizado um estudo experimental para estudar o deslocamento e substituição de um fluido mais leve inerte por um fluido mais pesado a ser injetado em uma tubulação inclinada fechada. Esse processo simularia o método de *dump bailing* de uma perspectiva da mecânica dos fluidos. Alguns fatores analisados foram os efeitos das propriedades do fluido injetado e dos parâmetros de escoamento, a eficiência do deslocamento de fluidos, o grau do processo de mistura e a qualidade de deslocamento. O aparato experimento consistia em dois tubos transparentes um externo de 2,46m de comprimento com 3,81cm de diâmetro interno e um interno com 2m de comprimento e diâmetro interno de 1,27cm, sendo o tubo menor colocado dentro do maior. Para os experimentos os fluidos

utilizados são miscíveis com diferentes densidades, sendo o fluido deslocador (pesado) uma solução de água e sal e o fluido deslocado (leve) água pura, além de misturas de glicerol e água com variação da viscosidade. O experimento consistia em preencher primeiramente o tubo externo com o fluido leve, então ao início do experimento a válvula era aberta para injeção do fluido pesado, sendo o fluido deslocado redirecionado para um compartimento externo. Através do estudo, foi possível concluir que a eficiência do deslocamento estava diretamente ligada à altura de descarga, além de indicar que uma inclinação da geometria em direção à vertical pode aumentar o processo de mistura entre os fluidos bem como o tempo de preenchimento do domínio do escoamento pelo fluido mais pesado. O estudo das diferentes taxas de injeção do fluido pesado possibilitou averiguar que altas taxas de injeção provocam um processo de mistura adicional entre os fluidos nos estágios iniciais do escoamento de seção circular, mas sem afetar a velocidade de frente de fluido como um todo.

A análise de estudos de um fluido mais denso deslocando um fluido menos denso dentro de tubulações permite também analisar o processo de mistura que ocorre entre ambos quando ocorre o encontro da frente do fluido injetado com o fluido inerte. Isso pode ser observado no estudo apresentado por Alba, Taghavi e Frigaard (2013), onde tal análise foi realizada utilizando um tubo de acrílico de 4m de comprimento o qual poderia ser inclinado em diferentes ângulos da horizontal à vertical, contando com um diâmetro de 19,05mm e uma divisão a 80cm do topo com uma válvula de abertura para injeção do fluido mais denso, um esquemático do experimento, bem como dos ângulos de variação da tubulação pode ser visto na Figura 8. Ambas as partes da tubulação são preenchidas com água, sendo acrescido ao líquido inferior tinta preta para medição da concentração. Ao fluido contido na parte superior é acrescido sal (NaCl), para aumentar seu peso. O estudo mostra que com altos valores de Atwood existe uma indução significativa de instabilidades e processo de mistura transversal advindos da combinação de escoamento imposto e empuxo, além de mostrar que a redução de Froude impacta em um melhor processo de mistura.

**Figura 8 - (a) Esquemático do experimento realizado após a abertura da válvula. (b) Variação dos ângulos de realização dos experimentos.**



**Fonte: Adaptado de Alba, Taghavi e Frigaard (2013).**

Já o estudo apresentado por Amiri, Larachi e Taghavi (2016) demonstra como em um processo de um fluido mais denso deslocando um menos denso é possível a existência de instabilidades no escoamento. Para essa análise, foi utilizada uma tubulação em acrílico transparente de 2,02m de comprimento e 0,96cm de diâmetro, com uma válvula automática localizada a 39cm do topo, a qual, ao início de cada experimento, era aberta para que o fluido mais denso (água com sal) pudesse escorrer em direção ao fluido menos denso (água com corante preto). Através disso, foi possível observar a presença dos escoamentos instáveis, os quais estavam associados a instabilidades, difusão e o processo de mistura, o qual se dava melhor quando do aumento de Atwood em escoamentos verticais.

## 2.8 Considerações finais

No presente capítulo, foram abordados os temas de hidratos e gerenciamento de hidratos, bem como sua relevância na produção de petróleo *offshore*, sendo ainda observada a atuação dos inibidores termodinâmicos que possuem elevada importância na produção petrolífera. Esses inibidores termodinâmicos são altamente utilizados nas linhas de produção, seja para a remoção de *plugs* de hidratos, como também para evitar sua formação. Por fim, foram analisados como se dá o processo de difusão de fluidos, além de números adimensionais usados para descrever o comportamento de fluidos.

O *mixing* de fluidos miscíveis possui elevada importância em diferentes áreas, dentre suas implicações está a indústria a extração de petróleo, e um conhecimento sobre como ocorre esse processo é necessário para situações como as de parada e repartida em uma linha de produção.

Conforme observado, há uma ampla utilização de inibidores termodinâmicos nas linhas de produção. Com isso, faz-se necessário um estudo que aborde de maneira satisfatória experimental e numericamente o processo de mistura entre fluidos miscíveis através de parâmetros como concentração ao longo da geometria e uma análise dimensional detalhada.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

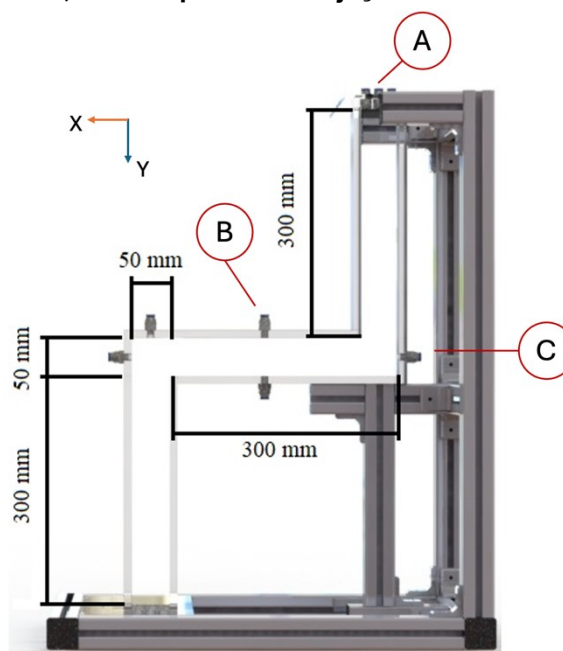
Nesse capítulo, será apresentada a metodologia experimental proposta para o desenvolvimento do presente trabalho. Para esse estudo, foi desenvolvida uma geometria quasi-2D que facilitasse os estudos numéricos posteriores. São apresentadas imagens do projeto, bem como o processo de execução dos testes, além dos artefatos utilizados para medição de concentração.

#### 3.1 Aparato experimental

O aparato experimental utilizado consiste em uma célula *Hele-Shaw* transparente, sendo esta uma célula composta de duas placas paralelas com um espaçamento estreito entre elas formando um canal confinado. A utilização de uma célula *Hele-Shaw* se deu pois através de sua utilização é possível realizar simulações numéricas de maneira mais simplificada, visto que com ela é possível se aproximar de uma geometria quasi-2D, além de possibilitar a utilização de uma quantidade menor de fluidos.

A geometria utilizada é apresentada na Figura 9, sendo composta por três regiões com mudanças de direção sendo duas colunas verticais e uma horizontal. Cada uma dessas três regiões possui 300mm de comprimento, com 50mm de espessura e 6mm de largura, possuindo, assim, um diâmetro hidráulico de 107mm.

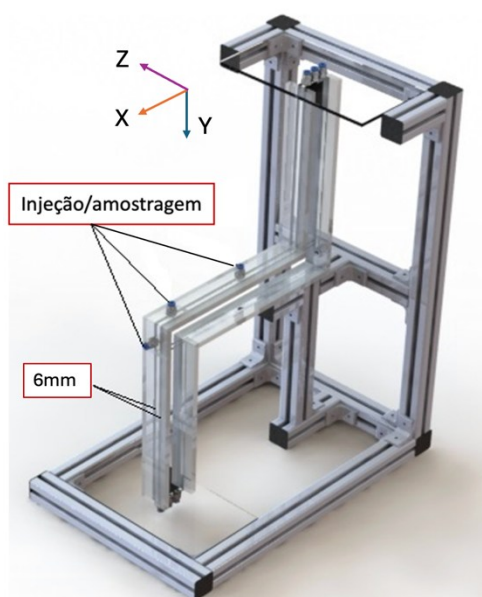
**Figura 9 - Geometria da bancada experimental piloto composta de duas seções verticais e uma seção horizontal, com os pontos de injeção demarcados por A, B e C.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 10 é possível observar uma vista isométrica do aparato experimental, propiciando uma perspectiva da espessura da célula e dos diferentes pontos de injeção e amostragem nos experimentos.

**Figura 10 – Bancada em vista isométrica com identificação dos diferentes pontos de injeção e amostragem presentes no canal confinado e a largura de 6mm dessa.**



Fonte: Autoria própria.

O aparato foi fabricado com lâminas de poliacetal com 6mm de espessura, sob as quais vários conectores de fácil acoplamento foram colocados em diferentes posições para injeção e retirada de amostras, sendo também posicionados dois drenos na região superior para realização de alívio de pressão na seção de testes.

### 3.2 Procedimento experimental

Para avaliar o processo de mistura do MEG na água, primeiramente o aparato é totalmente preenchido com água. Para a injeção de MEG, foi utilizado um tubo de injeção de 3mm, resultando em uma razão de diâmetro de 0,28. Na Figura 9 é possível visualizar os três pontos de injeção que foram utilizados, nomeados como A, B e C; sendo o primeiro coaxial no topo da seção de testes ( $A - \beta = 90^\circ$ ), o segundo perpendicular à seção horizontal ( $B - \beta = 90^\circ$ ) e o terceiro coaxial à seção horizontal ( $C - \beta = 0^\circ$ ), onde  $\beta$  é o ângulo em relação à horizontal. Para a realização dos testes, foram utilizadas duas concentrações diferentes de MEG ( $C_0\%v/v$ ), sendo elas MEG puro (100% v/v) e MEG diluído em água (70%v/v).

A seção de testes era preenchida completamente com água da torneira antes da realização de cada ponto experimental. O equipamento utilizado para realizar a injeção de MEG no aparato foi uma bomba seringa *Teledyne<sup>TM</sup> 260D* conectada à bancada através dos pontos de injeção citados posteriormente. Todos os experimentos possuíam como objetivo final uma concentração global de 20% v/v de MEG na seção de testes. A temperatura ambiente e dos fluidos foram mantidas a 20°C e para melhor visualização do MEG foi adicionado corante laranja (anilina) a uma proporção de 0,1g/L, como pode ser observado no instante de injeção na Figura 11. Como citado anteriormente, o aparato possui dois drenos na parte superior, junto ao ponto de injeção A, visto que os testes necessitam que o fluido transborde.

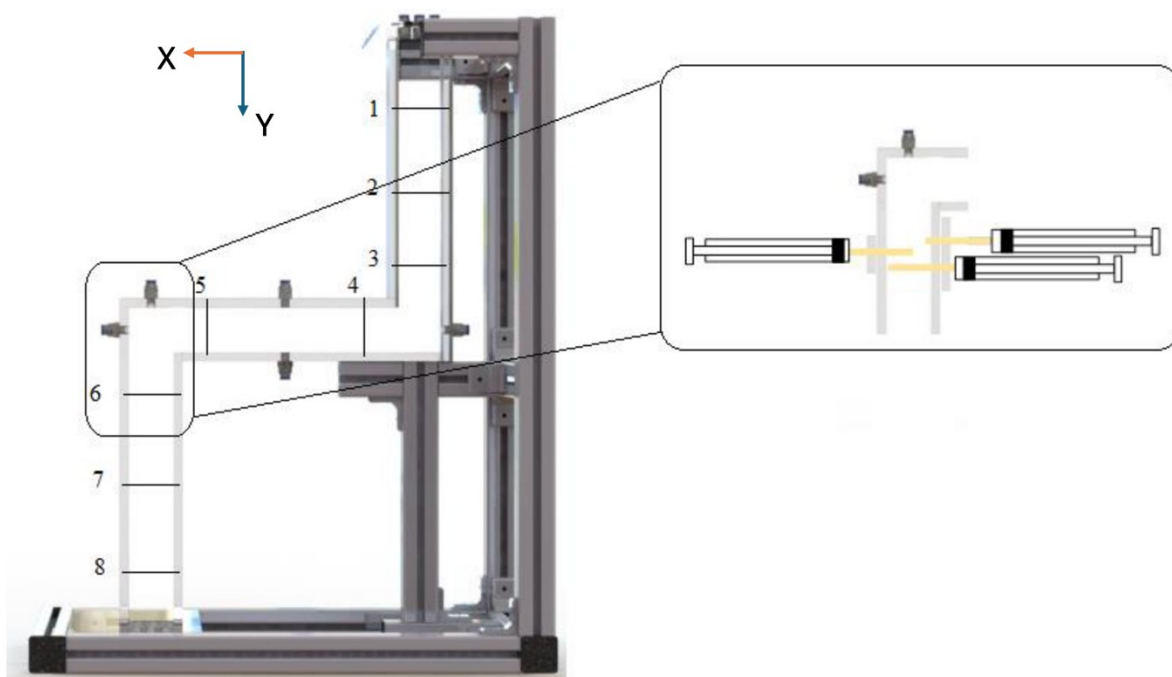
**Figura 11 - Injeção de MEG com anilina em um instante de tempo para melhor visualização**



**Fonte: Autoria própria.**

Como é possível visualizar na Figura 12, foram utilizados oito pontos de retirada de amostras para realização da medição de concentração do MEG, sendo eles três em cada seção vertical e dois na seção horizontal. Em cada um desses pontos, três amostras eram coletadas de diferentes posições do canal, permitindo, assim, uma análise de gradiente de concentração de cada ponto. As seringas permaneceram fora do canal de escoamento durante a injeção de fluido, sendo apenas introduzidas nos pontos de retirada cinco minutos após a finalização da injeção.

**Figura 12 - Pontos de retiradas de amostras**



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Análise de concentrações

Para realização da análise de concentração das amostras retiradas, foi utilizado um Refratômetro Digital para Etilenoglicol HI96831 da *HANNA® Instruments*, o qual possibilita a concentração volumétrica instantânea de MEG com correção de temperatura e 0,4% v/v de incerteza.

### 3.4 Grade de testes

A Tabela 1 apresenta a grade de testes que foi utilizada para obtenção dos resultados experimentais, os casos realizados para esse estudo também serão repetidos numericamente, a fim de que seja realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelos casos experimentais e numéricos. Nesta tabela é possível observar que os casos possuem variação de vazão, bem como de concentração de injeção e também o local de injeção.

Tabela 1 - Grade de testes para análise experimental e numérica

Caso	Vazão [ml/min]	Diâmetro de Injeção [mm]	Concentração de injeção [%v/v]	Local de Injeção
1	100	3	100	A
2	36	3	70	A
3	18,25	3	70	A
4	100	3	100	B
5	36	3	70	B
6	18,25	3	70	B
7	100	3	100	C
8	36	3	70	C
9	18,25	3	70	C

Fonte: Autoria própria.

### 3.5 Considerações finais

No presente capítulo, foram apresentados os processos e metodologias utilizados para o teste de escoamento de fluidos em uma bancada confinada. A ideia com tal bancada de testes era proporcionar um canal com mudança de direção, além de possibilitar diferentes pontos de injeção nesta. Foi apresentada também a grade de testes que foi utilizada para obtenção de resultados experimentais e numéricos. A escolha dos casos de experimento se deu através da variação da vazão de injeção e da concentração de MEG, variando entre os três pontos de injeção possíveis na bancada. Cujo objetivo era se descobrir qual o melhor conjunto entre vazão, concentração e local de injeção para a obtenção de uma mistura mais uniforme no canal.

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

No presente capítulo, são apresentadas as equações de conservação que regem o problema, bem como as equações utilizadas referentes as propriedades de mistura, e o modelo de turbulência utilizado. São também apresentados o método para solução computacional do problema utilizado, as condições de contorno e inicial, bem como a malha geométrica utilizada, escolhida através do teste de malhas.

### 4.1 Modelagem matemática

Para a modelagem do problema de interesse, assume-se, por se tratar de um caso envolvendo dois fluidos miscíveis sem reação química, o escoamento como monofásico, turbulento e isotérmico. Além disso, suas propriedades são variáveis ponto a ponto segundo a concentração de MEG e esses, bem como sua mistura, são considerados como fluidos newtonianos.

Para a modelagem da turbulência, assume-se o conceito de médias de Reynolds (BATCHELOR, 1967) e a hipótese de Boussinesq (WILCOX, 2006). O sistema resultante dessa abordagem é comumente referido como RANS, sigla para *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations* (Equações de Navier-Stokes médias de Reynolds). Para escoamento monofásico e isotérmico, no contexto do presente problema, ele é dado pelas equações da continuidade e do balanço da quantidade de movimento, além de uma equação de transporte para a fração mássica de um dos fluidos que constitui a mistura, apresentadas respectivamente a seguir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \mu_{eff} \cdot \nabla^2 \vec{V} \quad (16)$$

$$\frac{\partial (\rho \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi) = \nabla \cdot \left[ \left( \rho D_{\Phi} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \varphi \right] + S_{\varphi} \quad (17)$$

Na Equação 16, os termos do lado esquerdo se referem, respectivamente, à aceleração temporal e convectiva de uma partícula fluida, e os do lado direito à queda de pressão e ao termo difusivo associado às tensões viscosas e turbulentas, respectivamente.

Já na Equação 17,  $\Phi$  se refere à concentração do fluido que é injetado, onde  $\varphi = \Phi/\rho$  é a concentração por unidade de massa,  $S_\varphi$  é o termo fonte volumétrico e  $D_\Phi$  é a difusividade cinemática para o escalar. Por se tratar de um escoamento turbulento, constam ainda os termos  $Sc_t$  que é o número de turbulência de Schmidt e  $\mu_t$  se refere à viscosidade turbulenta. Em uma mistura constituída por  $n$  fluidos miscíveis, são resolvidas  $n-1$  equações equivalentes à Eq. 17, já que a concentração do fluido restante pode ser obtida como complementar às concentrações dos demais.

Para ambas as equações,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão,  $\vec{V}$  é o vetor velocidade média de Reynolds e  $\mu_{eff}$  é a viscosidade efetiva do fluido. Por definição, a viscosidade efetiva é composta pela soma das viscosidades molecular,  $\mu$  e turbulenta,  $\mu_t$ ,  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ . A viscosidade molecular é uma propriedade física do fluido de trabalho, enquanto a viscosidade turbulenta é derivada do processo média de Reynolds e da hipótese de Boussinesq, estando relacionada com as tensões adicionadas provocadas pelas flutuações do campo de velocidade – sendo calculada através de modelos de turbulência (AZEVEDO, 2019; POPE, 2000).

#### 4.1.1 Modelagem da turbulência em escoamento monofásico

Como discutido acima, a modelagem média da turbulência requer uma estimativa para a viscosidade turbulenta, a qual deve ser calculada através de um modelo. Existem diversos modelos de turbulência baseados em médias de Reynolds, sendo comuns os chamados modelos de duas equações (WILCOX, 2006).

Um dos modelos mais conhecidos nesse sentido é o de Launder e Spalding (1974), chamado  $k - \varepsilon$  padrão. Esse modelo, como a maioria dos modelos RANS, estima a viscosidade cinemática turbulenta como função de duas propriedades turbulentas, uma delas a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a outra dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ), para as quais são resolvidas duas novas equações de transporte adicionais.

No entanto, esse modelo possui uma série de deficiências, tais como a predição inadequada de regiões de separação e desconsideração das subcamadas próximas à parede em escoamentos internos (MENTER, 1992). Por outro lado, soluções mais complexas necessitam recursos computacionais elevados, e acabam se tornando proibitivas por essa razão (ROSA, 2012).

Dessa forma, soluções práticas procuram utilizar modelos que não possuam as deficiências presentes no modelo  $k - \varepsilon$  sem serem, também, computacionalmente proibitivos. Um dos modelos mais utilizados atualmente que satisfaça tais demandas (AZEVEDO, 2019) é o modelo  $k - \omega$  SST de Menter (1994).

#### 4.1.1.1 Modelo SST de Menter

O modelo  $k - \omega$  SST, proposto por Menter (1994), é um dos modelos de turbulência mais utilizados atualmente. Ele adota uma formulação especial para a viscosidade turbulenta, a qual procura simular o efeito do transporte de tensões médias turbulentas, normalmente filtrados em modelos de médias de Reynolds, porém de importância em escoamentos com gradiente adverso de pressão. A base desse modelo utiliza uma formulação ponderada que aproveita a independência de funções amortecedoras do modelo  $k - \omega$  nas regiões próximas à parede junto à robustez do modelo  $k - \varepsilon$  nas regiões distantes da parede.

Esse modelo assume a solução das equações de transporte para as propriedades turbulentas  $k$  e  $\omega$ , sendo elas, respectivamente, a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica da turbulência. Essas propriedades surgem a partir da combinação dos modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  padrão, sendo suas equações de transporte respectivamente apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\alpha_{\omega 3} \rho}{\mu_t} P_k + \frac{2}{\sigma_{\omega 2} \omega} (1 - F_1) \rho (\nabla k \cdot \nabla \omega) - \beta_{\omega 3} \rho \omega^2 \quad (19)$$

sendo  $F_1$  uma função ponderadora,  $\beta^* = 0,09$  e  $P_k$  o termo de produção dado por:

$$P_k = \mu_t \left[ \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right] \nabla \vec{V} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) (3\mu_t \nabla \cdot \vec{V} + \rho k) \quad (20)$$

Os coeficientes  $\sigma_{k3}$ ,  $\sigma_{\omega3}$ ,  $\alpha_{\omega3}$  e  $\beta_{\omega3}$  são calculados pela função genérica  $\zeta = (\sigma_k, \sigma_\omega, \alpha_\omega, \beta_\omega)$ , tal que  $\zeta_3 = F_1 \zeta_1 + (1 - F_1) \zeta_2$ , onde, segundo Menter (1994):

$$\begin{aligned} \sigma_{k1} &= 2; \sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega1} = 2; \sigma_{\omega2} = 1/0,856 \\ \alpha_{\omega1} &= 5/9; \alpha_{\omega2} = 0,44; \beta_{\omega1} = 0,075; \beta_{\omega2} = 0,0828 \end{aligned}$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[ \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega \delta_w}; \frac{500\mu}{\rho \delta_w^2 \omega} \right); \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega2} \delta_w^2} \right) \right]^4 \right\} \quad (21)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( \frac{2\rho}{\sigma_{\omega2} \omega} (\nabla k \cdot \nabla \omega); 1 \times 10^{-10} \right) \quad (22)$$

sendo  $\delta_w$  a distância à parede mais próxima.

O modelo assume  $\mu_t$  como uma função de  $k$  e  $\omega$ , multiplicado por uma função ponderadora  $F_2$  tal que:

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega_{SST} F_2)} \quad (23)$$

onde  $a_1 = 0,031$  e  $\Omega_{SST}$  é a magnitude do vetor vorticidade, e  $F_2$  é dada pela seguinte equação:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{\delta_w \sqrt{k}}{\beta^* \omega \delta_w}; \frac{500\mu}{\rho \delta_w^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (24)$$

Segundo Azevedo (2019), o modelo SST é numericamente robusto, não computacionalmente proibitivo e já foi validado para uma série de aplicações, sendo por ora também considerado para o presente trabalho.

## 4.2 Modelagem numérica

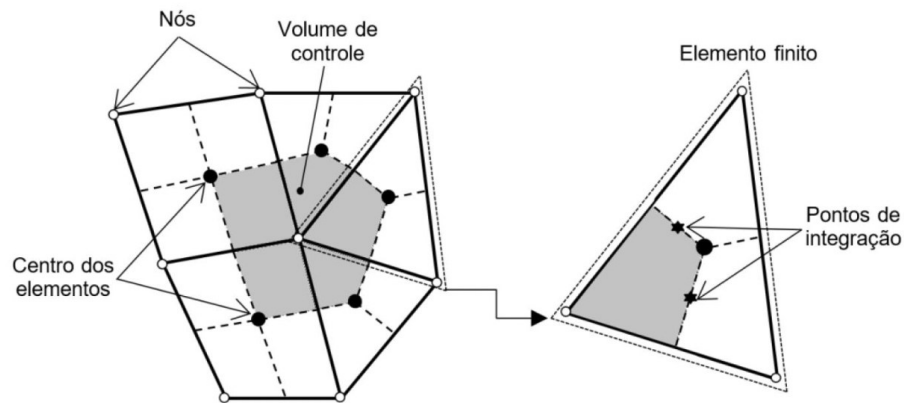
Para a solução das equações apresentadas anteriormente, é necessária uma solução numérica. No presente trabalho, essa solução é obtida através da metodologia de volumes baseada em elementos, como implementada no programa de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS® CFX® (ANSYS INC, 2021).

Segundo Azevedo (2019), essa metodologia se baseia na discretização do domínio a ser calculado em uma malha numérica composta por volumes de controle finitos, sendo as equações governantes integradas sobre esses, além de serem discretizadas e linearizadas, o que resulta em um sistema algébrico de equações que devem ser resolvidas computacionalmente através de um processo iterativo.

Tal método é considerado um método numérico híbrido, e isso ocorre pela utilização do método dos volumes finitos para discretizar as equações de conservação e o método dos elementos finitos para discretização espacial. Versteeg e Malalasekera (2007), assim como Patankar (1980), descrevem extensamente o método dos volumes finitos. Já a técnica baseada em elementos é descrita por Yeoh e Tu (2019) e outros.

Nesse método, os volumes de controle de cada elemento finito da malha são construídos em torno dos centros, cujo esquemático pode ser observado na Figura 13. Nesse esquema, é possível visualizar a criação de um volume de controle poliédrico, representado pela região sombreada dentro dos elementos finitos, onde suas fronteiras estão delimitadas pelos centros de cada elemento.

**Figura 13 - Volume de controle formado pelos centros dos elementos finitos**



**Fonte: Adaptado de ANSYS INC (2021).**

Na Figura 13, as linhas contínuas definem os elementos finitos, sendo as propriedades dos fluidos e variáveis do problema calculadas em seus vértices, os quais estão marcados com círculos brancos. Já as linhas tracejadas definem os volumes de controle, cujos fluxos de superfícies são avaliados nos pontos de integração, marcados com uma estrela preta e que se encontram entre os volumes de controle adjacentes.

Azevedo (2019) explica que as equações da continuidade e conservação de momento são integradas em cada volume de controle sombreado, sendo, em seguida, aplicado o teorema da divergência de Gauss para conversão das integrais de volume em integrais de superfície. Após isso, ocorre a discretização das integrais de volume para cada setor do volume de controle, sendo acumuladas, então, no volume de controle ao qual cada setor pertence. Em contrapartida, acontece a discretização das integrais de superfícies sobre cada ponto de integração e sua distribuição para os volumes de controle adjacentes.

A fim de se obter aproximações para o cálculo dos valores de determinados termos nos pontos de integração, uma vez que as variáveis são calculadas nos nós da malha, é feita uma interpolação exclusivamente geométrica para variáveis escalares, além de propriedades do fluido e gradientes de propriedades e termos difusivos. Uma explicação mais detalhada dessa interpolação pode ser encontrada em ANSYS Inc (2021).

Liston e Santos (2021) explicam que o programa ANSYS® CFX® conta com diferentes modelos capazes de realizar a interpolação dos modelos advectivos para

sua aproximação. Esquemas como o *upwind*, de primeira ordem, e o de diferenças centrais, de segunda ordem, contudo apresentam alguns problemas, tais como o primeiro que é muito difusivo e o último que ocasionalmente gera oscilações não físicas em regiões de elevados gradientes.

Dessa forma, ANSYS Inc (2021) recomenda o uso do esquema *high resolution*, o qual procura corrigir as principais falhas dos exemplos anteriores ao assumir que o valor de uma dada variável de transporte sobre o ponto de integração,  $\bar{\omega}_{up}$ , é calculado da seguinte forma:

$$\bar{\omega}_{ip} = \bar{\omega}_{up} + \kappa_{HR} \nabla \bar{\omega}_{up} \cdot \Delta \vec{r} \quad (25)$$

Sendo  $\bar{\omega}_{up}$  o valor da variável avaliado em um nó à montante (*upwind*),  $\nabla \bar{\omega}_{up}$  o gradiente desse valor,  $\vec{r}$  o vetor posição do nó à montante do ponto de integração e  $\kappa_{HR}$  um coeficiente que varia dinamicamente no domínio de solução. Para calcular  $\kappa_{HR}$ , o programa se baseia no princípio de Barth e Jespersen (1989), o qual busca tornar o coeficiente o mais próximo de 1,0 possível, diminuindo ao máximo o efeito difusivo do esquema *upwind*, mas sendo limitado o suficiente para que esse valor não provoque as oscilações presentes no esquema de segunda ordem.

Com todas as equações discretizadas para todas as variáveis em todos os volumes de controle, é necessário, agora, resolver o problema através de algum método iterativo. Para isso, segundo Yeoh e Tu (2019), o programa ANSYS® CFX® utiliza um sistema acoplado de solução, onde o sistema de equações é resolvido em uma única matriz. Por sua vez, o acoplamento pressão-velocidade é solucionado através de um método pensado para sistemas de malhas co-localizadas baseado no esquema desenvolvido por Rhie e Chow (1983).

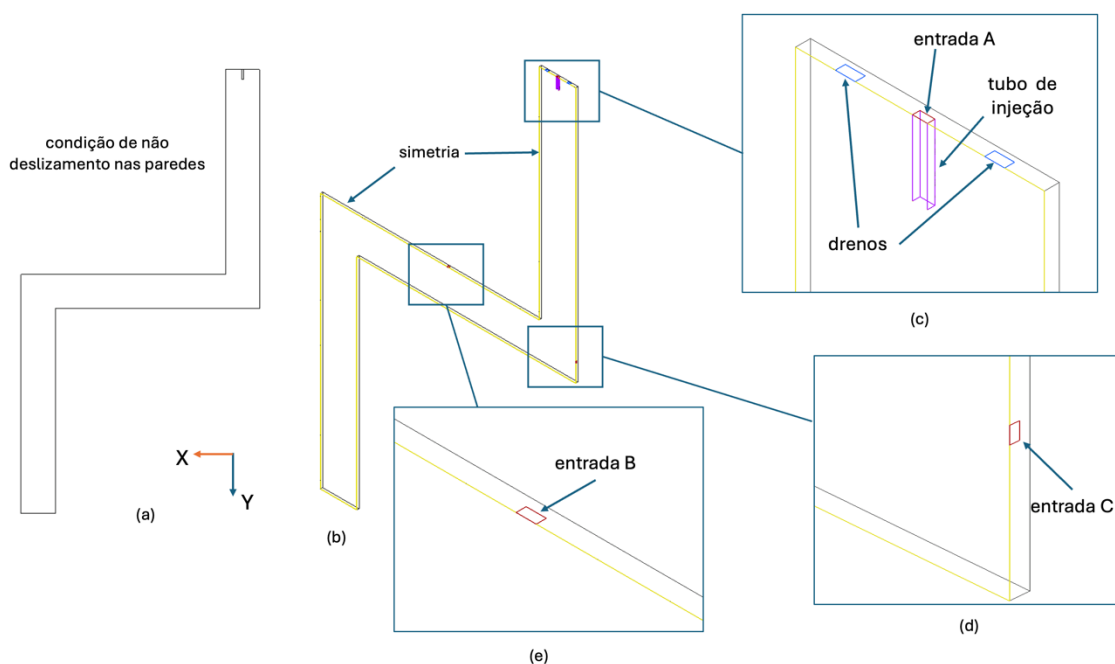
#### 4.2.1 Condições de contorno

Para resolução do problema foi utilizada a geometria que pode ser vista na Figura 14. As regiões de entrada e os drenos foram todos simplificados como quadradas utilizando-se seu diâmetro hidráulico equivalente. Devido à geometria do problema, foi possível utilizar uma condição de simetria, sendo a localização das

regiões de entrada e dos drenos colocadas a fim de se aproveitar da simetria. Em (a) é possível visualizar a geometria e a utilização de uma condição de não deslizamento nas paredes. Em (b), é possível visualizar a geometria com o plano de simetria em destaque em amarelo; em (c) é possível visualizar, em destaque, a localização dos drenos, em azul, a entrada A em vermelho e o tubo de injeção, em lilás, sendo possível visualizar, também, o plano de simetria, em (d) é possível visualizar a entrada C localizada na parede lateral da porção vertical superior, e em (d) é possível visualizar a entrada B, na porção horizontal.

Para resolver o problema numericamente, a geometria apresentada na Figura 14 (a) foi projetada com o uso dos programas *SolidWorks* e *ICEM® CFX®*, possuindo essas as mesmas dimensões do modelo experimental – conforme Figuras 9 e 10. Com o intuito de reduzir o custo computacional, a geometria foi utilizando um plano de simetria, o qual pode ser mais bem explicitado nas Figuras 14 (b), (c), (d) e (e).

**Figura 14 - Geometria utilizada para solução numérica onde são apresentadas as condições de contorno utilizadas: (a) condição de não deslizamento na parede; (b) plano de simetria; (c) tubo de injeção, entrada A e drenos; (d) entrada C e (e) entrada B.**



**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 14 (a) é possível observar que as paredes da geometria foram modeladas com a condição de não deslizamento. Já na Figura 14 (c), a entrada é realizada através de um tubo de injeção. Isso ocorre para que o fluido injetado não se

dirija diretamente para os drenos localizados na mesma face da entrada. Com o intuito de não haja pressurização da geometria, foram modelados drenos como uma abertura (*opening*), permitindo a saída do excesso de fluido. Para as entradas B e C, vistas nas Figuras 14 (e) e (d), respectivamente, a injeção de fluido é realizada logo na entrada delimitada junto à parede. As paredes são consideradas como lisas, sobre as quais é adotada a condição de não-deslizamento.

Para os casos simulados, MEG foi injetado a uma vazão constante, sendo ela de 100ml/min, 36ml/min ou 18,25ml/min, dependendo do caso testado. O tempo de injeção variou com relação à vazão de injeção – sendo eles de 34,2s, 135,714s e 267,71s, respectivamente. Foi utilizado um passo de tempo (*timestep*) variável, onde no período de injeção de MEG e mais 100s após finalizada a injeção o *timestep* foi de 0,05s, após esse período o *timestep* foi de 0,1s, cujo objetivo era um número de Courant médio menor que 5. Um nível de turbulência de 5% é especificado na entrada. A simulação é isotérmica e ocorre a 20°C e buscando-se uma concentração global de MEG de 20% ao final da simulação são injetados 28,5ml de MEG.

Como o objetivo das simulações é entender como se dá o processo de mistura, é necessário que a evolução do escoamento seja observada também após a finalização da injeção de MEG. Dessa forma, MEG é injetado conforme os tempos de injeção citados anteriormente, e após cessada a injeção, a simulação ocorre por mais 300s – sendo assim possível compreender como se dá o processo da mistura ao longo do tempo. Este procedimento também foi realizado durante a realização dos testes experimentais.

No modelo numérico, o problema de mistura do MEG e da água, dois fluidos miscíveis, é resolvido assumindo-se que o fluido de trabalho é uma mistura de composição variável (*variable composition mixture – VCM*), cuja fração mássica é resolvida através da Eq. 17. A VCM é configurada a partir dos fluidos que compõem a mistura, nesse caso água e MEG.

Numericamente, um dos fluidos que compõe a mistura é assumido como fluido base, chamado de *constraint*. No presente trabalho, o fluido base é assumido como a água. Dessa forma, ao se configurar o problema, a concentração calculada pela Eq. 17 se refere ao fluido secundário, no caso o MEG.

Como condição inicial, assume-se que a concentração da mistura no início do teste é composta apenas pelo fluido base, a água. Já o fluido a ser injetado tem

concentração de MEG estipulada conforme a condição operacional que se deseja simular. Dessa forma, na condição de contorna estabelecida na entrada é apontado a fração mássica de etileno glicol a ser injetada. Para os casos em que MEG puro é injetado, a concentração mássica de entrada é especificada como 1,0. Entretanto, nos casos em que 70% da fração volumétrica a ser injetada é de MEG, é necessário calcular a fração mássica de MEG correspondente a partir das equações abaixo:

$$x = \frac{m_{MEG}}{m_{MEG} + m_{H_2O}} \quad (26)$$

$$m_{MEG} = Vol_{MEG} \rho_{MEG} \quad (27)$$

$$m_{H_2O} = Vol_{H_2O} \rho_{H_2O} \quad (28)$$

onde  $x$  é a fração mássica de MEG,  $m_{MEG}$ ,  $Vol_{MEG}$  e  $\rho_{MEG}$  são a massa, volume e densidade do MEG, respectivamente, enquanto  $m_{H_2O}$ ,  $Vol_{H_2O}$  e  $\rho_{H_2O}$  são a massa, volume e densidade da água, respectivamente, todos a 20°C. Substituindo  $\rho_{MEG} = 1113,06 \text{ kg/m}^3$ ,  $Vol_{MEG} = 0,7 \text{ m}^3$ ,  $\rho_{H_2O} = 998,543 \text{ kg/m}^3$  e  $Vol_{H_2O} = 0,3 \text{ m}^3$  nas equações obtém-se um valor para a fração mássica de MEG de 0,722 – sendo esse valor a ser injetado na entrada.

As propriedades relevantes desse fluido, neste caso a massa específica, a viscosidade e a difusividade, são estimadas em função da concentração local de MEG presente na mistura. Para esse cálculo, é necessário descrever como essas propriedades são alteradas com o aumento de concentração de etileno glicol na mistura. As equações que regem tais comportamentos são apresentadas na seção a seguir.

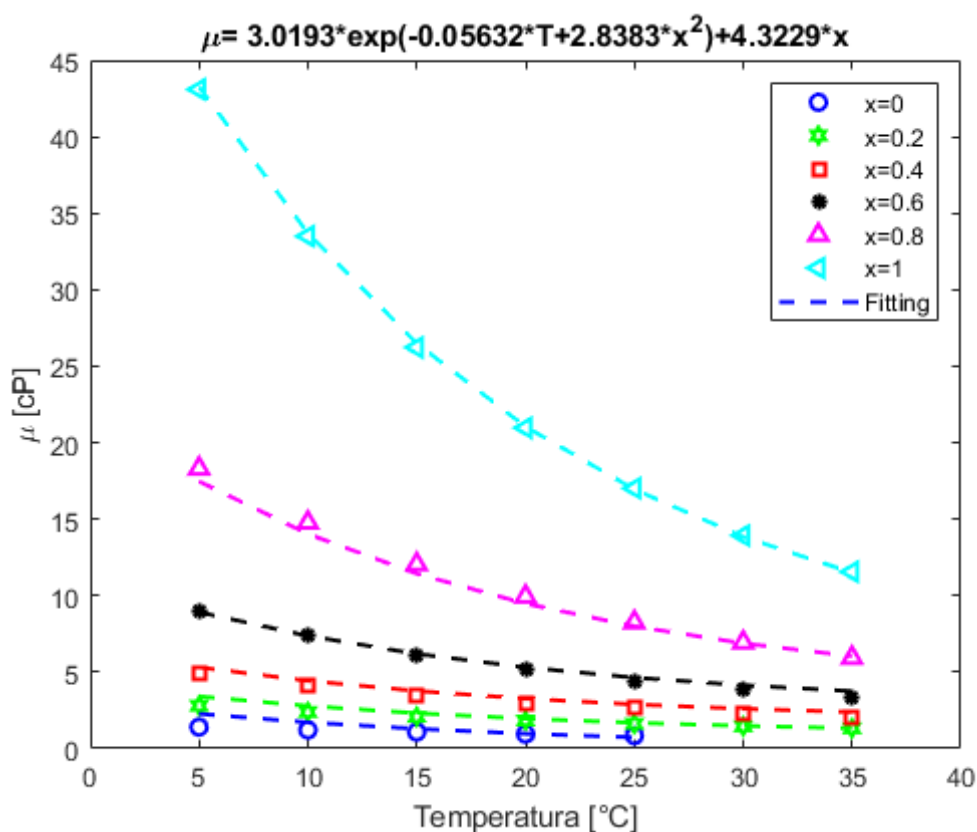
#### 4.2.1.1 Equações para as propriedades da mistura

A fim de se obter resultados mais próximos dos casos testados experimentalmente, fez-se necessário o cálculo iterativo das propriedades da mistura conforme se aumentava a fração mássica de MEG dentro da geometria. Para a

correção da massa específica, da viscosidade e da difusividade, foram levados em conta tanto trabalhos já realizados como a medição dos dados experimentalmente.

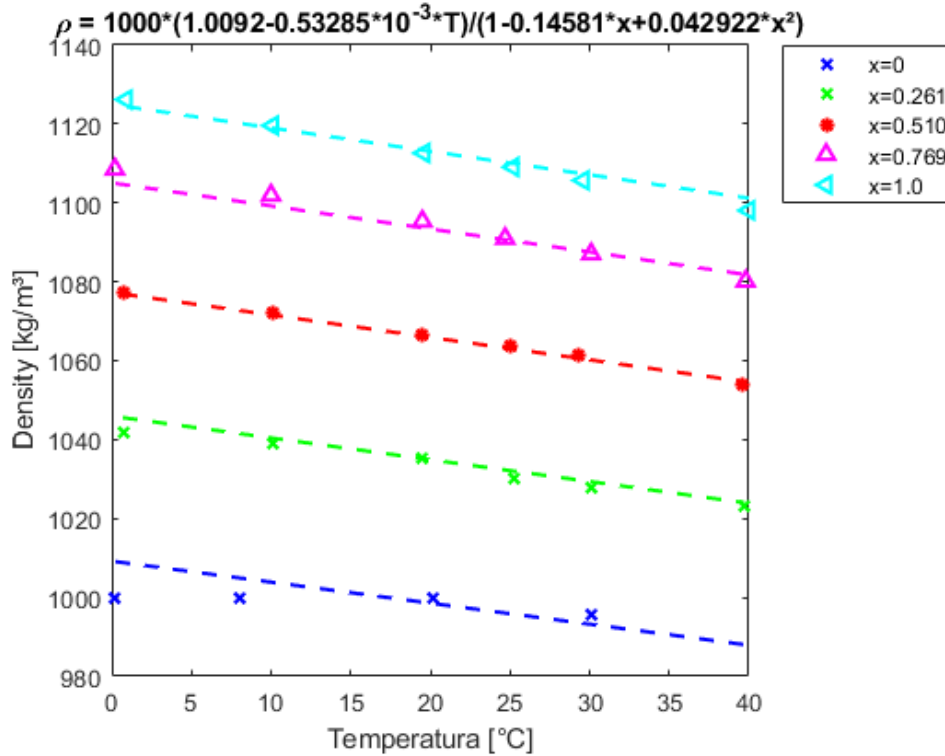
Para a correção dos dados de massa específica, foi utilizado como base o trabalho de Bohne; Fischer e Obermeier (1984). Já para os dados de viscosidade, ela foi medida em um viscosímetro Brookfield DV-II+Pro, cuja incerteza é de  $\pm 1\%$ . A partir desses dados foram então geradas curvas para a massa específica e viscosidade em função da fração mássica de MEG e da temperatura, as quais podem ser observadas nas Figuras 15 e 16 que seguem.

Figura 15 - Curva da viscosidade em função da fração mássica de MEG



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Curva da densidade em função da fração mássica de MEG



Fonte: Autoria própria.

A partir de cada gráfico, foi possível encontrar uma equação que rege as curvas a partir de uma regressão linear. Para a difusividade, foi utilizada a equação proposta por Hayduk e Minhas (1982) apresentada por Poling et al. (2001), a qual fornece o coeficiente de difusão  $D_{AB}^{\circ}$  de A em uma solução infinitamente diluída de A em B. Essas equações foram então implementadas no programa ANSYS® CFX® para descrever as propriedades da VCM em função da concentração local de MEG. As equações utilizadas para a viscosidade, densidade e difusividade podem ser observadas a seguir:

$$\mu_m = 3,0193 \exp(-0,05632T + 2,8383x^2) + 4,3229x \quad (29)$$

$$\rho_m = 1000(1,0092 - 0,53285 \cdot 10^{-3}T) / (1 - 0,14581x + 0,042922x^2) \quad (30)$$

$$D_{AB}^{\circ} = 1,25 \times 10^{-8} (V_A^{-0,19} - 0,292) T^{1,52} \mu_{H_2O}^{\varepsilon*} \quad (31)$$

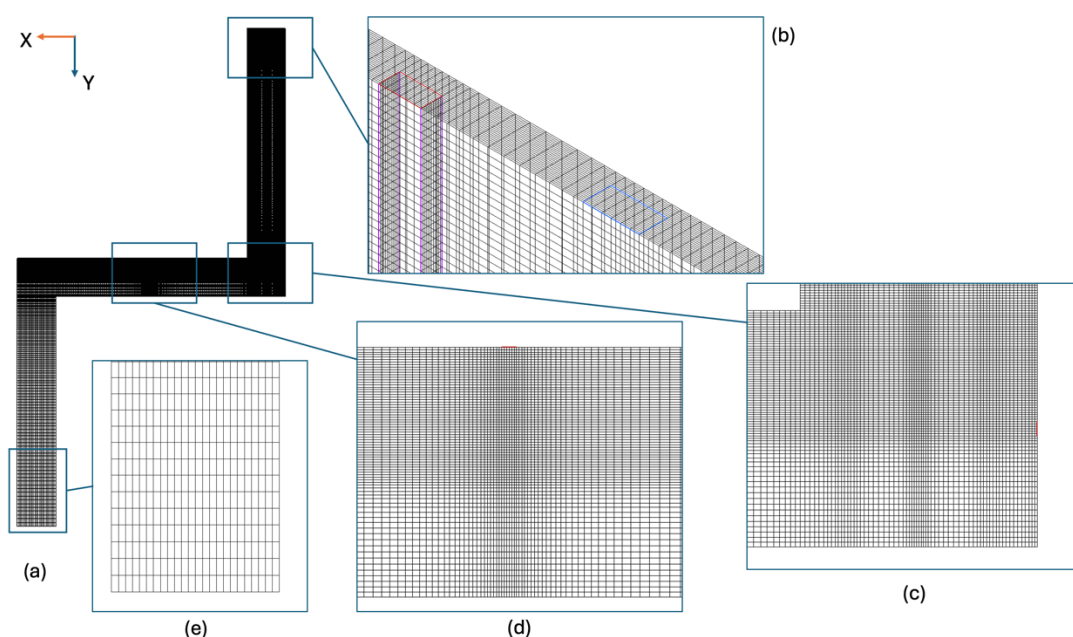
onde  $x$  é a fração mássica de MEG,  $T$  é a temperatura,  $V_A$  é o volume molar do soluto A na temperatura de ebulição,  $\mu_{H_2O}$  é a viscosidade da água e  $\varepsilon^* = (9,58/V_A) - 1,12$ .

#### 4.2.2 Malha numérica

A Figura 17 apresenta a malha numérica utilizada bem como suas regiões de interesse. Nela é possível observar que existem três regiões por onde pode ser realizada a injeção de fluidos. A entrada A, na Figura 17 (b), a injeção acompanha um canal, denominado tubo de injeção, o qual se aprofunda por 15mm. Já as entradas B e C, Figura 17 (c) e (d), são apenas demarcadas superficialmente na parede.

A intenção de criação dessa malha foi feita para que se pudesse utilizar a mesma independente de por onde fosse realizada a injeção de fluidos. Para que isso pudesse ocorrer, foi feito um refino de malha próximo a cada uma das entradas, que podem ser vistos nas vistas aumentadas das Figuras 17 (b), (c) e (d), tanto na porção vertical superior, como na porção horizontal. Dessa forma, a fim de aliviar a malha, a porção vertical inferior possui menor refino quando comparada às outras duas porções, o que pode ser visualizado na Figura 17 (e).

**Figura 17 - Malha numérica sendo (a) vista geral da malha; (b) vista aumentada da região de entrada A e refino realizado, (c) vista aumentada da região de entrada C e refino realizado, (d) vista aumentada da região de entrada B e refino realizado e (e) vista aumentada do alívio realizado na malha.**



Fonte: Autoria própria.

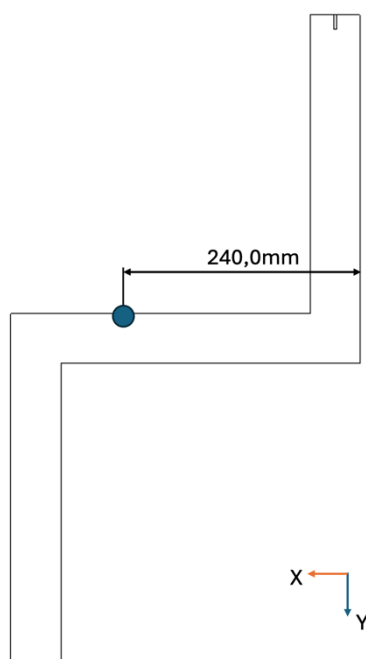
A fim de se testar uma malha ótima para solução do problema foram testadas seis malhas com diferentes números de elementos. A Tabela 2 apresenta em ordem de aumento do número de elementos as malhas utilizadas, bem como a concentração de MEG percentual em um ponto localizado na porção vertical da geometria próximo a parede superior, além de apresentar também a diferença percentual de cada malha em relação a malha mais refinada (Malha 6). O ponto de medição escolhido pode ser visualizado na Figura 18, o ponto encontra-se a 240mm da parede esquerda da porção superior vertical, além de estar também localizado na parede superior da porção horizontal.

**Tabela 2 - Características das malhas utilizadas no teste de malhas, levando em consideração número de elementos, concentração de MEG e diferença percentual para a malha mais refinada**

Malha	Nº de elementos	Concentração de MEG (%)	Diferença (%)
1	18720	12,50	6,56
2	219420	9,46	3,53
3	563544	8,72	2,78
4	906912	6,10	0,16
5	1344384	5,99	0,05
6	2706429	5,94	-

Fonte: Autoria própria.

**Figura 18 - Localização do ponto de medição da concentração de MEG para os testes de malha**

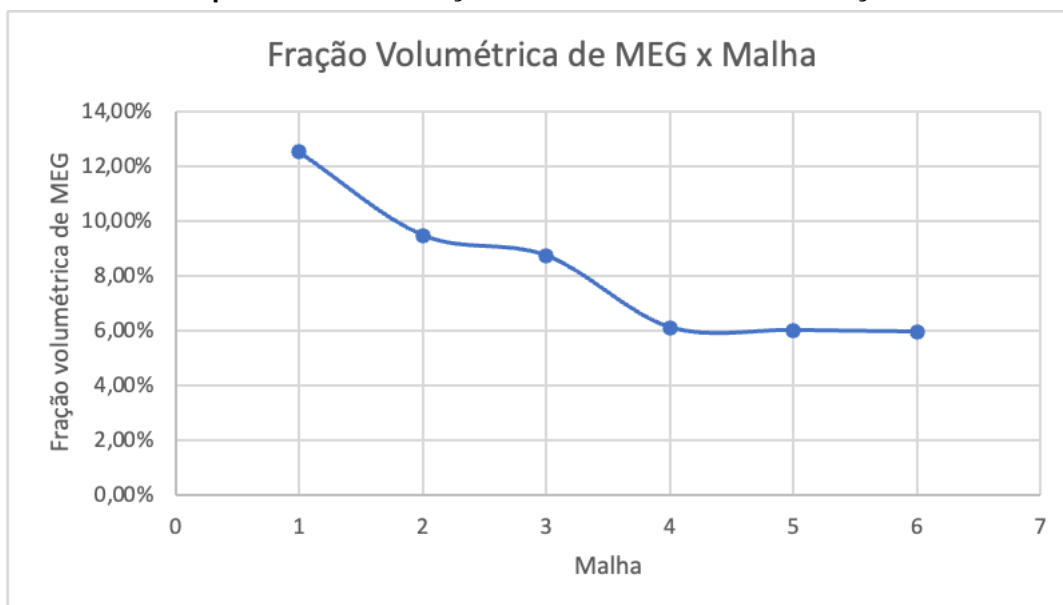


**Fonte: Autoria própria.**

Para todas as malhas rodadas a configuração da simulação foi a mesma, no qual existe um período de injeção de MEG e após um tempo de descanso deste dentro da geometria. Em todos os testes, foram consideradas a entrada de 100% de MEG na geometria que estava preenchida por água, o tempo de injeção foi de 34,2s e o tempo total de simulação foi de 318s. As concentrações foram medidas no ponto previamente descrito após decorrido o tempo total de simulação.

Como pode ser visualizado na Tabela 2 a malha mais grossa (Malha 1) apresenta uma diferença elevada, 6,56%, com relação à concentração de MEG quando comparada à malha mais refinada (Malha 6). No entanto, é possível observar que conforme se aumenta o número de elementos tal diferença tende a diminuir, sendo a diferença de 3,53% para a Malha 2 e de 2,78% para a Malha 3, sendo possível observar tal comportamento também no gráfico representado na Figura 19 com o comportamento da curva.

**Figura 19 - Gráfico representativo da fração volumétrica de MEG em função da malha utilizada**



**Fonte: Autoria própria.**

Ao se chegar nas Malhas 4, 5 e 6 é possível observar no gráfico que a curva apresenta um comportamento de reta, e analisando os valores da tabela é possível perceber que a diferença é pequena, sendo de 0,16% da Malha 4 para a malha mais refinada (Malha 6), enquanto a Malha 5 apresenta uma diferença de 0,05%. Dessa forma é possível concluir que para o melhor custo-benefício a Malha 4 é tida como a malha ótima, visto que aponta uma precisão similar às malhas refinadas (Malha 5 e 6) e com um custo computacional menos elevado, devido ao menor número de elementos.

### 4.3 Fechamento do capítulo

No presente capítulo, foi apresentada a modelagem matemática e numérica para solução do problema proposto. Na seção de modelagem matemática, foram apresentadas as equações governantes do problema. Já na modelagem numérica, foi possível entender melhor como o programa utilizado resolve essas equações iterativamente, além de serem apresentadas as principais condições de contorno e a malha numérica utilizadas.

Uma vez validado com os dados experimentais, espera-se que a solução numérica venha a complementar, de forma geral, o entendimento do problema, uma

vez que permite acessar a concentração de MEG ao longo do tempo em todo o domínio de solução, o que é muito difícil de se realizar experimentalmente. O modelo numérico pode, também, fornecer informações muito úteis sobre o comportamento de variáveis relevantes para o problema e que são de difícil medição experimental, como energia cinética turbulenta, tensões de cisalhamento etc.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas a grade de testes utilizada, os resultados experimentais e numéricos obtidos, bem como uma comparação entre eles. A partir da comparação estabelecida, são feitas análises do escoamento dos casos simulados, além de análises paramétricas destes.

### 5.1 Grade de testes e pontos de análises

A Tabela 3 apresenta novamente a grade de testes realizados para o seguinte trabalho. Os pontos experimentais testados objetivam a criação de uma comparação com o modelo numérico que será apresentado posteriormente. A escolha desses pontos se deu através da possibilidade de análise das diferentes vazões, além de se poder estudar diferentes concentrações de MEG, sendo os valores escolhidos de vazões e concentrações replicados nos outros pontos de injeção.

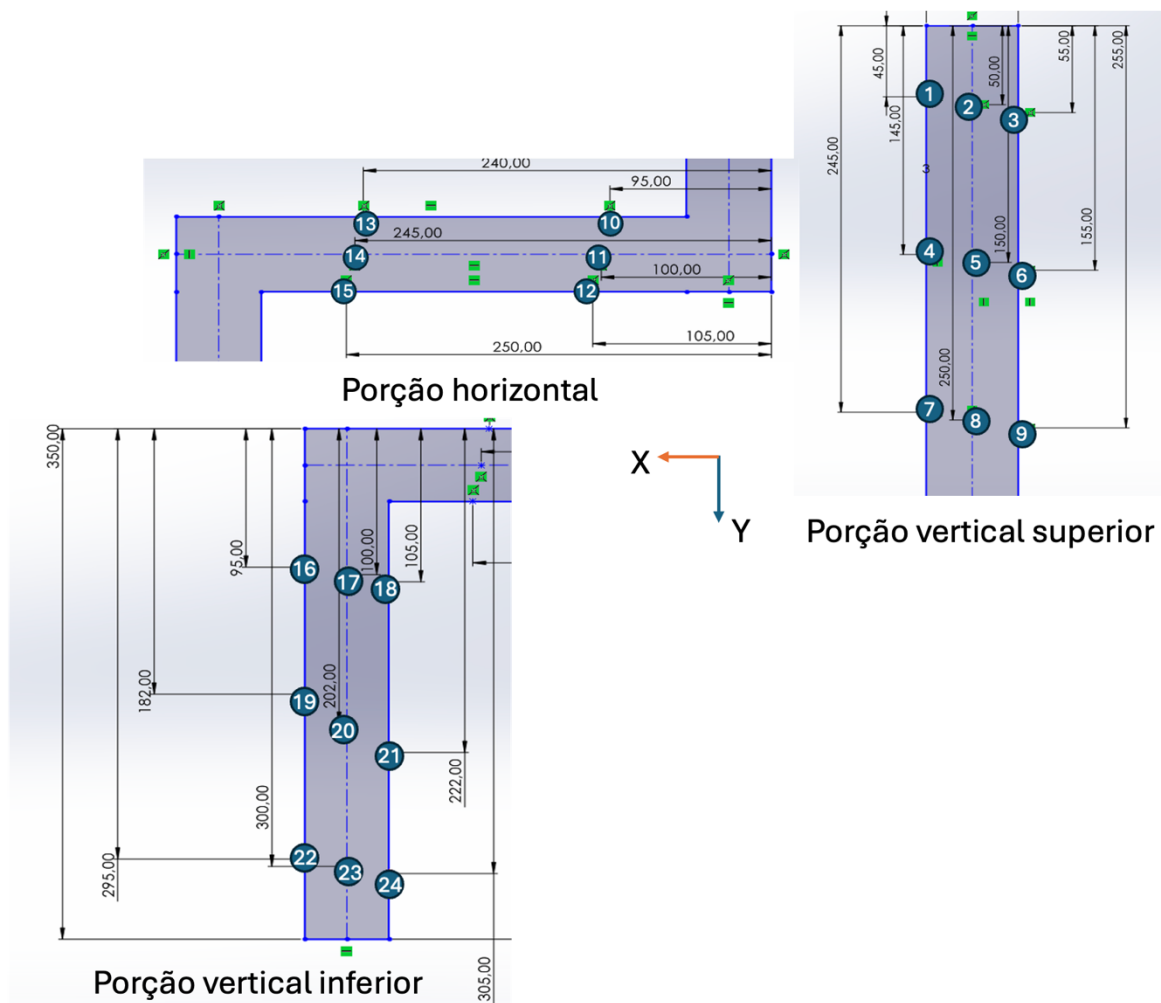
**Tabela 3 - Grade de testes experimentais e numéricos**

Ponto	Vazão [ml/min]	Diâmetro de Injeção [mm]	Concentração de injeção [%v/v]	Local de Injeção
1	100	3	100	A
2	36	3	70	A
3	18,25	3	70	A
4	100	3	100	B
5	36	3	70	B
6	18,25	3	70	B
7	100	3	100	C
8	36	3	70	C
9	18,25	3	70	C

Fonte: Autoria própria.

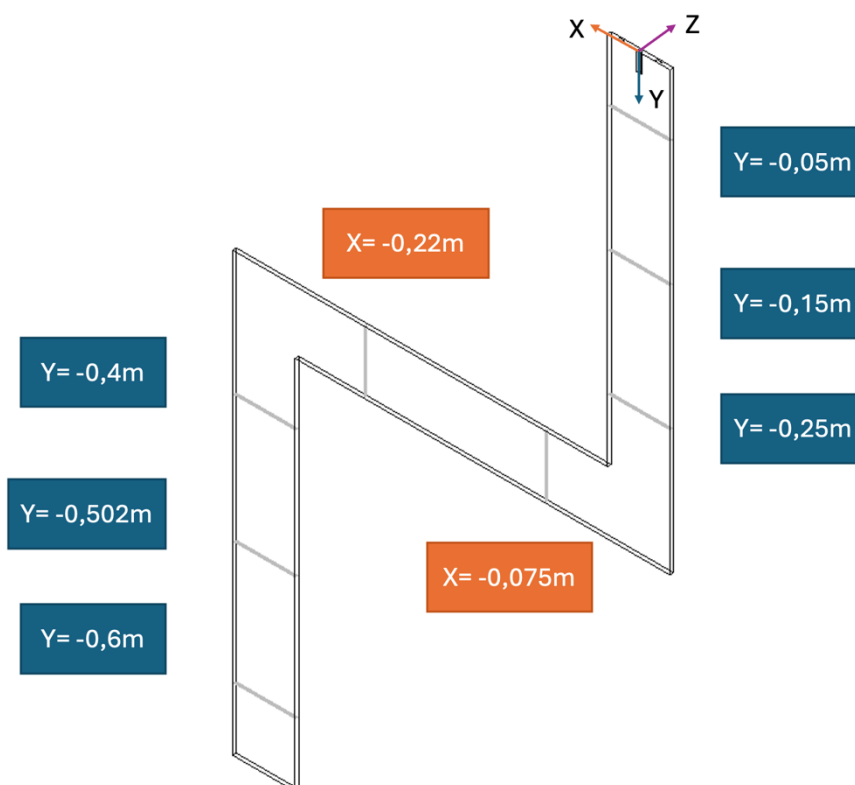
Para análise dos resultados experimentais foram retiradas amostras de 24 pontos ao longo da estrutura, sendo 3 pontos em 8 planos definidos, para a análise dos resultados numéricos os valores foram retirados nos mesmos pontos e planos, cuja localização pode ser observada nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

**Figura 20 - Localização dos pontos de retiradas de amostras para casos experimentais e numéricos**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 21 - Localização dos planos de medição para análises numéricas**



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Comparação dos resultados experimentais e numéricos

Os casos experimentais realizados tiveram como objetivo a obtenção de uma comparação com o modelo numérico apresentado, dessa forma os resultados obtidos serão apresentados juntamente com os resultados numéricos obtidos e o erro percentual, sendo estes visualizados nas Tabelas 4, 5 e 6. Para cada tabela é possível observar a concentração de MEG encontrada em cada um dos 24 pontos anteriormente explicados, sendo retirados os valores para casos experimentais, bem como para os casos numéricos e então foi calculada o erro percentual entre os dois valores. Serão também apresentadas as tabelas com os valores representativos dos planos, onde para os valores experimentais foi utilizada a média dos três pontos que definem cada plano.

Cada tabela foi dividida segundo o local de injeção dos casos apresentados, dessa forma a Tabela 4 apresenta os Casos 1, 2 e 3, cujo local de injeção é dado pela

entrada A; a Tabela 5 apresenta os Casos 4, 5 e 6, cujo local de injeção é a entrada B e, por fim, a Tabela 6 apresenta os Casos 7, 8 e 9, cujo local de injeção é a entrada C.

Analisando a Tabela 4 é possível observar que o maior erro percentual encontrado no Caso 1 se deu para o ponto 24, sendo este de -5618%, os outros valores para o erro percentual flutuaram entre valores positivos e negativos, mantendo uma média de -1198%, com o menor valor encontrado sendo de 108%. Para o Caso 2, o maior valor encontrado foi de -6705% para o ponto 15, no entanto o restante dos valores se manteve mais elevado quando comparado ao Caso 1, com uma média dos erros de -4194%. Já para o Caso 3, o maior valor encontrado foi de -10958%, enquanto a média das diferenças se manteve em -3960%. Dessa forma, analisando os resultados para o local de injeção A, é possível perceber que concentrações menores de MEG, como nos Casos 2 e 3, obtiveram resultados menos precisos entre o modelo numérico e experimental, sendo a vazão de 36ml/min a responsável pelas maiores diferenças.

Partindo para a análise da Tabela 5, nota-se que o Caso 4 mantém a média dos erros percentuais em 2587%, sendo que o maior valor de erro percentual encontrado é de 10000% e aparece nos pontos 1, 3, 4 e 5. Já no Caso 5, o maior desvio encontrado se deu no ponto 16 com -14114%, porém a média para este caso foi menor que no Caso 4, sendo de -1182%. Agora, para o Caso 6, o ponto de maior erro percentual foi de 10000% assim como no caso anterior e aparece nos pontos 1, 2 e 3, obtendo uma média de desvio de -874%. Para o local de injeção B, o comportamento dos erros percentuais se apresenta diferente, apresentando o maior erro percentual médio para a maior vazão, enquanto o menor erro percentual médio ocorre na menor vazão.

Por fim, analisando os resultados obtidos pela Tabela 6 para o local de injeção C, o Caso 7 apresentou uma média de erro percentual de 2140%, com o maior valor sendo -25717% encontrado no ponto 14, apresentando nesse caso as únicas ocorrências de erro de 0%, ocorrendo nos pontos 2 e 7. Para o Caso 8, a média do erro percentual foi de -1261%, com o maior valor sendo -52598% no ponto 14 também. Enfim, para o Caso 9, o maior valor encontrado foi mais uma vez no ponto 15 sendo de -59479%, onde a média de erro percentual foi de -3635%. Dessa forma é possível observar que para a injeção ocorrendo na entrada C, o maior erro percentual médio

ocorreu na menor vazão, enquanto o menor erro percentual médio se deu na vazão intermediária.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam os valores para a concentração de MEG nos planos de medição para os casos experimental, numérico e o erro percentual entre eles. A Tabela 7 apresenta os resultados dos Casos 1, 2 e 3, enquanto a Tabela 8 apresenta os resultados para os Casos 4, 5 e 6 e por fim a Tabela 9 apresenta os resultados para os Casos 7, 8 e 9.

Na Tabela 7 é possível observar que para o Caso 1 o maior valor encontrado foi de -2737% no plano 8, sendo a média do desvio de -1316%. Para o Caso 2, o maior valor encontrado foi de -6068% também no plano 8, e o desvio médio foi de -4414%. Já para o Caso 3, a maior diferença encontrada foi de -6549% no plano 4, sendo o desvio médio de -4060%. Conforme observado anteriormente, as menores concentrações de MEG, Casos 2 e 3, apresentaram maiores erros e média de erro quando comparadas ao Caso 1 no qual é injetado MEG puro.

Já na Tabela 8 vê-se que para o Caso 4 a maior diferença é de 10000% no plano 1, com erro percentual médio de 2581%. Enquanto para o Caso 5 o maior erro é dado no plano 1 com 9970%, com seu erro percentual médio sendo -1049%. O Caso 6 também apresenta um erro de 10000% para o plano 1. Para os casos apresentados com a injeção sendo dada pela entrada B, é possível observar uma mudança no comportamento comparando com os casos anteriores, onde o menor erro médio foi encontrado na menor vazão de injeção e o maior erro médio aconteceu na maior vazão.

Por fim, para a Tabela 9, no Caso 7 repete-se o erro de 10000% para os planos 1 e 2, enquanto possui um erro percentual médio de 4676%, apresentando o menor valor entre todos os casos, de -54% ocorrendo no plano 6. Já para o Caso 8, o maior erro percentual é de 9999% no plano 8 com um desvio médio de 7,02%. E para o Caso 9 a maior diferença é de 14,14% encontrada no plano 1 novamente, sendo o erro percentual médio de 258%. Com isso, é possível constatar que o comportamento muda mais uma vez quando comparando aos casos anteriores, para a injeção pela entrada C o menor erro percentual médio é dada para a vazão intermediária, sendo que a maior vazão apresenta o maior erro percentual médio.

Os valores de erros obtidos demonstraram que o modelo numérico não se adequa ao apresentado pelo experimental. Contudo, apesar de grandes erros terem

vido encontrados, foi possível observar, que o modelo tende a ter erros mais elevados quando a análise é feita analisando ponto a ponto, possuindo um comportamento médio nos planos melhor, com valores de erros menores para essa análise.

A diferença apresentada pelos valores de erros elevados obtidos poderá ser mais bem observada na seção seguinte onde é realizado um comparativo entre o caso numérico e experimental através de imagens tiradas em determinados instantes de tempo.

**Tabela 4 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 1, 2 e 3 para local de injeção A**

Ponto	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	13,20%	12,54%	502%	14,90%	20,03%	-3445%	16,10%	18,02%	-1195%
2	13,20%	12,81%	299%	16,10%	20,06%	-2460%	16,10%	18,19%	-1301%
3	13,20%	13,06%	108%	15,50%	20,20%	-3035%	16,70%	18,37%	-1001%
4	13,70%	14,63%	-678%	16,40%	19,85%	-2105%	16,50%	20,63%	-2502%
5	14,10%	15,75%	-1170%	16,30%	21,31%	-3076%	17,00%	20,77%	-2215%
6	14,10%	15,93%	-1297%	15,60%	21,44%	-3741%	17,10%	20,90%	-2220%
7	14,10%	14,32%	-155%	16,20%	18,95%	-1699%	17,60%	21,74%	-2349%
8	14,70%	17,04%	-1592%	16,40%	22,07%	-3459%	16,90%	23,03%	-3630%
9	14,40%	17,11%	-1881%	16,50%	22,14%	-3420%	17,90%	23,21%	-2967%
10	11,90%	8,44%	2908%	14,30%	13,60%	489%	8,00%	16,77%	-10958%
11	14,80%	17,78%	-2012%	16,90%	23,48%	-3893%	17,60%	26,17%	-4871%
12	28,40%	29,10%	-248%	20,90%	34,20%	-6363%	21,60%	31,47%	-4571%
13	10,20%	7,22%	2919%	10,10%	12,99%	-2863%	16,10%	15,72%	239%
14	16,10%	17,80%	-1054%	16,30%	23,67%	-4522%	17,50%	26,31%	-5032%
15	19,90%	25,90%	-3013%	19,30%	32,24%	-6705%	21,00%	30,93%	-4727%
16	15,50%	18,44%	-1894%	17,50%	25,87%	-4785%	18,30%	27,49%	-5020%
17	15,40%	18,51%	-2017%	16,40%	25,94%	-5819%	18,20%	27,53%	-5129%
18	15,10%	19,90%	-3181%	18,00%	26,74%	-4854%	18,80%	28,31%	-5057%
19	16,90%	19,15%	-1333%	18,10%	27,28%	-5071%	19,00%	28,14%	-4810%
20	16,80%	19,48%	-1594%	17,40%	27,71%	-5928%	18,80%	28,32%	-5063%
21	14,90%	20,04%	-3447%	18,00%	28,21%	-5670%	18,90%	28,51%	-5086%
22	18,50%	21,62%	-1684%	18,80%	30,33%	-6135%	19,30%	29,36%	-5211%
23	18,80%	21,84%	-1616%	19,10%	30,52%	-5981%	19,60%	29,47%	-5037%
24	14,10%	22,02%	-5618%	19,10%	30,79%	-6122%	19,30%	29,61%	-5340%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 5 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 4, 5 e 6 para local de injeção B**

Ponto	Caso 4			Caso 5			Caso 6		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	0,20%	0,00%	10000%	0,10%	0,00%	10000%	0,30%	0,00%	10000%
2	0,10%	0,00%	10000%	0,10%	0,00%	10000%	0,30%	0,00%	10000%
3	0,20%	0,00%	10000%	0,10%	0,00%	10000%	0,30%	0,00%	10000%
4	1,00%	0,00%	10000%	5,50%	0,16%	9713%	4,00%	0,14%	9641%
5	1,10%	0,00%	10000%	7,70%	0,34%	9556%	5,10%	0,44%	9129%
6	1,10%	0,00%	10000%	6,40%	0,79%	8763%	4,20%	0,98%	7673%
7	4,10%	4,83%	-1787%	16,50%	20,98%	-2714%	13,80%	13,68%	84%
8	4,80%	5,42%	-1292%	16,20%	21,46%	-3250%	13,20%	14,38%	-892%
9	4,80%	5,85%	-2193%	17,20%	21,92%	-2744%	14,30%	15,05%	-522%
10	7,20%	0,38%	9475%	14,30%	16,50%	-1542%	15,30%	13,65%	1082%
11	15,50%	24,72%	-5946%	22,70%	31,40%	-3830%	22,20%	29,92%	-3480%
12	81,30%	56,25%	3081%	44,00%	50,86%	-1558%	46,90%	59,41%	-2667%
13	2,20%	0,22%	9022%	14,30%	14,39%	-61%	17,60%	10,46%	4055%
14	14,50%	24,67%	-7013%	21,50%	31,37%	-4591%	21,70%	29,79%	-3727%
15	46,80%	49,94%	-670%	29,70%	49,56%	-6688%	30,10%	57,36%	-9055%
16	30,10%	30,94%	-280%	15,70%	37,86%	-14114%	24,80%	40,91%	-6496%
17	30,20%	31,12%	-305%	25,90%	37,98%	-4664%	25,80%	41,12%	-5937%
18	30,20%	32,60%	-795%	26,10%	39,22%	-5027%	25,50%	42,61%	-6709%
19	34,40%	32,85%	449%	27,10%	40,12%	-4805%	27,50%	44,05%	-6020%
20	35,40%	33,54%	525%	27,30%	40,76%	-4932%	25,90%	44,95%	-7355%
21	35,30%	34,28%	288%	27,20%	41,63%	-5307%	27,70%	46,00%	-6605%
22	36,00%	37,45%	-402%	27,80%	47,34%	-7028%	28,40%	50,53%	-7791%
23	38,30%	37,79%	133%	28,70%	47,58%	-6579%	29,00%	51,01%	-7591%
24	37,20%	37,96%	-205%	28,30%	48,03%	-6973%	29,00%	51,61%	-7797%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 6 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos pontos de medição dos casos 7, 8 e 9 para local de injeção C**

Ponto	Caso 7			Caso 8			Caso 9		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	0,10%	0,00%	10000%	0,20%	0,00%	10000%	0,20%	0,00%	10000%
2	0,00%	0,00%	0%	0,10%	0,00%	9989%	0,10%	0,00%	10000%
3	0,30%	0,00%	10000%	0,10%	0,00%	10000%	0,20%	0,00%	10000%
4	0,10%	0,00%	10000%	0,20%	0,00%	9998%	0,20%	0,00%	10000%
5	0,10%	0,00%	10000%	0,20%	0,00%	9997%	0,10%	0,00%	10000%
6	0,20%	0,00%	10000%	0,40%	0,00%	9998%	0,10%	0,00%	9973%
7	0,00%	0,00%	0%	0,20%	0,14%	2834%	0,10%	0,23%	-12570%
8	0,40%	0,00%	10000%	0,20%	0,21%	-746%	0,20%	0,32%	-5873%
9	0,10%	0,00%	9981%	0,30%	0,31%	-458%	0,20%	0,43%	-11744%
10	0,10%	0,00%	10000%	0,30%	0,00%	9991%	0,10%	0,00%	10000%
11	6,10%	10,37%	-7003%	12,30%	25,11%	-10416%	6,00%	28,54%	-37573%
12	87,50%	95,51%	-916%	62,60%	94,64%	-5119%	69,10%	95,48%	-3818%
13	0,40%	0,00%	10000%	0,60%	0,00%	9958%	0,20%	0,00%	9999%
14	3,00%	10,72%	-25717%	4,00%	25,04%	-52598%	4,10%	28,49%	-59479%
15	51,10%	76,77%	-5023%	41,90%	87,40%	-10860%	42,50%	86,83%	-10430%
16	37,20%	37,27%	-20%	35,30%	48,50%	-3739%	36,20%	48,06%	-3277%
17	37,20%	37,49%	-79%	36,50%	48,74%	-3353%	37,60%	48,28%	-2842%
18	37,40%	39,66%	-603%	35,20%	51,84%	-4728%	37,40%	50,29%	-3448%
19	44,80%	40,93%	863%	40,40%	52,25%	-2933%	42,10%	51,13%	-2145%
20	47,30%	42,16%	1088%	42,90%	53,43%	-2456%	43,10%	52,06%	-2078%
21	46,50%	43,57%	629%	41,60%	54,75%	-3161%	42,90%	53,06%	-2369%
22	47,50%	49,56%	-434%	44,50%	61,67%	-3859%	45,00%	58,13%	-2917%
23	47,70%	50,95%	-681%	44,80%	62,42%	-3933%	44,10%	58,66%	-3301%
24	47,90%	51,32%	-715%	42,90%	62,95%	-4673%	44,50%	59,40%	-3348%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 7 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 1, 2 e 3 para local de injeção A**

Plano	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	13,20%	12,81%	299%	15,50%	20,07%	-2947%	16,30%	18,19%	-1162%
2	13,97%	15,76%	-1284%	16,10%	21,32%	-3243%	16,87%	20,77%	-2312%
3	14,40%	17,05%	-1843%	16,37%	22,07%	-3486%	17,47%	23,03%	-3188%
4	18,37%	18,00%	201%	17,37%	23,74%	-3668%	15,73%	26,04%	-6549%
5	15,40%	17,64%	-1454%	15,23%	23,41%	-5370%	18,20%	25,80%	-4175%
6	15,33%	18,49%	-2059%	17,30%	25,94%	-4993%	18,43%	27,51%	-4927%
7	16,20%	19,46%	-2013%	17,83%	27,71%	-5541%	18,90%	28,30%	-4971%
8	17,13%	21,82%	-2737%	19,00%	30,53%	-6068%	19,40%	29,48%	-5194%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 8 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 4, 5 e 6 para local de injeção B**

Plano	Caso 4			Caso 5			Caso 6		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	0,17%	0,00%	10000%	0,10%	0,00%	9970%	0,30%	0,00%	10000%
2	1,07%	0,00%	9994%	6,53%	0,34%	9478%	4,43%	0,44%	8998%
3	4,57%	5,42%	-1872%	16,63%	21,46%	-2904%	13,77%	14,38%	-443%
4	34,67%	23,23%	3299%	27,00%	31,92%	-1821%	28,13%	30,78%	-940%
5	21,17%	22,69%	-721%	21,83%	31,56%	-4454%	23,13%	30,35%	-3120%
6	30,17%	31,10%	-309%	22,57%	37,98%	-6830%	25,37%	41,12%	-6209%
7	35,03%	33,55%	423%	27,20%	40,76%	-4987%	27,03%	44,95%	-6628%
8	37,17%	37,80%	-169%	28,27%	47,61%	-6844%	28,80%	51,00%	-7708%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 9 - Resultados experimentais, numéricos e diferença percentual dos planos de medição dos casos 7, 8 e 9 para local de injeção C**

Plano	Caso 7			Caso 8			Caso 9		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
1	0,13%	0,00%	10000%	0,13%	0,00%	9999%	0,17%	0,00%	10000%
2	0,13%	0,00%	10000%	0,27%	0,00%	9960%	0,13%	0,00%	9962%
3	0,17%	0,00%	9988%	0,23%	0,22%	783%	0,17%	0,32%	-9049%
4	31,23%	15,39%	5073%	25,07%	27,49%	-967%	25,07%	28,90%	-1528%
5	18,17%	14,18%	2197%	15,50%	26,40%	-7035%	15,60%	27,80%	-7819%
6	37,27%	37,47%	-54%	35,67%	48,75%	-3668%	37,07%	48,26%	-3019%
7	46,20%	42,17%	873%	41,63%	53,46%	-2840%	42,70%	52,08%	-2196%
8	47,70%	50,91%	-672%	44,07%	62,42%	-4164%	44,53%	58,67%	-3175%

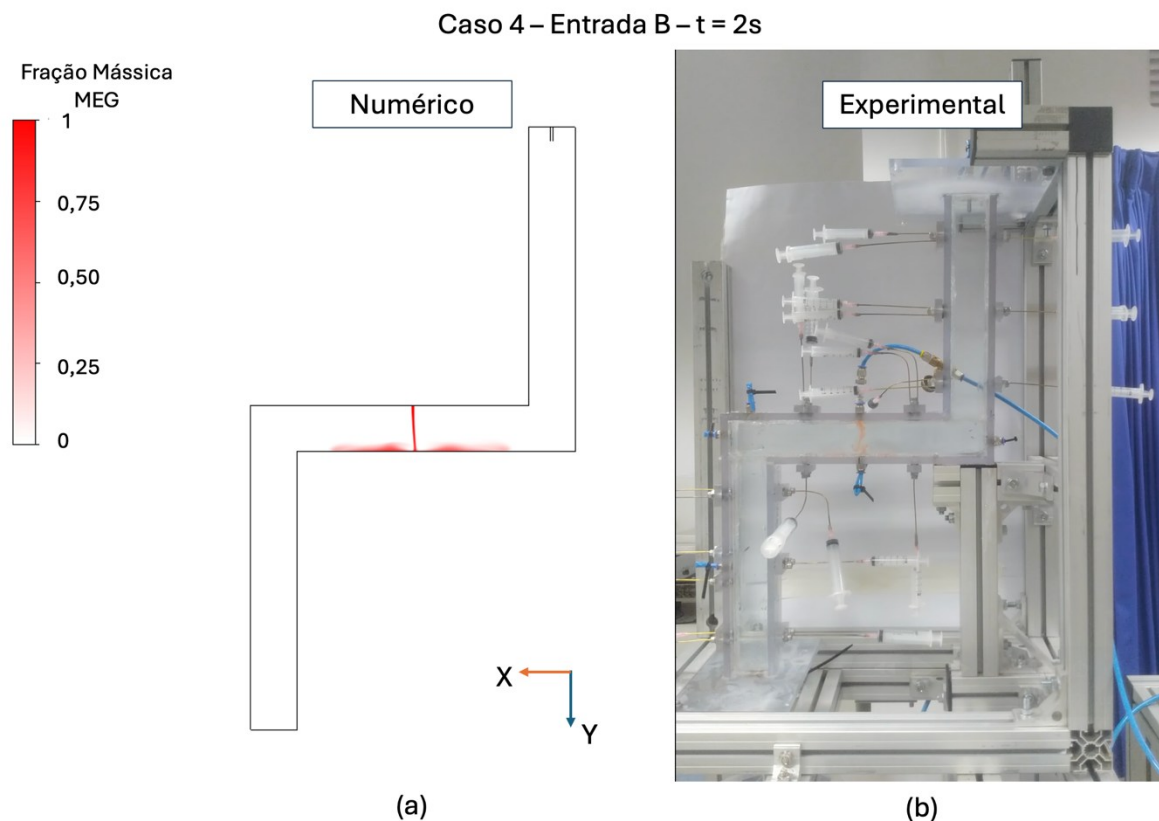
**Fonte: Autoria própria.**

### 5.3 Comparativo entre escoamento experimental e numérico

Como forma de observar de maneira comparativa o escoamento ao longo do tempo tanto para o caso experimental como para o caso numérico, foram extraídas figuras para um caso em específico nas duas situações. O caso escolhido foi o caso 4, cuja injeção de fluido se dá pela entrada B, sendo este injetado à 100mL/min e sendo composto 100% por MEG.

A Figura 22 apresenta o caso 4 no tempo de 2s para o estudo (a) numérico e (b) experimental. Para o caso numérico é possível observar que o MEG que entra começa a se concentrar na região mais inferior da porção horizontal, se estendendo para ambas as direções. Já para o caso experimental, é possível notar um jato mais claro, devido ao corante utilizado, e que também começa a se espalhar mais para os lados da porção inferior da região horizontal da geometria. Contudo, a diferença entre ambos os casos é que no caso experimental é possível notar um comportamento mais difuso do fluido que está sendo injetado, visto que esse se espalha melhor na água que se encontra preenchendo a geometria.

**Figura 22 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 2s**

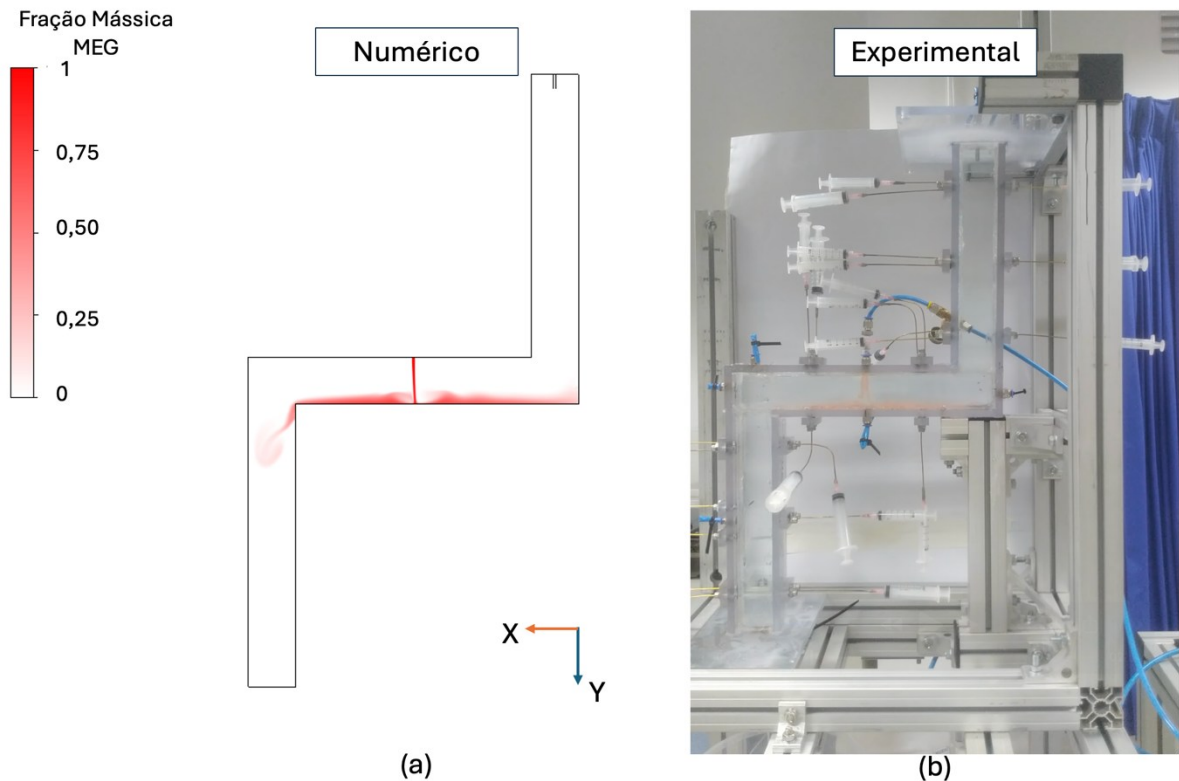


**Fonte: Autoria própria.**

Agora para o tempo de 5s a Figura 23 apresenta um comparativo entre os casos (a) numérico e (b) experimental. Para esse tempo, é possível observar que o caso numérico o MEG se encontra mais aglomerado na porção inferior da região horizontal da geometria, tendo se espalhado por toda essa parte e começando a descer pela região vertical inferior. Já para o caso experimental, evidencia-se que a difusividade do MEG injetado é maior que no caso numérico, dessa forma o MEG não se encontra tão concentrado como em (a). Porém nota-se que o fluido injetado já toma a porção inferior da região horizontal, começando a se elevar em direção à porção vertical superior da geometria, tal qual no caso numérico, e se direciona à porção vertical inferior desta.

**Figura 23 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 5s**

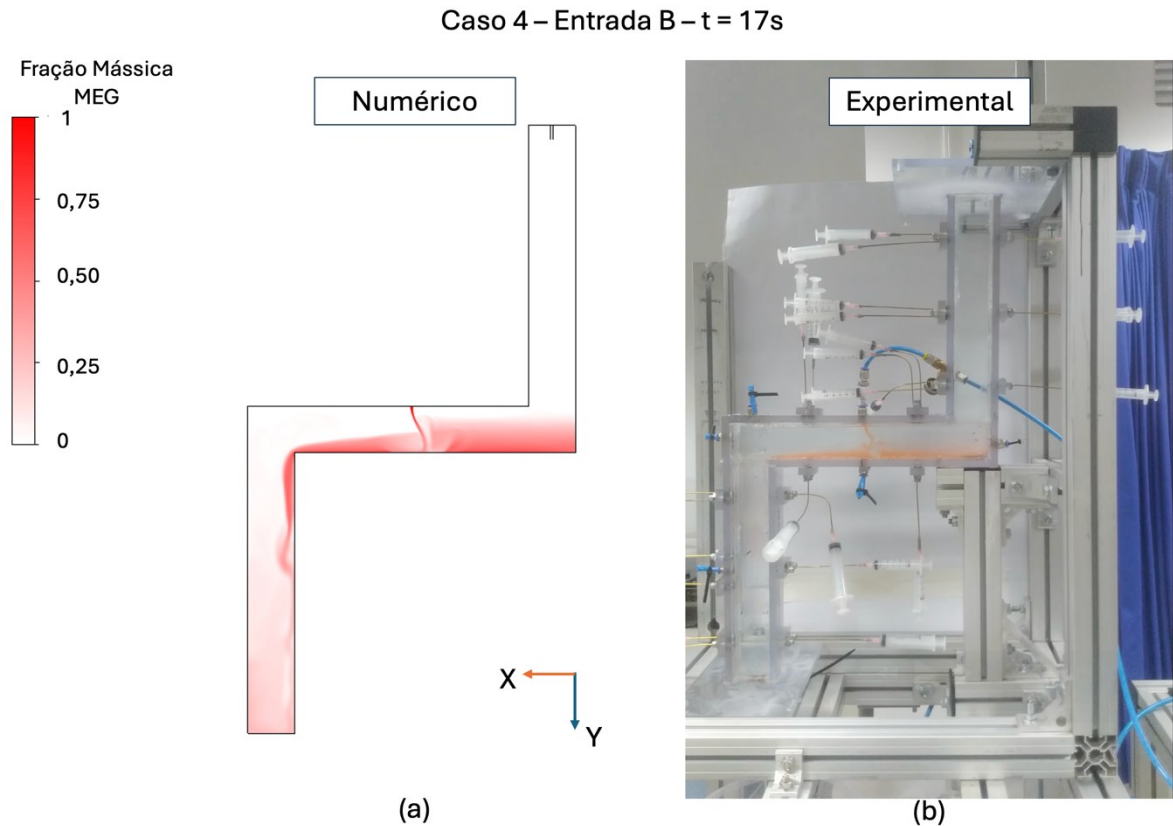
Caso 4 – Entrada B –  $t = 5s$



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 24 é possível visualizar um comparativo da concentração de MEG para os casos 4 nos testes (a) numérico e (b) experimental no tempo de 17s. Para esse instante observa-se para o caso numérico que o MEG se encontra em sua maioria concentrado na porção horizontal da geometria, porém começa a se concentrar também no fundo da região vertical inferior da geometria. Agora, ao se examinar o caso experimental, é possível observar novamente a difusividade do MEG no fluido quiescente, todavia nota-se que este começa a se concentrar na região horizontal, conforme se observa no caso numérico difundindo-se ao longo da espessura, e também começa a descer a região vertical inferior, no entanto, sem ainda se concentrar no fundo desta.

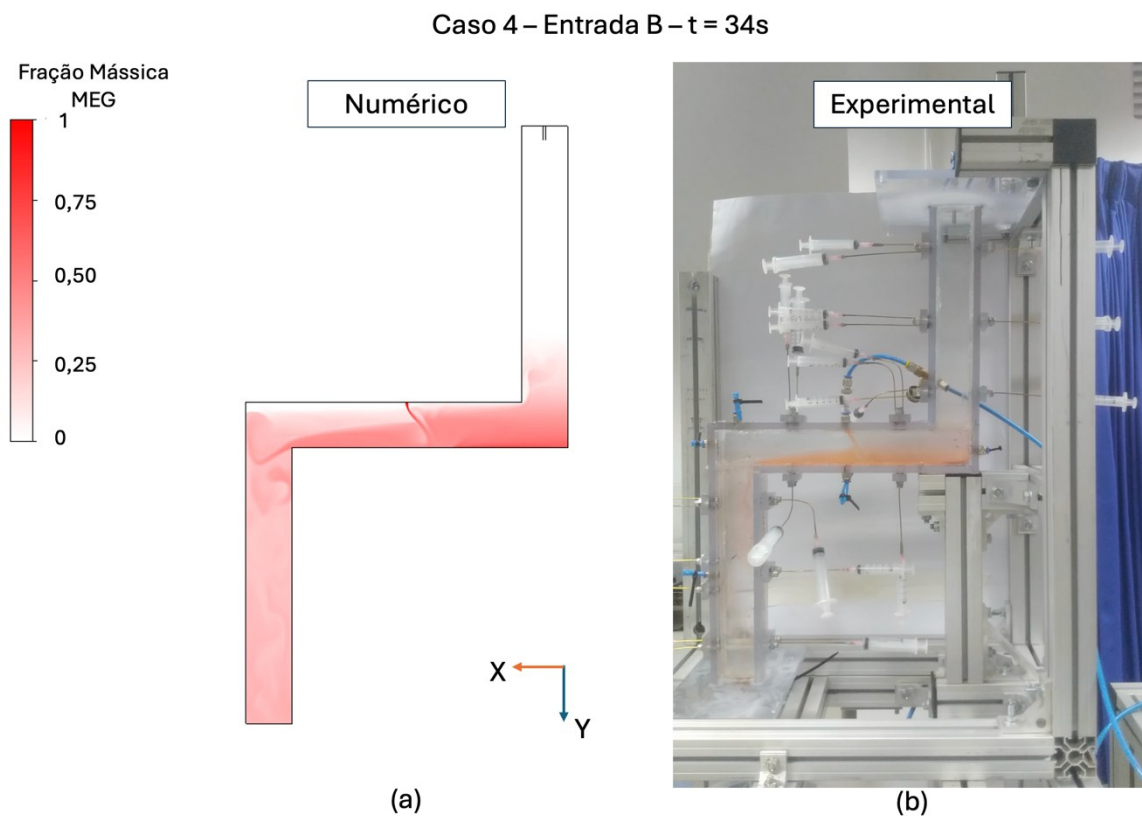
**Figura 24 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 17s**



**Fonte: Autoria própria.**

Já na Figura 25, é possível observar o comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental para o caso 4 em 34s, o instante final da injeção de MEG. Em (a) é possível notar que o MEG injetado toma a região vertical inferior e horizontal por completo e já começa a subir pela região vertical superior. Contudo, não é possível notá-lo tão facilmente no caso experimental, onde devido à maior difusividade do MEG na água presente na geometria e ao corante utilizado, o MEG se encontra mais presente na região horizontal, onde é possível observar um gradiente de concentração em direção à região vertical inferior, o que também se observa no caso numérico. Também se nota que o fluido, apesar de mais difundido consegue preencher a porção inferior da geometria e começa a se direcionar à região superior desta.

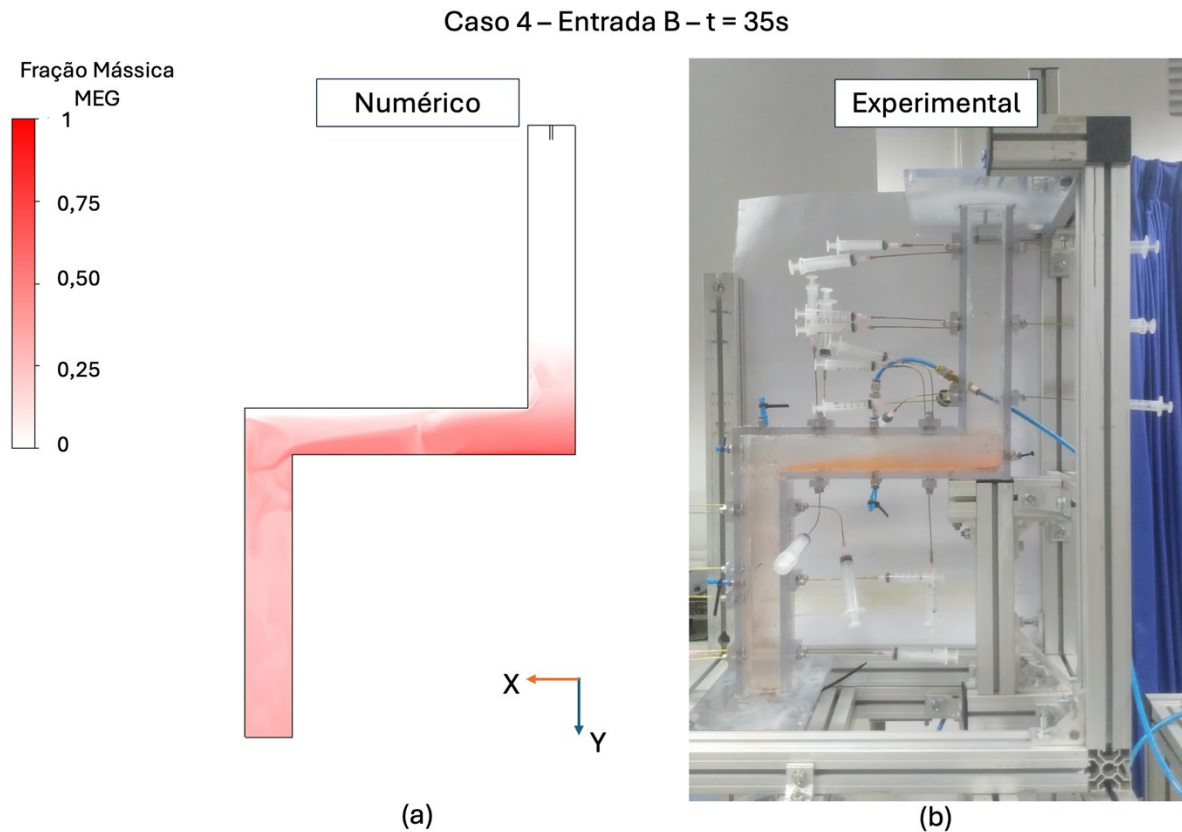
**Figura 25 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 34s**



Fonte: Autoria própria.

Para a Figura 26, é possível visualizar um comparativo da concentração de MEG para os casos (a) numérico e (b) experimental no instante 35s. Esse é o instante após a parada da injeção de MEG na geometria, o que pode ser observado em ambos os casos em que o fluxo que entrava já não se encontra mais presente. Em (a) nota-se que o MEG ainda continua a se movimentar em direção a parte inferior da geometria e ainda existe um gradiente de concentração ao longo da região horizontal da geometria. Esse comportamento também pode ser observado em (b), onde o gradiente de concentrações de MEG se mostra bastante presente na região horizontal e também parece se digirir para a porção inferior da geometria.

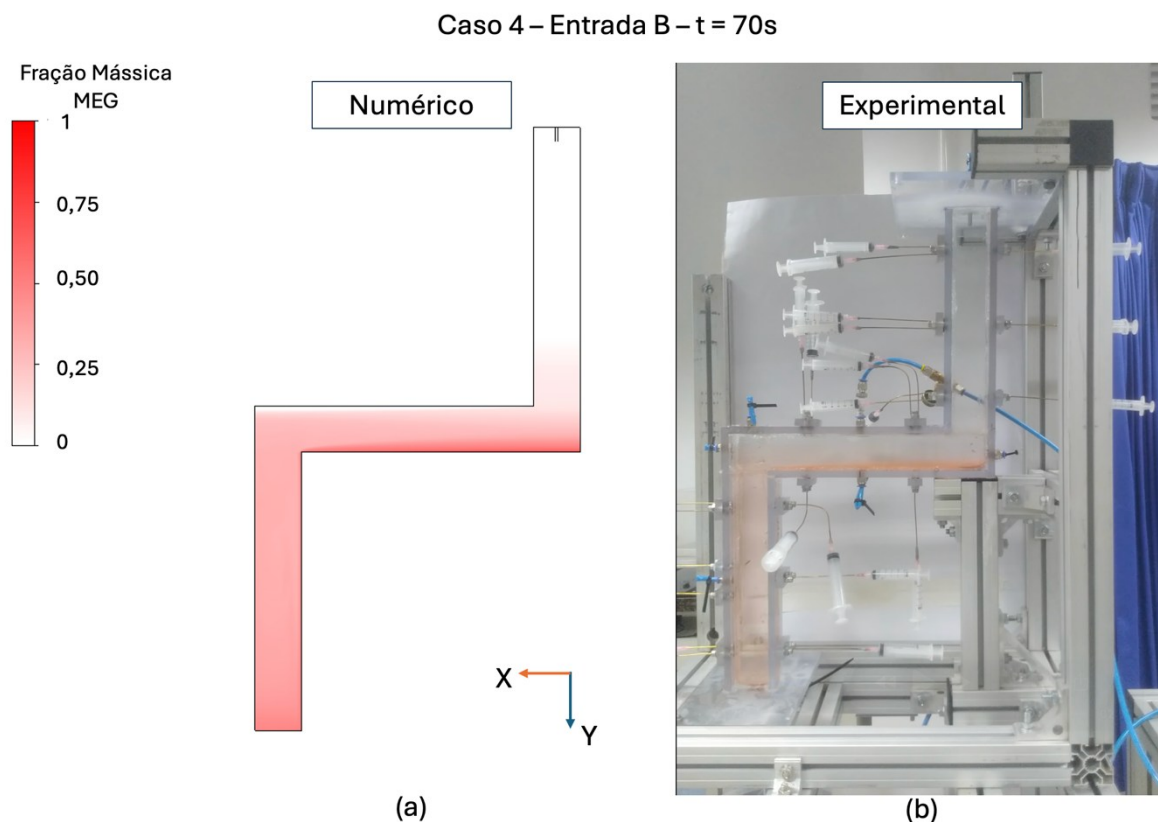
**Figura 26 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 35s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 apresenta o caso 4 para os estudos (a) numérico e (b) experimental no instante 70s. Nesse instante é possível visualizar que o fluido que anteriormente se apresentava em movimento agora tende a se organizar melhor ao longo de toda a espessura tanto da região horizontal, como da região vertical inferior – tal comportamento pode ser observado tanto no caso numérico como no experimental. Em ambos os casos é possível notar que ainda existe uma pequena camada de maior concentração na porção inferior da região horizontal e esta vai se difundindo ao longo da espessura, sendo que isso ocorre de maneira mais significativa no caso experimental.

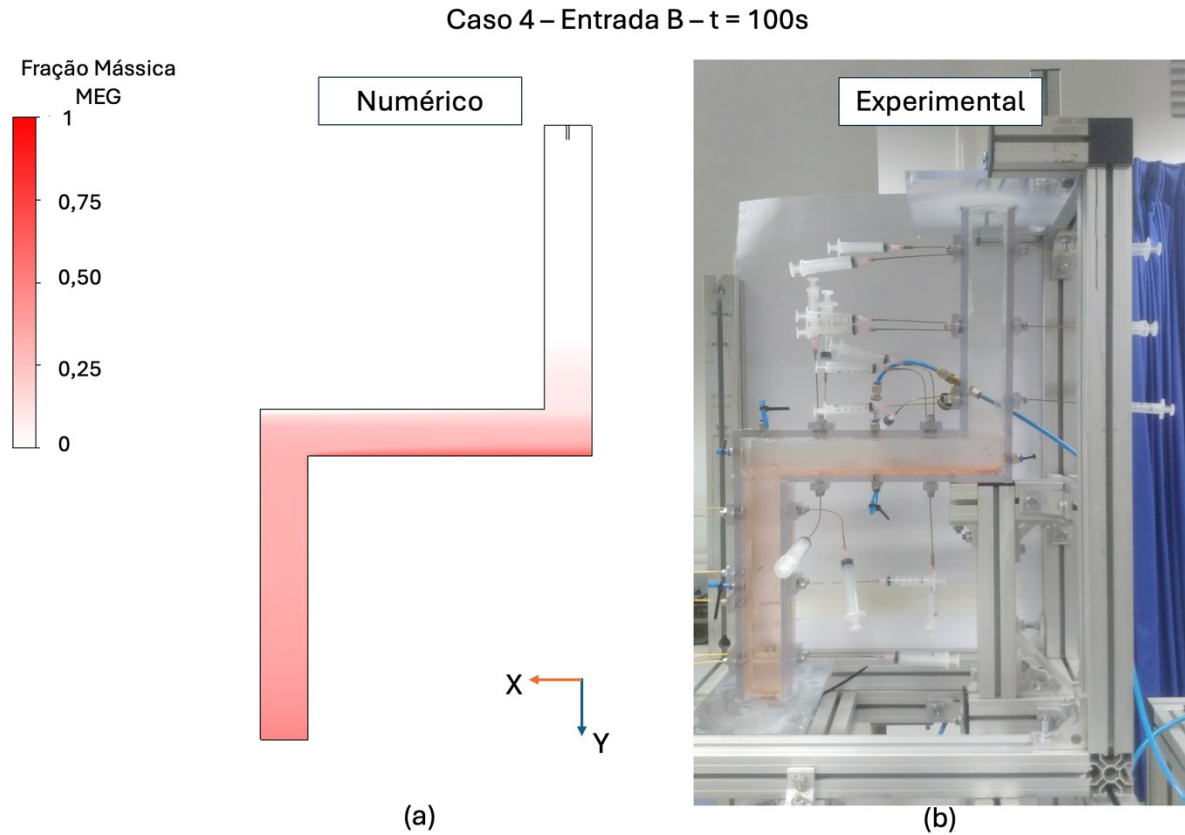
**Figura 27 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 70s**



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 28, é possível observar um comparativo de MEG para os casos (a) experimental e (b) numérico no instante 100s. Esse instante se mostra muito similar ao instante anterior, tendo comportamentos parecidos para ambos os casos. Para o caso numérico nota-se que a região vertical inferior se encontra uniformemente preenchida com MEG, enquanto na região horizontal existe uma maior concentração na porção inferior desta além de estar presente uma região na parte superior onde não se encontra MEG, sendo possível também observar uma leve difusão de MEG subindo pelo braço superior vertical. As regiões vertical inferior e horizontal do caso experimental apresentam o mesmo comportamento do caso numérico, porém não é possível visualizar de maneira clara a presença de MEG subindo pela região vertical superior para esse caso.

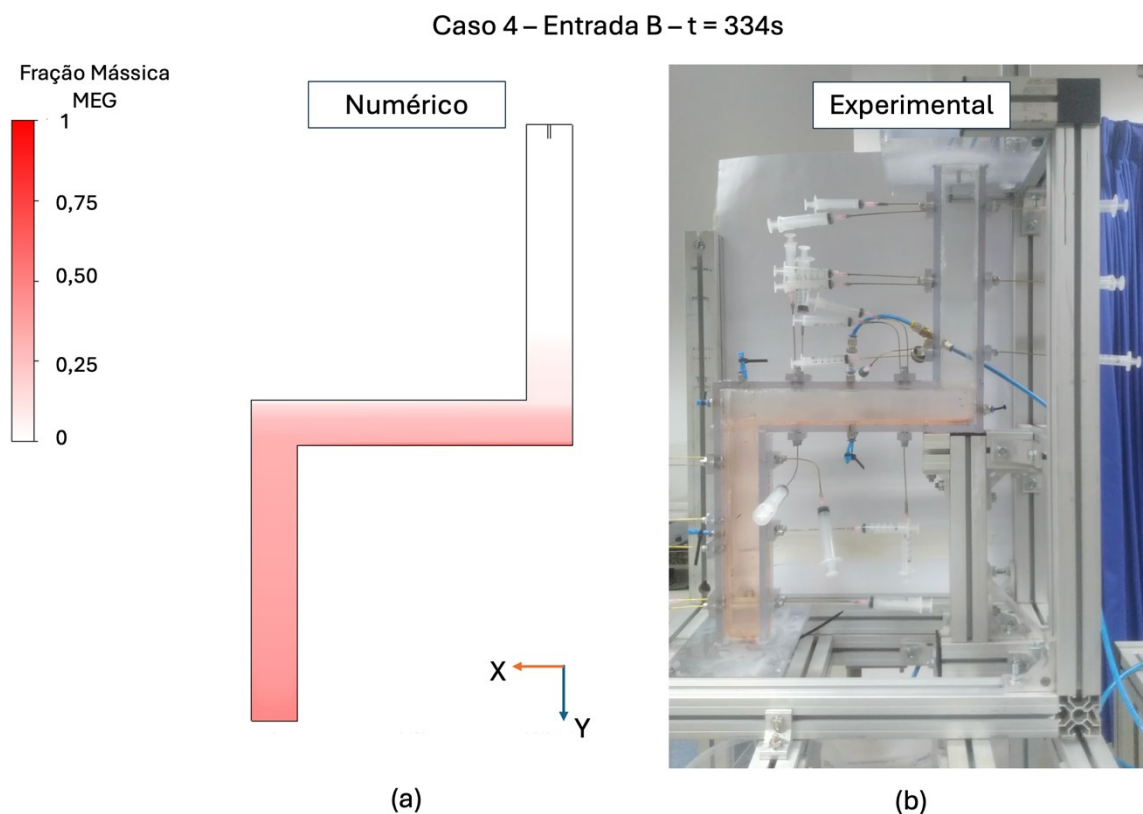
**Figura 28 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 100s**



Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 29 apresenta um comparativo da concentração de MEG para os casos (a) numérico e (b) experimental no instante 334s. No instante final para ambos os testes é possível notar como o tempo de descanso permitiu que a mistura se uniformizasse pela geometria. Para ambos os casos é possível notar que a região vertical inferior possui MEG difundido uniformemente por sua espessura, enquanto a região horizontal, apesar de estar melhor difundida ainda apresenta uma camada de concentração maior de MEG na porção inferior, e, por fim, também se observa uma leve concentração de MEG presente na parte inferior da porção vertical superior.

**Figura 29 - Comparativo da concentração de MEG para os estudos (a) numérico e (b) experimental do caso 4 em 334s**



Fonte: Autoria própria.

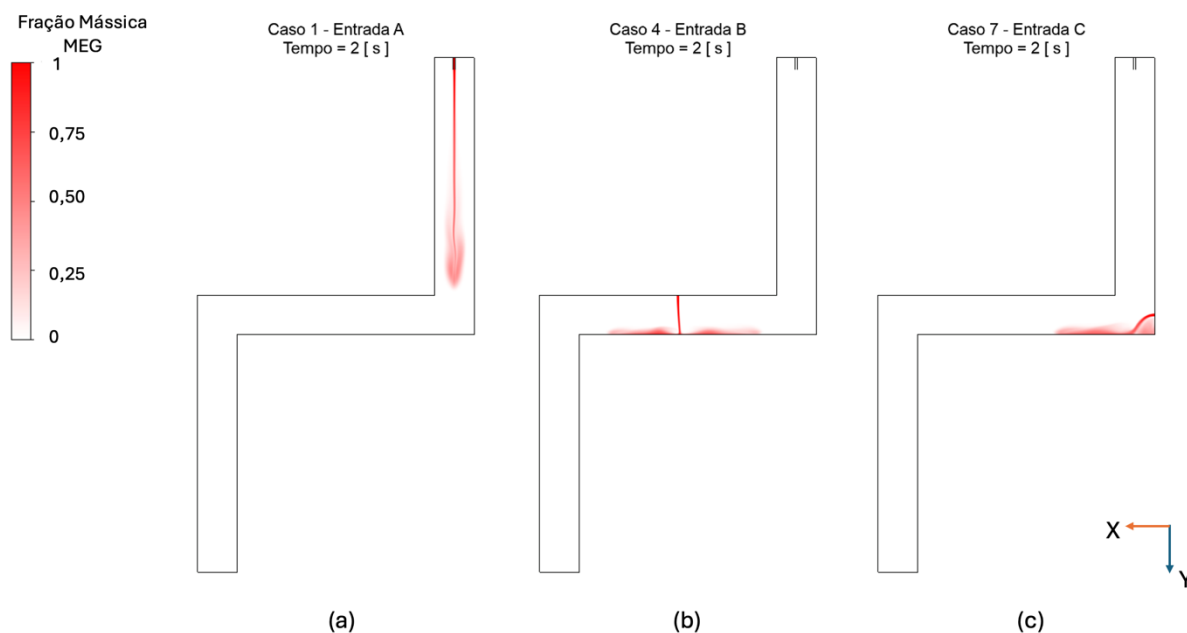
Conforme observado na seção anterior o erro elevado apresentado para os casos pode ser exemplificado nesse comparativo através do comportamento difusivo incorreto do modelo numérico comparado ao modelo experimental. Através das imagens ao longo do tempo é possível observar como o caso experimental se apresenta mais difusivo ao longo do tempo e mais bem espalhado no instante final ao longo da geometria do que no caso numérico. Essa diferença de comportamentos pode ser explicada pela utilização incorreta da correlação para o coeficiente de difusividade para diluições infinitas, visto que, como observada nas imagens do caso experimental, não se trata de uma diluição infinita, visto que são encontradas concentrações elevadas de MEG em determinados pontos da geometria.

#### 5.4 Análise do escoamento numérico

Agora, como forma de melhor entender o processo de mistura ao longo do tempo para os casos simulados foram extraídas figuras para cada caso nas diferentes entradas, vazões e concentrações em determinados instantes de tempo. O objetivo dessa análise é um comparativo entre os casos com mesma vazão e concentração, porém entre as diferentes opções de entradas, dessa forma os casos foram agrupados conforme as características de injeção, sendo vazão de 100ml/min e concentração de 100% de MEG: casos 1, 4 e 7; vazão de 36ml/min e concentração de 70% de MEG: casos 2, 5 e 8, e vazão de 18,25ml/min e concentração de 70% de MEG: casos 3, 6, 9.

A Figura 30 apresenta as concentrações de MEG para os casos 1 (a), 4 (b) e 7 (c) no instante 2s. Nessa figura é possível observar como a posição da injeção influencia em como o MEG adentra a geometria, enquanto em (a) é possível observar que o fluido injetado ocupa quase toda a porção superior da geometria, em (b) o fluido injetado ocupa um espaço menor da porção horizontal comparativamente, enquanto em (c) o MEG injetado ocupa uma porção relativamente menor do mesmo espaço. Também é possível observar que devido a porção vertical (a) parece difundir melhor o jato de injeção.

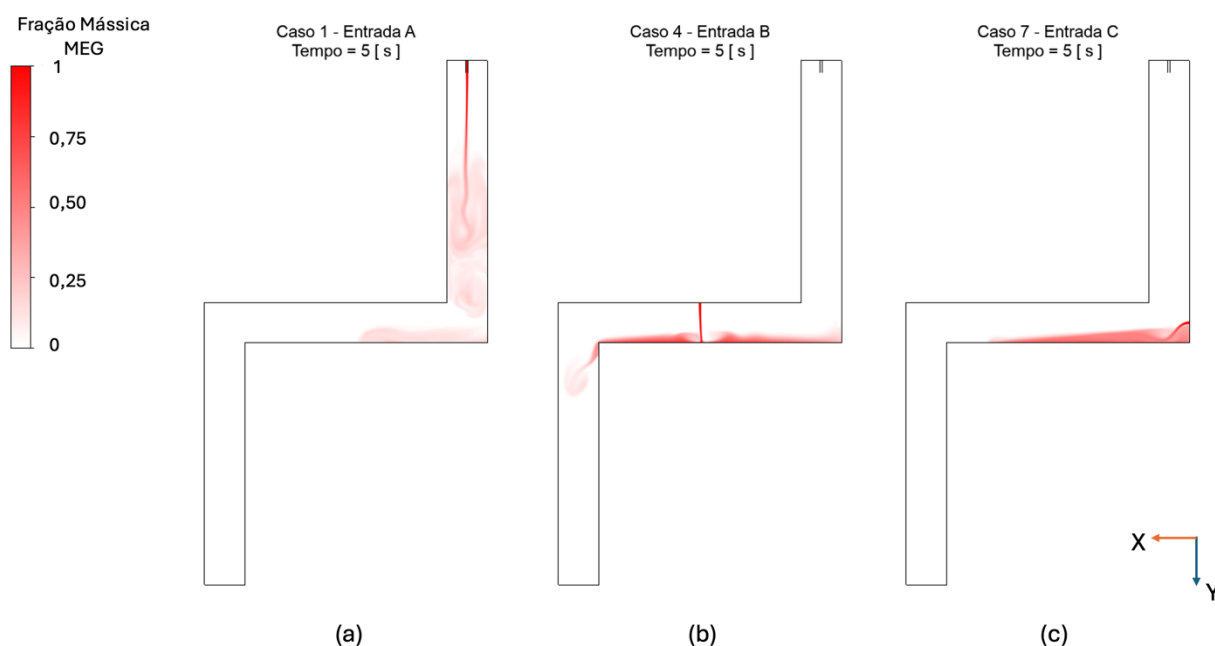
**Figura 30 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 2s**



Fonte: Autoria própria.

Seguindo para 5s a Figura 31 apresenta os casos 1 (a), 4 (b) e 7 (c) neste instante de tempo. Em 5s é possível analisar que para (a) o fluido injetado começa a ocupar a porção horizontal da geometria, enquanto (b) ocupando toda a porção horizontal passa a descender na porção vertical inferior, e em (c) o jato está ocupando a porção horizontal quase por inteira. É possível observar que apesar de ocupar mais significativamente as regiões subsequentes (a) apresenta uma menor concentração de MEG tanto na região superior como na porção de fluido que adentra a região horizontal, visto que o MEG se difunde ao longo de toda a largura da geometria. Em (b) o MEG tende a se concentrar na parte inferior da região horizontal, porém se espalhando ao logo desta e o porção de fluido que adentra a região inferior possui uma concentração menor que aquela encontrada na região horizontal. Já em (c) a concentração de MEG encontrada é maior, porém confinada numa porção menor da região horizontal.

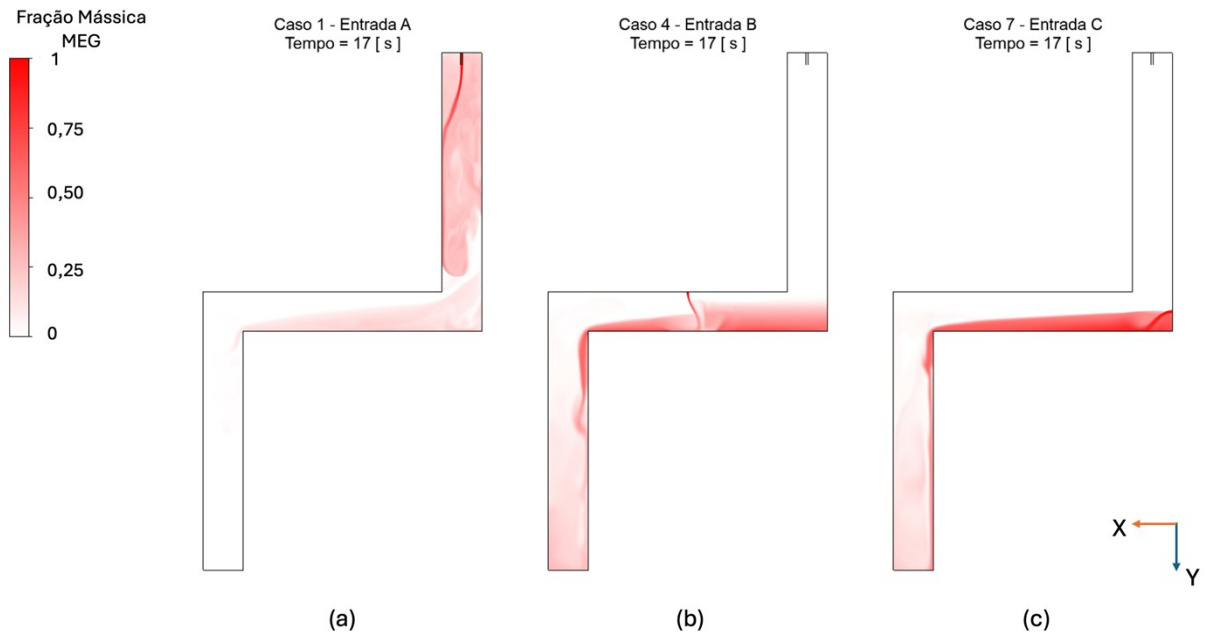
**Figura 31 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 5s**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 32 apresenta a concentração de MEG para os casos 1, 4, e 7 no instante 17s. Neste instante é possível observar em (a) que a região superior da geometria se encontra completamente tomada por MEG numa concentração superior a região horizontal em toda sua largura, também se observa que o MEG na região horizontal da geometria forma um gradiente ao longo do seu comprimento, onde uma pequena porção passa a adentrar a região inferior da geometria. Em (b) é possível notar que a metade inferior da região horizontal e a região inferior da geometria se encontram preenchidas pelo MEG, também é possível observar que na região inferior o MEG tende a se concentrar também na região mais inferior da geometria, tal comportamento é observado devido a maior densidade do MEG quando comparado à água que preenche o canal, no entanto a maior concentração entre essas duas regiões está concentrada na metade inferior da região horizontal, ainda que na metade superior é possível encontrar uma menor concentração de MEG difundida. Já em (c) todo o MEG da região horizontal encontra-se concentrado na metade inferior desta, enquanto uma porção mais difundida e menor concentrada encontra-se na região inferior da geometria, principalmente na parte mais inferior desta região.

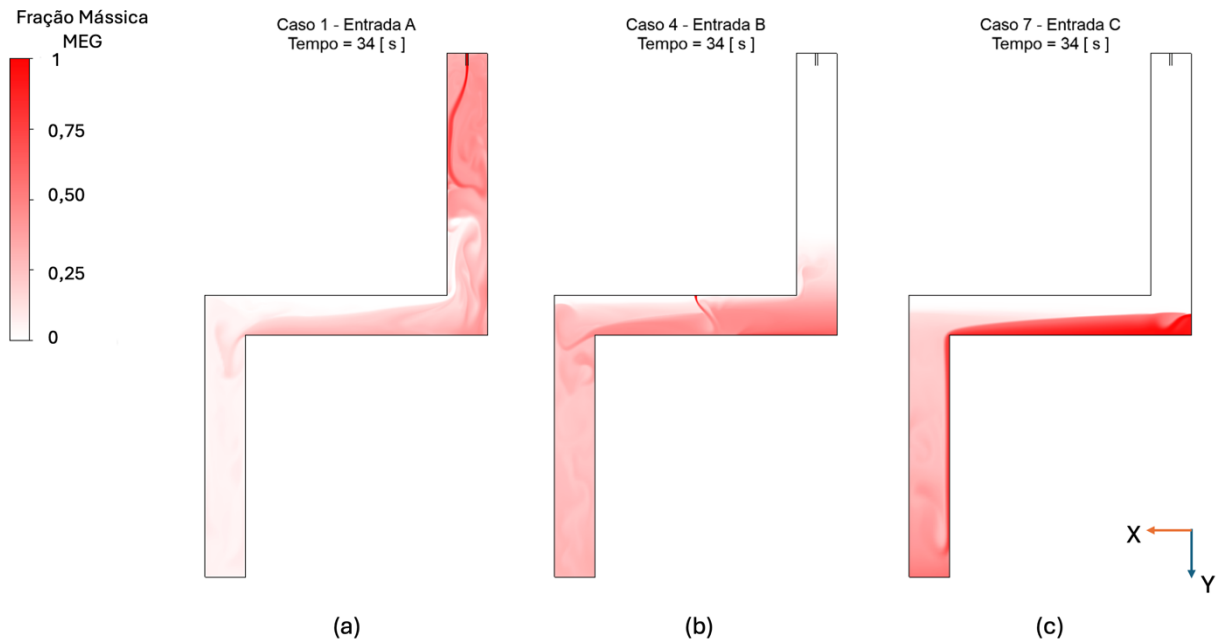
**Figura 32 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 17s**



**Fonte: Autoria própria.**

Em 34 segundos, a Figura 33 apresenta os casos 1, 4 e 7 com as devidas concentrações de MEG. Este é o último instante de injeção de MEG para esses casos, ainda é possível visualizar a injeção ocorrendo em (a), (b) e (c). Em (a) é possível notar que a geometria inteira se encontra preenchida de MEG em diferentes concentrações, com a região superior sendo aquela na qual ocorrem as maiores concentrações, esse comportamento pode ser descrito pela localização dos drenos na parede superior. Também é possível observar que o gradiente de concentração continua a ocupar todo o comprimento da região horizontal. Em (b) as regiões horizontal e inferior se encontram preenchidas de MEG também em diferentes concentrações e uma porção mais difundida de MEG começa a subir pela região superior, enquanto na região horizontal existe um gradiente de concentração, a qual tende a reduzir conforme alcança a região inferior da geometria. Já em (c) o MEG injetado escorre pela parte inferior da região horizontal e escorre pela parede direita em direção a região inferior, nesse caso também é possível observar um gradiente que se assemelha a uma camada limite na qual encontra-se as maiores concentrações de MEG.

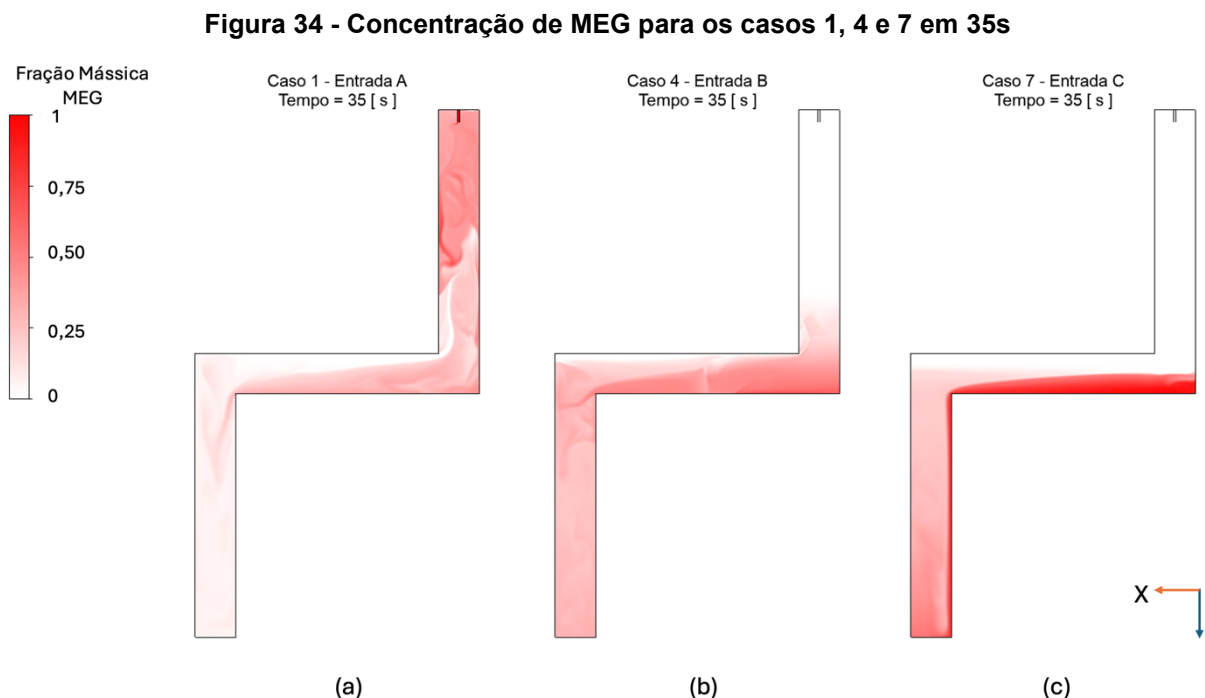
**Figura 33 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 34s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 apresenta a concentração de MEG na geometria para os casos 1, 4 e 7 em 35s. Este instante é o primeiro após a parada da injeção de MEG e para os três casos é possível observar que o MEG injetado ainda está em processo de mistura com a água que preenchia a geometria, movimentando-se. Para o caso 1, em (a) é possível observar que a maior parte do MEG injetado ainda se localiza na região superior da geometria, alcançando concentrações em torno de 40% de MEG, enquanto a região horizontal, ainda com o gradiente alcança valores em torno de 25% e a região inferior, para onde o MEG ainda está de dirigindo, possui concentrações mais próximas dos 5% de MEG. Para o caso 4, em (b), as maiores concentrações estão localizadas na região horizontal que apresenta regiões com até 30%, enquanto a região inferior, para onde o MEG se dirigiu após a injeção, a concentração está em torno de 25%, e a pequena porção na região superior por onde o MEG subiu se difundido encontra-se numa concentração de 10%, porém a maior parte superior da geometria encontra-se apenas com água. Já para o caso 7, em (c), a região inferior apresenta concentrações na faixa de 50% de MEG, porém na parede direita por onde continua a escorrer MEG a concentração é maior chegando à faixa de 75%, já na região horizontal é onde localiza-se o gradiente onde a parte superior aparenta não apresentar MEG enquanto na parte inferior é possível encontrar concentrações

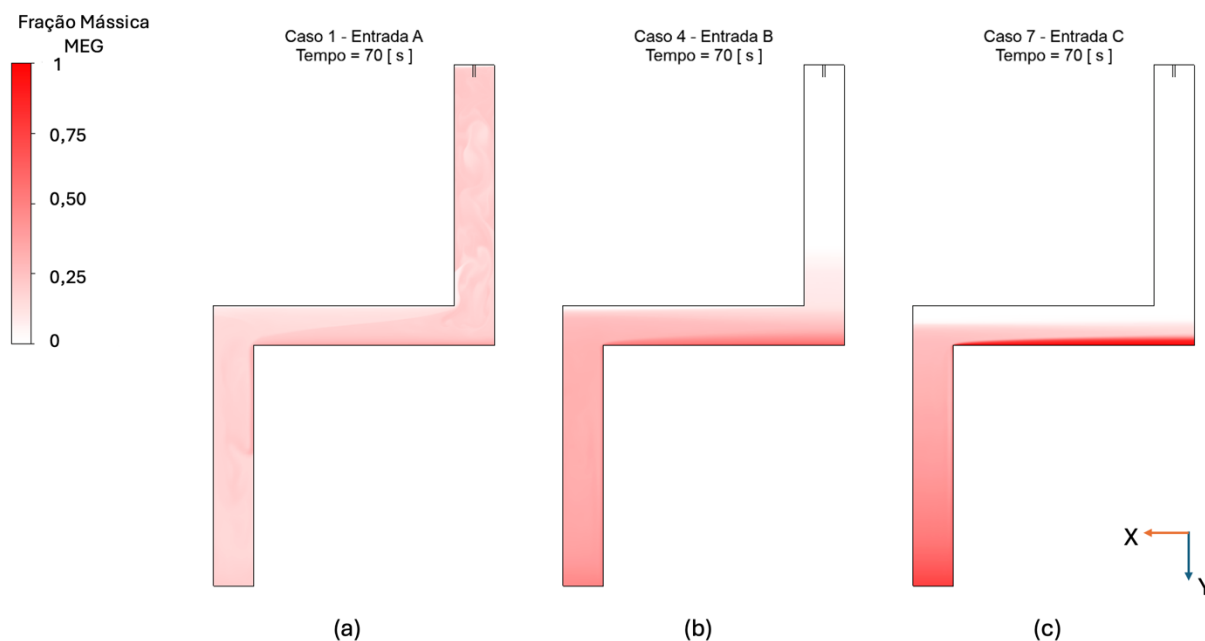
superiores a 80%, porém a região superior da geometria não apresenta MEG nesse instante.



Fonte: Autoria própria.

Em 70s a Figura 35 apresenta as concentrações de MEG para os casos 1, 4 e 7. Em (a) é possível observar que MEG preenche toda a geometria, sendo possível observar que MEG ainda está se dirigindo para a região inferior, isso é possível observar através do gradiente ainda possível de visualizar, porém é possível observar que movimento dos fluidos ainda está ocorrendo devido aos vórtices presentes na região superior. Em (b) é possível notar que a região inferior está preenchida de MEG e a região horizontal também com exceção de uma pequena faixa de água no lado esquerdo na parte superior da região horizontal, também é possível verificar que o MEG se difundiu mais acima na região superior do que em momentos anteriores. Já em (c), o MEG parou de escorrer pela parede direita da região inferior e o MEG que se encontrava na parte inferior da região horizontal começou a se difundir para a parte superior desta, porém sem preencher toda a largura da geometria com MEG nessa região da geometria, com relação a parte superior, está ainda se encontra visivelmente sem concentrações de MEG.

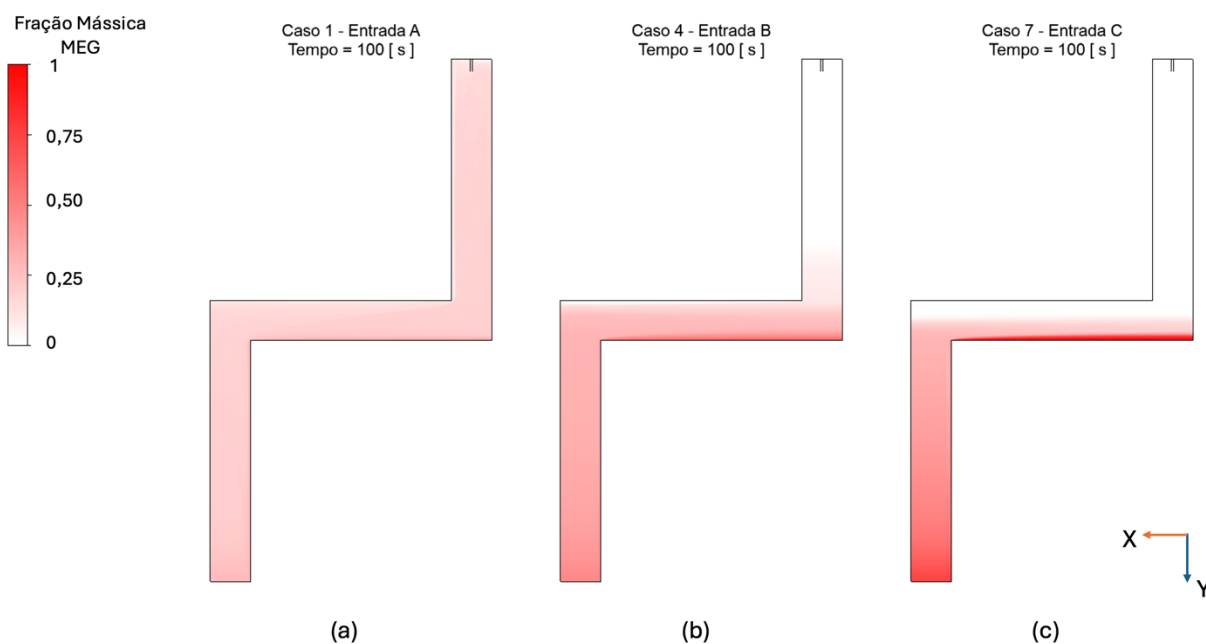
**Figura 35 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 70s**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 36 apresenta as concentrações de MEG para os casos 1, 4 e 7 no instante 100s. Neste momento é possível perceber que em (a), toda a geometria encontra-se preenchida com MEG sem diferenças nas concentrações, alcançando uma média em toda a geometria de aproximadamente 15%, no entanto ainda é possível observar um leve gradiente na porção horizontal. Em (b) é possível observar que o MEG se difundiu melhor ao longo da geometria sendo possível alcançar regiões mais altas parte superior da geometria, porém sem chegar à metade desta. Ainda é possível observar que uma pequena faixa no lado esquerdo da região horizontal encontra-se majoritariamente com água, contudo é possível observar uma boa difusão do MEG, contando com uma média de 30% nas regiões onde está localizado o MEG, a exceção da porção na região superior que possui cerca de 5% de MEG. Já em (c), a camada com maior concentração de MEG se difundiu mais na parte superior da região horizontal da geometria, porém sem alcançar toda a largura preenchida com MEG, já a região inferior está preenchida com MEG, sendo a maior parte deste concentrada na parte inferior alcançando acima de 50% de concentração de MEG.

**Figura 36 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 100s**

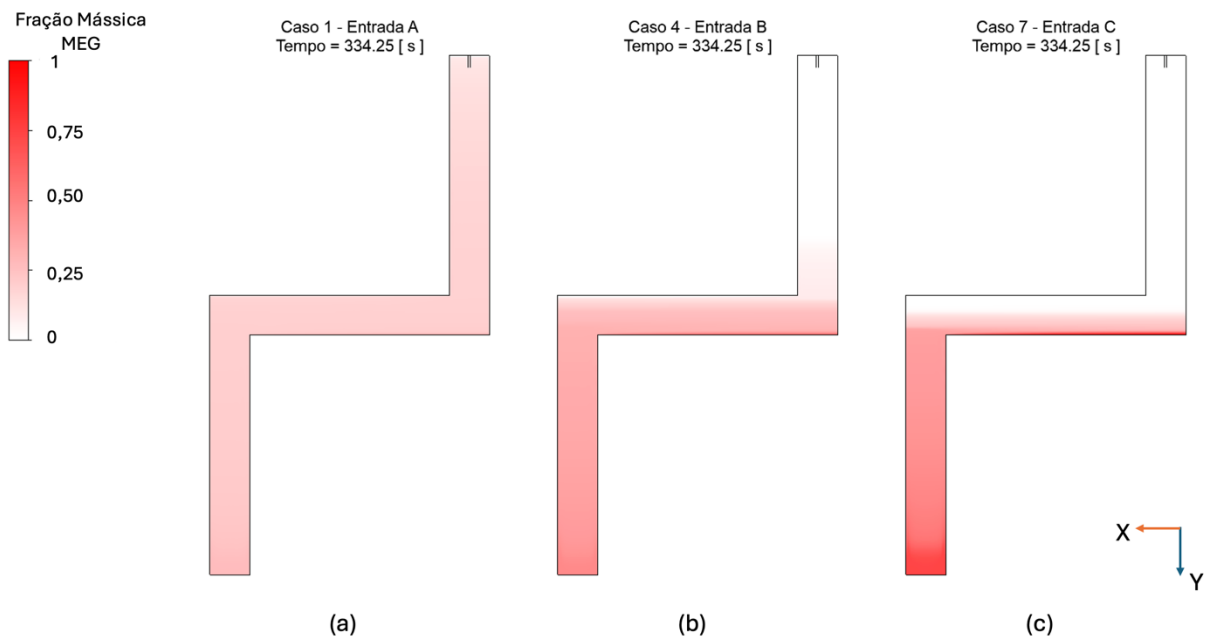


Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 37 mostra a concentração de MEG para os casos 1, 4, e 7 no instante 334,25s. Esta figura apresenta o instante final dos casos simulados, sendo possível observar para todos que o tempo de descanso após a injeção muda o comportamento da mistura enquanto ainda está ocorrendo o processo desta. Analisando as Tabelas 4 e 7 juntamente com a figura é possível observar que para o caso 1, em (a), o MEG se encontra uniformemente espalhado pela geometria, sendo possível notar que não há mais o gradiente de concentrações ao longo da região horizontal, com uma média de concentração perto dos 17%, porém houve maior concentração de MEG na parte inferior da região horizontal e da região inferior, chegando a valores de 30% para o primeiro e cerca de 21% para o último – tal comportamento é observado pela maior densidade do MEG quando comparado com a água. Para o caso 4, em (b), avaliando também as Tabelas 5 e 8 é possível observar que o MEG ocupa a região inferior em sua totalidade tendo uma concentração maior na parte inferior da parte inferior da geometria com uma concentração próxima dos 35%, ao passo que na região horizontal o MEG se concentrou mais na parede inferior chegando a concentrações de cerca de 50%, enquanto na parede superior desta região ainda é possível observar visualizar uma faixa com concentrações de MEG perto de 0%, já na região inferior da parte superior é possível observar concentrações

próximas dos 5%. Agora para o caso 7, em (c), juntamente com as Tabelas 6 e 9, é possível notar que a parte superior da região horizontal, bem como a região superior encontram-se sem MEG, enquanto a parte inferior da região horizontal e inferior apresentam as maiores concentrações de MEG, chegando a concentrações de 85% e 50%, respectivamente. Contudo a porção central e superior da região inferior apresenta maior distribuição tendo uma média de 40% de MEG em seu entorno.

**Figura 37 - Concentração de MEG para os casos 1, 4 e 7 em 334,25s**

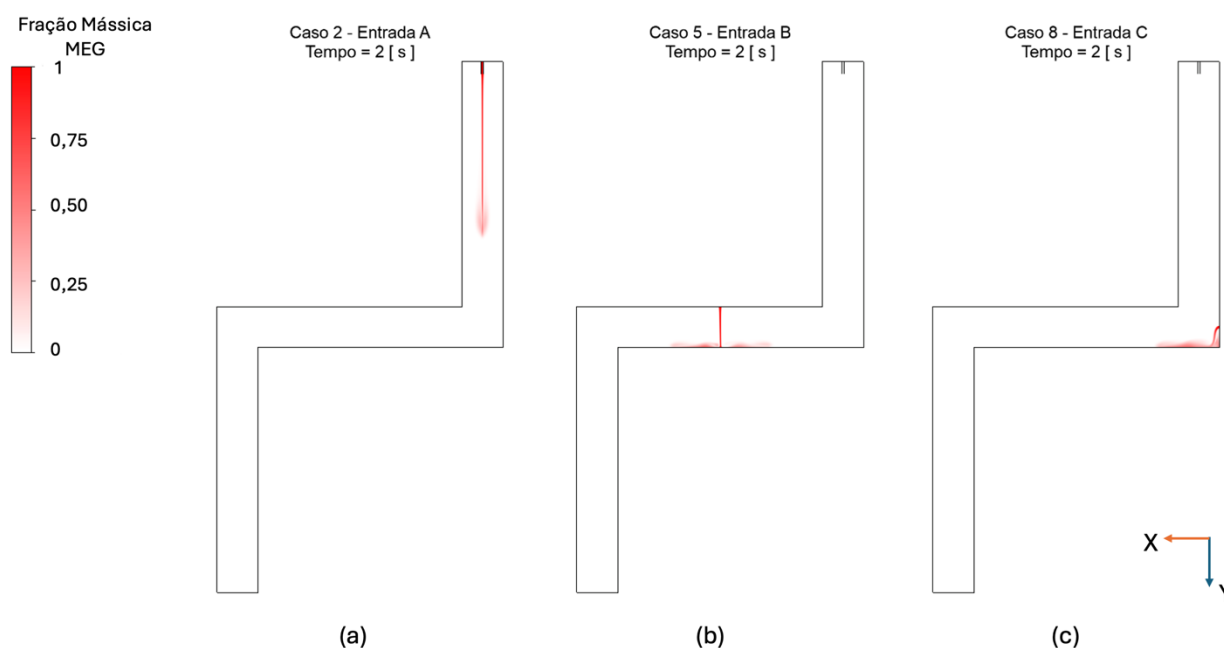


**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 38 apresenta a concentração de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c) no instante 2s, para esses casos, diferente dos casos vistos anteriormente, o que entra na geometria não é MEG puro, mas sim uma mistura de 70% MEG e 30% água. Novamente é possível observar a influência dos locais de injeção na forma como a mistura de MEG adentra a geometria, porém comparando com o mesmo instante para o caso 1 na Figura 30, em (a) a mistura que adentra não alcança até o final da região superior, chegando a pouco mais da metade desta, no entanto é possível observar que para esse caso o jato se difunde menos que no caso anterior, mostrando que a injeção de MEG diluído dificulta a difusão quando comparado ao MEG puro. Ao se comparar o caso 4 no mesmo instante com (b) é possível notar que ao adentrar na geometria o fluido não se espalha com tanta facilidade, se concentrando logo abaixo

o local de injeção B, sendo o jato também menos espesso que no caso do MEG puro, visto da sua diluição. Agora ao se comparar (c) com o caso 7 no mesmo instante é possível perceber que além do jato mais estreito este não alcança uma distância maior como no exemplo do caso 7, e cai na parede inferior da região horizontal se acumulando próximo do local de injeção C, aparentando difundir menos que no caso anterior com MEG puro.

**Figura 38 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 2s**

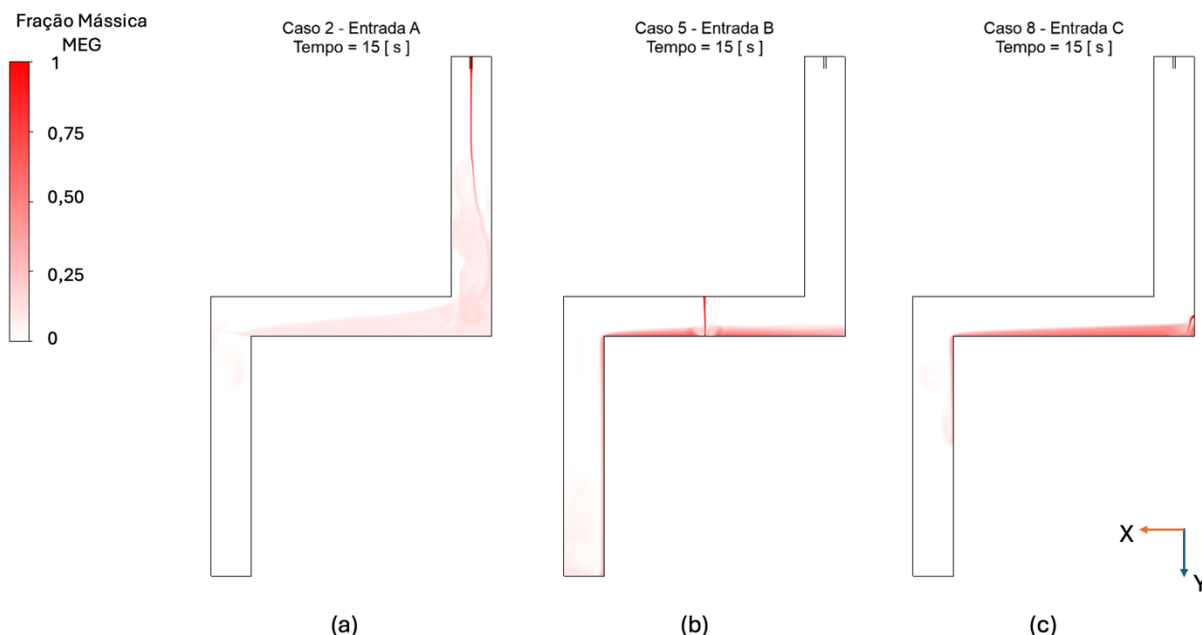


**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 39 apresenta a concentração de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c) no instante 15s. Neste instante é possível observar em (a) que o jato de injeção já toma a região superior da geometria e que o MEG apresenta nessa mistura de injeção vai se difundindo pela largura dessa região, na região horizontal vai se formando novamente o gradiente de concentração e o MEG começa a se aproximar da região inferior. Em (b) o fluido já ocupa a região horizontal da geometria e começa a escorrer pela parede direita em direção a parte inferior da região inferior da geometria, onde o MEG começa a se difundir para a largura da geometria. Já em (c) o fluido também ocupa a região horizontal próximo a parede inferior e começa a escorrer pela parede direita rumo a parede inferior da região inferior, o MEG que se encontra na ponta

dessa região que escorre pela parede começa a se difundir em direção à largura da geometria.

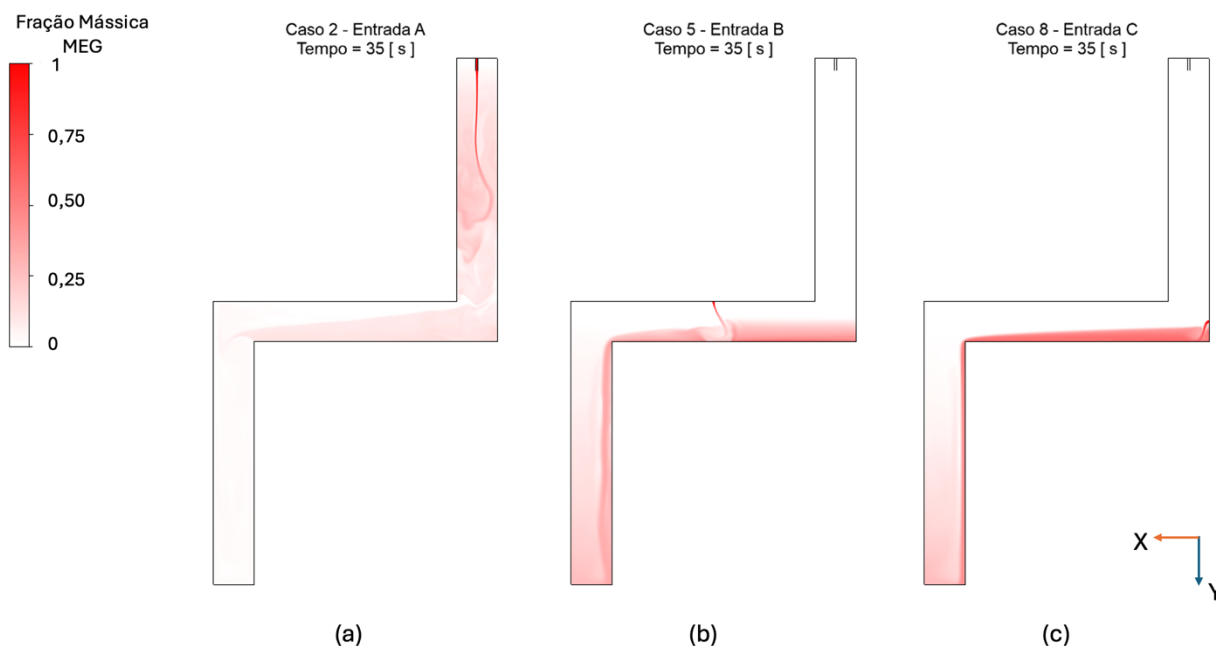
**Figura 39 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 15s**



**Fonte: Autoria própria.**

No instante 35s a Figura 40 apresenta a concentração de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c). Em (a) nota-se que apesar de desigual, toda a geometria está preenchida por MEG, a região superior conta com as maiores concentrações enquanto o jato oscila, a região horizontal apresenta o gradiente de concentrações com concentrações inferiores as encontradas na região superior, e a região inferior está começando a ser preenchida com MEG com uma concentração bem baixa deste. Em (b) a faixa de MEG que se localiza na região horizontal está mais espessa com este se difundindo para a parte superior enquanto também escoo pela parede direita em direção a porção inferior da geometria a qual já possui MEG difundido por toda sua largura. Já em (c) a faixa de MEG que também se localiza na região horizontal aumentou comparado ao instante anterior, porém com uma concentração maior que em (b), a faixa de MEG que escoo pela parede também possui uma concentração mais elevada e diferentemente de (b), MEG concentra-se na parte inferior desta região ao invés de difundido por seu comprimento.

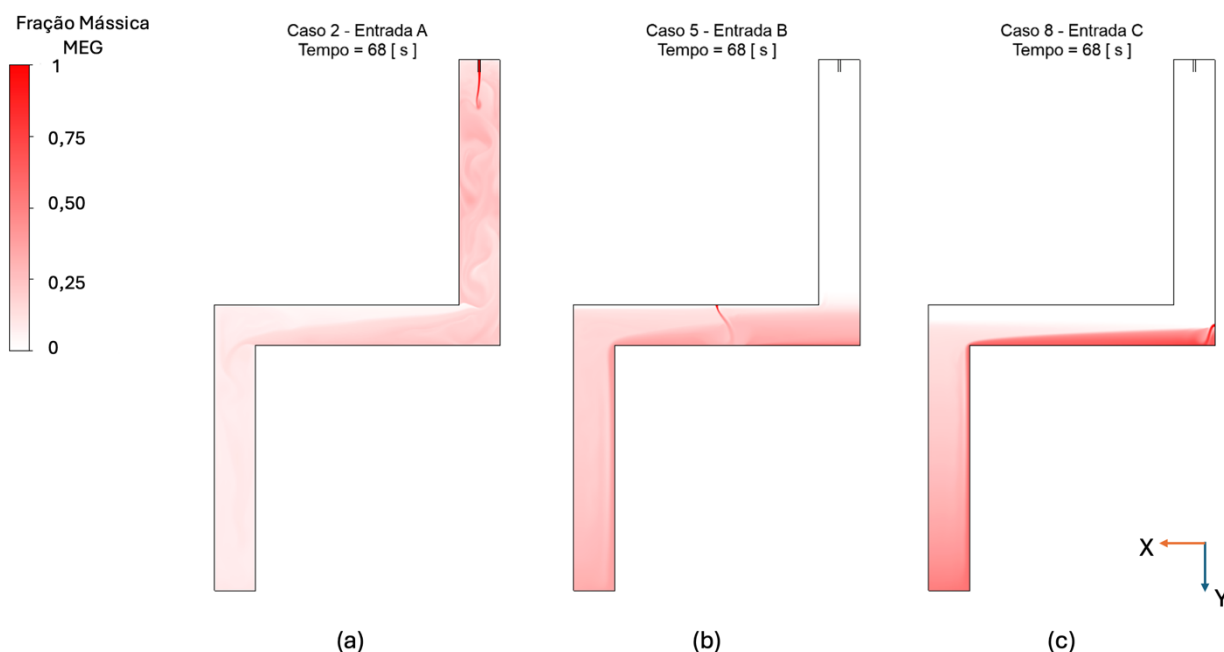
**Figura 40 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 35s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 apresenta a concentração de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c) no instante 68s. Este é o instante onde ocorre a metade do período de injeção e é possível notar que para o caso 2, em (a) o jato de injeção encontra-se pequeno e o fluxo abaixo deste encontra-se repleto de vórtices, o que facilitam o processo de mistura do MEG, o gradiente de concentrações mantém-se presente na região horizontal enquanto na região inferior a concentração de MEG segue aumentando. Para o caso 5, em (b), é observa-se que o MEG se difundiu por toda a região horizontal e inferior, porém ainda segue escoando pela parede direita, contudo é possível notar que existe uma faixa de água próxima a parede superior da região horizontal, ao mesmo tempo que o MEG começa a se difundir através da região superior da geometria. Agora no caso 8, em (c), a faixa de MEG da região horizontal aumentou em espessura e concentração, enquanto na porção da região horizontal próximo da região inferior o MEG começa a se difundir, já na região inferior o MEG se difundiu por toda espessura com sua maior concentração se localizando na porção mais inferior desta região.

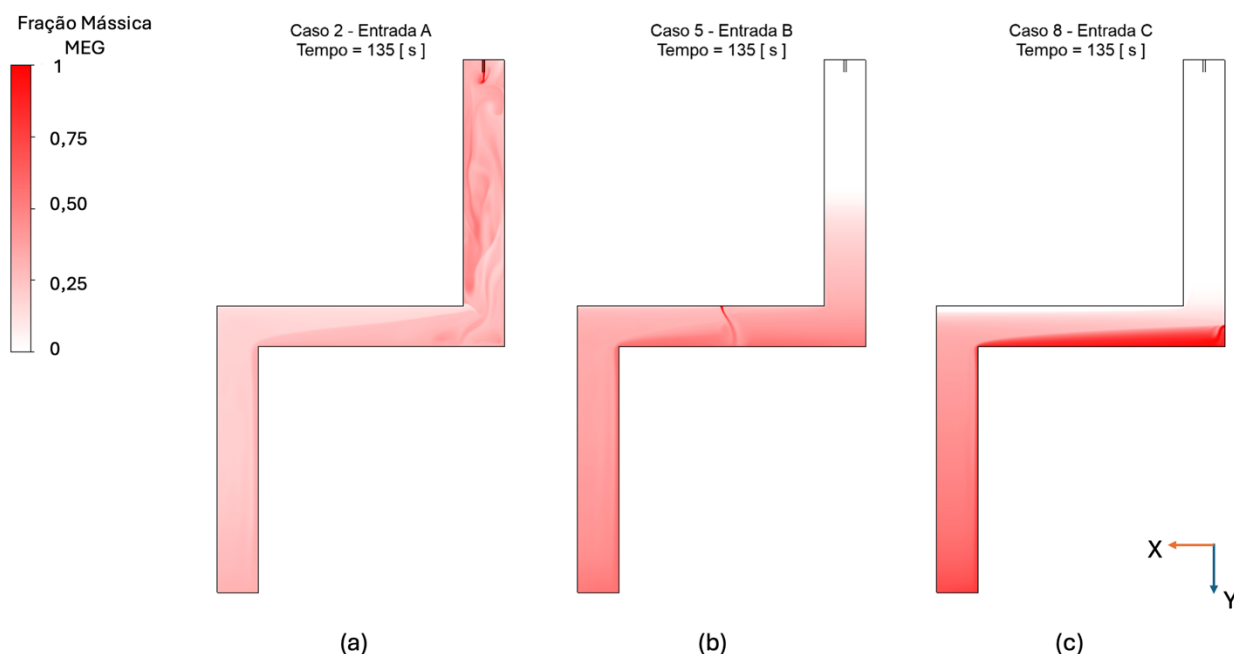
**Figura 41 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 68s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta o instante 135s para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c). Este é o último instante de injeção de MEG e nota-se em (a) que a concentração de MEG aumentou na região superior, porém está se direcionando para a região inferior através do gradiente presente na região horizontal, os vórtices presentes na região superior estão se desfazendo através do comprimento da região superior. Em (b) MEG ocupou a região inferior e horizontal da geometria, preenchendo a faixa de água anteriormente presente na parede superior da região horizontal, enquanto a concentração de MEG aumentou na porção inferior da região superior e agora MEG encontra-se até metade da região superior. Já em (c), MEG ocupa toda a região inferior da geometria ainda escorrendo pela parede direita, enquanto preenche a região horizontal com uma faixa localizada na porção inferior desta região, deixando apenas uma faixa sem preenchimento por MEG enquanto este começa a se difundir pela porção inferior da região superior.

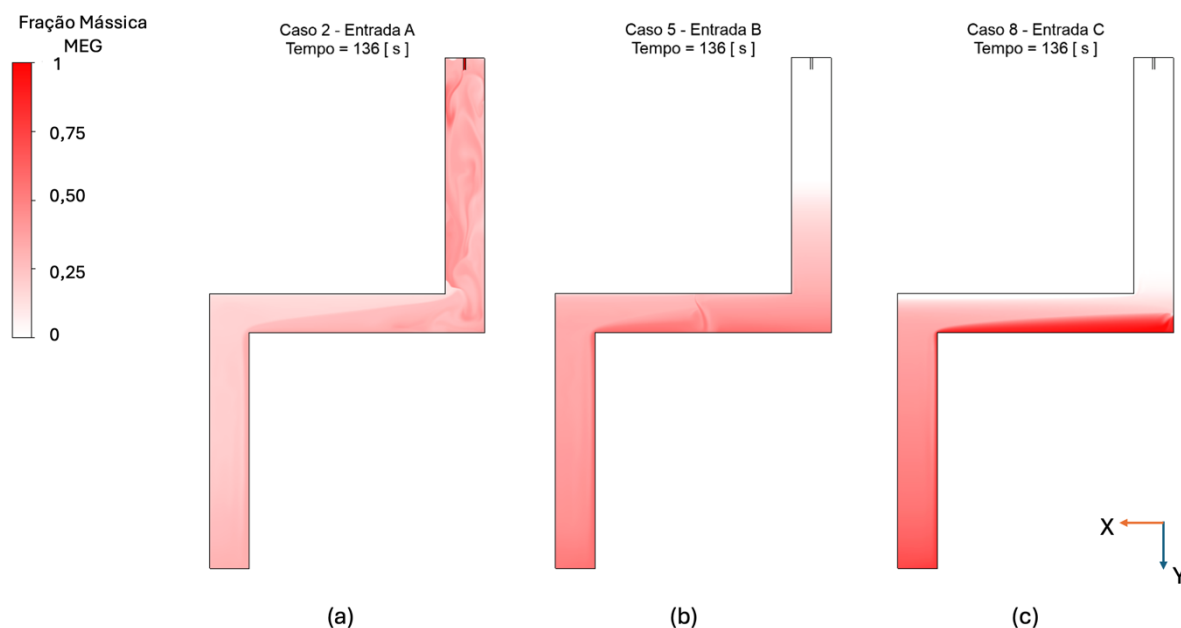
**Figura 42 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 135s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 apresenta a concentração de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c) no instante 136s, sendo este o instante seguido à parada da injeção de MEG diluído. Em (a) é possível analisar que o fluxo de injeção existente até o instante anterior movimentou com vórtices a região superior da geometria chegando a concentrações próximas de 30%, enquanto o MEG se direciona para o restante da geometria buscando uma uniformidade. Em (b) nota-se que existe uma faixa na porção inferior da região horizontal que apresenta uma leve superioridade na concentração de MEG chegando próximo de 50%, enquanto MEG escoou pela parede direita em direção à região inferior da geometria, já na região superior, o MEG se difundiu até metade desta com concentrações próximas de 25%. Agora, em (c), a faixa de MEG continua com uma concentração elevada de cerca de 80% próximo a parede inferior da região horizontal, enquanto esse escoou pela parede em direção a região inferior a qual apresenta uma concentração de aproximadamente 60%.

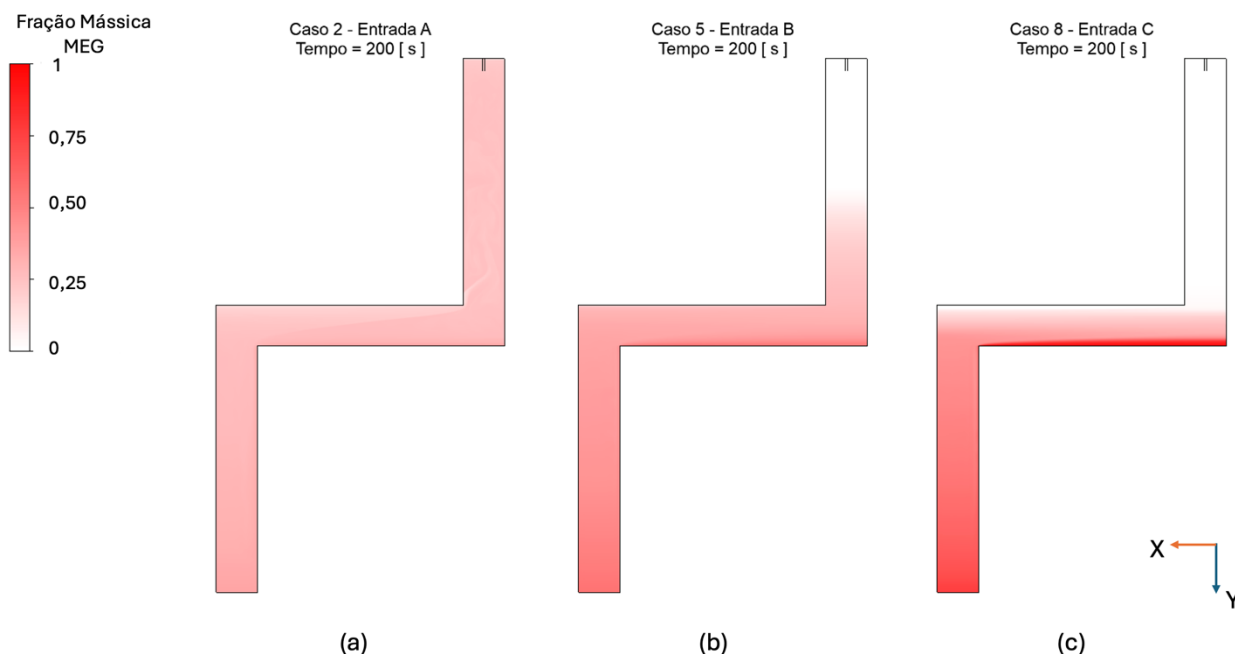
**Figura 43 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 136s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 apresenta as concentrações de MEG no instante 200s para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c). Em (a) é possível que MEG preenche toda a geometria quase uniformemente, no entanto ainda é possível observar o contorno do gradiente de concentrações na região horizontal. Já em (b) é perceptível que MEG se difundiu pela porção superior alcançando até metade desta, sendo também observável que toda a região abaixo encontra-se preenchida por MEG de maneira uniforme, a exceção da parte inferior das regiões horizontal e inferior onde é possível notar uma tendência à concentração de MEG. Quanto a (c) pode-se constatar que MEG ainda está se difundindo na região horizontal, visto que este é encontrado em grandes concentrações na parte inferior de todo o comprimento desta região, assim como concentra-se na parte mais inferior da geometria, também é possível observar que ainda há uma faixa de água na parte superior da região horizontal, enquanto a região superior da geometria não possui concentrações de MEG.

**Figura 44 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 200s**

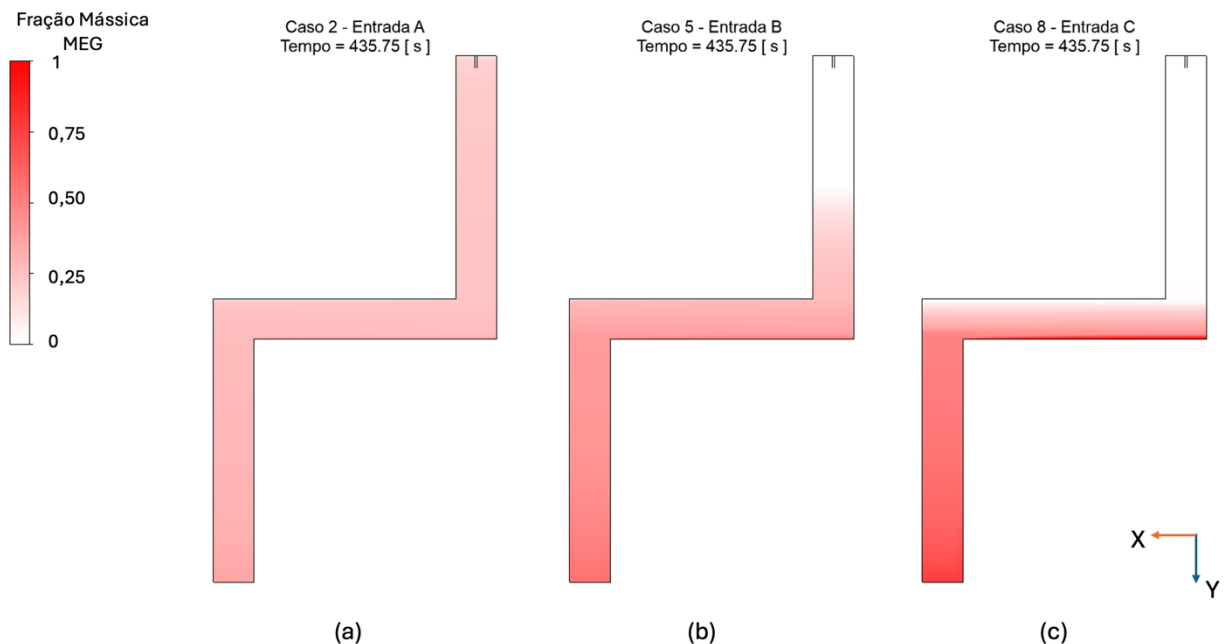


Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 45 mostra as concentrações de MEG para os casos 2 (a), 5 (b) e 8 (c) no instante final da simulação em 435, 75s. Como observado na Figura 37 para o instante final dos casos anteriores, o tempo de descanso permite uma melhor uniformidade da mistura dentro da geometria. Tal comportamento é notado quando se analisa principalmente (a) e os valores presentes na Tabela 4 e 7, onde é possível notar que MEG se distribuiu de maneira uniforme ao longo da geometria chegando a uma média de cerca de 24%, porém começa a se depositar em regiões mais inferiores da geometria como na região horizontal e inferior, chegando a valores de concentração de cerca de 33% e 305, respectivamente, tal comportamento se deve ao fato da densidade do MEG ser mais elevada que a da água fazendo com que este tenda a se depositar em regiões mais inferiores. Já ao se analisar (b) e as Tabelas 5 e 8 é possível observar que a metade superior da região superior da geometria chegando a valores em torno de 0,15%, enquanto a parte inferior desta região foi tomada pelo MEG que se difundiu, alcançando concentrações pouco acima dos 20% enquanto nas regiões horizontal e inferior o MEG se difundiu melhor, porém a concentrações mais elevadas com uma média nessas regiões de cerca de 38%, porém também tendendo a se concentrar nas partes inferiores dessas regiões, chegando em torno de 50% na região horizontal e em torno de 48% na região inferior.

Então, estudando-se (c) e as Tabelas 6 e 9 é possível observar que a porção superior da região horizontal e toda a região superior da geometria encontram-se majoritariamente preenchidas por água, chegando a concentrações de MEG abaixo de 0,1%, contudo na parte inferior da região horizontal, onde nota-se uma concentração maior de MEG esses valores chegam próximos de 90%, enquanto no braço inferior ocorre uma melhor distribuição do MEG com uma média elevada de 50% de MEG, ainda que este tenda-se a se concentrar na porção inferior desta região, alcançando concentrações de cerca de 62%.

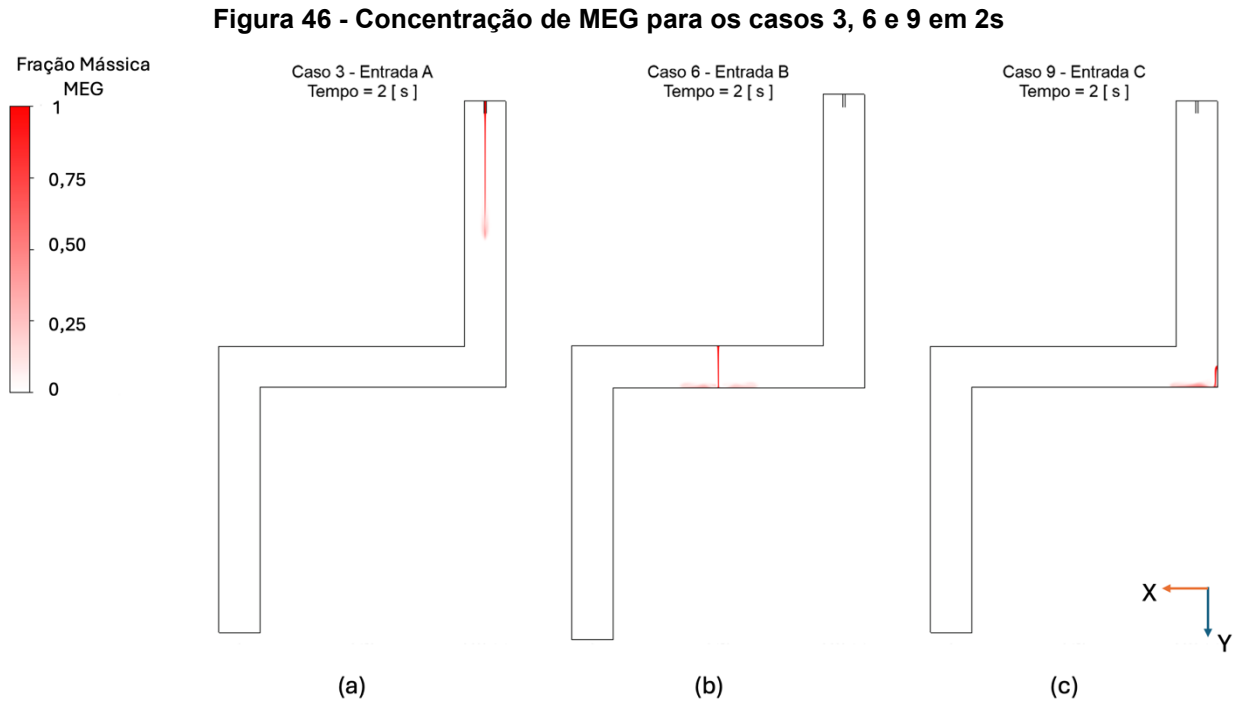
**Figura 45 - Concentração de MEG para os casos 2, 5 e 8 em 435,75s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 46 apresenta a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c) no instante 2s. Comparando essa figura com a Figura 38 que apresenta o mesmo instante para os casos 2, 5 e 8 é possível observar a semelhança entre os casos devido à injeção da mesma mistura composta majoritariamente por MEG, contudo a vazão menor de injeção, de 18, 25ml/min, mostra algumas diferenças também. Um exemplo disso é em (a) onde é possível observar que a vazão menor reflete em um jato de injeção mais curto e menos difuso quando comparado a (a) na Figura 38. Já em (b) é possível notar a diferença com relação a (b) na Figura 38 ao se analisar que o jato de injeção é mais fino que o anterior e a concentração de MEG abaixo do ponto

de injeção B se espalha menos que na Figura 38. Agora o mesmo ocorre em (c) o jato não se estende tanto na direção da região horizontal e o MEG que se acumula abaixo do ponto de injeção C é menor comparado a (c) na Figura 38.

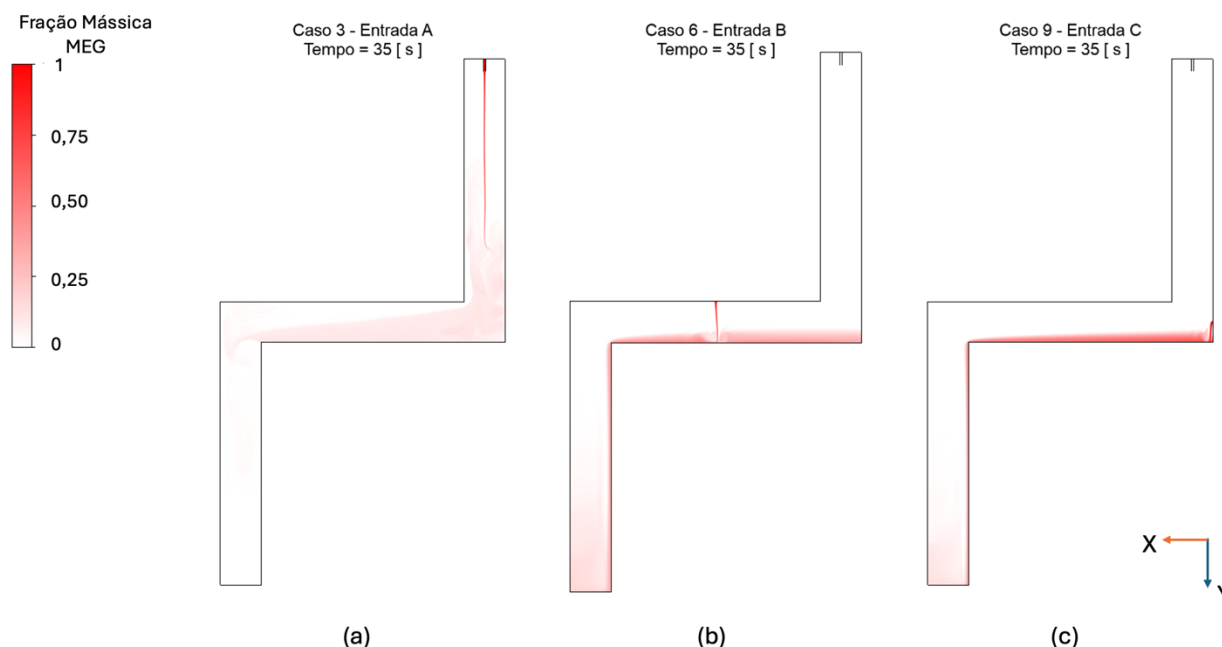


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 47 é possível observar a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c) no instante 35s. Comparando-se os casos presentes na Figura 47 aos casos da Figura 40, é possível observar a influência da vazão no processo de injeção, visto que na figura abaixo o processo de injeção ainda é incipiente, enquanto na Figura 40 ele já se mostra mais desenvolvido para todos os casos. Nota-se em (a) que o jato escoar pela região superior da geometria começando a se difundir ao final desta e o MEG que se difunde se espalha pela porção horizontal. Em (b) é possível observar que o MEG injetado espalha-se por toda a porção horizontal e começa a escoar pela parede direita em direção à região inferior, nesse caso é possível observar como a faixa presente na região horizontal e inferior começam a se difundir em direção à largura da geometria. Já em (c) a injeção toma toda a região horizontal a uma concentração mais elevada que em (b) enquanto escoar também pela parede direita

em direção à região inferior, porém diferentemente de (b) o processo de difusão não é tão presente na porção inferior da geometria.

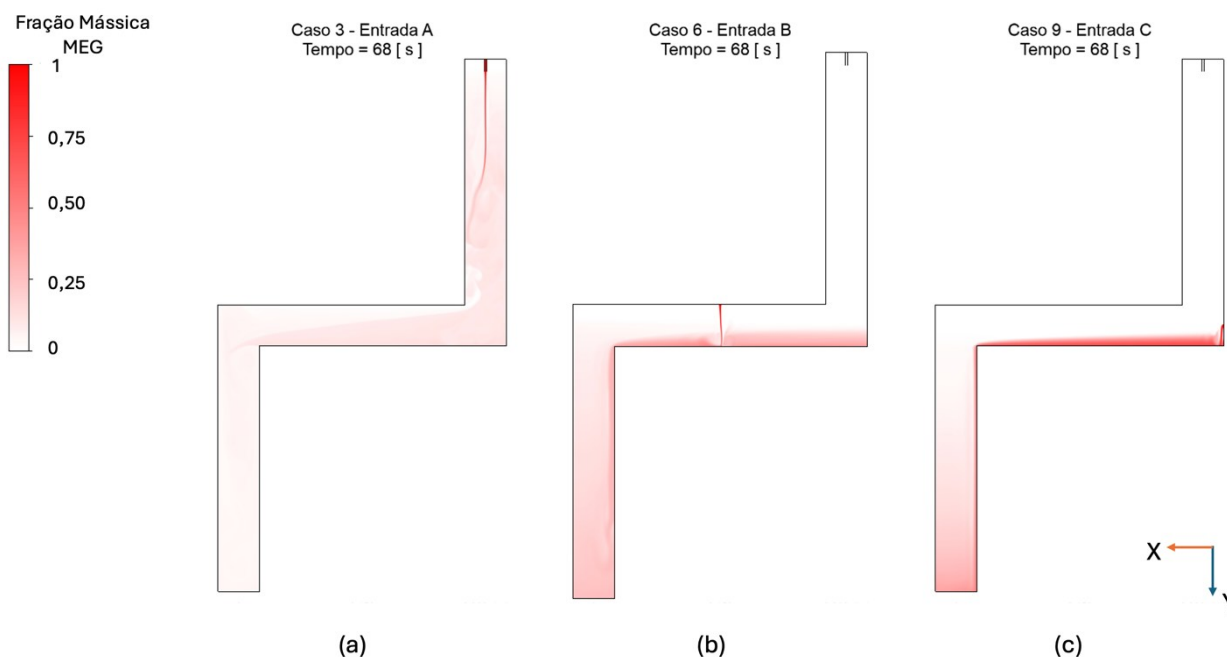
**Figura 47 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 35s**



Fonte: Autoria própria.

No instante 68s a Figura 48 mostra a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c). Nesse instante é possível observar como o MEG já começa a ocupar melhor as regiões da geometria para os diferentes casos apresentados. Em (a) é possível notar que toda a geometria já apresenta ao menos alguma concentração de MEG, sendo a porção superior a com maiores concentrações enquanto o MEG se direciona para a região com menor concentração que é a região inferior. Já em (b) é possível observar que a faixa de MEG presente na região horizontal se alargou, porém sem alcançar a largura total da geometria e dessa forma não adentrando a região superior desta. Contudo, a região inferior apresenta-se em sua maioria composta por uma pequena concentração de MEG. Agora em (c) nota-se que a faixa de MEG presente na região horizontal aumentou sua concentração enquanto este se direciona para a região inferior da geometria, a qual apresenta até sua metade concentrações mais elevadas de MEG.

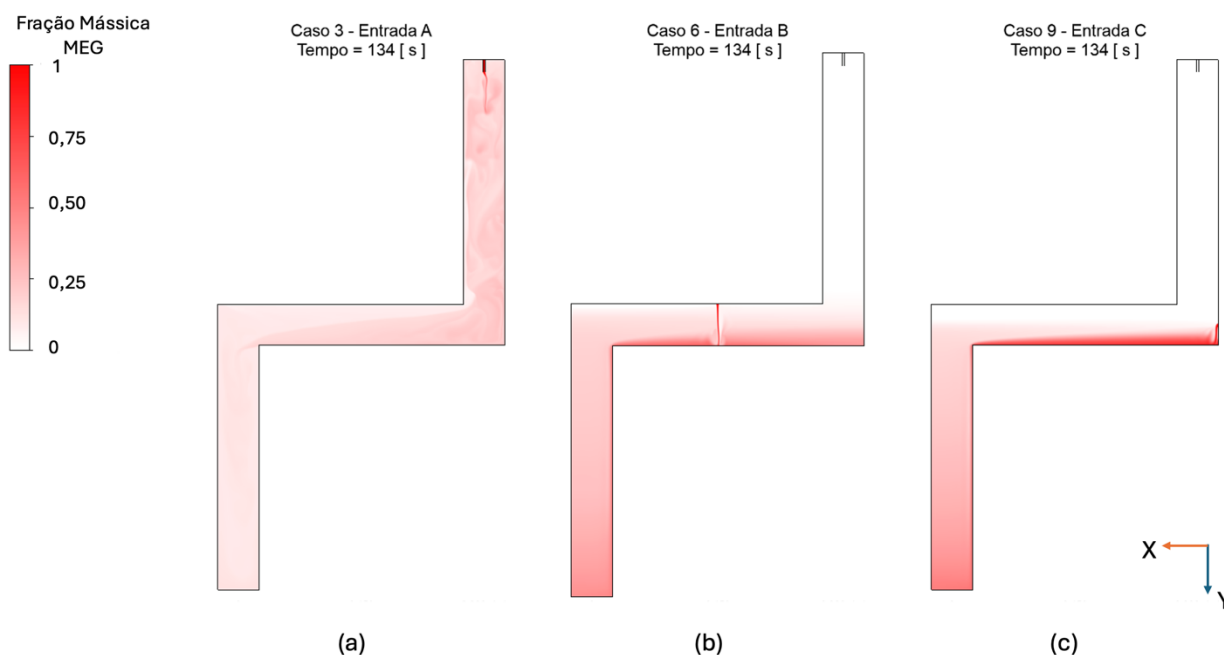
**Figura 48 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 68s**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 49 apresenta o instante 134s, a metade do tempo de injeção, para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c). Em (a) nota-se que a concentração aumentou em toda geometria, sendo ainda predominante na região superior, nessa pode se visualizar a movimentação do fluido devido ao próprio processo de injeção. O MEG presente na geometria tende a se dirigir para a região que ainda apresenta as menores concentrações, a região inferior. Em (b) é possível observar que a faixa antes mais concentrada de MEG na região horizontal agora se mostra mais difundida ao longo da largura, porém ainda sendo possível visualizar uma faixa de água na parte superior desta região. MEG ainda desce para a região inferior escoando através da parede direita, e apesar de se difundir ao longo de toda a região inferior, começa a se concentrar na parte inferior desta região. Já em (c) a faixa de MEG que percorre a região horizontal aumenta sua concentração, porém também começa a se difundir através da largura, contudo não alcança a metade superior da região. Assim como em (b) MEG ainda escoo pela parede direita e se difunde ao longo da região inferior, porém tende a se concentrar na porção mais inferior da geometria.

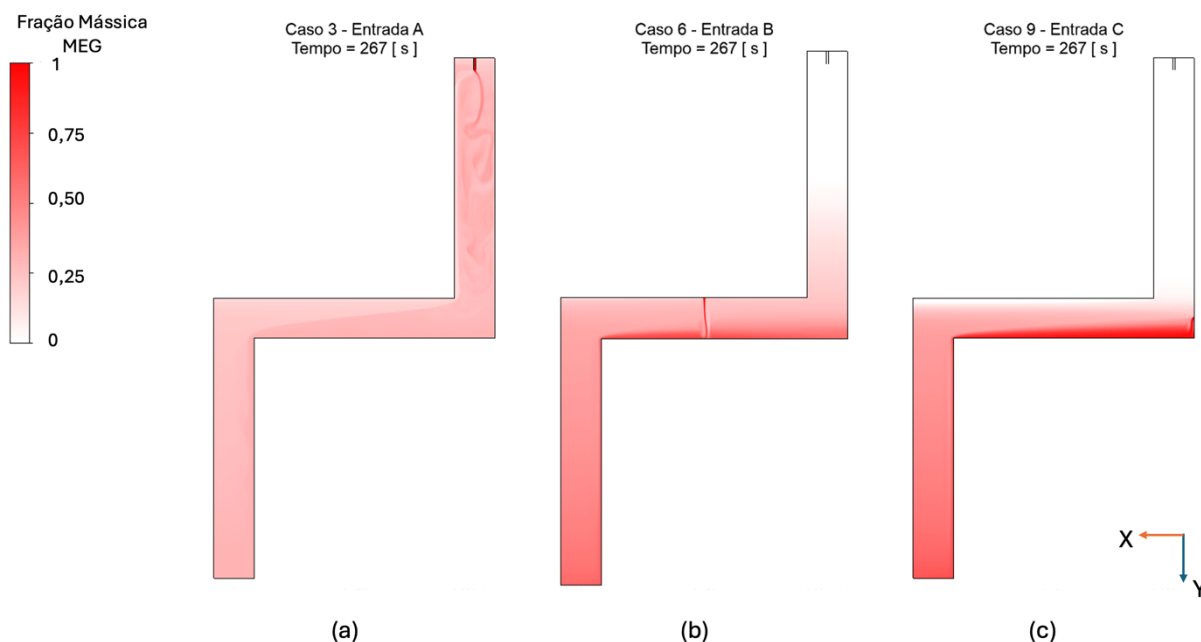
**Figura 49 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 134s**



**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 50 é possível visualizar o instante 267s, o instante final da injeção da mistura de MEG, para os casos 3 (a), 6 (b), e 9 (c). Para o caso 3, em (a), observa-se que o jato de injeção induziu algumas instabilidades na região superior da geometria, a qual apesar de apresentar as maiores concentrações de MEG já se mostra mais igualada às concentrações presentes da região horizontal, enquanto a região inferior ainda se mostra com menores concentrações quando comparada as outras duas regiões. Já em (b) é possível observar que ainda existe uma faixa de maior presença de MEG na região horizontal, porém agora a largura toda desta região foi preenchida com MEG, e este começou a subir pela região superior, enquanto a região inferior apresenta uma maior concentração na sua porção mais inferior. Em (c), apesar da faixa de maior concentração de MEG presente na região horizontal, este se espalhou por quase toda a largura desta região, enquanto ainda escorre pela parede direita se concentrando no fundo da região inferior da geometria.

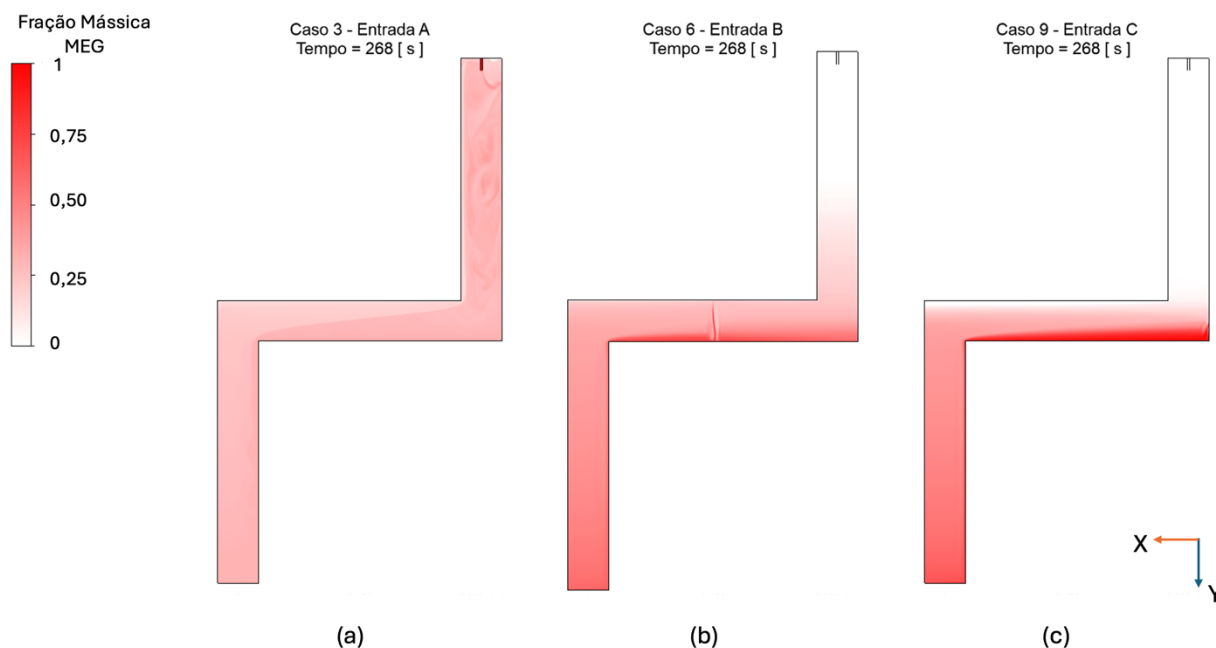
**Figura 50 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 267s**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 51 exibe a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c) no instante 136s, momento este seguido à parada da injeção de MEG diluído. Em (a) é possível observar que as instabilidades causadas anteriormente pelo jato de injeção acarretaram a presença de vórtices na região superior da geometria, quanto à concentração de MEG na geometria é possível identificar que ainda existem algumas diferenças, sendo metade da região horizontal e a região inferior as responsáveis pelas menores concentrações. Já em (b), é possível notar que o fluxo que estava sendo injetado está se encaminhando para o fundo da região horizontal, enquanto a geometria continua a se portar com o mesmo comportamento do instante anterior com uma pouca quantidade de MEG a porção inferior da região superior e a maior parte se localizando no fundo das regiões horizontal e inferior. Agora em (c) é possível notar também a finalização do jato de entrada como no caso (b), apresentando também similaridade com o instante anterior onde a geometria também se apresenta com as maiores concentrações no fundo das regiões horizontal e inferior.

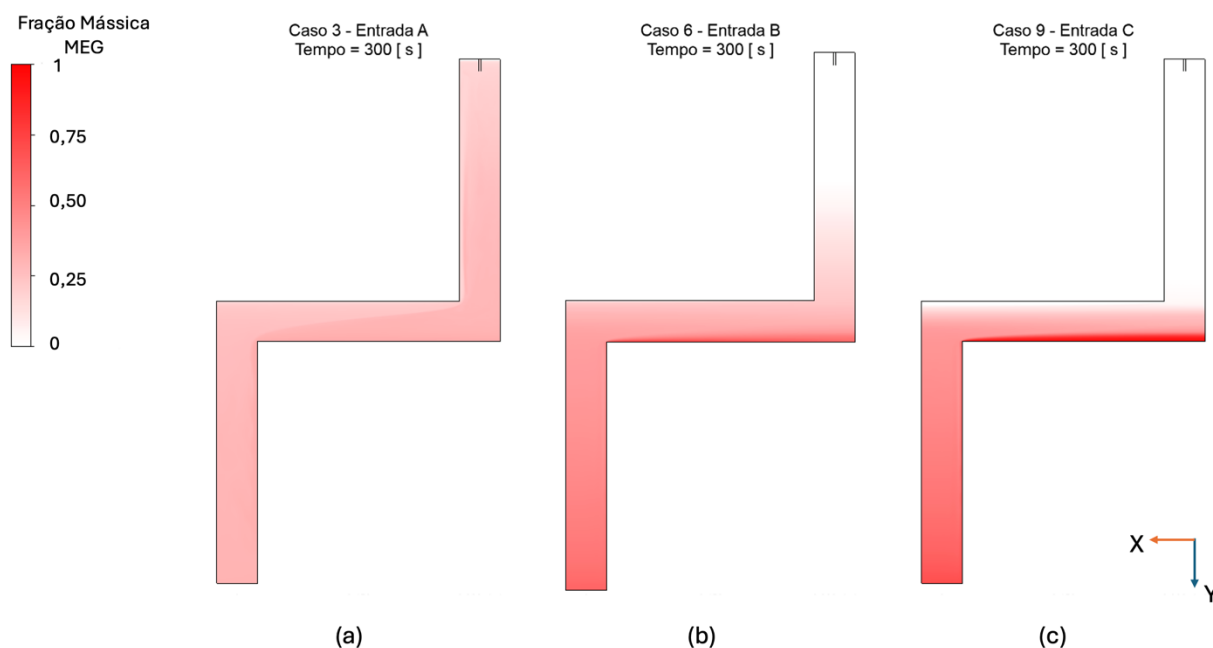
**Figura 51 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 268s**



**Fonte: Autoria própria.**

No instante 300s é possível visualizar na Figura 52 a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c), sendo possível notar neste momento como para todos os casos a mistura tende a uma uniformidade dentro da geometria. Em (a) é possível reparar que ainda há movimentação de fluido em direção à região inferior, ainda que ao todo a geometria esteja toda preenchida de MEG e os valores de concentração sejam todos muito próximos. Em (b) identifica-se que o MEG presente na porção inferior da região superior difundiu-se subindo até metade desta região, ainda existindo uma pequena faixa de maior concentração de MEG no fundo da região horizontal e inferior. Já em (c) a faixa de maior concentração de MEG que estava presente na região horizontal afinou tendo este se difundido para o restante da geometria, tendo ainda uma faixa de água presente na parte superior dessa região.

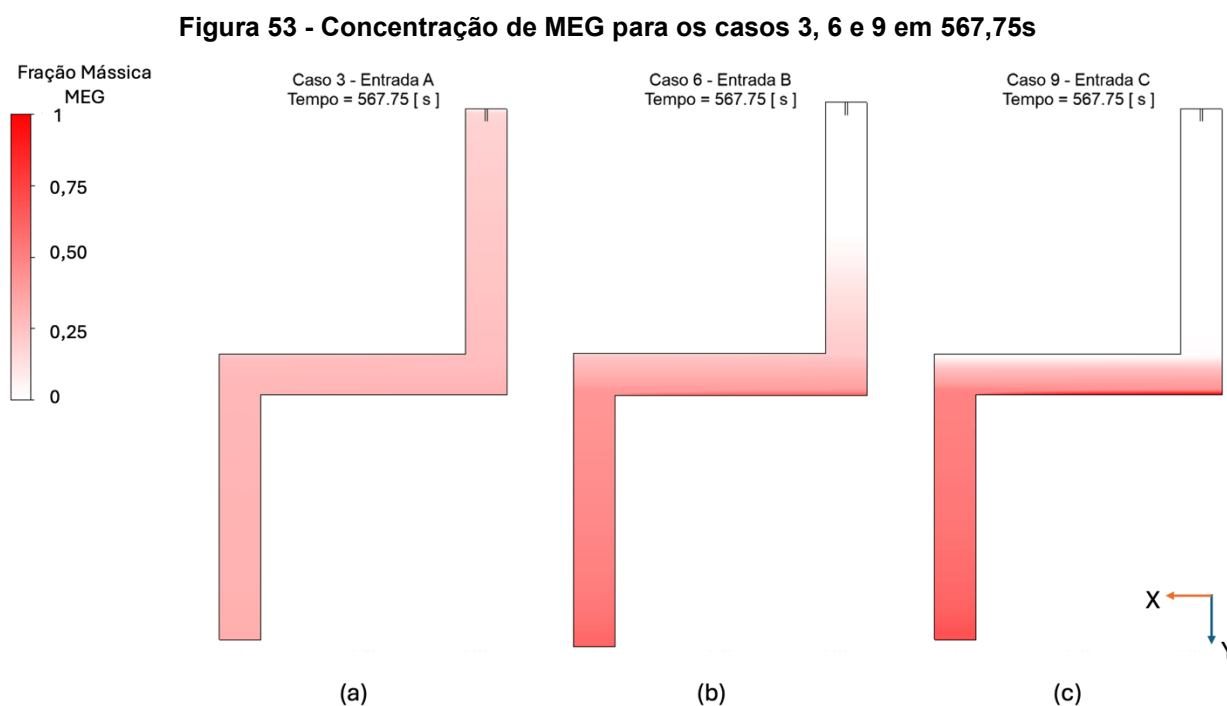
**Figura 52 - Concentração de MEG para os casos 3, 6 e 9 em 300s**



**Fonte: Autoria própria.**

Enfim, a Figura 53 expõe a concentração de MEG para os casos 3 (a), 6 (b) e 9 (c) no instante final da simulação em 567,75s. Mais uma vez é possível notar como o tempo de descanso tende a melhorar o processo de mistura e permite que este se uniformize melhor ao longo da geometria, principalmente no caso 3, em (a). Analisando esse caso e as Tabelas 4 e 7, percebe-se que a média das concentrações ficou próxima dos 25%, porém com alguns valores mais elevados, nas porções inferiores das regiões horizontal e inferior, chegando próximo de 60% para o primeiro e em torno de 50% para o último, comportamento observado devido a densidade do MEG, conforme comentado anteriormente. Já em (b) juntamente das Tabelas 5 e 8, identificou-se que o MEG na região superior não alcançou a metade da região superior, ficando o topo com uma média de 0,22% de presença de MEG, enquanto a porção inferior desta região apresentou uma concentração próxima de 15%, enquanto a média nas outras regiões foi de 30% para a região horizontal e de 46% na região inferior, tendo o MEG se concentrado no fundo da geometria alcançando valores em torno de 50%. Por fim, analisando (c) e as Tabelas 6 e 9 é possível notar que a região inferior se encontra completa por MEG, com uma média de 53%, e na região horizontal com uma média de 28%. No entanto, observa-se que a junto à parede superior da região horizontal existe uma faixa de água e que as maiores concentrações de MEG

se encontram no fundo das regiões horizontal e inferior, chegando a valores próximos de 90% e 60%, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

## 5.5 Análise adimensional

A Tabela 10 apresenta os parâmetros adimensionais para os casos simulados, são analisados os valores de Reynolds, Atwood, Froude e razão de viscosidade. É possível observar que os casos que os parâmetros que mais influenciaram o escoamento foram Reynolds e Froude, enquanto Atwood e a razão de viscosidade estavam intimamente ligados à concentração de MEG presente na injeção.

Nota-se que valores elevados e baixos de Reynolds influenciam negativamente a uniformidade do escoamento, enquanto o mesmo pode ser observado para valores mais baixos de Froude, sendo os melhores resultados encontrados quanto à uniformidade do escoamento quando da ocorrência de valores médios de Reynolds e valores altos de Froude. Agora, analisando-se Atwood, os melhores resultados foram obtidos quando esse parâmetro possui valores mais elevados, porém o comportamento oposto pode ser observado quanto à razão de

viscosidade, sendo os resultados mais uniformes encontrados quando este parâmetro é reduzido.

**Tabela 10 - Parâmetros adimensionais para os casos simulados**

Caso	Re	At	Fr	m
1	19,58	0,0542	1,323	0,0465
2	20,82	0,0422	0,476	0,1407
3	10,55	0,0422	0,242	0,1407
4	19,58	0,0542	1,323	0,0465
5	20,82	0,0422	0,476	0,1407
6	10,55	0,0422	0,242	0,1407
7	19,58	0,0542	1,323	0,0465
8	20,82	0,0422	0,476	0,1407
9	10,55	0,0422	0,242	0,1407

Fonte: Autoria própria.

## 5.6 Fechamento do capítulo

Esse trabalho avaliou o processo de mistura de etileno glicol em água ao longo de uma geometria confinada, sendo tais análises realizadas de maneira experimental e numérica afim de se comparar ambas as análises. O estudo foi realizado através da injeção de MEG na célula *Hele-Shaw* que estava preenchida por água, para entender o processo de mistura, foram variados parâmetros, dentre eles a posição de injeção, a vazão e a concentração de MEG no fluido a ser injetado. Foram realizados 9 testes onde primeiramente era inserido o fluido com MEG e então aguardado um tempo para descanso da mistura para que o fluido injetado pudesse terminar o processo de mistura.

O objetivo desse trabalho foi analisar o processo de mistura de um inibidor termodinâmico, etileno glicol, em água em uma estrutura confinada, sendo para tal avaliada a influência dos diferentes parâmetros, como posição de injeção, vazão de injeção e concentração do fluido injetado.

Para análise do problema foram realizadas diferentes abordagens, experimental e numérica, as quais permitiram o desenvolvimento de um modelo de

comparação entre as duas. O modelo numérico utilizado, quando comparado ao modelo experimental, não conseguiu representar corretamente seu comportamento, sendo a provável causa a utilização da correlação para o modelo de difusividade para diluições infinitas.

Através de um estudo comparativo entre um caso numérico e experimental para as mesmas configurações foi possível entender melhor o comportamento de ambos os escoamentos e perceber que existem divergências entre o comportamento do caso experimental e numérico abordado, sendo possível perceber que a principal diferença se dá na difusividade do processo, corroborando para o que foi afirmado anteriormente.

No estudo analisando instante a instante as simulações numéricas realizadas foi possível compreender melhor como ocorre o processo de mistura nas diferentes configurações e como essas influenciam o comportamento do escoamento. Essa análise também permitiu observar a necessidade do tempo de descanso para que a mistura pudesse se homogeneizar ao longo da geometria, sempre apresentando resultados mais homogêneos após esse período do que logo após a finalização da injeção. Já na análise adimensional do escoamento foi possível caracterizar as diferentes configurações dos testes segundo parâmetros adimensionais, o que permite também entender como esses influenciam o resultado do escoamento.

## 6 CONCLUSÕES

A indústria petrolífera engloba diferentes aspectos, desde a perfuração até a extração do óleo e gás natural. Os hidratos podem se formar ao longo de todo o processo de extração, porém, sua ocorrência é mais frequente em situações não programadas de parada e repartida. Apesar das linhas de produção serem construídas para operarem fora da zona de formação de hidratos, fluidos estáticos podem entrar nesta zona em situações de paradas e repartidas não programadas.

Como forma de evitar a formação de hidratos, o uso de inibidores termodinâmicos, como álcoois e glicóis, segue como a estratégia primária para a garantia de escoamento. Esses operam deslocando a sua curva de formação para regiões de temperaturas mais baixas e pressões mais altas. A ação correta e eficaz dos *THIs* depende de fatores como vazão, volume e local de injeção, sendo seu entendimento de grande importância para a indústria petrolífera.

Neste contexto, o presente trabalho objetivou, através de um estudo experimental e numérico, entender como ocorre o processo de mistura de dois líquidos miscíveis, sendo um deles o etileno glicol, comumente usado como *THI*. Como discutido ao longo da revisão bibliográfica, o tema ainda é relativamente pouco explorado, podendo o estudo contribuir com a literatura da área.

O uso de diferentes técnicas de instrumentação para a medição experimental de concentração de inibidores, bem como o emprego de uma metodologia numérica validada e consistente para a solução computacional do problema, deverá aportar grande quantidade de informação para o entendimento do fenômeno.

Apesar dos estudos levantados tanto experimental como numericamente o presente trabalho não conseguiu comparar de maneira satisfatória ambas as análises, isso se deve ao fato da complexidade do estudo, que envolve não apenas um estudo transiente, como também requer a utilização de uma correlação que discretize o comportamento da transferência de massa ocorrendo durante o processo.

Ainda que o modelo apresente desvios entre a análise experimental e numérica, é possível notar que a análise dos casos simulados ao longo do tempo permitiu entender melhor ao ponto das diferentes variáveis analisadas para cada simulação. Com isso foi possível observar o seguinte:

- i. O local de injeção de *THI* influencia diretamente no processo de mistura deste, sendo possível observar que a injeção realizada pelo topo da geometria, garantiu a melhor uniformidade final do escoamento após a finalização do período simulado, independente da concentração de MEG injetada ou da vazão;
- ii. A concentração de MEG injetada influenciou na difusividade da mistura enquanto esta era injetada, o MEG puro mais difusivo que este diluído em água, contudo chega a valores médios de MEG mais elevados dentro da geometria;
- iii. A vazão mais alta de injeção influencia em como ocorre o processo de mistura ao longo do tempo, sendo possível acelerar esse processo, porém resulta também em valores médios de MEG mais elevados dentro da geometria.

## 6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Ao final do trabalho foi possível observar algumas oportunidades de melhoria da metodologia diante dos resultados obtidos, além de novos estudos que poderiam contribuir com a área. Diante disso são listadas algumas sugestões que possam auxiliar novos estudos nessa área:

- i. Utilizar modelo de correlação para a difusividade que melhor discretize a transferência de etileno glicol para a água durante o experimento;
- ii. Utilizar diferentes modelos de turbulência e avaliar a influência de cada um nos resultados apresentados;
- iii. Avaliar como a alteração do Schmidt de turbulência influencia no processo de mistura e difusividade do MEG;
- iv. Replicar o estudo para outros *THI*, como por exemplo etanol;
- v. Utilizar de sensores no modelo experimental para a captação dos valores de MEG ao longo do tempo;

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ACHARYA, S.; MISHRA, V. K.; PATEL, J. K. **Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review**. AIP Conference Proceedings. **Anais...**American Institute of Physics Inc., 13 maio 2021.

ADISASMITO, S.; PARUBAK, E. Ethylene glycol injection for hydrate formation prevention in deepwater gas pipelines. **MATEC Web of Conferences**, v. 268, p. 02003, 2019.

AKBARI, S.; TAGHAVI, S. M. Injection of a heavy fluid into a light fluid in a closed-end pipe. **Physics of Fluids**, v. 32, n. 6, 1 jun. 2020.

AKBARI, S.; TAGHAVI, S. M. Fluid experiments on the dump bailing method in the plug and abandonment of oil and gas wells. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 205, 1 out. 2021.

ALBA, K.; TAGHAVI, S. M.; FRIGAARD, I. A. Miscible density-unstable displacement flows in inclined tube. **Physics of Fluids**, v. 25, n. 6, 1 jun. 2013.

AL-QAESSI, F.; ABU-FARAH, L. Prediction of Mixing Time for Miscible Liquids by CFD Simulation in Semi-Batch and Batch Reactors. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 3, n. 1, p. 135–146, 19 jan. 2009.

AMIRI, A.; LARACHI, F.; TAGHAVI, S. M. Buoyant miscible displacement flows in vertical pipe. **Physics of Fluids**, v. 28, n. 10, 1 out. 2016.

ANP. Boletim de produção de petróleo e gás natural. dez. 2024.

ANSYS INC. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. Canonsburg: ANSYS Inc, 2021.

ASANO, KOICHI. **Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications**. [s.l.] Wiley-VCH, 2006.

AZEVEDO, H. S. DE. **Estudo numérico e experimental do escoamento bifásico líquido-gás em um rotor plano.** [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

BANERJEE, A.; KRAFT, W. N.; ANDREWS, M. J. Detailed measurements of a statistically steady Rayleigh-Taylor mixing layer from small to high Atwood numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 659, p. 127–190, 2010.

BARTH, T. J.; JESPERSEN, D. C. **The design and application of upwind schemes on unstructured meshes.** 27th Aerospace Science Meeting. **Anais...Reno:** 1989.

BATCHELOR, G. K. **An introduction to fluid dynamics.** 1st. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

BAVOH, C. B. et al. The effect of acidic gases and thermodynamic inhibitors on the hydrates phase boundary of synthetic Malaysia natural gas. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 458, n. 1, p. 012016, 24 dez. 2018.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 7. ed. [s.l: s.n.].

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena.** 2. ed. [s.l: s.n.].

BOHNE, D.; FISCHER, S.; OBERMEIER, E. Thermal conductivity, density, viscosity, and Prandtl-numbers of ethylene glycol-water Mixtures. **Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie**, v. 88, n. 8, 1984.

BRUSTAD, S.; LØKEN, K. P.; WAALMANN, J. G. **Hydrate prevention using MEG instead of MeOH: Impact of experience from major Norwegian developments on technology selection for injection and recovery of MEG.** Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. **Anais...Houston:** 2005.

CHAPOY, A. et al. Can n-propanol form hydrate? **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 5, p. 1689–1694, 1 mar. 2008.

CHRISTIANSEN, H. E. **Rate of hydrate inhibitor in long subsea pipelines**. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2012.

DE VASCONCELOS, L. F. S. **Equilíbrio de fases experimental de hidratos de dióxido de carbono e metano na presença de isopropanol e cloreto de sódio**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

DE VASCONCELOS, L. F. S. et al. Experimental phase equilibria of carbon dioxide and methane hydrates in the presence of 2-propanol and sodium chloride. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 67, n. 6, p. 1528–1540, 2022.

DEBACQ, M. et al. Self-similar concentration profiles in buoyant mixing of miscible fluids in a vertical tube. **Physics of Fluids**, v. 13, n. 11, p. 3097–3100, nov. 2001.

DEBACQ, M. et al. Buoyant mixing of miscible fluids of varying viscosities in vertical tubes. **Physics of Fluids**, v. 15, n. 12, p. 3846–3855, dez. 2003.

FOX, R. W. et al. **Introduction to fluid mechanics**. 9. ed. [s.l.: s.n.].

HATZIKIRIAKOS, S. G.; ENGLEZOS, P. Permafrost melting and stability of offshore methane hydrates subject to global warming. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, v. 4, n. 2, 1994.

HEMMINGSEN, P. V; LI, X.; KINNARI, K. **Hydrate plugging potential in underinhibited systems**. 6th International Conference on Gas Hydrates. **Anais...**Vancouver: 2008.

IYOWU, T. O. **Prevention of hydrates in pipelines using hybrid thermodynamic inhibitors**. [s.l.] African University of Science and Technology, 2010.

KATZ, D. L. Prediction of conditions for hydrate formation in natural gases. **Transactions of the AIME**, v. 160, n. 01, p. 140–149, 1 dez. 1945.

KELLAND, M. A. **Production chemicals for the oil and gas industry**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

KOH, C. A. et al. Mechanisms of gas hydrate formation and inhibition. **Fluid Phase Equilibria**, v. 194–197, p. 143–151, mar. 2002.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 3, p. 269–289, 1974.

LISTON, A. C. Z.; SANTOS, M. H. A. **Análise do escoamento em golfadas em um distribuidor líquido-gás**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

LU, H. et al. **Experimental and computational study of thermodynamic hydrate inhibitor mixing and displacement in subsea jumper**. Day 2 Tue, May 01, 2018. **Anais...OTC**, 30 abr. 2018. Disponível em: <<https://onepetro.org/OTCONF/proceedings/18OTC/2-18OTC/Houston,%20Texas,%20USA/179165>>

MACHADO, P. L. O. et al. Experimental investigation of water-MEG mixing in a Hele-Shaw cell with change of direction. **27th International Congress of Mechanical Engineering**, 2023.

MENTER, F. R. **Improved two-equation k- $\omega$  turbulence models for aerodynamic flows**. [s.l.: s.n.].

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, ago. 1994.

MORAIS, J. M. DE. **Petróleo em águas profundas: Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. 1. ed. Brasília: Ipea: Petrobras, 2013.

ØSTERGAARD, K. K. et al. Can 2-propanol form clathrate hydrates? **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 8, p. 2064–2068, 1 abr. 2002.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [s.l.] Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PENG, G. G. et al. Trapping and escape of viscous fingers in a soft Hele-Shaw cell. **Physical Review Fluids**, v. 7, n. 6, p. L062001, 8 jun. 2022.

PERRIN, A.; MUSA, O. M.; STEED, J. W. The chemistry of low dosage clathrate hydrate inhibitors. **Chemical Society Reviews**, v. 42, n. 5, p. 1996, 2013.

POLING, B. E. et al. **The properties of gases and liquids**. [s.l.: s.n.].

POPE, S. B. **Turbulent flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

RHIE, C. M.; CHOW, W. L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA Journal**, v. 21, n. 11, p. 1525–1532, nov. 1983.

ROSA, E. S. **Escoamento multifásico isotérmico**. São Paulo: Artmed Editora, 2012.

RUZICKA, M. C. **On dimensionless numbers**. **Chemical Engineering Research and Design**, ago. 2008.

SÉON, T. et al. Buoyant mixing of miscible fluids in tilted tubes. **Physics of Fluids**, v. 16, n. 12, 2004.

SLOAN, D.; KOH, C.; SUM, A. K. **Natural gas hydrates in flow assurance**. 1. ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2011.

SLOAN, E. D.; KOH, C. A. **Clathrate hydrates of natural gases**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

TRUZZOLILLO, D.; CIPELLETTI, L. Hydrodynamic instabilities in miscible fluids. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 30, n. 3, p. 033001, 24 jan. 2018.

VALIM, L. S. **Simulação fluidodinâmica da mistura de correntes líquidas aplicada à injeção de inibidores termodinâmicos de hidratos de gás**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[www.pearsoned.co.uk/versteeg](http://www.pearsoned.co.uk/versteeg)>.

WELTY, J. R. et al. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. [s.l.: s.n.].

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. 3. ed. La Cañada: DCW Industries, 2006.

XU, B. et al. Thermal mixing of two miscible fluids in a T-shaped microchannel. **Biomicrofluidics**, v. 4, n. 4, p. 044102, dez. 2010.

YEOH, G. H.; TU, J. **Computational techniques for multiphase flows**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.

YOUSIF, M. **Effect of underinhibition with methanol and ethylene glycol on the hydrate-control process**. Offshore Technology Conference. **Anais...**Houston: 1998.