



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA  
LABORATÓRIO DE PESQUISA EM FLUIDODINÂMICA E  
IMAGEM**



**MORGANA DE VASCONCELLOS ARAUJO**

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÁGUA E ÓLEO EM  
CONEXÕES TÊ NA PRESENÇA DE VAZAMENTO**

**Campina Grande-PB, Julho/2014**

**MORGANA DE VASCONCELLOS ARAÚJO**

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÁGUA E ÓLEO EM  
CONEXÕES TÊ NA PRESENÇA DE VAZAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
requisito para a obtenção do título de  
mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação

Orientador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

**Campina Grande-PB, Julho/2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A663e Araújo, Morgana de Vasconcelos.  
Estudo numérico do escoamento bifásico de água e óleo em conexões Tê na presença de vazamento / Morgana de Vasconcelos Araújo. – Campina Grande, 2014.  
87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".  
Referências.

1. Petróleo. 2. Simulação Numérica. 3. Vazamento. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

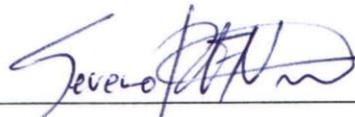
CDU 665.61(043)

**MORGANA DE VASCONCELLOS ARAÚJO**

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÁGUA E ÓLEO EM  
CONEXÕES TÊ NA PRESENÇA DE VAZAMENTO**

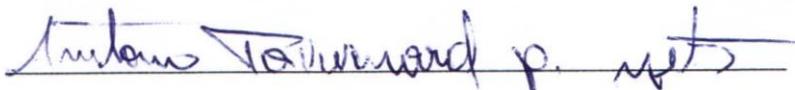
Dissertação aprovada em 24 de Julho de 2014.

BANCA EXAMINADORA:



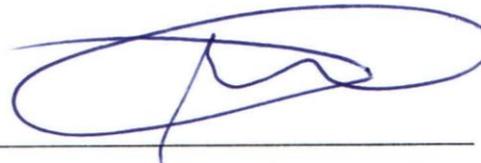
---

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
UAEQ/CCT/UFCG - Orientador



---

Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto  
UAEQ/CCT/UFCG – Examinador Interno



---

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
UAEM/CCT/UFCG – Examinador Externo

**Campina Grande-PB, Julho/2014**

## DEDICATÓRIA

À Deus pela sabedoria e à minha família pelo amor e compreensão

## AGRADECIMENTOS

À Deus – Autor do Universo – pela saúde e sabedoria.

À minha mãe Elba, por tudo.

À minha família, pelo amor, carinho, incentivo, compreensão e paciência

Ao Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto pela oportunidade, confiança, transmissão de conhecimentos e amizade.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pelos ensinamentos valiosos.

Aos colegas e amigos do LPFI e do LCTF, por todas as contribuições técnicas e pelos inúmeros momentos de descontração.

À Universidade Federal de Campina Grande, por todas as formas de conhecimento disponibilizadas aos seus alunos.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem, LPFI/UAEQ/UFCG e ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, LCTF/UAEM/UFCG, que colocaram à minha disposição os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES, CNPq, FINEP e a UFCG pela parceria na realização deste trabalho.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste sonho,

MUITO OBRIGADA!

“Tudo posso naquele que me fortalece”  
(Filipenses 4:13)

## RESUMO

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Estudo Numérico do escoamento Bifásico de Água e Óleo em Conexões Tê na Presença de Vazamento.** Campina Grande: Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Dissertação (mestrado).

Diante do número de acidentes com dutos na indústria petrolífera, diversas pesquisas vêm buscando o aperfeiçoamento das tecnologias de detecção de vazamento, fazendo-se necessário o conhecimento do comportamento do(s) fluido(s) no interior da tubulação. O trabalho tem como objetivo geral o estudo termofluidodinâmico do escoamento água-óleo em uma conexão tê na presença de vazamento. Para isto, foi construído um domínio tridimensional e foi simulado o escoamento não isotérmico de água testando-se os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão, SST e RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  e utilizando as equações da conservação de massa, momento e energia. Foram simulados os escoamentos bifásicos de água-óleo em uma conexão tê com vazamento, variando-se a fração volumétrica de óleo e as temperaturas das misturas nas seções de entrada. Comparando os perfis de velocidade e temperatura com dados experimentais observou-se que o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão representou satisfatoriamente o comportamento do escoamento. Notou-se que quanto menor a fração volumétrica de óleo no escoamento, maior a pressão a montante do vazamento e que a região de encontro entre o duto principal e o duto secundário apresentou os maiores gradientes de pressão.

**Palavras-chave:** Petróleo, Simulação Numérica, Vazamento.

## ABSTRACT

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Numerical Study of Two-phase Flow of Water and Oil in Tee Junctions With Leak**. Campina Grande: Pos graduation in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2014. Dissertation (master's degree).

From the large number of accidents involving pipelines in the oil industry, many researcher have the objective of improving the technologies of leak detection, where the knowledge of the behavior (s) fluid (s) inside the pipe is necessary. The work aims to describe the thermo-fluid dynamics study of oil-water flow in a pipe with tee junction and with the presence of leakage. For this, a three-dimensional domain was built and it was simulated the non-isothermal flow of water by testing models of turbulence  $\kappa$ - $\varepsilon$  standard, SST e RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$ , using the equations of conservation of mass, momentum and energy. Comparing the profiles of velocity and temperature with experimental data, it were observed that the  $\kappa$ - $\varepsilon$  standard model well represented the flow pattern behavior satisfactorily. The water-oil two-phase flow in a tee junction with leakage was simulated, varying the volume fraction of oil mixtures and temperatures of the input sections. It was noted that the smaller the volume fraction of oil in the flow, the greater the pressure upstream of the leak and the region where the main duct is linked to the secondary duct showed higher pressure gradients.

**Keywords:** Black Oil, Numerical Simulation, Leakage.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo Geral .....	2
1.2	Objetivos específicos .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1	Petróleo .....	3
2.1.1	O petróleo .....	3
2.1.2	Impactos ambientais do vazamento de óleo .....	3
2.2	Dutos: características gerais .....	6
2.3	Detecção de vazamentos em dutos .....	8
2.3.1	Método observacional .....	9
2.3.2	Métodos baseados em <i>hardwares</i> .....	10
2.3.3	Métodos baseados em <i>softwares</i> .....	14
2.3.4	Detecção de vazamentos por computador <i>online</i> .....	16
2.3.5	Simulação numérica .....	18
2.4	Escoamento em conexões .....	22
2.5	A fluidodinâmica computacional .....	31
2.6	Escoamento multifásico .....	32
2.6.1	Características gerais .....	32
2.6.2	Modelagem matemática para escoamentos multifásicos .....	34
3	METODOLOGIA .....	42
3.1	O problema físico .....	42
3.2	Domínio de estudo .....	43
3.3	Domínio computacional: malha .....	44
3.4	Modelagem matemática .....	45
3.4.1	Escoamento permanente monofásico e isotérmico .....	45
3.4.2	Escoamento permanente, monofásico e não-isotérmico .....	45

3.4.3	Escoamento transiente bifásico e não-isotérmico.....	46
3.4.4	Escoamento permanente bifásico e não-isotérmico.....	47
3.4.5	Propriedades físico-químicas .....	48
3.4.6	Queda de pressão em dutos .....	49
3.4.7	Desvio padrão da média.....	49
3.4.8	Critério de convergência .....	50
3.5	Casos estudados.....	50
3.5.1	Escoamento monofásico .....	50
3.5.2	Escoamento bifásico .....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	Escoamento monofásico.....	57
4.1.1	Dependência da malha .....	57
4.1.2	Influência do modelo de turbulência no escoamento .....	57
4.2	Escoamento bifásico .....	61
4.2.1	Validação da malha.....	61
4.2.2	Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de fração volumétrica e de temperatura na ausência de vazamento .....	62
4.2.3	Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de pressão na ausência de vazamento .....	66
4.2.4	Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de velocidade na ausência de vazamento .....	67
4.2.5	Efeito da fração volumétrica de óleo sobre o escoamento na presença de vazamento .....	73
4.2.6	Efeito da temperatura sobre o escoamento na presença de vazamento .....	75
4.2.7	Efeito do vazamento sobre os campos de pressão .....	77
5	CONCLUSÕES .....	82
6	BIBLIOGRAFIA .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reservatório de petróleo com gás no topo e óleo na base.....	3
Figura 2: Distribuição dos incidentes comunicados em 2011, de acordo com a classificação da Resolução ANP 44/2009 .....	4
Figura 3: Custos com vazamentos entre os anos de 2002 à 2009.....	5
Figura 4: Principais causas de vazamentos no ano de 2002 a 2009 .....	5
Figura 5: Locais de ocorrência de vazamentos no ano de 2002 a 2009.....	6
Figura 6: Oleoduto rompido em 2010 no estado de Michigan. ....	7
Figura 7: Arquitetura básica de aplicação de sistema de detecção de vazamentos. ....	9
Figura 8: Sensor acústico .....	11
Figura 9: Comportamento de pressão e taxa de fluxo ao longo de um duto para escoamento com a presença de um vazamento central. ....	14
Figura 10: Esquema representativo da montagem experimental do teste de detecção on-line .....	17
Figura 11: Modelo físico e sistema de coordenadas utilizados em escoamento de água.....	18
Figura 12: Campo de pressão em torno do vazamento (1 mm x 1 mm) .....	19
Figura 13: Variação de pressão ao longo do duto: 1 mm abaixo do vazamento .....	19
Figura 14: Variação de pressão ao longo da linha central .....	20
Figura 15: Variação do gradiente de pressão ( $dp/dz$ , Pa/m) ao longo da linha central.....	20
Figura 16: Campo de velocidade na vizinhança do vazamento .....	20
Figura 17: Estruturas do jato em escoamento cruzado .....	22
Figura 18: Geometria e condições de contorno para a reprodução do experimento térmico .23	
Figura 19: Estrutura de vórtices desenvolvida a jusante da conexão tê.....	24
Figura 20: Escoamento térmico de água na conexão tê via campo de (a) velocidade e de (b) pressão.....	24
Figura 21: Conexão tê acrílica usada para testes experimentais de mistura térmica. ....	25
Figura 22: Domínio computacional para a simulação em CFD da mistura térmica em conexão tê acrílica.....	25
Figura 23: Distribuição de velocidade na linha 1 da Figura 21 em $x = 0,5D$ .....	26
Figura 24: Distribuição de velocidade na linha 2 da Figura 21 em $x = 1,25D$ .....	26
Figura 25: Distribuição de temperatura média na linha 1 da Figura 21 em $x = 0,5D$ .....	27
Figura 26: Distribuição de temperatura média na linha 2 da Figura 21 em $x = 1,25D$ .....	27
Figura 27: Campos de velocidade para (a) $r = 0,5$ , (b) $r = 1$ , (c) $r = 2$ e (d) $r = 4$ . ....	28

Figura 28: Esquema experimental analisado numericamente .....	28
Figura 29: Tensões de von Mises obtidas após simulação numérica .....	28
Figura 30: Tensões circunferenciais .....	29
Figura 31: Tensões axiais .....	29
Figura 32: Modelo geométrico da conexão tê utilizado no trabalho de Ming e Zhao (2012) .....	30
Figura 33: Comparação da distribuição da temperatura com diferentes tempos físicos .....	30
Figura 34: Comparação da distribuição da velocidade com diferentes tempos físicos .....	30
Figura 35: modelo de conexão tê usada para separar água e óleo .....	31
Figura 36: Escoamento estratificado para fluxos horizontais líquido-líquidos. ....	33
Figura 37: Escoamento anular em fluxo horizontal líquido-líquido .....	33
Figura 38: Outros regimes observados em escoamento horizontal líquido-líquido .....	34
Figura 39: Aparato experimental do escoamento não-isotérmico de água em conexão tê. ...	43
Figura 40: Geometria da conexão tê com orifícios de vazamentos no duto principal. ....	44
Figura 41: (a) Visualização da malha gerada no tubo e detalhes das (b) seção A, (c) seção B, (d) seção C, (e) ligação entre os dutos e (d) orifício de vazamento.....	44
Figura 42: Planos gerados para o cálculo das pressões médias .....	51
Figura 43: Representação das posições das linhas na tubulação onde foram tomados os valores de velocidade e temperatura. ....	58
Figura 44: Perfis de velocidade radial na posição $L_1$ .....	59
Figura 45: Perfis de velocidade radial na posição $L_2$ .....	59
Figura 46: Perfis de temperatura radial na posição $L_1$ .....	60
Figura 47: Perfis de temperatura radial na posição $L_2$ .....	60
Figura 48: Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 09); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 10) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 11). ....	62
Figura 49: Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 12); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 13) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 14). ....	63
Figura 50: Campo de temperatura do óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 09); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 10) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 11). ....	63
Figura 51: Campo de temperatura do óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 12); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 13) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 14). ....	64

Figura 52: Campo de viscosidade dinâmica do óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 09); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 10) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 11).....	64
Figura 53: Campos de viscosidade dinâmica do óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 12); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 13) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 14).....	65
Figura 54: Perfis de temperatura adimensional sobre a linha $L_1$ para os Casos 09, 10 e 11..	65
Figura 55: Perfis de temperatura adimensional sobre a linha $L_1$ para os Casos 12, 13 e 14..	66
Figura 56: Campo de pressão sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 09); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 10) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 11).....	67
Figura 57: Campo de pressão sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 12); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 13) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 14).....	67
Figura 58: Plano $xy$ utilizado para plotar os campos vetoriais .....	68
Figura 59: Vista superior dos campos vetoriais da velocidade do óleo sobre o plano $xy$ nas posições (a) $y = 0$ m, (b) $y = -0,01$ m, (c) $y = -0,014$ m, (d) $y = -0,017$ m, (e) $y = -0,020$ m e (f) $y = -0,023$ m.....	69
Figura 60: Planos $xy$ e $xz$ utilizados para plotar os campos de velocidade do óleo .....	70
Figura 61: Campo de velocidade do óleo sobre o plano $xy$ e sobre o plano $xz$ nas posições (a) $y = 0$ m, (b) $y = -0,01$ m e (c) $y = -0,016$ m.....	70
Figura 62: Campo de velocidade superficial do óleo o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 15); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 16) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 17).....	71
Figura 63: Campo de velocidade superficial do óleo sobre o plano longitudinal $xy$ com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a) $f_{\text{óleo}} = 0,99$ (Caso 18); (b) $f_{\text{óleo}} = 0,95$ (Caso 19) e (c) $f_{\text{óleo}} = 0,90$ (Caso 20).....	71
Figura 64: Velocidade superficial do óleo na linha $L_1$ para os Casos 09, 10 e 11. ....	72
Figura 65: Velocidade superficial do óleo na linha $L_1$ para os Casos 18, 19 e 20. ....	72
Figura 66: Velocidade superficial do óleo na linha $L_1$ para os Casos 10 e 13.....	73
Figura 67: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 15, 16 e 17.....	74
Figura 68: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 18, 19 e 20.....	74

Figura 69: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 15 e 18.....	76
Figura 70: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 16 e 19.....	76
Figura 71: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 17 e 20.....	77
Figura 72: Plano yz utilizado para os campos de pressão radiais .....	77
Figura 73: Campo de pressão axial no Caso 15 sobre o plano A nos instantes (a) $t = 0$ s, (b) $t = 0,001$ s, (c) $t = 0,003$ s e (d) $t = 0,01$ s. ....	78
Figura 74: Campo de pressão axial no Caso 16 sobre o plano A nos instantes (a) $t = 0$ s, (b) $t = 0,001$ s, (c) $t = 0,003$ s e (d) $t = 0,01$ s. ....	78
Figura 75: Campo de pressão axial no Caso 17 sobre o plano A nos instantes (a) $t = 0$ s, (b) $t = 0,001$ s, (c) $t = 0,003$ s e (d) $t = 0,01$ s. ....	78
Figura 76: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 15.....	79
Figura 77: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 16.....	79
Figura 78: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 17.....	79
Figura 79: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 15 .....	80
Figura 80: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 16 .....	80
Figura 81: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 17 .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição histórica dos incidentes comunicados à ANP.....	4
Tabela 2: Níveis de decibéis emitidos pelo vazamento de ar comprimido como função da pressão e do diâmetro do orifício.....	12
Tabela 3: Variações de temperatura (°C) como função do diâmetro de orifício e da pressão.....	13
Tabela 4: Condições experimentais da mistura não isotérmica em conexão tê acrílica.....	26
Tabela 5: Propriedades dos fluidos.....	49
Tabela 6: Dados sobre o refino das malhas e seus respectivos números de elementos.....	51
Tabela 7: Simulações para o teste de turbulência.....	52
Tabela 8: Efeito da temperatura e da concentração de óleo na detecção de vazamento.....	54
Tabela 9: Tabela-resumo de todas as simulações.....	55
Tabela 10: Diferença de pressão em função da densidade de volumes de controle na malha.....	57
Tabela 11: Erro relativo médio em porcentagem entre os valores experimentais e numéricos.....	61
Tabela 12: Diferença de pressão em função da presença de uma fração mínima de água.....	62
Tabela 13: Dados de pressões medidas na seção A na presença de vazamento.....	74

## NOMENCLATURAS

**Letras Latinas**

$A_{\alpha\beta}$	Área superficial por unidade de volume	$[m^{-1}]$
$C_1$	Constante da fórmula da força de lubrificação na parede	[-]
$C_2$	Constante da fórmula da força de lubrificação na parede	[-]
$C_{ab}^{(d)}$	Coeficiente de arraste interfacial	[-]
$C_D$	Coeficiente de arraste	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência k- $\varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 1RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência k- $\varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 2RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\varepsilon$	[-]
$C_L$	Coeficiente de sustentação	[-]
$C_\mu$	Constante empírica do modelo viscosidade turbulenta	[-]
$C_{\mu RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\varepsilon$	[-]
$C_{TD}$	Coeficiente de dispersão turbulenta	[-]
$C_{VM}$	Coeficiente de massa virtual	[-]
$D_1$	Diâmetro do duto principal	[m]
$D_2$	Diâmetro do duto principal	[m]
$d$	Diâmetro da região de vazamento	[m]
$d_\beta$	Diâmetro médio da fase dispersa	[m]
$E$	Erro relativo	[-]
$F_1$	Função de mistura do modelo de turbulência SST	[-]
$F_2$	Função de mistura do modelo de turbulência SST	[-]
$\hat{f}$	Fator de atrito de Moody	[-]
$f_\alpha$	Fração volumétrica da fase $\alpha$ na mistura	[-]
$f_\beta$	Fração volumétrica da fase $\beta$ na mistura	[-]
$f_{\beta,max}$	Fração volumétrica máxima de empacotamento	[-]
$h$	Entalpia	
$l_e$	Comprimento de escala	[m]
$l_m$	Comprimento de mistura	[m]

$\overline{M}_{\alpha\beta}^D$	Força de arraste interfacial	[N.m <sup>-2</sup> ]
$n_w$	Vetor normal à parede	[-]
$P_{\mathcal{G}b}$	Influência das forças de flutuabilidade do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$	
$P_k$	Produção de turbulência devido às forças viscosas do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$	
$P_{kb}$	Influência das forças de flutuabilidade do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$	
$r$	Razão de velocidade	[-]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$Re_m$	Número de Reynolds modificado	[-]
$R_m$	Raio máximo do duto	[m]
$S$	Medida invariante da taxa de deformação do modelo de turbulência SST	[s <sup>-1</sup> ]
$\overline{S}_M$	Termo fonte de momento linear	
$T$	Temperatura	[K]
$T_{frio}$	Temperatura do fluido frio	[K]
$T_{quente}$	Temperatura do fluido quente	[K]
$U$	Velocidade de escoamento do fluido	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_\alpha$	Velocidade da corrente de fluido da fase contínua <i>alfa</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_\beta$	Velocidade da corrente de fluido da fase dispersa <i>beta</i>	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\overline{U}_\beta^*$		[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_r = (U_\alpha - U_\beta)$	Velocidade relativa entre as fases $\alpha$ e $\beta$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$ U_\alpha - U_\beta $	Velocidade de deslizamento entre as fases $\beta$ (dispersa) e $\alpha$ (contínua) na direção da fase $\alpha$ .	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V_f$	Velocidade da água fria	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V_{num}$	Valor numérico	[-]
$V_q$	velocidade da água quente	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V_{real}$	Valor real	[-]
$y_w$	Distância próxima a parede	[m]

**Letras Gregas**

$\alpha$	Subíndice da fase contínua	[-]
$\beta$	Subíndice da fase dispersa	[-]
$\beta_{RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$	[-]
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker do modelo de turbulência SST	[-]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa	$[\text{m}^3.\text{s}^{-3}]$
$\kappa$	Energia cinética turbulenta	$[\text{m}^2.\text{s}^{-2}]$
$\kappa_\alpha$	Energia cinética da fase contínua	$[\text{m}^2.\text{s}^{-2}]$
$\lambda$	Condutividade térmica	
$\mu$	Viscosidade	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\mu_\alpha$	Viscosidade da fase $\alpha$	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\mu_m$	Viscosidade da mistura	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\mu_{t,c}$	Viscosidade turbulenta da fase contínua	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\mu_{t,d}$	Viscosidade turbulenta da fase dispersa	$[\text{Pa}.\text{s}]$
$\vec{n}_w$	Vetor normal à parede	[-]
$\rho$	Massa específica do fluido	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
$\rho_\alpha$	Massa específica da fase $\alpha$	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
$\sigma$	Número de Prandtl turbulento	[-]
$\sigma_\varepsilon$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	[-]
$\sigma_{\varepsilon RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$	[-]
$\sigma_k$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	[-]
$\sigma_m$	Desvio padrão médio	[-]
$\omega$	Frequência turbulenta	[-]
$\bar{\Omega}$	Taxa de rotação do movimento das partículas	[-]

**Letras Especiais**

$\nabla$	Operador nabra	[-]
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial com relação ao tempo	$[\text{s}^{-1}]$

## LISTA DE SIGLAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BSL RSM – Modelo de tensões de Reynolds de Linha de Base (*baseline Reynolds stress model*)

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CFD – Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

LCTF – Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos

LES – Simulação das Grandes Escalas de Turbulência (*Large Eddy Simulation*)

LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem

PETROBRAS S.A. – Petróleo Brasileiro S.A.

RANS – Equações de Navier-Stokes médias no tempo (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*)

RNG – Teoria do Grupo de Renormalização (*Renormalized Group Theory*)

SCADA – Sistema de Controle e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

SST – Shear Stress Transport

Tebar - Terminal Marítimo Almirante Barros

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte de óleo e derivados é realizado, em maioria, via dutos, pois estes são considerados o melhor meio de transporte de fluidos e gases a longas distâncias, sendo mais seguros e econômicos em comparação com os transportes rodoviário, ferroviário e marítimo.

Grandes recursos têm sido investidos para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária em todo o mundo com o objetivo de melhorar os níveis de segurança, confiança e eficiência de operação. Parte dessas tecnologias está voltada para o monitoramento de dutos, sendo que parte dessa fiscalização é feita para evitar ou detectar vazamentos, visto que muitos são os acidentes que envolvem o rompimento de tubulações, os quais resultam em grandes prejuízos ao meio ambiente e às indústrias. Se um vazamento, assim como sua localização, é detectado rapidamente, há mais chances de se evitar ou amenizar desastres.

Existe atualmente uma variedade de técnicas disponíveis para a detecção do vazamento, variando desde a simples inspeção física até os métodos acústicos, e diversos trabalhos têm sido realizados para aperfeiçoar tais técnicas. Porém, para que se faça a detecção, identificação e localização do vazamento é necessário conhecer o comportamento do(s) fluido(s) no interior do duto.

Em geral, uma rede de dutos possui acessórios, como válvulas, joelhos e conexões; e esses acessórios também devem ser monitorados. Neste sentido, observa-se na literatura a existência de diversos trabalhos que envolvem o estudo hidrodinâmico em conexões tê, porém ainda são poucos os dados que se têm sobre a relação entre esse tipo de conexão e o vazamento. Assim, a proposta de pesquisa vem dar uma contribuição no estudo de vazamento em conexão tê e auxiliar na compreensão dos fenômenos envolvidos via técnica da fluidodinâmica computacional.

## 1.1 Objetivo Geral

Estudar a termofluidodinâmica do escoamento água-óleo em uma tubulação munida de conexão T na presença de vazamento.

## 1.2 Objetivos específicos

- Definir um modelo matemático capaz de representar o escoamento bifásico em uma tubulação com uma bifurcação em T, com ou sem vazamento;
- Avaliar a influência do modelo de turbulência ( $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão, RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  e *SST*) na previsão do comportamento do escoamento sem vazamento e comparar com os dados experimentais disponibilizados na literatura;
- Na presença de vazamento, variar a fração volumétrica de óleo e a temperatura da mistura água-óleo nas seções de entrada da ramificação principal e da secundária na conexão T, estudando suas perturbações sobre o comportamento da velocidade, pressão, temperatura e fração volumétrica de óleo e água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma abordagem sobre o petróleo e seu papel na atualidade. Apresenta-se uma interpretação dos diferentes tipos e modelagens matemáticas de escoamento multifásico. Um breve histórico acerca de vazamentos de petróleo no Brasil e no mundo é mostrado, e, em seguida, tem-se uma descrição dos principais métodos utilizados para detectar vazamentos em dutos de petróleo e gás.

### 2.1 Petróleo

#### 2.1.1 O petróleo

Reservatórios naturais de petróleo encontram-se no subsolo, variando em aspectos como dimensão, profundidade, composição, porosidade, entre outros. Uma jazida contendo óleo e gás é ilustrada na Figura 1, onde o gás é armazenado no topo e o óleo no fundo. A alta pressão age sobre o gás, fazendo com que parte dele se dissolva no óleo. O petróleo ao subir pelo poço tem a sua pressão reduzida e esta redução ao longo do poço ocorre devido à fricção e ao aumento da elevação. A mistura tem seu volume de óleo reduzido e o volume de gás aumentado à medida que percorre o poço. A formação e a expansão do gás são diretamente afetadas tanto pela pressão quanto pela temperatura.



**Figura 1: Reservatório de petróleo com gás no topo e óleo na base.**

**Fonte: Brantland, 2010.**

#### 2.1.2 Impactos ambientais do vazamento de óleo

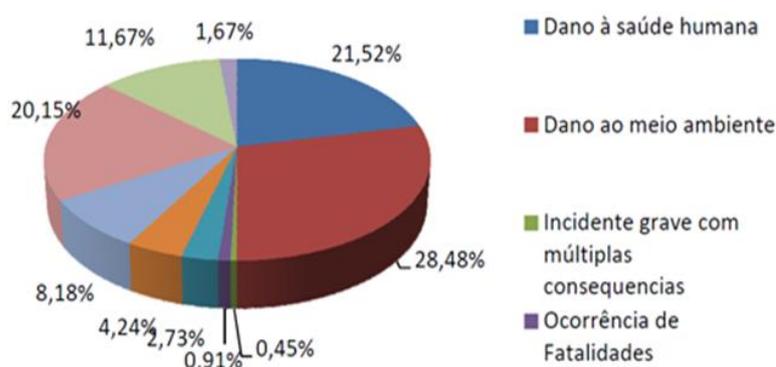
Eventos inesperados como acidentes ambientais envolvendo petróleo e derivados afetam direta ou indiretamente a indústria, a segurança e a saúde da população envolvida,

causando grandes prejuízos. A Tabela 1 apresenta a quantidade de comunicados de incidentes recebidos pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) nos últimos cinco anos, relacionados às atividades de exploração *onshore* (na terra) e *offshore* (no mar). É possível observar o aumento de cerca de 70% do número de incidentes comunicados no ano de 2011, em comparação ao ano anterior, destacando-se o grande crescimento de vítimas relacionadas à acidentes com derramamentos.

**Tabela 1: Distribuição histórica dos incidentes comunicados à ANP**

Fonte: CSO, 2011.

	2007	2008	2009	2010	2011
Derrame ou vazamento de petróleo ou derivados	72	59	101	86	79
Derrame ou vazamento de água oleosa	0	2	7	24	95
Derrame ou vazamento de outras substâncias	6	0	7	18	39
Derrame ou vazamento de fluido de perfuração	0	5	15	27	42
Explosão e/ou incêndio	6	2	5	11	50
Parada não programada	10	6	32	43	56
<i>Blowout</i>	1	0	0	2	1
Abalroamento	0	4	3	3	6
Adernamento	1	0	0	2	1
Número de óbitos em incidentes operacionais	4	8	3	3	6
Número de feridos em incidentes operacionais	11	7	8	14	26
Total de incidentes comunicados	181	150	260	375	664



**Figura 2: Distribuição dos incidentes comunicados em 2011, de acordo com a classificação da Resolução ANP 44/2009**

Fonte: CSO, 2011.

Na Figura 2 estão apresentados os principais incidentes ocorridos no Brasil, em 2011, classificados de acordo com a Resolução ANP 44/2009. Observa-se que o tipo de maior destaque foi o de dano ao meio ambiente.

Para que o leitor tenha uma noção do prejuízo financeiro que o derramamento de hidrocarbonetos acarreta, a Asel-Tech (2010) apresenta um estudo sobre vazamentos em dutos de transporte de petróleo e derivados a partir de dados do site da Administração de Segurança de Tubulação e Materiais Perigosos (PHMSA - *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration*). A Figura 3 apresenta os custos em dólares envolvendo acidentes com dutos do ano de 2002 à 2009 ocorridos nos Estados Unidos.

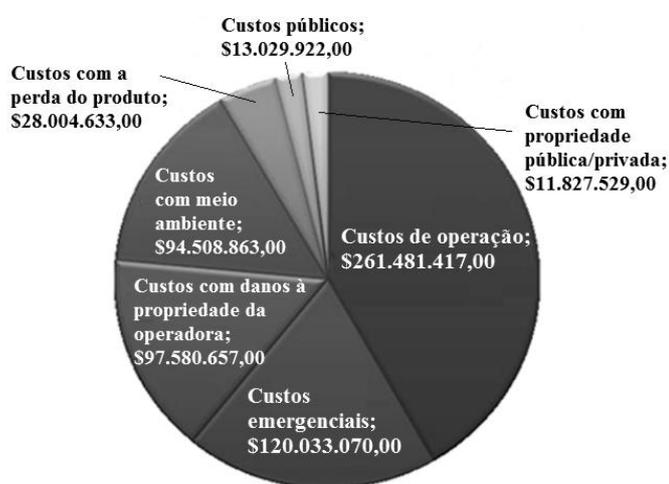


Figura 3: Custos com vazamentos entre os anos de 2002 à 2009

Fonte: Asel-Tech, 2010.



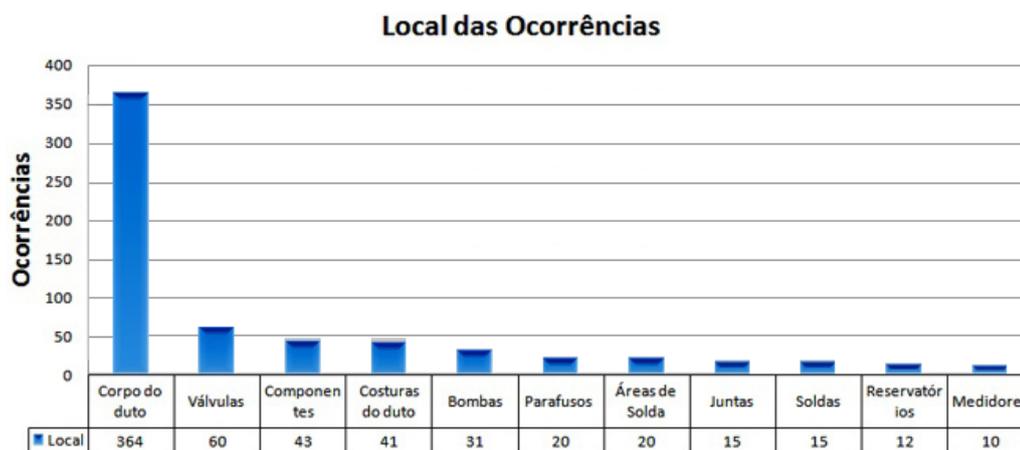
Figura 4: Principais causas de vazamentos no ano de 2002 a 2009

Fonte: Asel-Tech, 2010.

Acidentes de origem tecnológica, a exemplo dos causados por corrosões, falha de soldagem e forças naturais, são previsíveis em sua maioria e podem ser prevenidos, ou pelo

menos interrompidos em casos de ocorrência. A Figura 4 apresenta as principais causas de ocorrências de vazamentos em dutos durante o período de 2002 à 2009 referente à pesquisa feita nos Estados Unidos.

A Figura 5 apresenta o local das ocorrências dos vazamentos e nota-se que a maior parte deles ocorre no corpo do duto. Isto justifica a importância de um bom sistema de detecção e localização de vazamentos em dutos.



**Figura 5: Locais de ocorrência de vazamentos no ano de 2002 a 2009**

**Fonte: Asel-Tech, 2010.**

## 2.2 Dutos: características gerais

Dados históricos indicam que o início do uso de tubulações foi dado a 5000 anos atrás na China, Egito e na área hoje conhecida como Iraque, porém a necessidade do seu uso tem sido acelerada desde o surgimento da revolução industrial. Nos dias de hoje, os dutos são usados nas mais diversas aplicabilidades; são projetados para ter uma vida útil de 40 anos ou mais e o uso requer um grande investimento inicial. Dutos de petróleo e gás podem ser muito longos, às vezes cruzando fronteiras dos países. Projetos de dutos são muitas vezes tão importantes que chegam a causar complicações geopolíticas, fazendo com que longas e cuidadosas negociações com muitos grupos de interesse se tornem uma parte essencial do projeto (BRATLAND, 2009).

Atualmente os dutos são o meio de transporte preferencial para interligar as fontes de produção, refinarias e, em algumas situações, os centros consumidores.

*“A primeira linha de dutos de que se tem registro no Brasil data de 1942. Esta ligava a Refinaria Experimental de Aratu ao Porto de Santa Luzia,*

*na Bahia. Nesta época os dutos eram feitos de cobre e tinha pouca resistência à corrosão. Entretanto, a evolução da tecnologia metalúrgica tem permitido o desenvolvimento de tubos à base de aços especiais, com maior resistência e menor peso. Assim sendo, o desgaste do material destes dutos mais antigos, associado a possíveis problemas advindos do meio externo, como erosão e colapso do terreno onde estão situados, podem provocar danos à tubulação, resultando em vazamentos de óleo, o que torna a atividade de transporte petrolífero uma fonte de graves impactos ambientais.” (COLOMBAROLI, 2009)*

Acidentes ocorrem constantemente na atividade petrolífera, tais como o ocorrido em 4 de novembro de 2000, quando o Navio Vergínia II tentava atracar no TEBAR - Terminal Marítimo “Almirante Barroso”. Um erro na manobra causou uma fissura no casco do navio e 86 mil litros de óleo cru foram derramados e, por conta da maré, o óleo atingiu cerca de 18 praias do litoral norte de São Paulo.

Colombaroli (2009) cita um acidente ocorrido em 4 de junho de 2003, quando o navio norueguês Nordic Marita no píer Sul do Tebar (Terminal Marítimo Almirante Barroso), a serviço da Petrobrás/Transpetro, tentava descarregar em um dos terminais da Petrobrás no Litoral do estado de São Paulo. O acidente foi causado devido à problemas na conexão do braço de carregamento – mangote de ligação entre a embarcação e o terminal. O volume de petróleo vazado foi estimada entre 40 a 60 mil litros, onde pelo menos 15 mil litros vazaram no canal de São Sebastião.



**Figura 6: Oleoduto rompido em 2010 no estado de Michigan.**

**Fonte: Spear, 2012.**

Em julho de 2010, um duto foi rompido no estado de Michigan (norte dos Estados Unidos) e cerca de 1,1 milhões de galões de óleo cru vazaram e invadiram o rio Kalamazoo.

O oleoduto rompido, Figura 6, possui 76 centímetros de diâmetro e pertence à empresa canadense Enbridge Inc.

Um vazamento de óleo no píer de atracação do Terminal Aquaviário Almirante Barroso (Tebar) da Petrobras em 05 de abril de 2013 atingiu diversas praias do litoral norte de São Paulo. A Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) afirmou que o acidente foi ocasionado por um problema em uma válvula.

### **2.3 Detecção de vazamentos em dutos**

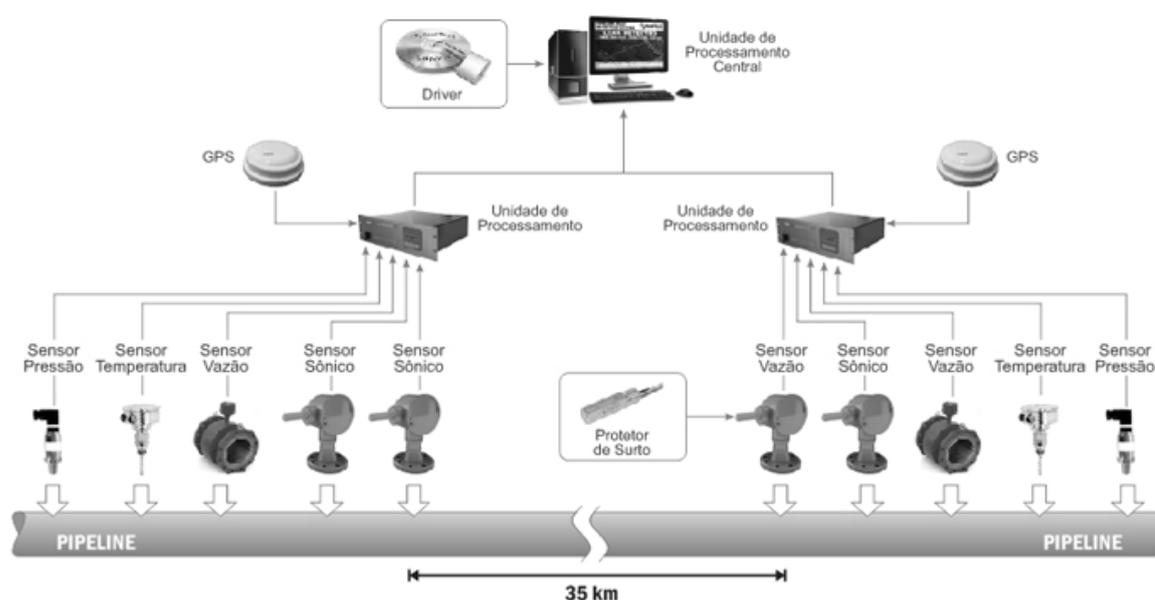
Agbakwuru (2011) distribui as causas de vazamentos em dutos em quatro principais classes: operacional, estrutural, não intencional e intencional. A classe operacional inclui todos os vazamentos resultantes de operações com dutos de óleo e gás como, por exemplo, erro humano e falha de equipamento. A classe de problemas estruturais inclui falhas em dutos como explosão, colapso, fadiga, fratura, corrosão, ruptura, etc. Os danos não intencionais são muitas vezes causados por trabalhadores em construções nas proximidades do duto. Os danos intencionais são causados por ataques terroristas, sabotagem/roubo. O menos comum, porém muito perigoso, é o vazamento por ruptura. Neste, o fluxo de escape de fluidos é maior, o que acarreta em danos significativos para o meio ambiente. Com um bom sistema de detecção de vazamentos, uma ruptura é facilmente identificada. Vazamentos causados por corrosão ou erosão, por exemplo, são menores, porém são mais difíceis de serem detectados. Essa dificuldade é uma das motivações de estudos para aperfeiçoar técnicas de detecção de fugas.

Um sistema de detecção de vazamentos rápido e eficaz possibilita a tomada de medidas emergenciais, como a parada do bombeio e o fechamento das válvulas, evitando ou diminuindo a ocorrência de catástrofes. Assim, o projeto de um duto precisa considerar fatores como o fluido a ser transportado (óleo/gás/sólidos, mono/multifásico), comprimento, capacidade requerida, o ambiente (acima/abaixo da terra ou sumerso no mar, clima quente/frio, zona rural/urbana) e condições operacionais (válvulas, compressores, bombas, etc.) (BRATLAND, 2009).

O uso de simulação baseada em sistemas de detecção de vazamento vem se tornando cada vez mais popular e muitas companhias comercializam módulos de softwares para esse propósito. Dois diferentes princípios de detecção estão atualmente em uso: redes neurais e cálculos baseados em modelos de fluxo. A precisão requerida para a detecção de vazamento tem um impacto na complexidade e no custo do sistema (BRATLAND, 2009). É importante

analisar todos os dados do planejamento do sistema para poder desenvolver um procedimento operacional apropriado e aplicar o método de detecção de vazamento adequado.

A Figura 7 ilustra uma arquitetura básica de aplicação de sistemas de detecção de vazamento. Sensores são dispostos ao longo do duto. Quando ocorre um vazamento, os sensores enviam sinais para unidades de processamentos e estas repassam os dados para a unidade de processamento central, onde, com auxílio de softwares são encontrados os valores acerca do vazamento, como localização e dimensão, e é dado o comando de interrupção da operação do duto.



**Figura 7: Arquitetura básica de aplicação de sistema de detecção de vazamentos.**

**Fonte: Asel-Tech, 2010.**

Além da classificação já mencionada por Agbakwuru (2011), Aguiar (2010) relata que as técnicas de detecção de vazamento são classificadas em três categorias: observacionais, baseados em *hardwares* e baseados em *softwares*.

### 2.3.1 Método observacional

O sistema de detecção baseado na observação é o mais simples para detectar vazamentos e consiste basicamente na inspeção visual, que pode ser feita a partir de câmeras de segurança, inspeções aéreas ou câmeras infravermelho.

Por questões óbvias esse método é aplicável em dutos de curto comprimento e que estejam em locais de acesso fácil.

### 2.3.2 Métodos baseados em *hardwares*

Os métodos de detecção baseados em *hardwares* utilizam dispositivos eletrônicos para a detecção e localização direta de um vazamento e são classificados de acordo com o princípio de funcionamento desses dispositivos. Estes métodos serão discutidos a seguir.

#### 2.3.2.1 Método que utiliza sensor de infravermelho

O método térmico utiliza câmeras de infravermelho para medir a energia térmica radiada em torno da tubulação. Temperaturas diferentes do perfil esperado em uma região podem indicar a presença de vazamentos. Este método pode cobrir vários quilômetros da tubulação em um dia com a patrulha em veículos, helicópteros ou sistemas portáteis.

A termografia em infravermelho é também usada na agricultura, engenharia civil, indústria de geração de energia elétrica, indústria automotiva, medicina, indústria manufaturada, proteção ambiental e proteção de patrimônio histórico, enquanto que vem sendo cada vez mais utilizada para a detecção de vazamento de fluidos (DUDIC *et al.*, 2012).

Sandberg *et al.* (1989) citam um sistema experimental onde foi utilizado um sensor remoto para identificar a presença de metano e etano na atmosfera em torno do gasoduto através do espectro infravermelho das substâncias. O sensor foi projetado para detectar os gases em pequenas concentrações por meio de picos no espectro infravermelho.

Os sensores detectam vazamentos direta e indiretamente. A detecção indireta pode ser feita pela análise do solo para saber se há presença de hidrocarbonetos. Van Der Meijde *et al.* (2012) afirmam que trabalhos realizados em laboratórios vêm estudando apenas locais onde a vegetação é densa. A pesquisa investiga solos com pouca vegetação.

#### 2.3.2.2 Método acústico

A detecção de vazamento pelo método acústico se baseia na detecção de sons, com auxílio de sensores, para a identificação de escape de fluidos. Em algumas situações são

utilizados sensores de ruídos ultrassônicos, que são instrumentos que detectam ruídos na faixa de frequência ultrassônicas produzidos pelo vazamento. O ultrassom é um som com frequência superior ao limite da audição humana. O ser humano capta sons de frequência de 10 Hz à quase 20 kHz enquanto que o ultrassom encontra-se na faixa entre 20 kHz e 100 kHz. A Figura 8 ilustra um sensor acústico da marca Asel-Tech.

Atualmente o ultrassom é muito utilizado na medicina, onde o diagnóstico por ultrassom não-invasivo é aplicado para exames de órgãos internos. Além da medicina, o ultrassom é largamente nas indústrias de processo, química, petroquímica, alimentícia, metalúrgica, assim como na engenharia civil e arquitetura. É também usado para a medição de quantidades físicas como o fluxo, nível de fluido, espessura de materiais, comprimento, área superficial, volume, velocidade, etc. (DUDIC *et al.*, 2012).



**Figura 8: Sensor acústico**

**Fonte: Asel-Tech, 2010.**

Dudic *et al.* (2012) exibiram a detecção de vazamento por ultrassom em três categorias: ativa, passiva e vibroacústica.

Geralmente sensores acústicos (microfones) são instalados ao longo da tubulação para detectar os sons emitidos por esta. Em diversos casos os sensores são conectados a uma placa conversora Analógica/Digital/Analógica (ADA) e esta a um computador, que estuda o sinal captado para detectar um possível vazamento. O software instalado no computador tem que ser desenvolvido de modo a ser capaz de filtrar ruídos externos. Um circuito elétrico compatibiliza o sinal proveniente do microfone com aquele compreendido pela placa ADA. Segundo Sousa (2007), um circuito pode apresentar várias etapas, entre elas a utilização de filtros passa faixa e de amplificadores.

Dudic *et al.* (2012) realizaram um estudo de comparação do potencial, das limitações, da confiança e da precisão entre duas metodologias distintas de detecção de vazamento: o método de detecção por ultrassom e o método da termografia infravermelha. Os autores testaram o escoamento de ar comprimido em uma mangueira contendo um

orifício de vazamento. Os testes foram realizados para orifícios de diâmetro de 0,5; 0,7; 1,0; 1,3; 1,5 e 2,0 mm e para cada orifício foram testados escoamento com pressões de 4, 5, 6, 7 e 8 bar. A intensidade do som emitido pelo vazamento é captada por detector ultrassom.

Os resultados de Dudic *et al.* (2012), expostos na Tabela 2, mostraram que, para orifícios de diâmetros entre 0,5 e 1,0 mm, há uma variação bem notável do ruído emitido pelo vazamento, o que não é observado para diâmetros iguais ou maiores que 1,3 mm, onde o som pouco varia com o aumento de tamanho e com a mudança de pressão.

**Tabela 2: Níveis de decibéis emitidos pelo vazamento de ar comprimido como função da pressão e do diâmetro do orifício**

Fonte: Dudic *et al.*, 2012.

Pressão [bar]	Diâmetro do orifício [mm]					
	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	2,0
4	60	66	71	73	74	75
5	63	68	72	73	74	75
6	66	69	72	73	74	75
7	69	71	73	74	74	75
8	72	73	74	74	75	75

Para testar a metodologia de infravermelho, devido à incapacidade de medir diretamente a temperatura do ar comprimido, Dudic *et al.* (2012) realizaram a medida da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) usando a Equação 01, onde a temperatura da mangueira é representada por  $T_{material}$  e a temperatura através do orifício é escrita como  $T_{orificio}$ . A temperatura do material  $T_{material}$  é dada pela divisão por três do somatório da temperatura da mangueira antes do orifício  $T_1$ , após o orifício  $T_2$  e abaixo do orifício  $T_3$ .

$$\Delta T = T_{material} - T_{orificio} \quad (01)$$

$$T_{material} = (T_1 + T_2 + T_3) / 3 \quad (02)$$

Dudic *et al.* (2012) verificaram (Tabela 3) que a mudança de temperatura é muito sensível com o aumento do diâmetro do orifício de vazamento e pouco sensível com a pressão do sistema. Diante dos resultados, os autores concluíram que a ultrassom pode ser usada para a detecção de orifícios de todas as dimensões, mas a quantificação é indicada para vazamentos pequenos, cujo nível de som emitido seja igual ou menor que 74 decibéis.

A câmara de infravermelho é indicada para quantificar grandes perdas, onde o som emitido seja maior do que 74 dB ou o diâmetro do orifício de vazamento seja entre 1,3 e 2,0 mm.

**Tabela 3: Variações de temperatura (°C) como função do diâmetro de orifício e da pressão.**

Fonte: Dudic *et al.*, 2012.

Pressão [bar]	Diâmetro do orifício [mm]					
	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	2,0
4	0,5	1,4	2,2	2,9	3,6	4,3
5	0,6	1,5	2,7	3,4	4,1	4,7
6	0,8	1,6	3,0	3,7	4,4	4,9
7	0,9	1,7	3,2	4,1	5,1	5,4
8	1,0	1,9	3,3	4,6	5,5	5,9

### 2.3.2.3 Método que utiliza sensor de ação seletiva

Sandberg *et al.* (1989) desenvolveram um sistema de sensor capaz de detectar vazamentos de grande parte dos combustíveis e solventes existentes. O sistema é constituído por um módulo de alarme e um cabo sensor. O cabo tem 2 km de comprimento e é instalado ao longo da tubulação. O cabo é revestido de um polímero condutivo que ao entrar em contato com o hidrocarboneto aumenta de volume e faz contatos elétricos com dois sensores, acionando o alarme para avisar a presença de vazamento.

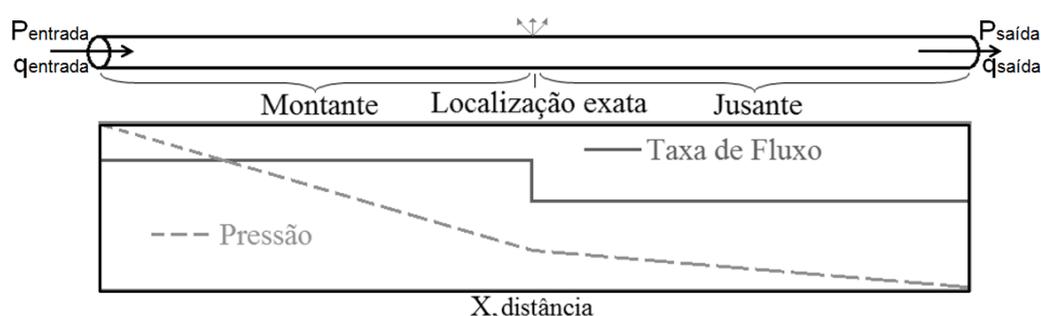
### 2.3.2.4 Onda de pressão negativa

A ocorrência do vazamento em dutos provoca uma queda de pressão repentina no local e origina uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som nos sentidos à montante e à jusante até o alcance um novo estado estacionário. Porém, como afirma Sousa (2007), ao analisar o comportamento do escoamento, torna-se necessária uma filtragem dos dados de pressão, pois bombas, abertura ou fechamento de válvulas e outros procedimentos normais também causam ondas de pressão negativas.

Sousa (2007) estudou o experimentalmente método acústico e o método de análise de pressão em um escoamento de gás em um duto de 60 metros de comprimento e 0,5 polegadas de diâmetro conectado a um vaso de pressão na entrada. Os vazamentos de gás

foram simulados por meio de um orifício de diâmetro variando entre 0,4 e 5,0 milímetros. Duas situações foram montadas. Na primeira o transdutor de pressão e o sensor acústico foram conectados ao vaso. Na segunda o transdutor e o sensor foram colocados no início do tubo. Analisando todas as simulações, a autora concluiu que o método acústico se apresentou mais eficiente na detecção do vazamento em relação ao método da análise do transiente de pressão. Para toda faixa de diâmetro de orifícios utilizada as amplitudes dos ruídos sonoros mostraram nitidamente a presença de vazamento ao passo que os transientes de pressão mostraram variações que identificassem a presença de vazamento para orifícios menores que 2,0 milímetros

A ocorrência de um vazamento divide o sistema de duto em três partes: localização exata, antes e depois do vazamento, como ilustrado na Figura 9. Edrisi e Kam (2013) mostram que os perfis de pressão e de taxa de fluxo, ao longo do duto, indicam a localização de um vazamento.



**Figura 9: Comportamento de pressão e taxa de fluxo ao longo de um duto para escoamento com a presença de um vazamento central.**  
**Fonte: Adaptado de Edrisi e Kam, 2013.**

### 2.3.3 Métodos baseados em *softwares*

Nos métodos de detecção baseados em *softwares*, o computador é utilizado como ferramenta auxiliar na detecção de vazamento e trabalha em conjunto com os sensores visando detectar qualquer falha. Segundo Aguiar (2010), esses métodos possuem um custo maior e requerem uma grande capacidade de processamento, tornando-se inviável a sua aplicação em oleodutos curtos. Normalmente dados do processo, como pressão, vazão, temperatura e outros são captados por um sistema de controle e aquisição de dados (do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*) e depois analisados para detectar possíveis vazamentos.

### 2.3.3.1 *Balanço de volume ou massa*

O método mede a diferença entre o volume/massa de fluidos que entra na tubulação e o que sai. Se essa diferença for maior que uma determinada tolerância estabelecida (2% para líquidos e 10% para gases), será gerado um alarme de vazamento. A desvantagem do método está na chance de ocorrência de alarmes falsos, visto que a taxa de fluxo depende de parâmetros como a temperatura, pressão, densidade e viscosidade, e mudanças nesses parâmetros podem acarretar em volumes/massas distintos de entrada e de saída. Sugere-se o uso de um modelo matemático ou medições das variáveis citadas ao longo do duto para diminuir a incidência de alarmes falsos (Sandberg *et al.*, 1989; Sousa, 2007). Este método não fornece a localização do vazamento, indicando apenas a presença ou ausência do vazamento.

### 2.3.3.2 *Mudança de pressão ou fluxo*

Nessa técnica considera-se que a ocorrência do vazamento está ligada a uma alta taxa de mudança da pressão e do fluxo a montante e a jusante. A taxa de variação de pressão ou fluxo ao longo do duto é medida periodicamente. Se em um determinado momento essa taxa for maior que um padrão definido, o alarme de vazamento será acionado. Por meio de alguns ajustes nos dados o vazamento pode ser localizado com razoável precisão. Este método pode ser aplicado apenas ao escoamento de fluidos incompressíveis em estado estacionário, caso contrário pode levar a alarmes falsos (COLOMBAROLI, 2009).

### 2.3.3.3 *Modelagem matemática em tempo real*

A maioria dos sistemas que utilizam a modelagem matemática possui a mesma essência: a solução de equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia.

As condições de contorno são um conjunto limitado de dados do escoamento na tubulação, tais como a pressão e o fluxo, possibilita a estimativa da variável intermediária. Caso haja discrepância com as medições reais, provavelmente há vazamento(s).

Sousa (2007) destaca o trabalho de Fukushima relacionado com um sistema de detecção de vazamento de gás, funcionando desde 1997, instalado na tubulação Niigata –

Sendai de 250 km de extensão. Nesse sistema são medidas a pressão e temperatura em estações, distante 12 km entre si, bem como o fluxo de gás na entrada e na saída do duto. O sistema de detecção identifica automaticamente o local do vazamento e a sua taxa em tempo real. O vazamento mínimo detectado é de 1,1% da carga total. A localização só é possível para vazamentos com carga mínima de 1,8% (com atraso de 4 minutos e erro de localização médio de 20%). Um vazamento com carga máxima é detectado em 8 minutos e com 4% de erro de localização médio. A carga máxima se refere àquela que uma tubulação suporta sem que haja seu rompimento.

#### 2.3.3.4 Método estatístico

O método estatístico de detecção de vazamentos em tubulações utiliza dados de medidas disponíveis para detectar mudanças de fluxo e pressão para detectar vazamentos.

Sousa (2007) cita um trabalho que examinou a aplicação do ATMOS PIPE (*software* desenvolvido pela empresa *Atmos International* para detectar vazamentos em dutos estatisticamente), o qual opera em tubulações de gás e líquido, e calculou a probabilidade do vazamento, encontrando a dimensão e a localização aproximada do vazamento a partir de medidas de fluxo e pressão. O trabalho afirma que a taxa de alarmes falsos é muito baixa.

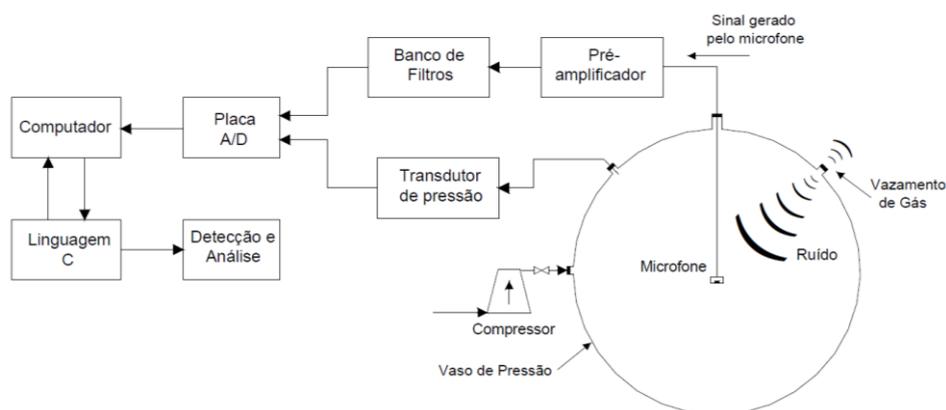
#### 2.3.3.5 Redes neurais artificiais

De acordo com Carvalho (2013), “redes neurais artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência”. O mesmo faz uma comparação com um ser vivo afirmando que “uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento; já o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios”.

Aplicados à detecção de vazamentos, sistemas de redes obtém dados de escoamentos em tubulações com e sem vazamentos e com estes geram-se dados que constituam padrões de operação. Posteriormente os sistemas são usados para verificar escapes de fluidos.

### 2.3.4 Detecção de vazamentos por computador *online*

Pavan (2005) apresentou o desenvolvimento e teste de uma técnica de detecção de vazamentos de gás em vasos de pressão através da detecção e análise em tempo real do ruído sonoro gerado pelo vazamento, bem como da variação de pressão interna do vaso. O autor realizou uma análise experimental, esquematizada na Figura 10, onde foi utilizado um botijão de gás como vaso de pressão, cuja capacidade é de 34,5 litros. A pressão no interior do vaso variou de 1 a 7 kgf/cm<sup>2</sup>. O orifício de vazamento variou no seu diâmetro de 0,1 a 4,0 mm. Vazamentos foram detectados quando o vaso de pressão operava em batelada e também com alimentação contínua de ar para o vaso.



**Figura 10: Esquema representativo da montagem experimental do teste de detecção on-line**

**Fonte: Pavan, 2005.**

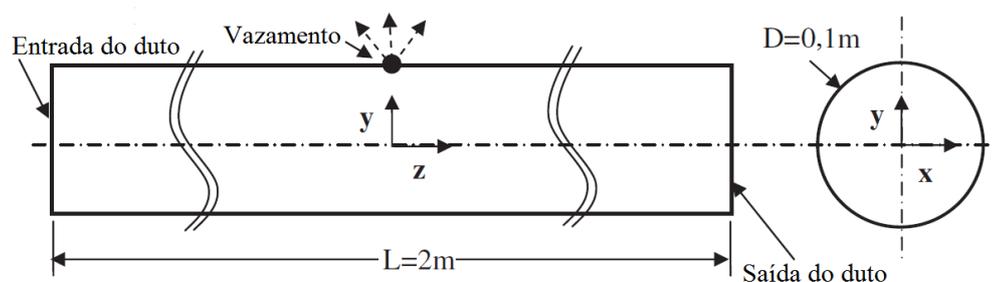
O vazamento libera um ruído, e este é captado por um microfone instalado no interior do vaso, ao passo que o mesmo vazamento causa uma variação de pressão que é sentida pelo transdutor de pressão (do tipo piezoelétrico). O sinal captado pelo microfone é amplificado e em seguida passa pelo banco de filtros passa-faixa de 1 kHz, 5 kHz e 9 kHz gerando três sinais contínuos em diferentes faixas de frequência. A placa A/D transfere os dados do transdutor de pressão e do banco de filtros para um computador que, com um programa em linguagem C, faz a aquisição *online* dos fenômenos ocorrentes no vaso de pressão, mostrando na tela do micro os dados coletados em função do tempo (PAVAN, 2005).

Os resultados obtidos para alimentações em batelada mostraram que a partir do instante de ativação do vazamento, a pressão no interior do vaso cai continuamente até que este se esvazie por completo. Observou-se que quanto maior o diâmetro do orifício utilizado, maior é a velocidade da queda de pressão. Pavan (2005) concluiu também que as amplitudes das frequências geradas pelo vazamento são diretamente proporcionais à pressão no interior do vaso e que o aumento no diâmetro do orifício eleva a amplitude do ruído gerado.

Para alimentações contínuas foi observado que a ocorrência de vazamento no vaso gera apenas uma pequena redução na pressão interna, e em alguns casos existe uma ligeira recuperação, permanecendo constante em seguida. Com relação à amplitude do ruído gerado, assim como nos casos em batelada, esta aumenta com o diâmetro do orifício de vazamento e é proporcional à pressão no interior do vaso (PAVAN, 2005).

### 2.3.5 Simulação numérica

Ben-Mansour *et al.* (2012) representaram, em um domínio tridimensional, um duto com diâmetro de 0,1 m e comprimento de 2 m, contendo um vazamento localizado no centro do duto ( $x = 0$ ,  $y = D/2$ ,  $z = 0$ ) como ilustra a Figura 11. Foi construída uma malha hexaédrica com mais de 540 mil células sobre o domínio. O vazamento tem formato retangular (1 mm x 1 mm). As simulações do escoamento de água foram realizadas com o *software* Fluent 6.2<sup>®</sup> e utilizou-se o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$ . Na região de vazamento foi adotada uma condição de contorno de pressão de saída igual à condição atmosférica (0 atm). Na entrada do duto foi imposta a condição de velocidade de 1 m/s. Na saída do duto foi adotada uma condição de pressão de saída no valor de 1 bar. Os autores afirmam que para evitar erosões, a velocidade de escoamento de água deve ser menor que 2,5 m/s.



**Figura 11: Modelo físico e sistema de coordenadas utilizados em escoamento de água**

**Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.**

Os resultados da simulação do escoamento permanente com o vazamento de dimensão de Ben-Mansour *et al.* (2012) apontam para um gradiente de pressão em torno do vazamento, como ilustra a Figura 12. A distribuição da pressão estática ao longo de uma linha paralela à linha central e 1 mm abaixo do vazamento é mostrada na Figura 13, onde nota-se uma queda brusca na pressão seguida de um leve aumento e diminuição. Ao tomar-se a distribuição da pressão estática ao longo da linha central, Figura 14, nota-se uma

pequena dobra em torno da posição do vazamento. Logo, quanto mais próxima a linha estiver do vazamento, maior a percepção deste. Outro modo de descrever a dobra na pressão na linha central é olhar para o gradiente de pressão na direção do fluxo, Figura 15, onde observa-se claramente o sinal de existência de vazamento. Analisando o campo de velocidade em torno do vazamento, os vetores mostrados na Figura 16 indicam o aumento da velocidade de cerca de 1 m/s para cerca de 10 – 11 m/s na região em torno do vazamento.

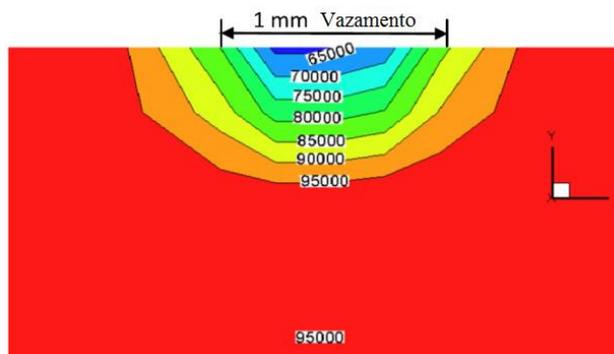


Figura 12: Campo de pressão em torno do vazamento (1 mm x 1 mm)

Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.

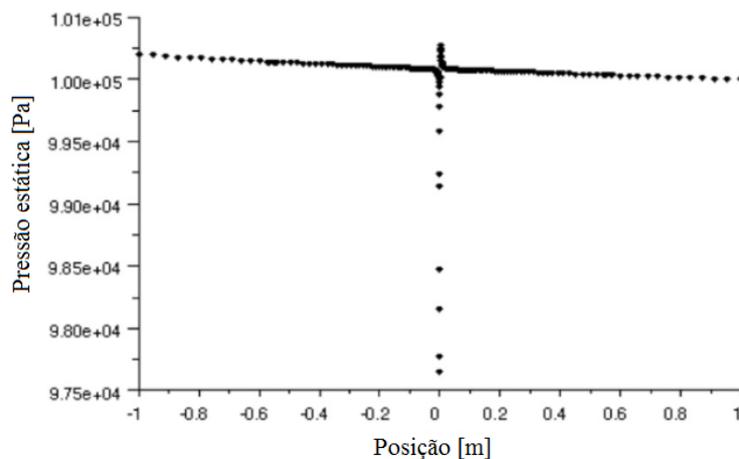


Figura 13: Variação de pressão ao longo do duto: 1 mm abaixo do vazamento

Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.

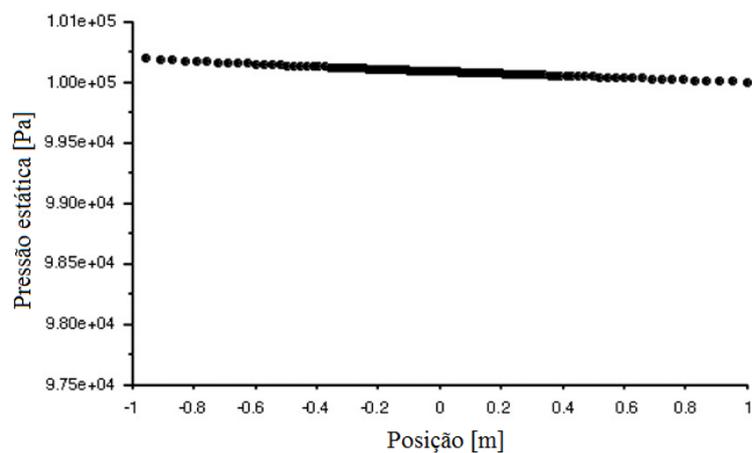


Figura 14: Variação de pressão ao longo da linha central

Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.

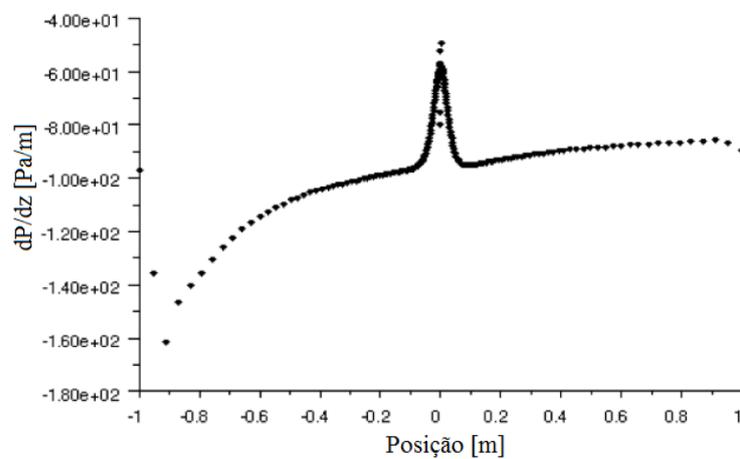


Figura 15: Variação do gradiente de pressão ( $dp/dz$ , Pa/m) ao longo da linha central

Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.

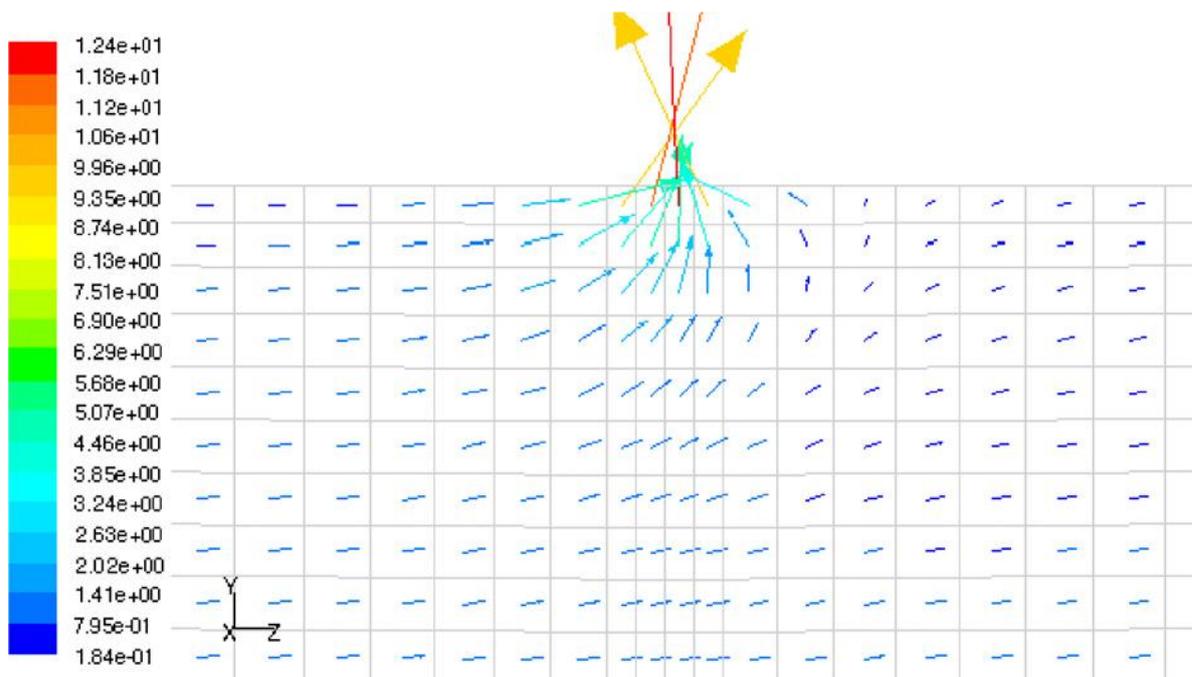


Figura 16: Campo de velocidade na vizinhança do vazamento

Fonte: Ben-Mansour *et al.*, 2012.

Sousa *et al.* (2013) simularam o escoamento ascendente de uma mistura bifásica e isotérmica de água e óleo. O domínio do escoamento consiste em um duto vertical de 8 metros de comprimento e 15 cm de diâmetro contendo um vazamento de 6 mm de diâmetro localizado à 4 m da secção de entrada do duto. A malha gerada sobre o domínio possui 327327 elementos hexaédricos. A simulação foi realizada no *software* ANSYS CFX 11.0. Os autores variaram a fração volumétrica de óleo no fluxo na entrada do duto em valores de 0,75 à 1 e notaram que quanto menor a fração de óleo maior é a fração volumétrica de água na mistura e, conseqüentemente, maior a vazão mássica atravessando o orifício de vazamento. Sousa *et al.* (2013) variaram as velocidades de entrada da mistura e perceberam que entre os valores de 0,75 à 1,5m/s a razão entre o fluxo mássico vazando e o fluxo mássico total na entrada diminuiu com o aumento da velocidade, mas entre os valores de 1,5 à 2m/s o efeito foi o inverso devido às forças inerciais do fluxo tornarem-se menor que as forças causadas pela diferença de pressão entre a entrada do duto e a região de vazamento. Contudo, foi possível perceber que o fluxo mássico total saindo pelo vazamento aumentou diretamente com a velocidade de entrada da mistura.

Sousa *et al.* (2013) notaram, ainda, que o surgimento do vazamento causa uma variação de pressão que é diretamente proporcional à fração volumétrica de água na mistura e à velocidade de escoamento da mesma.

Barbosa *et al.* (2012) simularam o escoamento elevatório trifásico e não isotérmico da mistura de óleo, água e gás. O domínio do escoamento consiste em um duto vertical de 7 metros de comprimento e 12,5 cm de diâmetro contendo um vazamento de 8 mm de diâmetro localizado a 3,5 m da seção de entrada do duto. A malha gerada sobre o domínio possui 330000 elementos hexaédricos. A simulação foi realizada com o auxílio de *software* ANSYS CFX 12.1. Na entrada do duto foram adotadas condições de contorno de velocidade de 1m/s para a água e 0,5 m/s para o óleo e para o gás, e de fração volumétrica de 0,8 de óleo, 0,15 de água e 0,05 de gás.

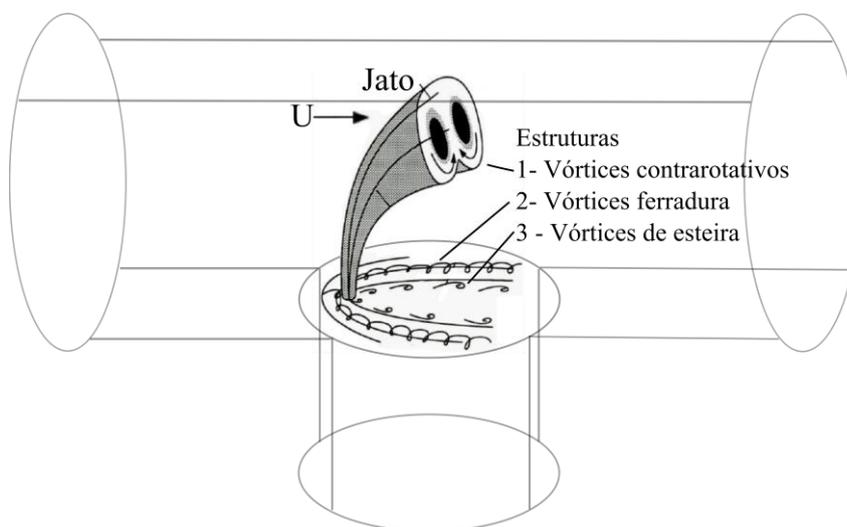
Os resultados da simulação numérica de Barbosa *et al.* (2012) apontaram para uma perturbação no campo de pressão com o surgimento de um vazamento. O campo de velocidade que esperadamente tem um valor máximo de 1,089 m/s, alcançou um pico de 1,861 m/s na região do vazamento com a ativação do mesmo. Os autores também avaliaram a composição do líquido que escapou pelo orifício de vazamento e observaram que quase 70% do volume de óleo, aproximadamente 30% do volume, é composto por água e que menos de 1 % é de volume gasoso.

## 2.4 Escoamento em conexões

Tem sido reportados na literatura uma gama de trabalhos sobre escoamento de fluidos em conexões. Diversos destes buscam encontrar uma boa modelagem matemática. Boa parte se remete ao estudo das flutuações de temperatura na conexão devido à entrada de fluidos com velocidades e temperatura distintas, mostrando os efeitos dessas flutuações sobre a parede do duto. Outra grande parte aborda o escoamento bifásico estudando como as conexões têm ajudado na separação de fluidos.

Lula (2006) relata que o estudo de jatos e, escoamento cruzado tem sido fonte de trabalhos de pesquisadores desde o início do século XX devido à variedade de aplicações em que é encontrado, a exemplo da saída de fumaças das chaminés, da dispersão da pluma de fumaça expelida por vulcões e da dispersão de efluentes líquidos em rios, mares e lagos.

A formação de vórtice, devido à turbulência, é o fenômeno responsável pela maior parte do processo de mistura turbulento. Os vórtices que ocorrem em escoamento cruzado estão ilustrados na Figura 17. Para estudar os perfis de velocidade e os campos de concentração nas regiões próximas à mistura, Lula (2006) realizou testes experimentais da mistura de água (duto principal) e traçador Rodamina B (duto secundário) em uma conexão acrílica.



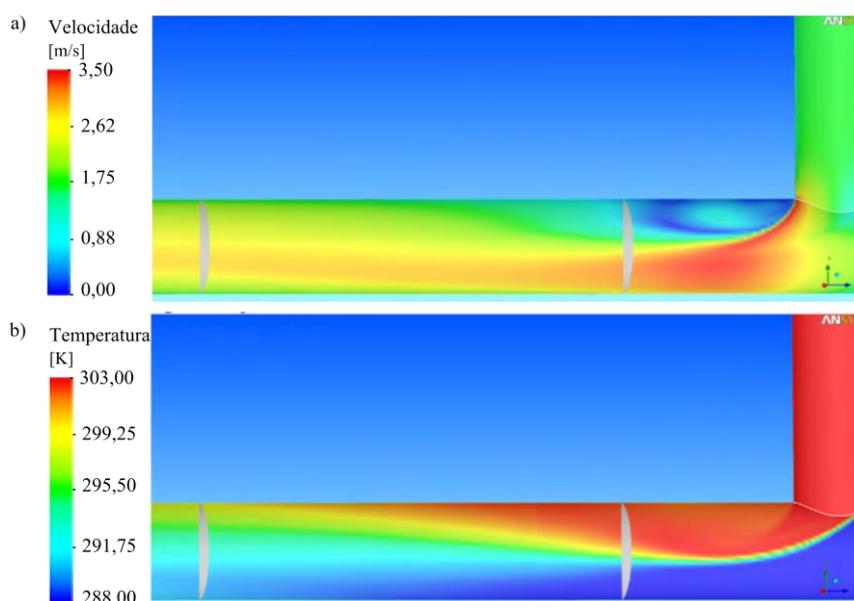
**Figura 17: Estruturas do jato em escoamento cruzado**

Fonte: Adaptado de Lula, 2006.

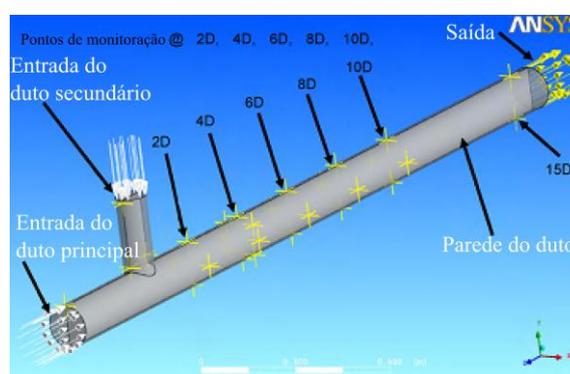
Frank *et al.* (2010) afirmam que a mistura turbulenta de fluidos com temperaturas diferentes através uma conexão têm pode levar à altas flutuações transientes de temperatura

nas adjacências das paredes, resultando em fadiga térmica cíclica e conseqüentemente, em falha na parede do duto.

Frank *et al.* (2010) reproduziram um escoamento experimental e não isotérmico de água em uma conexão tê, onde os diâmetros do duto principal e da ramificação são, respectivamente, 14 cm e 10 cm, conforme ilustra Figura 18. A água entra no duto principal com uma temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  e vazão volumétrica de 24 L/s, enquanto que na ramificação a água entra a  $30^{\circ}\text{C}$  e com uma vazão de 12 L/s. A Figura 19 ilustra os vórtices desenvolvidos à jusante da conexão. A

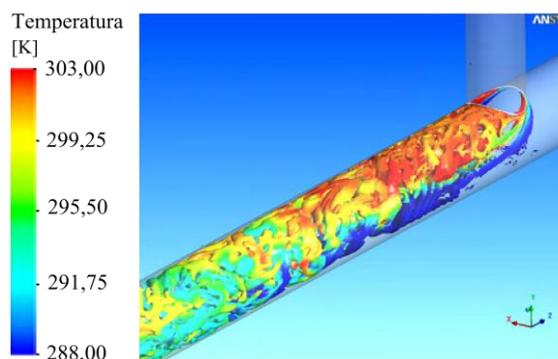


**Figura 20** mostra os campos de velocidade e de pressão ao longo da tubulação, onde observa-se que logo após a conexão, a parede superior do duto sofre maiores temperaturas e, portanto, está mais propensa a fadiga térmica. Os autores testaram alguns modelos de turbulência e concluíram que o modelo SST-SAS fornece os resultados que melhor se aproximam dos experimentais.



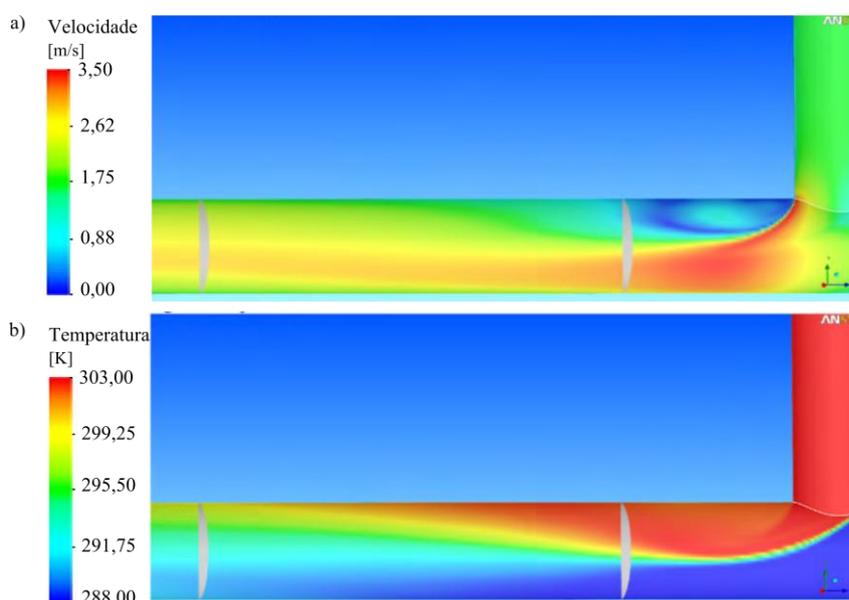
**Figura 18:** Geometria e condições de contorno para a reprodução do experimento térmico

Fonte: Frank et al., 2010.



**Figura 19:** Estrutura de vórtices desenvolvida a jusante da conexão tê.

Fonte: Frank et al., 2010.



**Figura 20:** Escoamento térmico de água na conexão tê via campo de (a) velocidade e de (b) pressão.

Fonte: Frank et al., 2010.

Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) construíram um aparato experimental para investigar o perfil de velocidades e de temperatura de um escoamento em conexão tê em acrílico, onde o fluido de trabalho (água) entra no duto principal e no duto secundário com velocidades e temperaturas distintas. As condições experimentais e as regiões onde foram medidas as velocidades e temperaturas locais (posições 1 e 2) são ilustradas na Figura 21. Essas medidas foram feitas, respectivamente, por um controlador de temperatura constante e um anemômetro de fio quente. Os autores reproduziram o experimento em CFD variando as razões de velocidade conforme a Tabela 4. A razão de velocidade,  $r$ , é a razão entre as velocidades da água quente,  $V_q$ , e a água fria,  $V_f$ . As dimensões do domínio numérico são descritas na Figura 22. Os autores utilizaram o *software* FLUENT e aplicaram o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ . Todas as simulações foram realizadas em condições permanentes. As

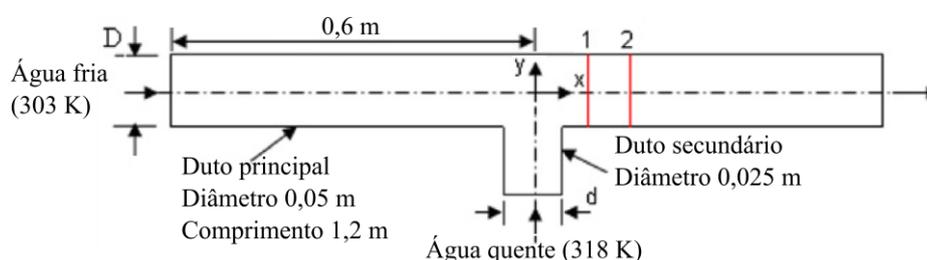
paredes do duto foram consideradas adiabáticas e sem deslizamento. Os fluxos mássicos de entrada têm os mesmos valores que os experimentais (Tabela 4). A variação da densidade da água, devido à flutuação da temperatura, foi considerada usando a aproximação de Boussinesq (Equação 03):

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (03)$$

**Tabela 4: Condições experimentais da mistura não isotérmica em conexão tê acrílica**

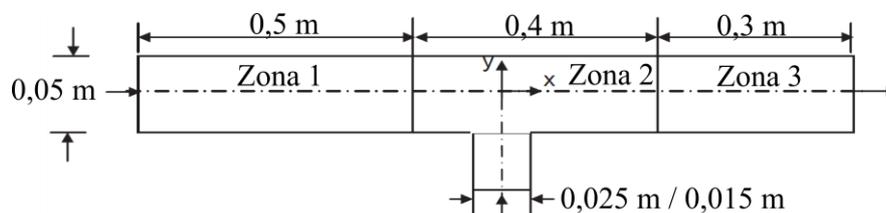
Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.

Razão de velocidade, $r=V_q/V_f$	Duto principal			Duto secundário		
	Diâmetro [mm]	Velocidade ' $V_f$ ' [m/s]	Temperatura ' $T_f$ ' [K]	Diâmetro [mm]	Velocidade ' $V_q$ ' [m/s]	Temperatura ' $T_q$ ' [K]
0,5	0,05	1	303	0,025	0,5	318
1	0,05	0,5	303	0,025	0,5	318
2	0,05	0,5	303	0,015	1	318
4	0,05	0,33	303	0,015	1,32	318



**Figura 21: Conexão tê acrílica usada para testes experimentais de mistura térmica.**

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.



**Figura 22: Domínio computacional para a simulação em CFD da mistura térmica em conexão tê acrílica.**

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.

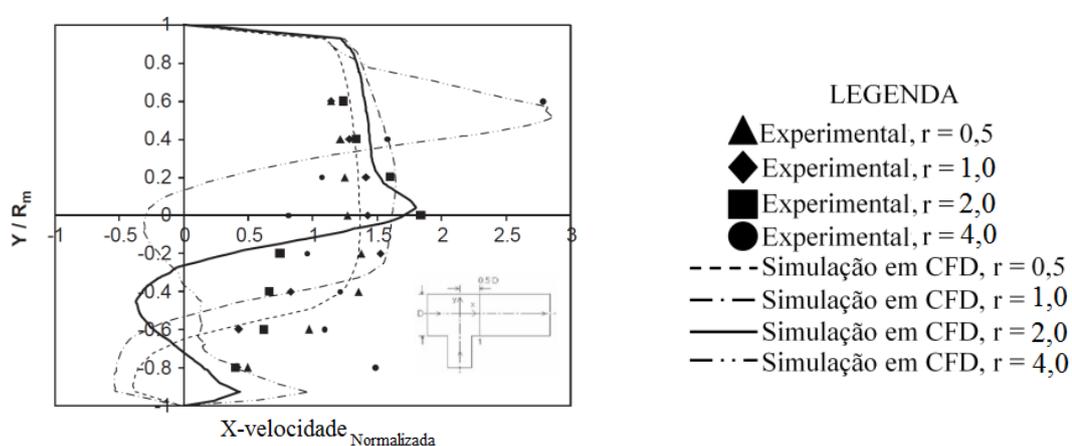
O valor da velocidade no eixo  $x$  (Figura 23 e 24) é equivalente à velocidade do duto principal. Para adimensionalizar o valor da temperatura mostrada por Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) nas Figuras 25 e 26, a temperatura média foi normalizada como:

$$T_{m_{normalizado}} = \frac{(T - T_{frio})}{(T_{quente} - T_{frio})} \quad (4)$$

onde  $T$  é a temperatura medida,  $T_{frio}$  é igual a 303 K e  $T_{quente}$  vale 318 K.

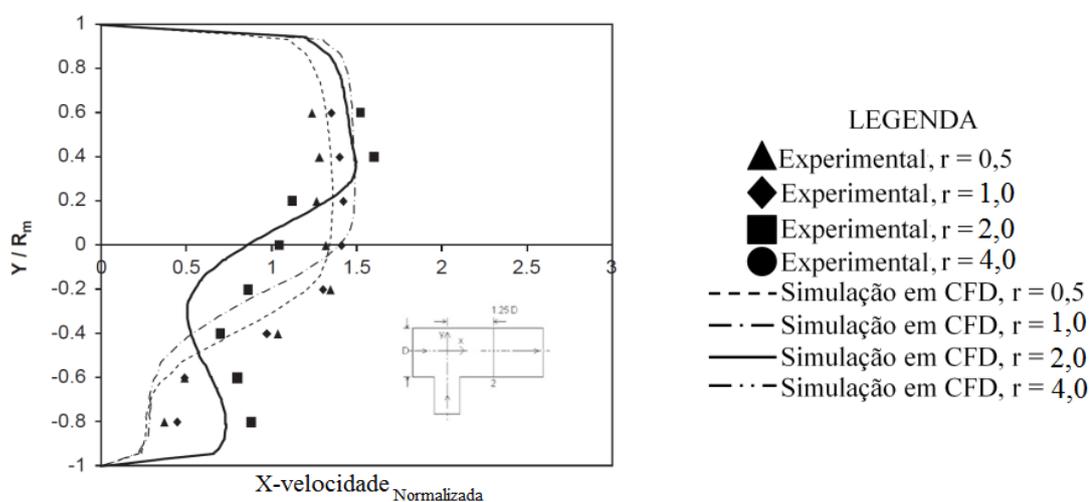
O eixo  $y$  foi adimensionalizado dividindo-se o valor ao longo do eixo pelo valor do raio máximo do duto,  $R_m$ , que nesse estudo é dado por  $R_m = 0,025$  m.

As Figuras 23 e 24 mostram as distribuições de velocidade no eixo  $x$  para as razões de velocidade expostas na Tabela 4. As Figuras 25 e 26 mostram as distribuições de temperatura. Observa-se uma concordância entre os dados experimentais e os numéricos. A Figura 27 mostra os campos de velocidade.



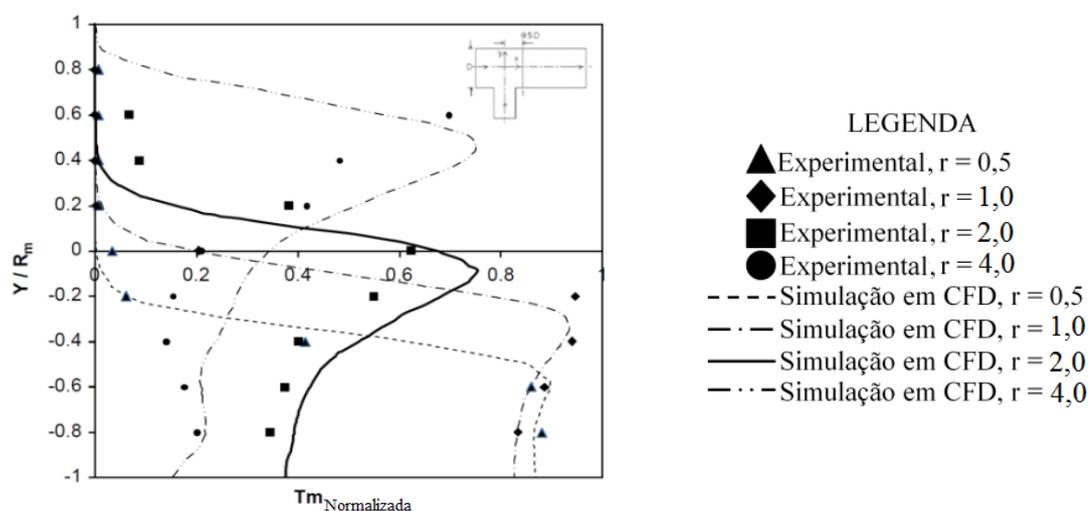
**Figura 23: Distribuição de velocidade na linha 1 da Figura 21 em  $x = 0,5D$**

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.



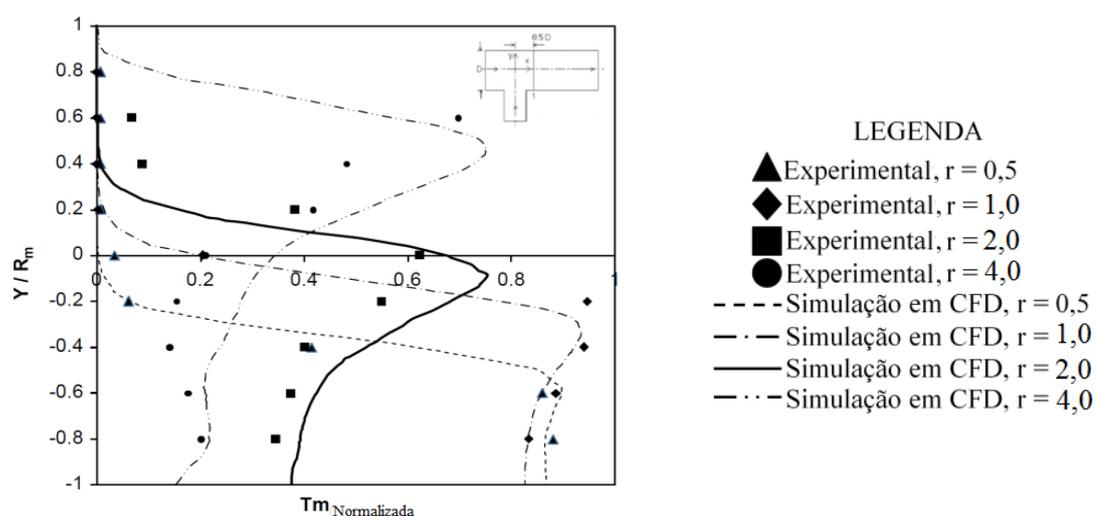
**Figura 24: Distribuição de velocidade na linha 2 da Figura 21 em  $x = 1,25D$**

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.



**Figura 25:** Distribuição de temperatura média na linha 1 da Figura 21 em  $x = 0,5D$

Fonte: Naik-Nimbalkar et al., 2010.



**Figura 26:** Distribuição de temperatura média na linha 2 da Figura 21 em  $x = 1,25D$

Fonte: Naik-Nimbalkar et al., 2010.

Kamaya e Nakamura (2011) estudaram o escoamento tridimensional em uma conexão tê vertical, como ilustrado na Figura 28, onde a água entra no duto principal com uma temperatura de 321 K e velocidade de 1,46 m/s, e na ramificação à 306 K e 1 m/s. Os autores utilizaram o software CFX-10 (Ansys, Inc.) para gerar a malha sobre o domínio, Figura 29, e realizar a simulação numérica transiente. Os autores observaram a distribuição das tensões de Von Mises no duto, como ilustrado na Figura 29. As tensões se tornam máximas na borda da conexão tê e uma tensão relativamente grande foi observada a jusante da conexão. As Figuras 30 e 31 ilustram o campo de tensões circunferenciais e axiais após 10 segundos de escoamento. As regiões que sofrem maiores tensões são aquelas onde mais facilmente ocorrerão fraturas.

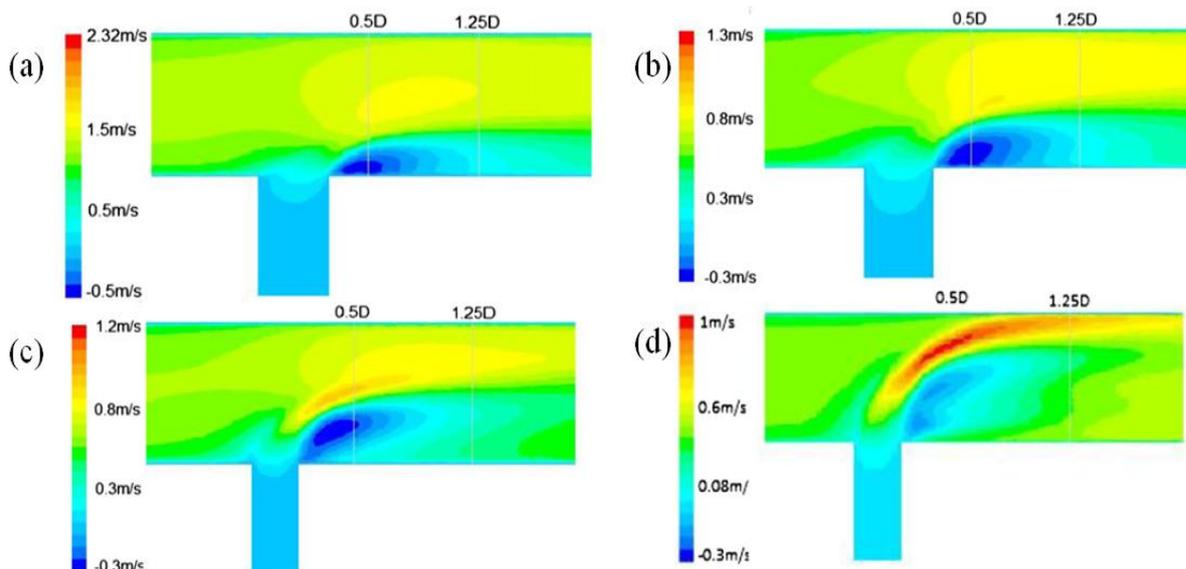


Figura 27: Campos de velocidade para (a)  $r = 0,5$ , (b)  $r = 1$ , (c)  $r = 2$  e (d)  $r = 4$ .

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.

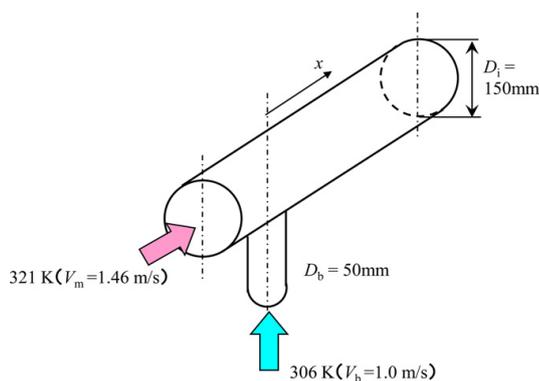


Figura 28: Esquema experimental analisado numericamente

Fonte: Kamaya e Nakamura, 2011.

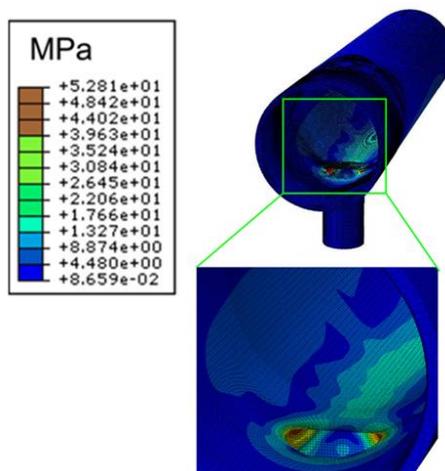
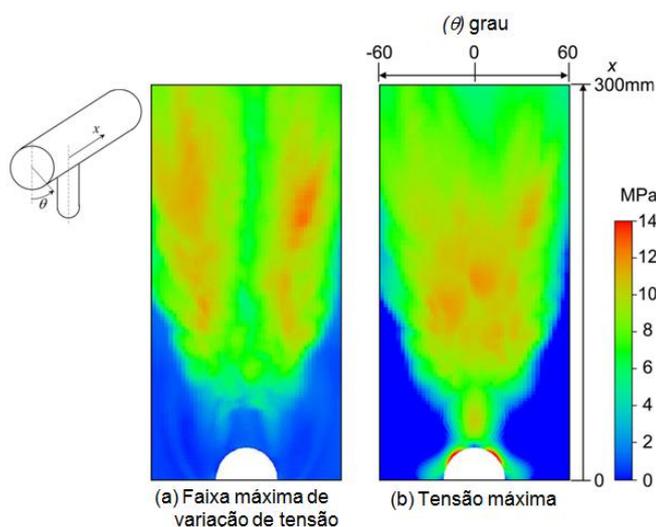


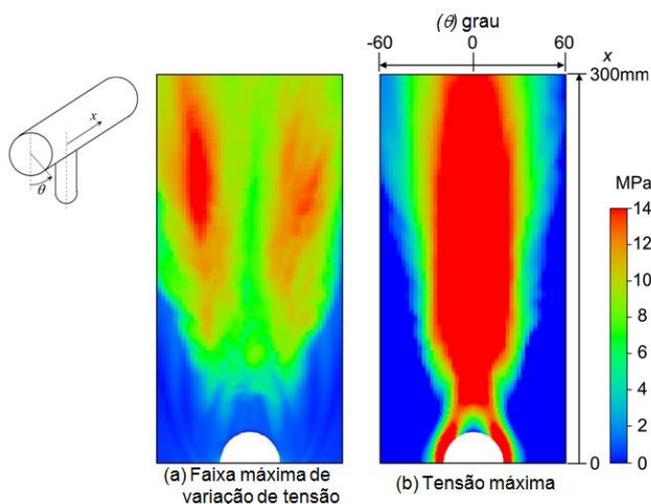
Figura 29: Tensões de von Mises obtidas após simulação numérica

Fonte: Kamaya e Nakamura, 2011.



**Figura 30: Tensões circunferenciais**

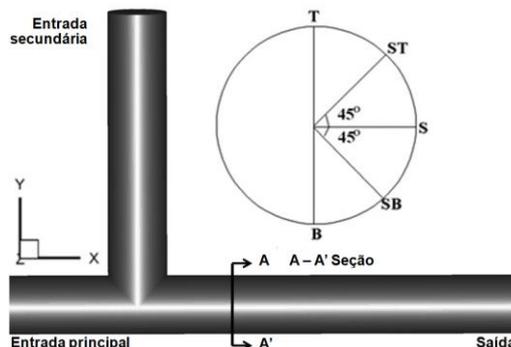
**Fonte: Kamaya e Nakamura, 2011.**



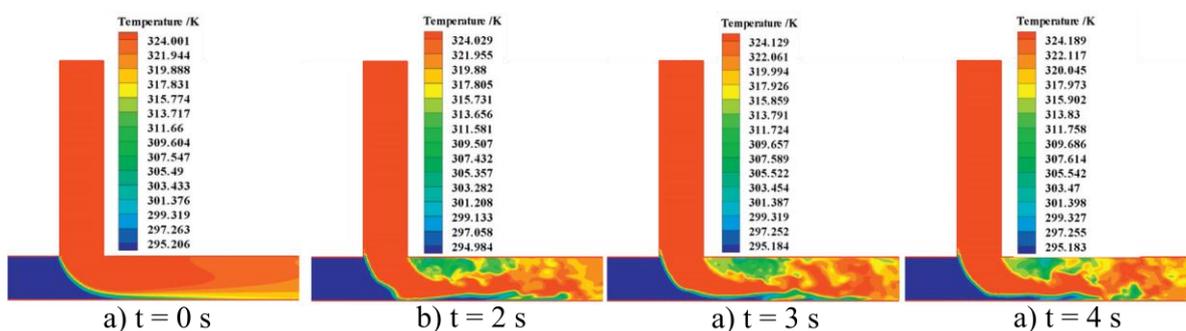
**Figura 31: Tensões axiais**

**Fonte: Kamaya e Nakamura, 2011.**

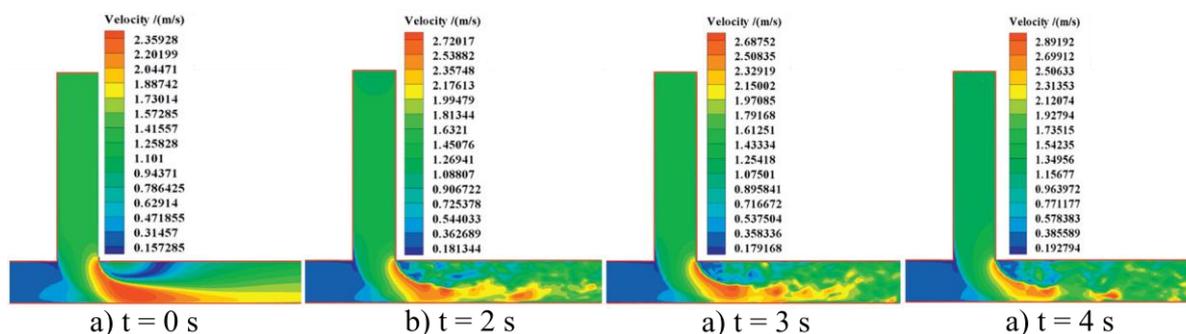
Ming e Zhao (2012) simularam, com o *software* FLUENT, o escoamento de água em uma conexão tê horizontal, conforme ilustra a Figura 32. As condições de contorno adotadas foram: na entrada principal a água foi injetada com uma temperatura de 293,15 K e velocidade de 0,27 m/s, enquanto que na entrada da ramificação adotou-se uma temperatura de 326,05 K e velocidade de 1,26 m/s. Para avaliar a sensibilidade dos resultados com o tamanho da malha, quatro casos foram simulados sob as mesmas condições. Escolheu-se a malha com 1265424 elementos, pois, aumentando-se o tamanho desta não houve mais variações significativas nos perfis de velocidade e de temperatura. Testaram-se os modelos de turbulência RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e LES (*Large Eddy Simulation*) e foi possível perceber que o modelo LES mostrou com mais clareza os vórtices formados no interior do duto.



**Figura 32: Modelo geométrico da conexão tê utilizado no trabalho de Ming e Zhao (2012)**  
**Fonte: Ming e Zhao, 2012.**



**Figura 33: Comparação da distribuição da temperatura com diferentes tempos físicos**  
**Fonte: Ming e Zhao, 2012.**



**Figura 34: Comparação da distribuição da velocidade com diferentes tempos físicos**  
**Fonte: Ming e Zhao, 2012.**

Ming e Zhao (2012) analisaram a flutuação da velocidade e da temperatura do escoamento na conexão e, como mostram as Figuras 33 e 34, no início do escoamento a superfície superior do duto está mais susceptível a fadiga térmica.

Gan e Riffat (2000) usaram o pacote comercial FLUENT para simular o escoamento de ar em uma conexão tê de seção transversal quadrada aplicando o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . Os autores dividiram as simulações em fluxo convergente (duas entradas e uma saída) e fluxo divergente (uma entrada e duas saídas), variaram as vazões volumétricas de entrada e encontraram valores de coeficientes de perda de pressão. Os resultados numéricos foram comparados com os da literatura e concluíram que a fluidodinâmica computacional produz valores razoáveis desses coeficientes para fluxos convergentes. O mesmo não pode ser afirmado para fluxos divergentes.

Separadores de fases são caros e ocupam muito espaço, por exemplo, em plataformas petrolíferas e diversos esforços tem ocorrido a fim de otimizar esses separadores. Wang *et al.* (2008) afirmaram que a conexão tê é um separador de fase parcialmente eficiente, pois pode reduzir a carga que o separador principal recebe. Os autores reproduziram em CFD três casos experimentais de separação bifásica água-óleo em uma conexão tê. O modelo geométrico usado na simulação é mostrado na Figura 35, onde o duto tem 0,05 m de diâmetro e cada seguimento tem 1,0 m de comprimento. No estudo, a velocidade da mistura na entrada do duto é controlada entre 0,48 m/s e 0,728 m/s, a fração volumétrica de óleo na entrada variou entre 0,2182 e 0,2656, e o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  foi adotado.

Wang *et al.* (2008) concluíram que a performance de separação bifásica em uma conexão tê é fortemente influenciada pelo padrão de escoamento e que o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  produziu resultados que estão de acordo com os dados experimentais.

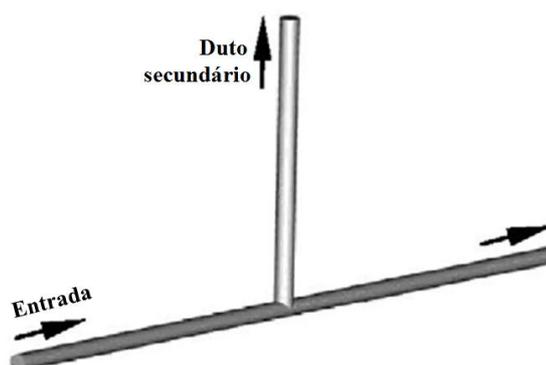


Figura 35: modelo de conexão tê usada para separar água e óleo

Fonte: Wang et al., 2008

## 2.5 A fluidodinâmica computacional

A revisão bibliográfica mostrou vários estudos sobre as técnicas de detecção de vazamentos. Em muitos deles foram realizadas análises experimentais, que podem ser dispendiosas ou demoradas. Em face do atual desenvolvimento tecnológico, o uso de modelos computacionais mostra-se uma alternativa viável em comparação com testes empíricos, visto que parâmetros como temperatura, vazão, dimensões, entre outros, podem ser modificados com uma maior facilidade, possibilitando um aumento na variedade de ensaios. O uso da fluidodinâmica computacional elimina os problemas técnicos de ensaios de laboratórios e as influências externas inesperadas. Porém, há a necessidade de uma boa

escolha dos modelos representativos dos fenômenos envolvidos e da validação dos modelos computacionais a partir das características observadas experimentalmente.

A mecânica dos fluidos computacional pode ser aplicada em problemas de aerodinâmica de veículos terrestres (trens, caminhões, carros, etc.), da indústria petrolífera, de planejamento e gestão de recursos hídricos, da previsão de tempo, de mecanismos de bombas hidráulicas e de muitos outros.

Atualmente existem diversos pacotes comerciais de softwares que simulam os mais variados tipos de escoamento (bi ou tridimensionais, monofásicos ou multifásicos, etc.), a exemplo do FlexPDE<sup>®</sup>, CFX<sup>®</sup>, FLUENT<sup>®</sup>, POLIFLOW<sup>®</sup>, OpenFOAM<sup>®</sup> e outros. Esses se diferenciam em diversos fatores tais como: definição da geometria, geração da malha (estruturada ou não estruturada), modelos de turbulência e de transferência interfacial, método de resolução de equações (diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos ou ainda a combinação deles).

## **2.6 Escoamento multifásico**

### **2.6.1 Características gerais**

Escoamentos multifásicos ocorrem em muitos processos industriais. Um bom exemplo em indústrias químicas e petroquímicas é o fluxo simultâneo de dois fluidos imiscíveis em dutos, como óleo e água.

Para descrever escoamentos, um dos primeiros desafios é observar se há a necessidade de um modelo multifásico. Propriedades como densidade, compressibilidade, calor específico e várias outras são ligeiramente afetadas pela presença de umidade, mas as equações que descrevem o fluxo ou a troca de calor ao seu redor não são afetadas.

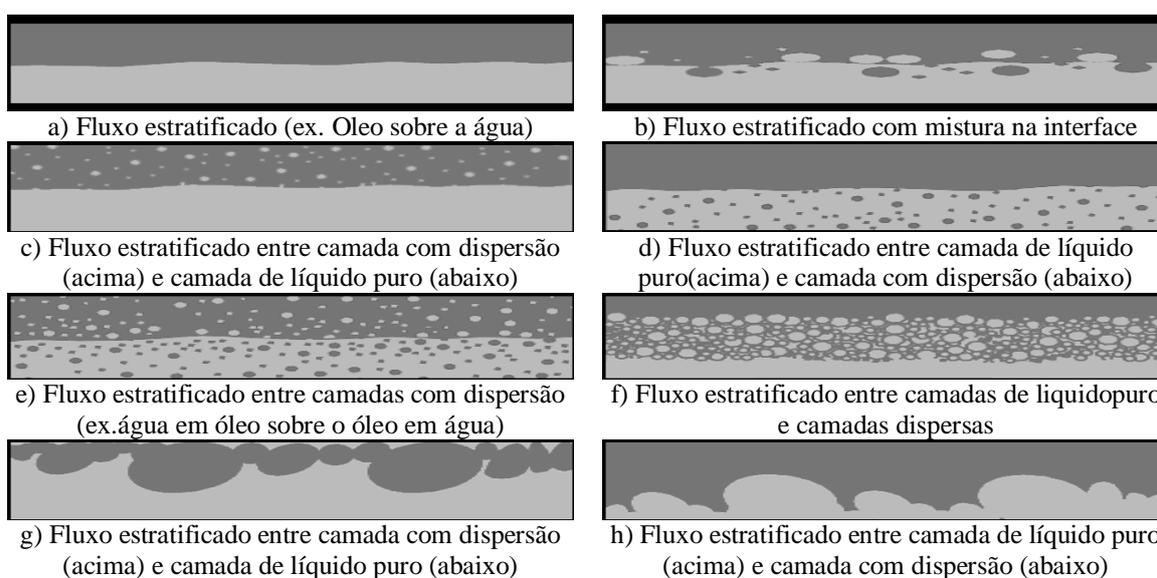
Em se tratando de escoamento de hidrocarbonetos, as primeiras simulações são frequentemente realizadas anos antes da tubulação ser colocada em funcionamento, onde os dados de entrada disponíveis são bastante escassos (BRANTLAND, 2010). A previsão inadequada pode ter como consequência alto custo e a interrupção do uso da tubulação.

Um dos aspectos mais desafiantes em lidar com escoamento multifásico é o fato de que o mesmo pode adquirir diferentes formas, e essas formas variam com a fração volumétrica, velocidade, temperatura, etc (BRANTLAND, 2010).

Em um escoamento bifásico líquido-líquido, se a diferença de densidade entre os líquidos da mistura bifásica for baixa, o escoamento é pouco afetado pela inclinação do duto, mas se essa diferença for alta, o fluxo torna-se mais parecido com um escoamento gás-líquido. Porém, se as densidades possuírem o mesmo valor, o escoamento ocorrerá como se não houvesse a presença da força gravitacional (BRANTLAND, 2010).

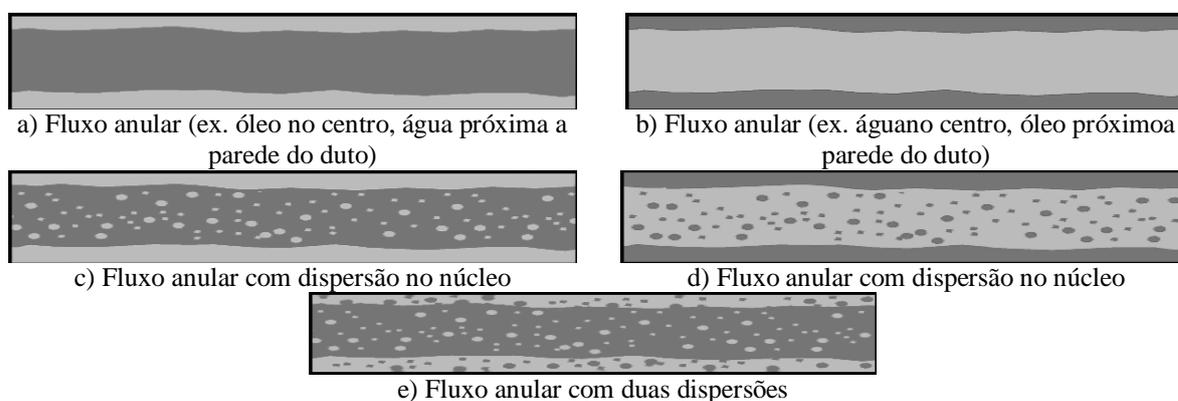
Modelos de escoamento líquido-líquido têm sido usados para tentar desenvolver métodos para o transporte de óleos pesados via *core-flow*, que consiste em lubrificar a parede do duto com um filme de água anular e com óleo escoando no centro (BRANTLAND, 2010).

A variedade do padrão de escoamento de uma mistura bifásica líquido-líquido é ampla, e esta pode ser observada para os escoamentos estratificados (Figura 36) e anular (Figura 37). Outros regimes de escoamento também são relatados na Figura 38.



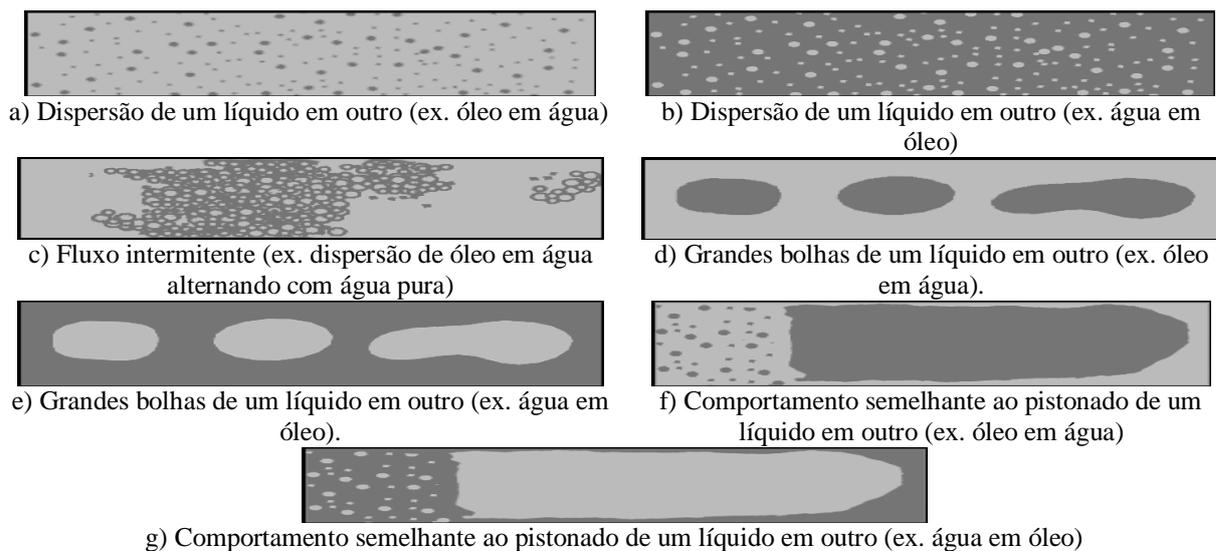
**Figura 36: Escoamento estratificado para fluxos horizontais líquido-líquidos.**

Fonte: Brantland, 2010.



**Figura 37: Escoamento anular em fluxo horizontal líquido-líquido**

Fonte: Brantland, 2010.



**Figura 38: Outros regimes observados em escoamento horizontal líquido-líquido**  
**Fonte: Brantland, 2010.**

## 2.6.2 Modelagem matemática para escoamentos multifásicos

Para modelar matematicamente o escoamento multifásico em um duto duas abordagens podem ser utilizadas:

- Euleriana-Lagrangeana: o transporte de partícula (fase dispersa) é feito pela fase contínua; logo as equações do momento são resolvidas apenas para a fase contínua;
- Euleriana-Euleriana: o acoplamento entre as fases acontece pela transferência interfacial e as equações do momento são resolvidas para cada uma das fases (contínua e dispersa).

O escoamento multifásico é descrito por um modelo matemático constituído de um sistema de equações diferenciais parciais (Equações da Conservação da Massa, do Momento Linear e da Energia). O sistema é válido para a solução do escoamento em regime laminar e turbulento. A solução analítica completa do sistema ainda é desconhecida e a solução numérica possui um elevado custo computacional devido ao alto nível de discretização para caracterizar turbulências. Os modelos matemáticos são baseados em valores médios das equações instantâneas de Navier-Stokes e por isso são empregados para facilitar a solução das aplicações de engenharia.

### 2.6.2.1 Turbulência na fase contínua

A turbulência é caracterizada por um escoamento de fluido com intensa agitação caótica e imprevisível. Para estudar a turbulência é necessário conhecer dois importantes conceitos. O primeiro é a viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , que não é uma propriedade termodinâmica dos fluidos, mas sim uma condição do escoamento, podendo ser determinada conhecendo-se duas propriedades termodinâmicas, como a pressão e a temperatura. O segundo é o comprimento de mistura,  $l_m$ , que é um comprimento característico que equivale à distância percorrida pelo fluido onde há variação nas velocidades locais médias. Em um tubo, o comprimento de mistura é a distância necessária, partindo-se da entrada, a partir da qual o perfil de velocidades não se modifica mais com o aumento da distância ao longo do tubo.

Osborne Reynolds (1842-1912) sugeriu que os campos presentes nas equações de Navier Stokes fossem divididos em componentes médias e componentes flutuantes, ou turbulentas. Esse procedimento gerou uma nova equação onde os efeitos do campo turbulento estão isolados dos termos descritivos do escoamento médio, assim como revelou novas variáveis dinâmicas, resultando em um número de variáveis dinâmicas independentes maior do que o número de equações governantes disponíveis e caracterizando um problema matematicamente indeterminado. Necessita-se então de um modelo de fechamento para a solução do problema.

Os modelos de turbulência classificam-se em:

a) Modelos de viscosidade turbulenta:

- Modelos algébricos: são baseados na hipótese de Boussinesq, a qual estabelece o conceito de viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ . Uma equação algébrica é usada para determinar o valor da viscosidade turbulenta.
- Modelos a uma equação: também empregam a hipótese de Boussinesq, onde uma expressão algébrica fornece a propriedade de comprimento de mistura,  $l_e$ . Além disto, uma equação diferencial de transporte é resolvida para uma determinada propriedade turbulenta que, em geral, é a energia cinética turbulenta  $k$ .
- Modelos a duas equações: duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas são utilizadas, configurando-se, assim, como modelos de fechamento completos. Uma equação de transporte é aplicada para energia cinética turbulenta,  $k$ , e outra para a taxa de dissipação da energia cinética

turbulenta por unidade de massa,  $\varepsilon$ , ou, em alguns casos, uma frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas,  $\omega$ .

- b) Modelos para tensões de Reynolds (modelos de fechamento de segunda ordem): equações de transporte explícitas são aplicadas para o tensor de Reynolds. Ainda assim é necessária a adoção de uma equação de transporte complementar para  $\varepsilon$  ou  $\omega$  para fechar o problema completamente.

#### 2.6.2.1.1 Modelo $\kappa$ - $\varepsilon$ padrão

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão é classificado como modelo de duas equações. É um dos mais notáveis modelos de turbulência e é considerado o modelo padrão industrial. O manual do CFX<sup>®</sup> afirma que o modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$  usa uma abordagem de função de parede escalável para melhorar a robustez e a precisão quando a malha próxima à parede é refinada arbitrariamente, o qual é uma melhoria significativa sobre as funções de parede padrão.

As equações de transporte para as características turbulentas a serem determinadas são a da energia cinética turbulenta  $k$ , que é definida como a variância das flutuações em velocidade e tem dimensões de  $L^2T^{-2}$ , onde  $L$  é unidade de comprimento e  $T$  unidade de tempo, e a da taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon$  (a taxa na qual a velocidade de flutuação se dissipa) que tem as dimensões de  $k$  por unidade de tempo  $L^2T^{-3}$ .

Ambas as equações são dadas por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (05)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (06)$$

onde  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são constantes e seus valores são:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .  $P_{kb}$  e  $P_{\varepsilon b}$  representam a influência das forças de flutuabilidade.

A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é dada por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (07)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante de valor igual à 0,09.

Nas Equações 05 e 06,  $P_k$  é a produção de turbulência devido às forças viscosas, sendo modelada usando:

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (08)$$

#### 2.6.2.1.2 Modelo RNG $k$ - $\varepsilon$

O modelo RNG (Renormalized Group Theory) foi recentemente proposto como uma outra variação do modelo  $\kappa - \varepsilon$ , denominada RNG  $\kappa - \varepsilon$ . Mostrando-se adequado à previsão de escoamentos em regiões internas de camadas limite (baixos números de Reynolds) sem a inclusão de termos de correção, o modelo RNG  $k$ - $\varepsilon$  oferece um pouco de melhoria comparado ao modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão, fornecendo previsões mais precisas em situações de linhas de corrente curvas, separação e estagnação.

As equações de transporte para a geração e dissipação de turbulência são as mesmas do modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão, mas as constantes do modelo são diferentes. A constante  $C_{\varepsilon 1}$  é substituída pela função  $C_{\varepsilon 1RNG}$ , a  $C_{\varepsilon 2}$  pela  $C_{\varepsilon 2RNG}$  e  $\sigma_\varepsilon$  pela  $\sigma_{\varepsilon RNG}$ . Logo, a equação da energia cinética turbulenta permanece exatamente a mesma (Equação 05) e a equação de transporte para dissipação turbulenta se torna:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1RNG} P_{\varepsilon b}) \quad (09)$$

onde:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{\left( 1 + \eta^3 \beta_{RNG} \right)} \quad (10)$$

e:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (11)$$

Os valores das constantes das equações geração e dissipação de turbulência para o modelo RNG  $k$ - $\varepsilon$  são:  $C_{\varepsilon 2RNG} = 1,68$ ;  $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0,7179$ ;  $\beta_{RNG} = 0,012$  e  $C_{\mu RNG} = 0,085$ .

### 2.6.2.1.3 Modelo “shear stress transport” (SST)

Criado em 1993, o modelo *Shear Stress Transport - SST* pertence ao grupo de modelos para tensões de Reynolds. Segundo Noletto (2006), perto da parede utiliza-se a formulação do modelo  $k-\omega$  e longe da região de parede é utilizado o modelo  $k-\varepsilon$ . O modelo  $k-\omega$  dispensa leis de parede ou funções de amortecimento, diferentemente do modelo  $k-\varepsilon$ . A criação do modelo *SST* permite um adequado transporte das tensões cisalhantes, resultando, assim, em predições aprimoradas da separação sob diversas condições de gradiente. Noletto (2006) apresenta as equações de transporte do modelo *SST* como:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_{kb} - \beta k \omega \rho \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \rho S^2 + \beta \rho \omega + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (13)$$

onde  $k$  é a dissipação turbulenta e  $\omega$  é a frequência turbulenta.

Para o modelo foi adotado um limitador para o valor da viscosidade cinemática turbulenta:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (14)$$

onde  $S$  representa uma medida invariante da taxa de deformação,  $F_1$  e  $F_2$  são funções de misturas baseadas na distância até a parede e nas variáveis do escoamento.

### 2.6.2.2 Turbulência na fase dispersa

De acordo com Barbosa (2011), a fase dispersa em um escoamento multifásico turbulento é modelada usando-se o modelo de zero equação disperso. Esse modelo considera que a viscosidade turbulenta da fase dispersa  $\mu_{t,d}$  é proporcional à da fase contínua  $\mu_{t,c}$ , sendo determinada por:

$$\mu_{t,d} = \left( \frac{\rho_d}{\rho_c} \right) \frac{\mu_{t,c}}{\sigma} \quad (15)$$

onde  $\sigma$  é o número de Prandtl turbulento que relaciona as duas viscosidades turbulentas.

### 2.6.2.3 Equações constitutivas

As equações constitutivas são expressas por meio de uma constante de proporcionalidade simples considerando as características do material ou substância em uso, fornecendo a relação entre a resposta de um material a uma dada solicitação do campo de escoamento, temperatura ou massa. Essas equações representam relações entre grandezas físicas.

A transferência de momento em um escoamento multifásico pode ser realizada por forças de arraste e por forças de não-arraste.

#### 2.6.2.3.1 Forças de arraste

##### a) Força de arraste interfacial

A força de arraste interfacial é responsável pela maior parte da transferência da quantidade de movimento interfacial. Esta força por unidade de volume agindo na fase  $\alpha$  devido à presença da fase  $\beta$  é expressa como:

$$\overline{M}_{\alpha\beta}^D = C_{\alpha\beta}^{(d)} (\overline{U}_{\beta} - \overline{U}_{\alpha}) \quad (16)$$

onde  $C_{\alpha\beta}^{(d)}$  é o coeficiente de arraste interfacial e  $U_{\alpha}$  e  $U_{\beta}$  são as velocidades da corrente de fluido das fases contínua e dispersa, respectivamente.

O coeficiente de arraste expressa a transferência de momento entre as fases e é dado por:

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_{\alpha} |\overline{U}_{\alpha} - \overline{U}_{\beta}| \quad (17)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arraste,  $A_{\alpha\beta}$  é a área superficial por unidade de volume,  $\rho_{\alpha}$  a massa específica da fase  $\alpha$  e  $|\overline{U}_{\alpha} - \overline{U}_{\beta}|$  é a velocidade de deslizamento entre as fases  $\beta$  (dispersa) e  $\alpha$  (contínua) na direção da fase  $\alpha$ .

O *software* CFX 12.1 dispõe de alguns modelos de arraste, dentre eles o Modelo de arraste de Schiller-Naumann, onde o coeficiente de arraste para partículas esféricas é função do número de Reynolds sendo expresso por:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15\text{Re}^{0,687})/\text{Re} & \text{para } \text{Re} \leq 1000 \\ 0,44 & \text{para } \text{Re} \geq 1000 \end{cases} \quad (18)$$

### 2.6.2.3.2 Forças de não-arraste

#### a) Forças de sustentação

A força de sustentação, também conhecida como força de não-arraste, atua de maneira perpendicular ao sentido do movimento relativo das duas fases. O modelo para escoamento não-rotacional é expresso por:

$$\vec{M}_\alpha^L = \vec{M}_\beta^L = f_\beta \rho_\alpha C_L (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \times \omega_\alpha \quad (19)$$

onde  $\omega_\alpha = \text{curl}(U_\alpha)$ , é o rotacional, que fisicamente significa o momento angular em uma determinada região do espaço, e  $C_L$  é o coeficiente de sustentação.

No modelo para escoamento rotacional há o acréscimo para o vetor de rotação  $\Omega$  e a força de sustentação passa a ser definida por:

$$\vec{M}_\alpha^L = -\vec{M}_\beta^L = f_\beta \rho_\alpha C_L (\vec{U}_\beta^* - \vec{U}_\alpha^*) \times (\vec{\omega}_\alpha^* + 2\vec{\Omega}) \quad (20)$$

onde  $\vec{\omega}_\alpha^* = \text{curl}(\vec{U}_\alpha^*)$  é o rotacional para escoamentos rotacionais.

#### b) Força de massa virtual

“Quando um corpo (fase dispersa) se move através de um fluido (fase contínua), é necessário deslocar a massa da fase contínua para fora do seu caminho. Se o corpo estiver acelerado, o fluido circundante também deverá ser acelerado. A fase dispersa se comporta como tivesse um acréscimo de massa, de uma quantidade chamada massa hidrodinâmica do fluido (também chamada massa virtual ou adicional).” (BARBOSA, 2011).

A força de massa virtual é definida como sendo a força requerida para acelerar a massa de fluido da fase circundante e é dada por:

$$\overline{M}_{\alpha\beta}^{VM} = -\overline{M}_{\beta\alpha}^{VM} = f_{\beta}\rho_{\alpha}C_{VM} \left( \frac{D\overline{U}_{\beta}}{Dt} - \frac{D\overline{U}_{\alpha}}{Dt} \right) \quad (21)$$

onde  $C_{VM}$  é o coeficiente de massa virtual, o qual é uma função da direção do movimento, do formato e da concentração da partícula. O *software* Ansys CFX 12.1 usa um valor padrão de  $C_{VM} = 0,5$ , o qual pode ser ajustado para servir a cada tipo de partícula.

Para escoamento rotacional, a força de massa virtual é dada por:

$$\overline{M}_{\alpha\beta}^{VM} = -\overline{M}_{\beta\alpha}^{VM} = f_{\beta}\rho_{\alpha}C_{VM} \left[ \frac{D\overline{U}_{\beta}^*}{Dt} - \frac{D\overline{U}_{\alpha}^*}{Dt} + 2\overline{\Omega} \times (\overline{U}_{\beta}^* - \overline{U}_{\alpha}^*) \right] \quad (22)$$

onde  $\overline{\Omega}$  é a taxa de rotação do movimento das partículas.

### c) Forças de lubrificação na parede

Consideradas apenas em malhas bem refinadas, as forças de lubrificação na parede são apresentadas no *software* CFX 12.1 pelo modelo de Antal, como segue:

$$\overline{M}_{\alpha\beta}^{LUB} = -\overline{M}_{\beta\alpha}^{LUB} = f_{d\rho_c} \frac{|\overline{U}_r - (\overline{U}_r \cdot \overline{n}_w)\overline{n}_w|^2}{d_p} \cdot \max\left(C_1 + C_2 \frac{d_3}{y_w}, 0\right) \overline{n}_w \quad (23)$$

onde  $\overline{U}_r = (\overline{U}_{\alpha} - \overline{U}_{\beta})$  é a velocidade relativa entre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ ,  $\overline{n}_w$  é o vetor normal à parede,  $y_w$  é a distância próxima a parede,  $d_p$  é o diâmetro médio da fase dispersa ( $\beta$ ) e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes que, no CFX 12.1 possuem os valores de  $C_1 = -0,01$  e  $C_2 = 0,05$ .

### a) Forças de dispersão turbulenta

A força de dispersão turbulenta é o resultado das componentes flutuantes das forças atuando sobre uma partícula que, segundo o modelo Lopez de Bertodano, é expressa por:

$$\overline{M}_{\alpha}^{TD} = -\overline{M}_{\beta}^{TD} = -C_{TD}\rho_{\alpha}k_{\alpha}\nabla f_{\alpha} \quad (24)$$

onde  $k_A$  é a energia cinética da fase contínua ( $\alpha$ ) e  $C_{TD}$  é o coeficiente de dispersão turbulenta.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 O problema físico**

O domínio físico adotado é baseado no dispositivo experimental proposto por trabalho Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) e ilustrado na Figura 39. Nesta figura está destacado, em linha tracejada, o domínio de estudo utilizado, o qual é formado por um duto principal de 1,2 m de

comprimento e diâmetro de 0,05 m ligado a um duto secundário cujo comprimento é de 0,6 m e diâmetro de 0,025 m. A posição do duto secundário está no ponto médio entre a entrada e a saída do duto principal.

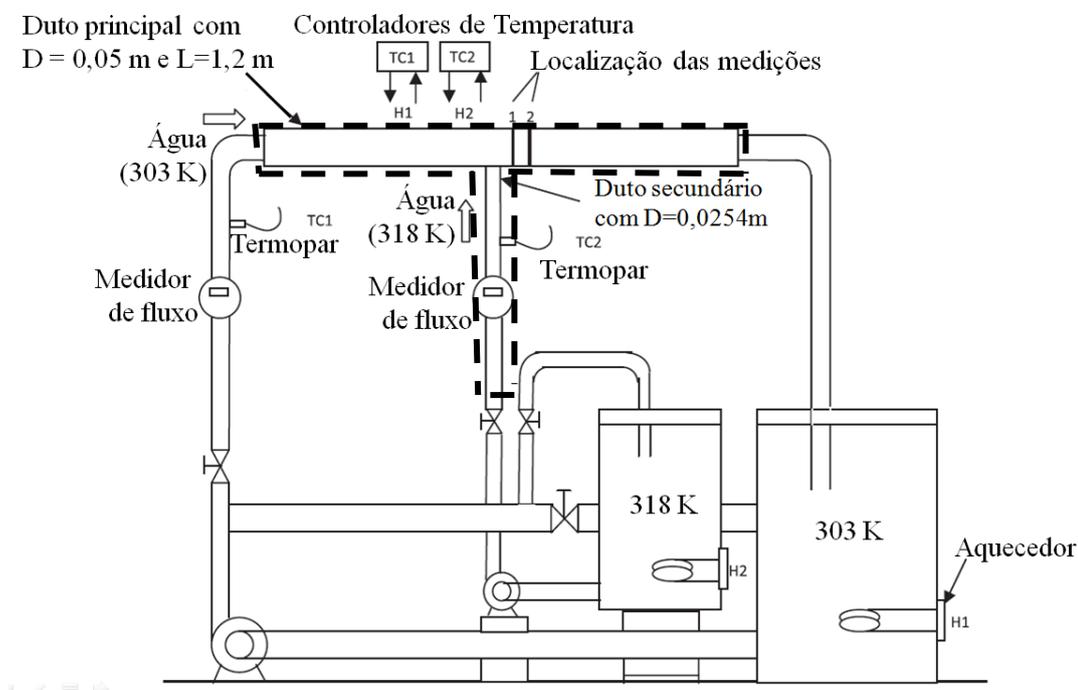


Figura 39: Aparato experimental do escoamento não-isotérmico de água em conexão tê.

Fonte: Naik-Nimbalkar *et al.*, 2010.

### 3.2 Domínio de estudo

Na Figura 40 está representada a tubulação munida de uma conexão tê conectada a tubos de diâmetro diferentes, sendo o ramal principal um tubo horizontal de diâmetro 0,05 m contendo um orifício de vazamento de 0,3 cm de diâmetro após a conexão, cujo centro do orifício está na posição  $x = 0,9$  m;  $y = 0$  m e  $z = -0,025$ , na base do duto

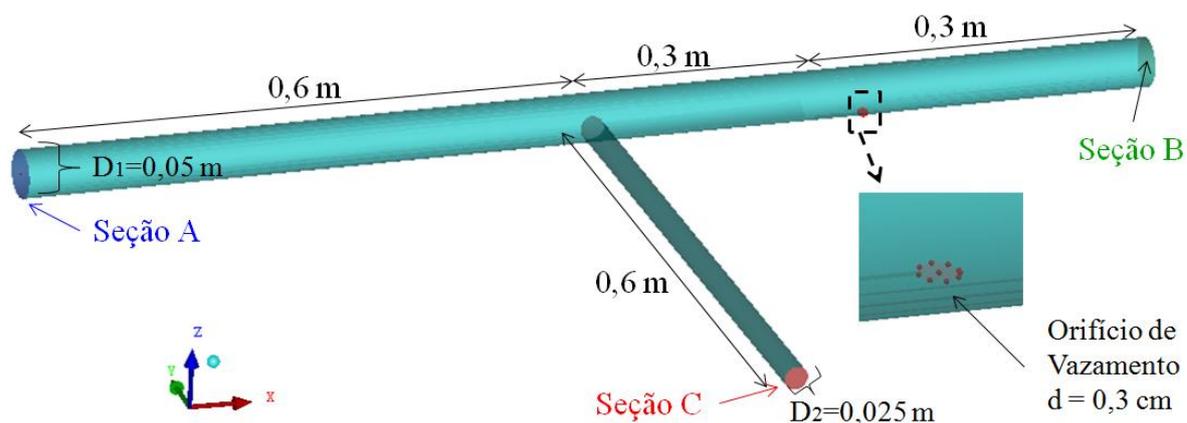


Figura 40: Geometria da conexão tê com orifícios de vazamentos no duto principal.

### 3.3 Domínio computacional: malha

A malha representativa do domínio de estudo, ilustrada na Figura 41, foi gerada usando o ICM CFD da Ansys CFX, empregando a estratégia de blocagem, e construída com 309720 elementos hexaédricos. Nas Figuras 41b, 41c, e 41d estão representados os detalhes das seções A, B e C, respectivamente, enquanto que nas Figuras 41e e 41f estão representadas, respectivamente, os detalhes da interseção dos ramos principal e secundário e do orifício de vazamento.

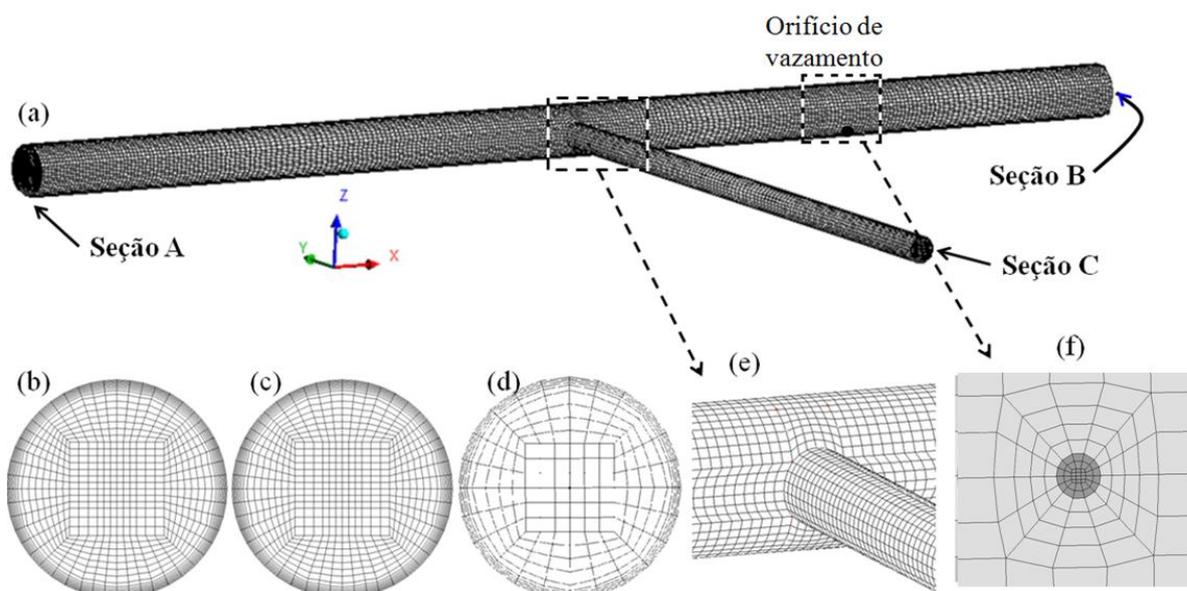


Figura 41: (a) Visualização da malha gerada no tubo e detalhes das (b) seção A, (c) seção B, (d) seção C, (e) ligação entre os dutos e (f) orifício de vazamento

### 3.4 Modelagem matemática

#### 3.4.1 Escoamento permanente monofásico e isotérmico

Para esta situação foram adotadas as seguintes considerações:

- Regime permanente;
- Fluido incompressível e com propriedades termo-física;
- Ausência de reação química;
- Tubo liso;
- Regime de escoamento laminar.

Com estas considerações, as equações de conservação da massa e do momento podem ser escritas como:

##### 3.4.1.1 Equação da conservação da massa

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (25)$$

onde  $\vec{U}$  é o vetor velocidade.

##### 3.4.1.2 Equação da conservação do momento linear

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) + \nabla p - \nabla \cdot \left\{ \mu \left[ \nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right] \right\} - \vec{S}_M = 0 \quad (26)$$

onde  $\rho$ ,  $p$  e  $\mu$  são a densidade, a pressão e a viscosidade do fluido, e  $\vec{S}_M$  é o termo fonte de momento linear.

#### 3.4.2 Escoamento permanente, monofásico e não-isotérmico

São adotadas as seguintes considerações:

- Regime permanente;
- Regime de escoamento laminar;
- Fluido incompressível;
- Ausência de reação química;
- Tubo liso;

- Não há fonte de calor externa;
- Não há mudança de fase.

As equações da conservação da massa e do momento linear são as Equações 25 e 26, respectivamente, e a de conservação de energia é dada por:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U} h - \lambda \nabla T) = 0 \quad (27)$$

onde  $h$  é a entalpia,  $\lambda$  é a condutividade térmica e  $T$  é a temperatura.

### 3.4.3 Escoamento transiente bifásico e não-isotérmico

Para a realização das simulações foram adotadas as seguintes considerações:

- Escoamento transiente
- Fluidos incompressíveis;
- Ausência de reação química;
- Tubo liso;
- Não há fonte de calor;
- Não há transferência de massa interfacial;
- Foram desconsideradas as forças de não-arraste e apenas as forças de arraste exercem efeito nos modelos de transferência do momento interfacial;
- Tensão interfacial: 0.031 N/m (Fonte: Xu *et al.*, 2010).

Com base nessas configurações as equações da conservação da massa e do momento são escritas como:

#### 3.4.3.1 Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = 0 \quad (28)$$

onde  $f_\alpha$  é a fração volumétrica da fase  $\alpha$  na mistura,  $\rho_\alpha$  é a massa específica da fase  $\alpha$  e  $\bar{U}_\alpha$  é o vetor velocidade da fase  $\alpha$ .

### 3.4.3.2 Equação da conservação do momento linear

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \overline{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \overline{U}_\alpha \otimes \overline{U}_\alpha)] + f_\alpha \nabla p_\alpha - \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[ \nabla \overline{U}_\alpha + (\nabla \overline{U}_\alpha)^T \right] \right\} - \overline{S}_{M_\alpha} - \overline{M}_\alpha = 0 \quad (29)$$

onde  $p_\alpha$  é a pressão da fase  $\alpha$ ,  $\mu_\alpha$  é a viscosidade da fase  $\alpha$ ,  $\overline{S}_M$  é o termo fonte e  $\overline{M}_\alpha$  é a soma das forças interfaciais, onde apenas as forças de arraste são consideradas, definida por:

$$\overline{M}_\alpha = \frac{C_D}{4} \frac{3f_\beta}{d_\beta} \rho_\alpha |\overline{U}_\alpha - \overline{U}_\beta| (\overline{U}_\beta - \overline{U}_\alpha) \quad (30)$$

Onde  $\beta$  é o coeficiente da fase dispersa,  $d_\beta$  é o diâmetro médio da fase  $\beta$ ,  $f_\beta$  é a fração volumétrica da fase  $\beta$  e  $C_D$  é o coeficiente de arraste dado por Schiller-Naumann definido anteriormente pela equação 20.

### 3.4.3.3 Equação da conservação da energia

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha h_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \overline{U}_\alpha h_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha)] = 0 \quad (31)$$

onde  $h_\alpha$  é a entalpia da fase  $\alpha$ ,  $\lambda_\alpha$  é a condutividade térmica da fase  $\alpha$ .

## 3.4.4 Escoamento permanente bifásico e não-isotérmico

Foram adotadas as considerações:

- escoamento permanente;
- fluido incompressível;
- ausência de reação química;
- tubo liso;
- não há fonte de calor;
- não há transferência de massa interfacial;
- foram desconsideradas as forças de não-arraste e apenas as forças de arraste exercem efeito nos modelos de transferência do momento interfacial;
- tensão interfacial: 0.031 N/m (Fonte: Xu *et al.*, 2010).

As equações da conservação da massa, de momento e de energia são dadas, respectivamente, por:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \overline{U}_\alpha) = 0 \quad (32)$$

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \overline{U}_\alpha \otimes \overline{U}_\alpha)] + f_\alpha \nabla p_\alpha - \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[ \nabla \overline{U}_\alpha + (\nabla \overline{U}_\alpha)^T \right] \right\} - \overline{S}_{M\alpha} - \overline{M}_\alpha = 0 \quad (33)$$

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \overline{U}_\alpha h\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha)] = 0 \quad (34)$$

### 3.4.5 Propriedades físico-químicas

As propriedades do óleo e da água utilizadas no escoamento isotérmico são apresentadas na Tabela 5. Para as simulações não-isotérmicas foram consideradas as propriedades contidas na Tabela 5, exceto as viscosidades da água e do óleo, que variam com a temperatura como definidas pelas Equações 35, 36 e 37, reportadas por Cunha (2010).

**Tabela 5: Propriedades dos fluidos**

Propriedades	Óleo	Água
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	860*	997***
Viscosidade (Pa.s)	0,044*	0,0008899****
Calor específico (J/kg.K)	2092**	4181,7***
Condutividade térmica (W/m.K)	0,143*	0,6198***

Fonte: \*Xu *et al.*, 2010; \*\*Cunha, 2010; \*\*\*Manual CFX 12.1

$$\mu_{\text{agua}} = \frac{2,185}{(40,12 + 0,0051547T_F)T_F - 1000} \quad (35)$$

$$\mu_{\text{oleo}} = 10^{-5} \exp \left\{ \exp \left[ 11,7613 - 2,099 \ln [T_F] \right] - 1,05 \right\} \quad (36)$$

$$T_F = 1,8T_K - 459,67 \quad (37)$$

Sendo  $T_F$  a temperatura em graus Fahrenheit e  $T_K$  é a temperatura em Kelvin, dos fluidos válidos, no intervalo de 295 à 500 K.

### 3.4.6 Queda de pressão em dutos

Em dutos retilíneos, a queda de pressão ( $\Delta P$ ) para um escoamento monofásico, em uma determinada distância percorrida pelo fluido no duto ( $L$ ), é dada pela equação de Darcy-Weisbach, definida por:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\hat{f}}{D} \frac{\rho U^2}{2} \quad (38)$$

onde  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $U$  é a velocidade de escoamento do fluido e  $\hat{f}$  é o fator de atrito. O fator de atrito para o escoamento laminar é dado por:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{\frac{\rho U D}{\mu}} = \frac{64 \mu}{\rho U D} \quad (39)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds, o qual define se o regime de escoamento é laminar ou turbulento, e  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

Para escoamentos turbulentos o fator de atrito pode ser encontrado utilizando, por exemplo, a correlação de Colebrook definida por:

$$\frac{1}{\hat{f}^{0,5}} = -1,7372 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{1,256}{Re \hat{f}^{0,5}} \right) \quad (40)$$

onde  $\varepsilon$  é a rugosidade da tubulação.

### 3.4.7 Desvio padrão da média

O desvio padrão, representado por  $\sigma$ , é a medida mais comum da dispersão estatística, mostrando a dispersão entre o valor obtido (neste caso: numérico) e o valor esperado (neste caso: experimental).

$$\sigma_m = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{num} - V_{real})^2} \quad (41)$$

onde  $V_{num}$  é o valor numérico,  $V_{real}$  é o valor analítico ou experimental e  $n$  é o número de pontos.

### 3.4.8 Critério de convergência

O valor quadrático médio (RSM - *root mean square*) de  $10^{-8}$  foi escolhido como critério de convergência.

## 3.5 Casos estudados

### 3.5.1 escoamento monofásico

#### 3.5.1.1 Análise de dependência da malha

A influência da densidade da malha sobre os resultados foi realizada utilizando quatro malhas com diferentes densidades de elementos conforme a Tabela 6. Para isto foi simulado o escoamento monofásico de óleo sem vazamento. O escoamento é em regime permanente, isotérmico, laminar, sem reações químicas e desconsiderando o efeito gravitacional. As paredes foram consideradas estáticas, lisas e sem deslizamento e a pressão de referência usada foi de 0 Pa.

As condições de contorno (Figura 42) são:

- Seção A: velocidade prescrita de 0,2 m/s;
- Seção B: pressão média de 101325 Pa;
- Seção C: velocidade prescrita de 0,2 m/s;
- Paredes estáticas,  $u_x = u_y = u_z = 0$ .

**Tabela 6: Dados sobre o refino das malhas e seus respectivos números de elementos**

Casos	Malha	Número de elementos hexaédricos	Número de nós
01	1	144694	138904
02	2	206894	199926
03	3	281810	273282
04	4	309720	300482

Foram tomados os valores de pressão média em seis seções transversais distintas na tubulação, conforme ilustrado na Figura 42. A partir desses valores calculou-se a diferença de pressão em três trechos do duto para se comparar com resultados analíticos. A diferença de pressão no Trecho A é definida pela subtração da pressão média na Seção 1 pela pressão média na Seção 2. O mesmo raciocínio é repetido para o Trecho B (Seção 3 – Seção 4) e para o Trecho C (Seção 5 – Seção 6).

As seções em destaque na Figura 42 estão distanciadas entre si de 0,1m. Os cálculos analíticos da queda de pressão foram realizados com o auxílio da Equação de Darcy-Weisbach (Equação 42) e o erro relativo usando a Equação 45.

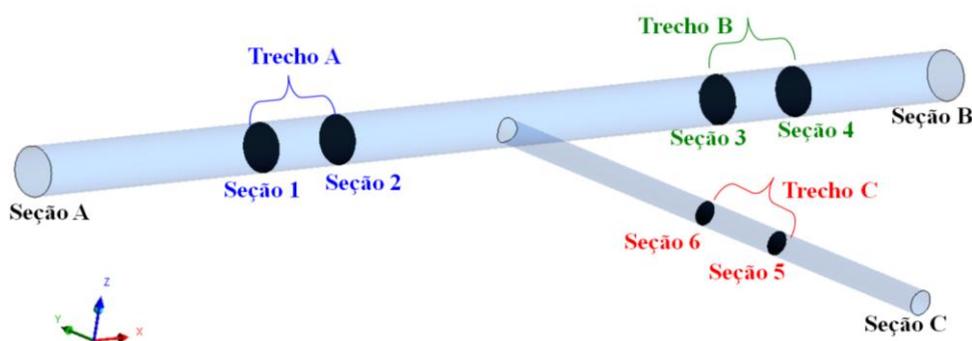


Figura 42: Planos gerados para o cálculo das pressões médias

### 3.5.1.2 Modelos de turbulência

Foram avaliados três modelos de turbulência, conforme Tabela 7, visando avaliar o modelo que melhor descreva o comportamento do escoamento da água em regime permanente, não-isotérmico e turbulento. Em seguida, comparou-se com os dados experimentais de Naik-Nimbalkar *et al.* (2010).

Para a avaliação foi considerada uma pressão de referência de 0 Pa e a aceleração gravitacional é de  $g_y = -9,81 \text{ m/s}^2$ .

O critério de convergência escolhido foi o do valor quadrático médio (RSM - *root mean square*) de  $10^{-8}$ .

Tabela 7: Simulações para o teste de turbulência

Casos	Modelo de turbulência
05	$k-\varepsilon$ padrão
06	SST
07	RNG $k-\varepsilon$

As condições de contorno adotadas sobre as seções A, B e C, são:

- Na Seção A:
  - Velocidade de água: 1 m/s;
  - Temperatura: 303 K.
- Na Seção B: Pressão média de 101325 Pa.
- Na Seção C:
  - Velocidade de água: 0,5 m/s;
  - Temperatura: 318 K.
- Paredes estáticas,  $u_x = u_y = u_z = 0$ .

### 3.5.2 escoamento bifásico

#### 3.5.2.1 Validação da malha e modelo matemático para escoamento bifásico

Para verificar se a malha escolhida nos testes monofásicos fornece resultados confiáveis para simulações bifásicas, feito um teste de escoamento de óleo e água. Para esse teste, foi inserida uma fração de água muito baixa, de forma que o resultado do escoamento bifásico seja equivalente a um escoamento monofásico de óleo. A determinação analítica de uma diferença de pressão em um trecho da tubulação é mais simples de ser calculada para escoamentos monofásicos, justificando a metodologia do teste de malha.

Assumindo o escoamento laminar de água e óleo, pois esse regime de escoamento produz um comprimento de entrada menor que o de um regime turbulento, com uma velocidade de 0,2 m/s, foi simulado o Caso 8, com uma fração volumétrica de 0,999955 de óleo (fase contínua) e 0,000045 de água (fase dispersa com diâmetro das gotículas igual a 0,1 mm).

#### 3.5.2.2 Escoamento não-isotérmico de água e óleo

Um vazamento em um duto normalmente ocorre quando há um regime de escoamento definido em seu interior. Para realizar as simulações da presente seção, inicialmente foram realizadas simulações permanentes sem a presença de vazamento, para que haja o estabelecimento de um regime de escoamento. Cada simulação permanente foi

adicionada nas simulações transientes, as quais há um vazamento ativado, como condição inicial.

Para estudar a influência da temperatura e da concentração da mistura água e óleo na detecção do vazamento via medição de pressão, foram simulados os casos descritos na Tabela 8 com as seguintes condições de contorno:

- Seção A: velocidade prescrita de 5 m/s;
- Seção B: pressão média de 101325 Pa;
- Seção C: velocidade prescrita de 5 m/s;
- Parede do duto estáticas ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ).

**Tabela 8: Efeito da temperatura e da concentração de óleo na detecção de vazamento**

Caso	Seção A	Seção C	Orifício de vazamento	
09	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 80^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	Sem vazamento
10	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 80^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	
11	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 80^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	
12	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 25^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	
13	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 25^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	
14	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 25^{\circ}\text{C}$	$u_x = u_y = u_z = 0$	
15	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	Com vazamento
16	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	
17	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 25^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	
18	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,99; T = 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	
19	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,95; T = 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	
20	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 80^{\circ}\text{C}$	$f_{\text{óleo}} = 0,90; T = 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	

a) Escoamento permanente

As simulações referentes aos Casos 09 a 14 ocorrem em regime permanente e não possuem vazamento, ou seja, no orifício de vazamento foi imposta a condição de contorno de não deslizamento ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ).

b) Escoamento transiente

As simulações referentes aos Casos 15 a 20 ocorrem em regime transiente e na presença de vazamento, ou seja, no orifício de vazamento com condição de pressão média de 101325 Pa. Além disso, possuem como condição inicial os Casos 09 a 14, respectivamente.

Todos os casos com regime transiente foram simulados com um tempo total de 2 segundos. Para otimizar o tempo de simulação e diminuir o número de dados armazenados, o passo de tempo foi modificado ao longo da simulação. De 0 à 0,01 s, adotou-se um passo de tempo de 0,001s, de 0,01 à 0,1 s, o passo de tempo é de 0,01 s, entre 0,1 e 1 s, o passo é de 0,1 s e, finalmente, entre 1 s e 2 s o passo de tempo foi de 0,2 s.

Para melhorar a compreensão acerca dos casos estudados, são apresentadas na Tabela 9 com todas as simulações as condições de contorno que as diferenciam.

Tabela 9: Tabela-resumo de todas as simulações

Caso	Escoamento				Condição de contorno			Aceleração gravitacional	Condição de vazamento
					Seção A	Seção B	Seção C		
01	Monofásico Óleo	Isotérmico	Laminar	Permanente	0,2 m/s	101325 Pa	0,2 m/s	Desconsiderada	Sem vazamento
02	Monofásico Óleo	Isotérmico	Laminar	Permanente	0,2 m/s	101325 Pa	0,2 m/s	Desconsiderada	Sem vazamento
03	Monofásico Óleo	Isotérmico	Laminar	Permanente	0,2 m/s	101325 Pa	0,2 m/s	Desconsiderada	Sem vazamento
04	Monofásico Óleo	Isotérmico	Laminar	Permanente	0,2 m/s	101325 Pa	0,2 m/s	Desconsiderada	Sem vazamento
05	Monofásico Água	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k-ε padrão)	Permanente	1,0 m/s; 303K	101325 Pa	0,5 m/s; 318K	$g_y = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
06	Monofásico Água	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo SST)	Permanente	1,0 m/s; 303K	101325 Pa	0,5 m/s; 318K	$g_y = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
07	Monofásico Água	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo RNG k- ε)	Permanente	1,0 m/s; 303K	101325 Pa	0,5 m/s; 318K	$g_y = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
08	Bifásico	Isotérmico	Laminar	permanente	0,2 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,999955$	101325 Pa	0,2 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,999955$	Desconsiderada	Sem vazamento
09	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- ε padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 25^\circ\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 80^\circ\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
10	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- ε padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 25^\circ\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 80^\circ\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
11	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- ε padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 25^\circ\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 80^\circ\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
12	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- ε padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 80^\circ\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 25^\circ\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
13	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- ε padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 80^\circ\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 25^\circ\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento

Tabela 9: Tabela-resumo de todas as simulações

Caso	Escoamento				Condição de contorno			Aceleração gravitacional	Orifício de vazamento
					Seção A	Seção B	Seção C		
14	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Permanente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 25^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Sem vazamento
15	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 80^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento
16	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 80^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento
17	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 25^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 80^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento
18	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,99; 25^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento
19	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,95; 25^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento
20	Bifásico	Não-isotérmico	Turbulento (Modelo k- $\epsilon$ padrão)	Transiente	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 80^{\circ}\text{C}$	101325 Pa	5 m/s; $f_{\text{óleo}} = 0,90; 25^{\circ}\text{C}$	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	Com vazamento

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Escoamento monofásico

#### 4.1.1 Dependência da malha

Na Tabela 10 estão representados os valores das diferenças de pressão obtidas entre as seções transversais em diferentes trechos, conforme ilustradas na Figura 42, para as diferentes malhas (Casos 01, 02, 03 e 04) avaliadas. Os resultados indicam que praticamente não há variação dos resultados obtidos com as malhas usadas nos Casos 3 e 4.

**Tabela 10: Diferença de pressão numérica e analítica, nos diferentes trechos do duto, para diferentes malhas**

Caso	$\Delta P$ [Pascal] Numérico			$\Delta P$ [Pascal] Analítico			Erro percentual		
	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho A	Trecho B	Trecho C
01	44	55	182	44	54	174	0,00	1,00	4,55
02	44	55	181				0,00	1,00	3,98
03	43	54	178				1,19	0,00	2,25
04	44	54	178				0,00	0,00	2,25

Observa-se, ainda na Tabela 10 que, ao se comparar os resultados numéricos com os analíticos, tem-se pequenos erros relativos, em especial para os casos 3 e 4. Com base nestes resultados, foi escolhida a malha referente ao Caso 4 para se realizar todas as simulações que são apresentadas e discutidas nas próximas seções.

#### 4.1.2 Influência do modelo de turbulência no escoamento

Os resultados numéricos referentes ao escoamento monofásico e turbulento de água na tubulação com conexão tê, para os três modelos de turbulência estudados (ver Tabela 7) (casos 5, 6 e 7) são apresentados e discutidos. Os resultados são comparados com os dados experimentais e resultados numéricos reportados por Naik-Nimbalkar *et al.* (2010).

Nas Figuras 44 e 45 estão representados os perfis de velocidade axial nas posições  $L_1$  e  $L_2$  (Figura 43) em função da posição adimensional  $y^*$  obtidos usando os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão, RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  e SST, bem como os perfis obtidos por Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) experimental e numericamente. A posição adimensional  $y^*$  é dada pela Equação 42.

$$y^* = \frac{y}{R_m} \quad (42)$$

onde  $y$  é a posição radial e  $R_m$  é o raio do tubo do ramal principal.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os perfis de temperatura adimensional  $T^*$  (Equação 43) em função de  $y^*$  e nas posições  $L_1$  e  $L_2$  (Figura 43):

$$T^* = \frac{T - T_{frio}}{T_{quente} - T_{frio}} \quad (43)$$

onde  $T$  é a temperatura medida localmente,  $T_{quente}$  é a maior temperatura de entrada (318 K) e  $T_{frio}$  é a menor temperatura de entrada (303K).

Os resultados apresentados nas Figuras 44, 45 e 46 e 47 indicam que os modelos de turbulência praticamente não têm influência no comportamento dos perfis de velocidade e temperatura. No entanto, o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão mostrou-se mais consistente fisicamente por fornecer resultados que se aproximam mais dos dados experimentais de Naik-Nimbalkar *et al.* (2010).

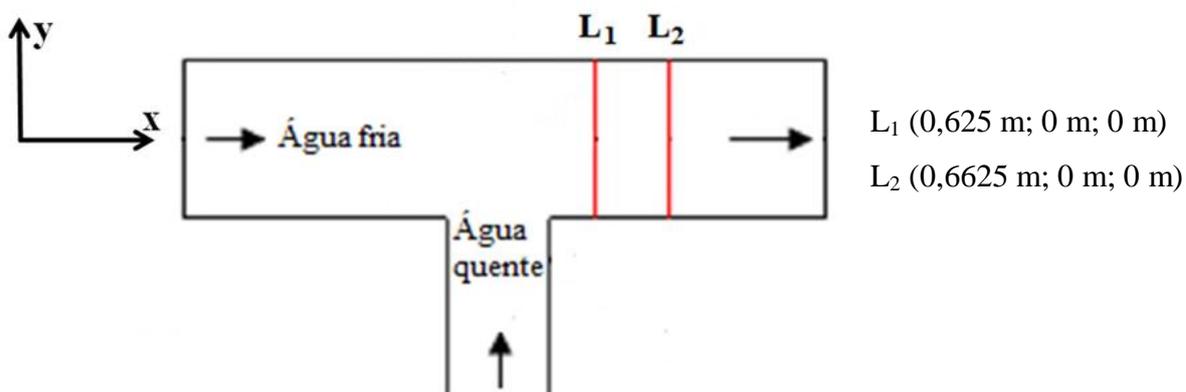


Figura 43: Representação das posições das linhas na tubulação onde foram tomados os valores de velocidade e temperatura.

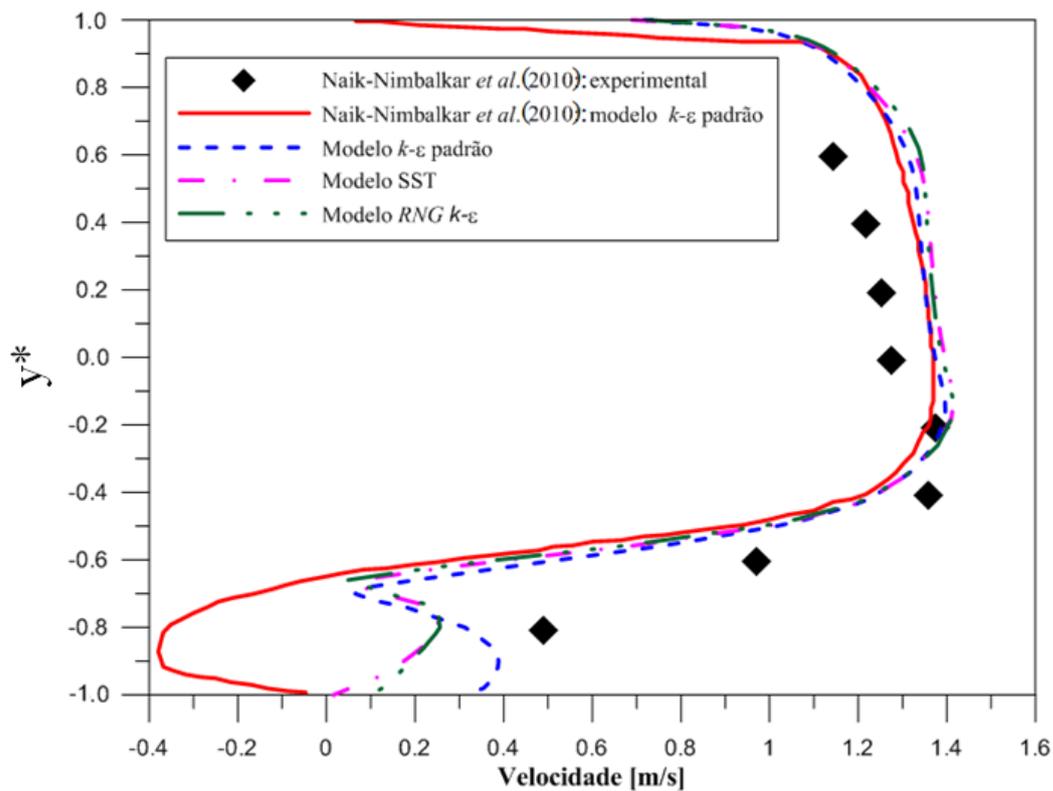


Figura 44: Perfis de velocidade radial na posição  $L_1$ .

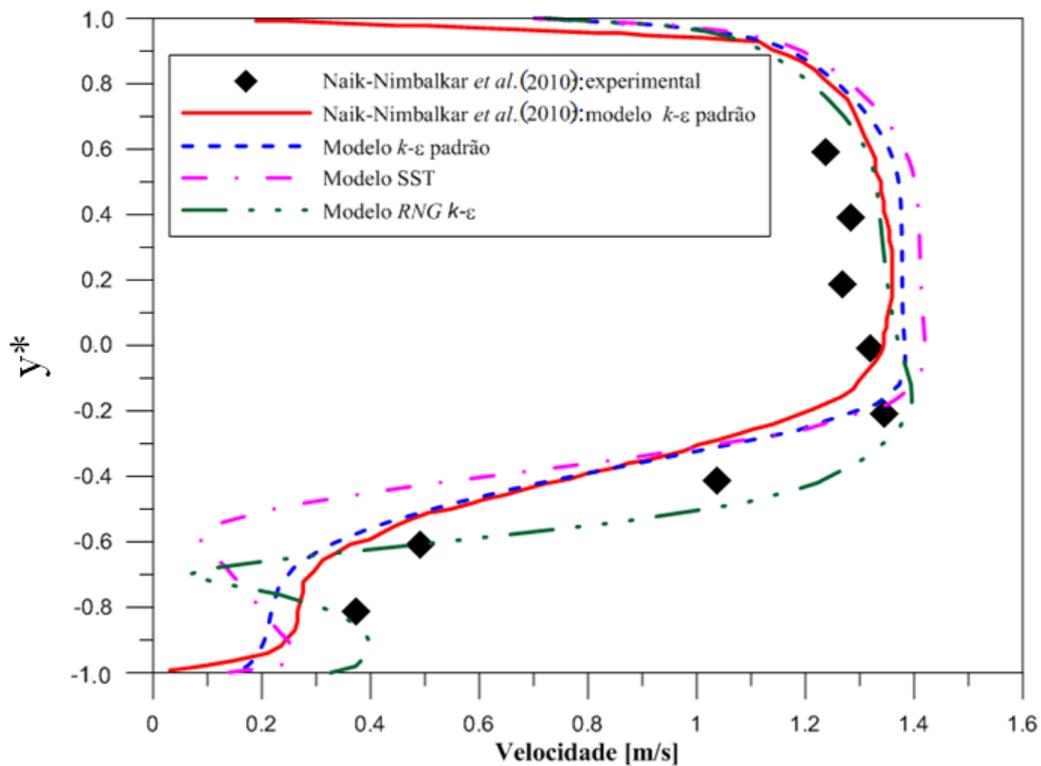


Figura 45: Perfis de velocidade radial na posição  $L_2$ .

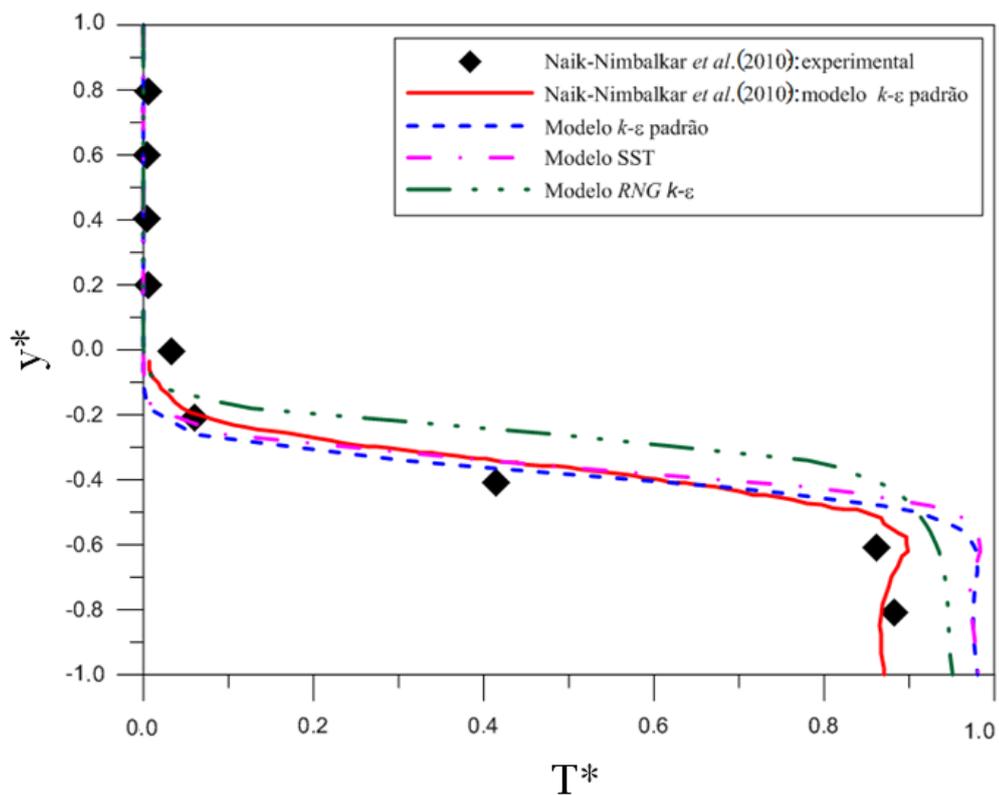


Figura 46: Perfis de temperatura radial na posição  $L_1$ .

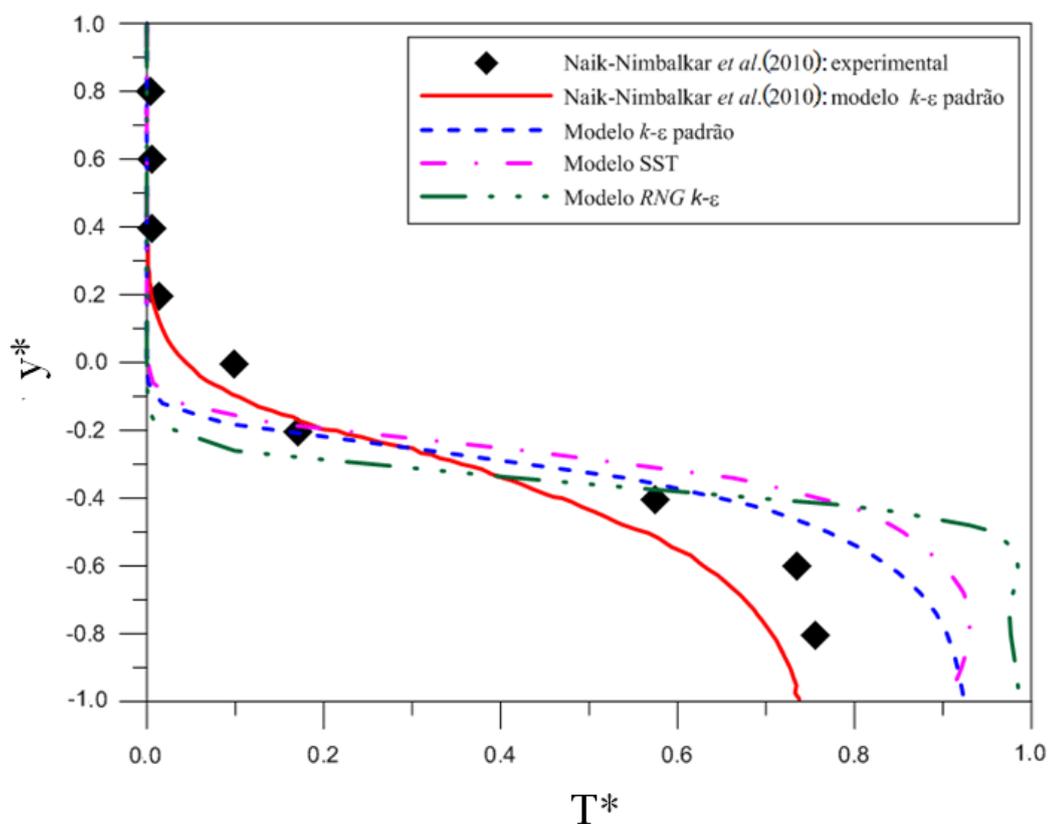


Figura 47: Perfis de temperatura radial na posição  $L_2$ .

Foram comparados os valores experimentais e numéricos via desvio padrão (Equação 43). Na Tabela 11 são apresentados os valores médios obtidos nas duas posições  $L_1$  e  $L_2$ .

**Tabela 11: Desvio padrão em porcentagem entre os valores experimentais e numéricos**

Modelo	Velocidade		Temperatura	
	$L_1$	$L_2$	$L_1$	$L_2$
$k-\varepsilon$ padrão	7,3	5,3	3,0	2,1
RNG $k-\varepsilon$	8,9	13,6	4,1	3,5
SST	10,5	10,3	6,2	4,1
$k-\varepsilon$ padrão (Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> , 2010)	14,3	4,7	2,6	2,1

Os resultados indicam que o modelo  $\kappa-\varepsilon$  padrão apresenta menores desvios se comparados aos modelos RNG  $\kappa-\varepsilon$  e SST. Há desvios entre os valores fornecidos por Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) e os calculados no presente trabalho usando o modelo  $k-\varepsilon$  padrão. Este fato pode estar relacionado com o fato de Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) terem utilizado o software FLUENT, o qual é baseado em volumes finitos, enquanto que o software usado no presente trabalho, CFX, utiliza volumes finitos baseados em elementos finitos. Outra explicação plausível seria o critério de convergência igual a  $10^{-4}$  utilizado por Naik-Nimbalkar *et al.* (2010), ao passo que os resultados deste trabalho usou um critério de  $10^{-8}$ . Uma terceira justificativa pode ser relacionada ao tipo de malha, visto que Naik-Nimbalkar *et al.* (2010) fizeram uso de uma malha tetraédrica, enquanto que no presente trabalho foi utilizada malha hexaédrica. No apêndice estão os dados numéricos e experimentais das velocidades radiais e das temperaturas normalizadas de todos os pontos analisados sobre as linhas 1 e 2.

## 4.2 Escoamento bifásico

### 4.2.1 Validação da malha

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das diferenças de pressão nos trechos A, B e C (Figura 42) e os valores analíticos calculados com o auxílio da equação de Darcy-Weisbach (Equação 40). Os resultados indicam que a malha 4 tomada por 309720 elementos hexaédricos é adequada para simulações bifásicas.

Tabela 12: Diferença de pressão analítica e numérica obtida nos diferentes trechos do duto

	Trecho A	Trecho B	Trecho C
$\Delta P$ [Pascal] Numérico	44	54	178
$\Delta P$ [Pascal] Analítico	44	54	174
Erro percentual	0,00	0,00	2,25

#### 4.2.2 Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de fração volumétrica e de temperatura na ausência de vazamento

Para verificar o efeito da fração volumétrica de óleo nas entradas (seções A e C, Figura 42), bem como a variação das temperaturas nas entradas sobre os campos de fração volumétrica no plano longitudinal  $xy$ , foram construídas as Figuras 48 e 49, onde estão representadas as distribuições da fração volumétrica referentes aos casos 09 a 14 em regime permanente e sem vazamento.

Sabe-se que a viscosidade é inversamente proporcional a temperatura. Neste sentido, foi representado nas Figuras 50 e 51, os campos de temperatura, e nas Figuras 52 e 53, a distribuição da viscosidade dinâmica sobre o plano longitudinal  $xy$  para os mesmos casos apresentados nas Figuras 48 e 49.

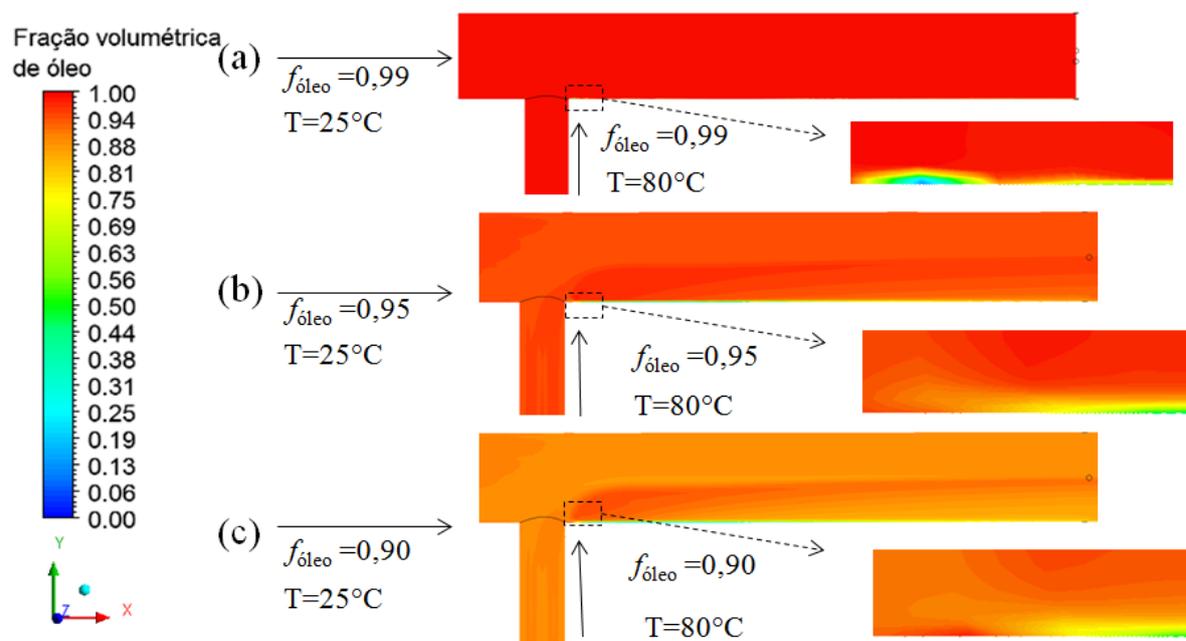


Figura 48: Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 09); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 10) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 11).

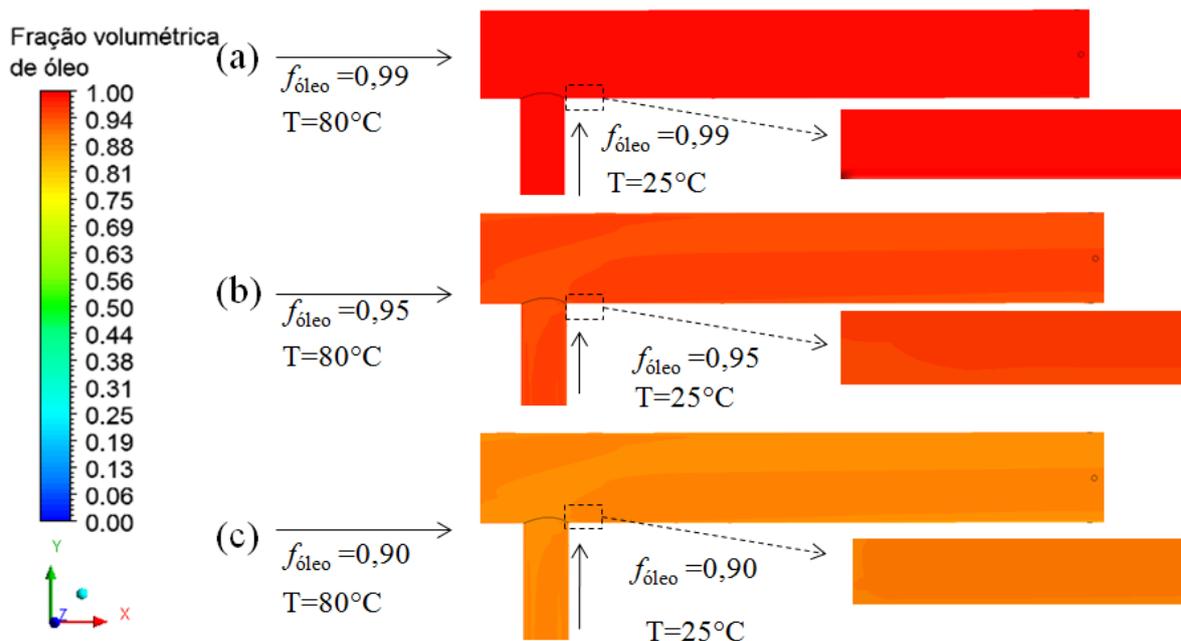


Figura 49: Campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal xy com a temperatura na Seção A  $80^{\circ}\text{C}$  e Seção C  $25^{\circ}\text{C}$ : (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 12); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 13) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 14).

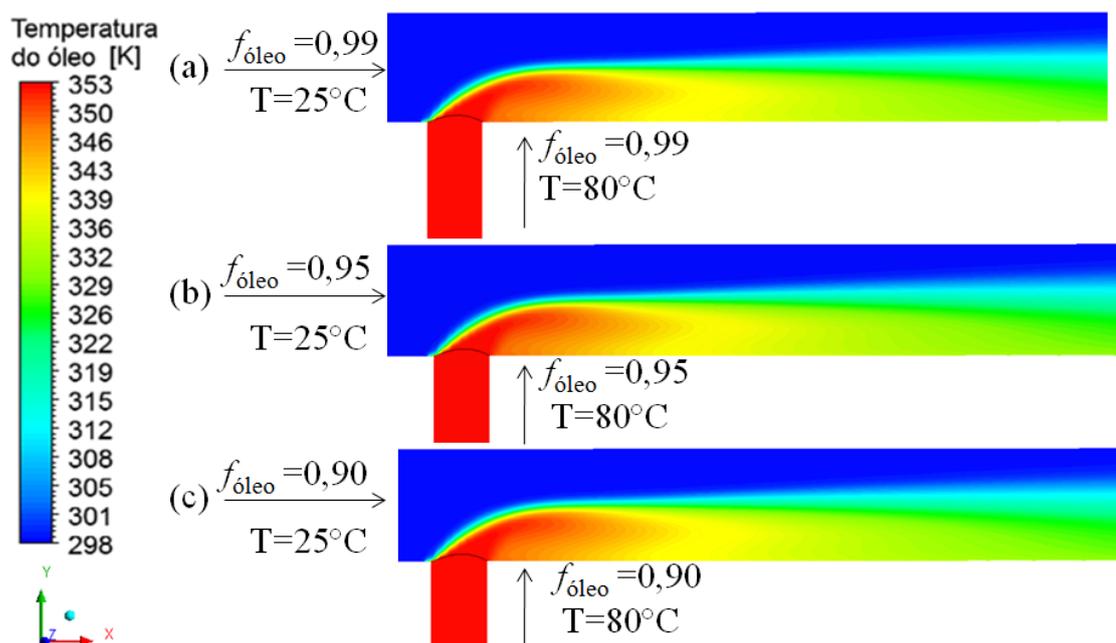


Figura 50: Campo de temperatura do óleo sobre o plano longitudinal xy com a temperatura na Seção A  $25^{\circ}\text{C}$  e Seção C  $80^{\circ}\text{C}$ : (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 09); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 10) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 11).

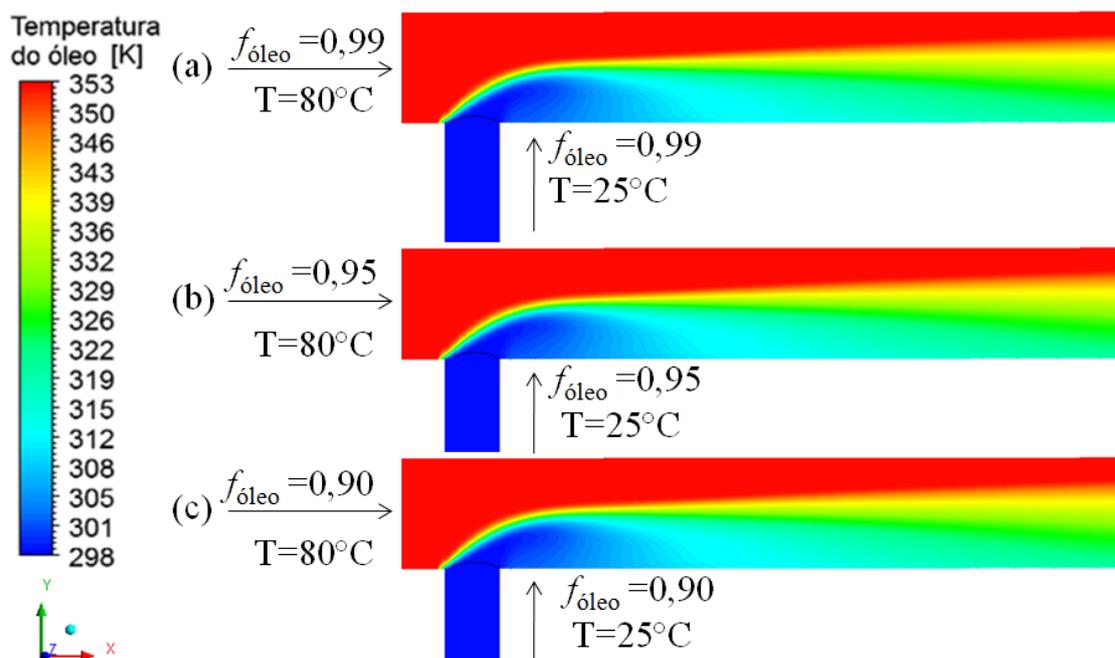


Figura 51: Campo de temperatura do óleo sobre o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A  $80^{\circ}\text{C}$  e Seção C  $25^{\circ}\text{C}$ : (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 12); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 13) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 14).

Nota-se, portanto, que no ramal principal, imediatamente após a bifurcação, a fração volumétrica de óleo é afetada pela mudança na temperatura da corrente de óleo entrando pelo ramal secundário. Este fato se deve ao aumento do gradiente de temperatura nesta região (Figuras 50 e 51) favorecendo, assim, alterações na viscosidade (Figuras 52 e 53).

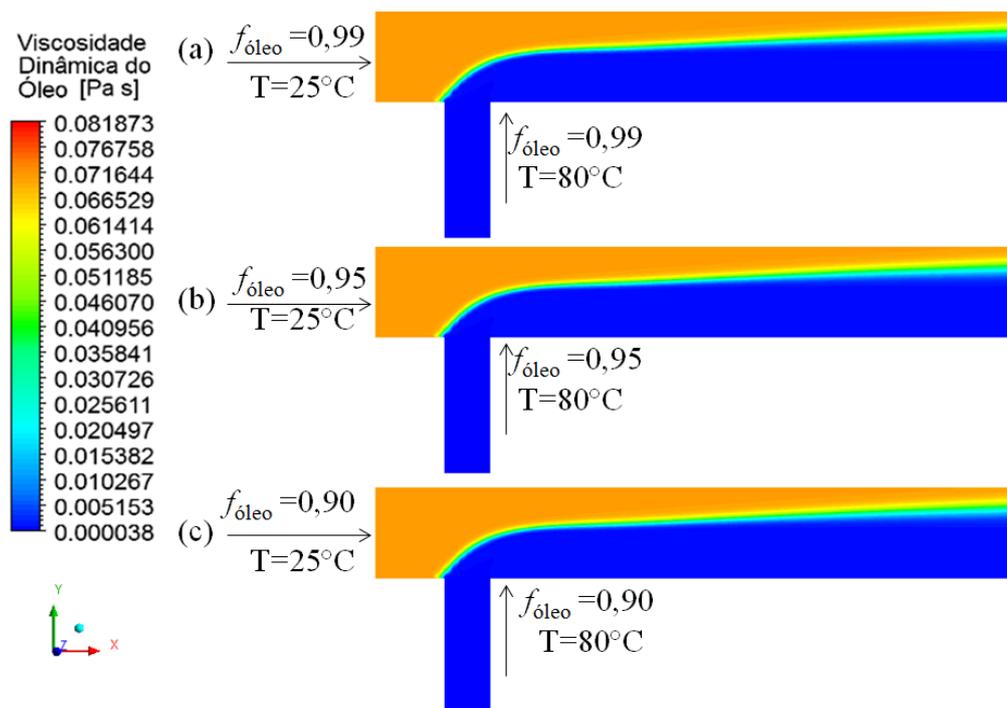
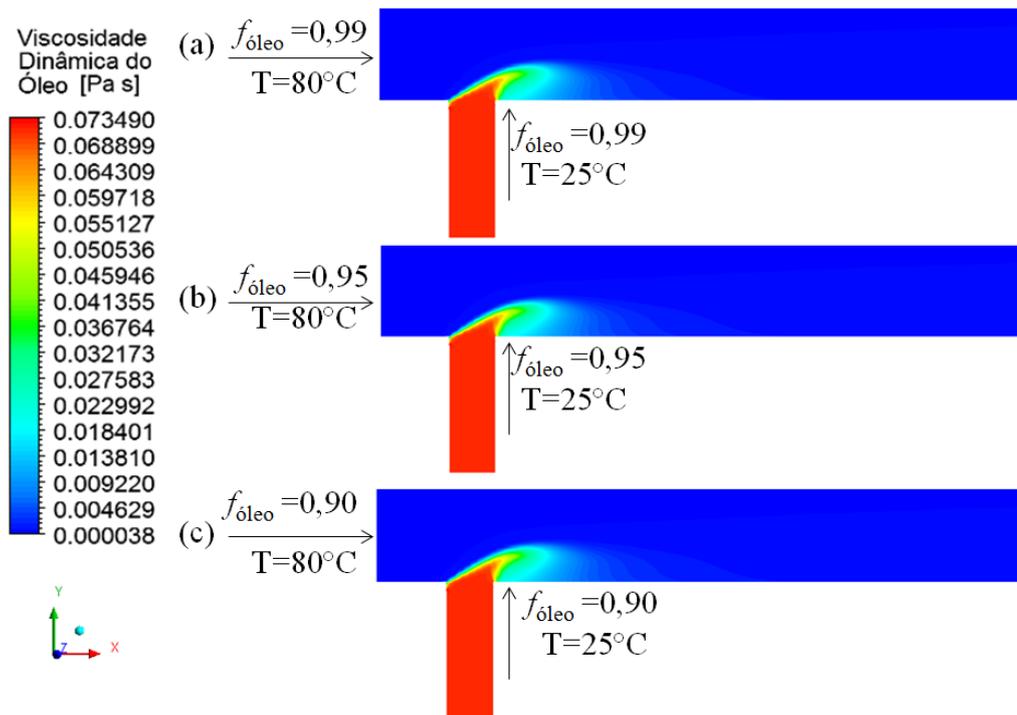
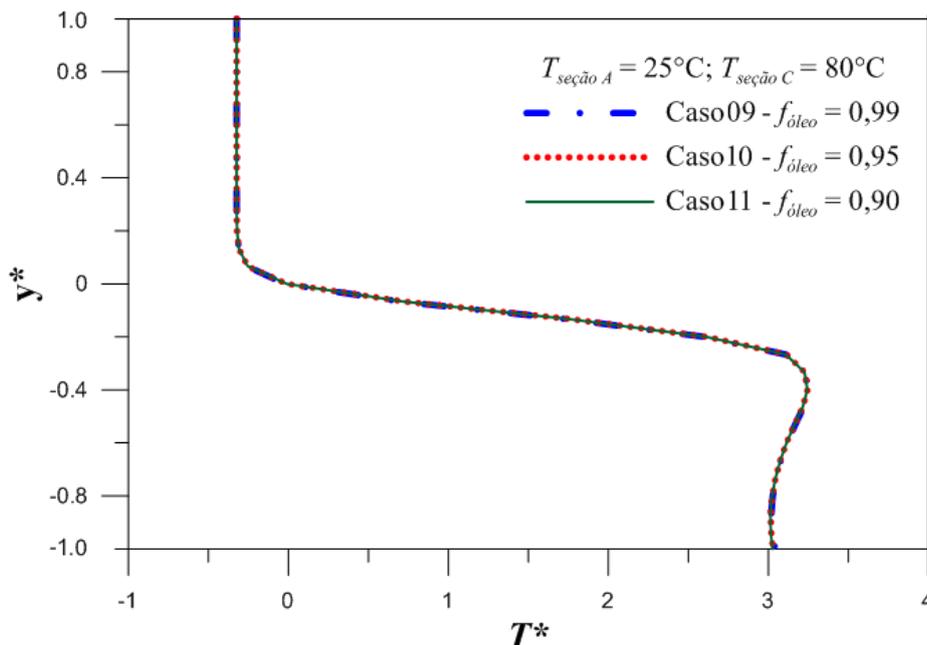


Figura 52: Campo de viscosidade dinâmica do óleo sobre o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A  $25^{\circ}\text{C}$  e Seção C  $80^{\circ}\text{C}$ : (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 09); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 10) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 11).

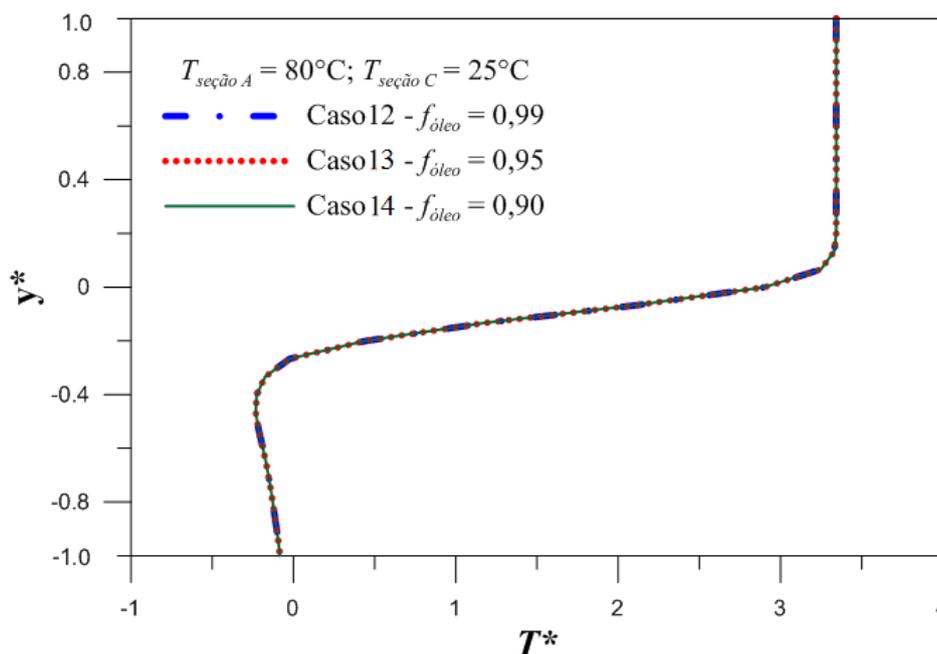


**Figura 53:** Campos de viscosidade dinâmica do óleo sobre o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A  $80^{\circ}\text{C}$  e Seção C  $25^{\circ}\text{C}$ : (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 12); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 13) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 14).

Nas Figuras 54 e 55 estão representadas a distribuição radial da temperatura em função de  $y^*$  na posição  $L_1$  ( $x = 0,625$  m e  $z = 0$  m) para as três frações volumétricas de óleo analisadas (0,90; 0,95 e 0,99) para os mesmos casos apresentados nas Figuras 48 a 53. Percebe-se que a variação da fração volumétrica de óleo praticamente não influenciou nos perfis de temperaturas.



**Figura 54:** Perfis de temperatura adimensional sobre a linha  $L_1$  para os Casos 09, 10 e 11.



**Figura 55:** Perfis de temperatura adimensional sobre a linha  $L_1$  para os Casos 12, 13 e 14.

#### 4.2.3 Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de pressão na ausência de vazamento

Para estudar como os campos de pressão são afetados pela variação da fração volumétrica de óleo e pelas mudanças das temperaturas na entrada no ramal principal e no secundário foram ilustradas as Figuras 56 e 57. Os campos de pressão foram avaliados sobre o plano longitudinal  $xy$  para as três frações volumétricas de óleo. Pode perceber que a fração volumétrica de óleo e a alternância das temperaturas nas seções de entrada, praticamente não alterou o campo de pressão no escoamento. Todavia, nota-se uma mudança quando são comparadas as diferenças de pressão para os casos apresentados nas Figuras 56 e 57. Os resultados, em média, são respectivamente 38,031 Pa (Figura 56) e 38,191 Pa (Figura 57). Todavia, esta diferença é bastante sutil, que praticamente não alteraria na potência de bombeamento do fluido nos dois ramais, principal e secundário. No entanto, o nível de pressão é menor quando a temperatura da mistura no ramal principal é menor que no ramal secundário, devido à mudança no campo de viscosidade.

É interessante observar que as regiões imediatamente após a bifurcação estão sujeitas à baixas pressões dado que são mais propícias ao surgimento de recirculação de fluidos. Os resultados indicam que a região de conexão entre o tubo principal e o tubo secundário

apresenta os principais gradientes de pressão, estando mais propensa ao surgimento de fissuras que podem proporcionar vazamentos ou rompimento dos tubos.

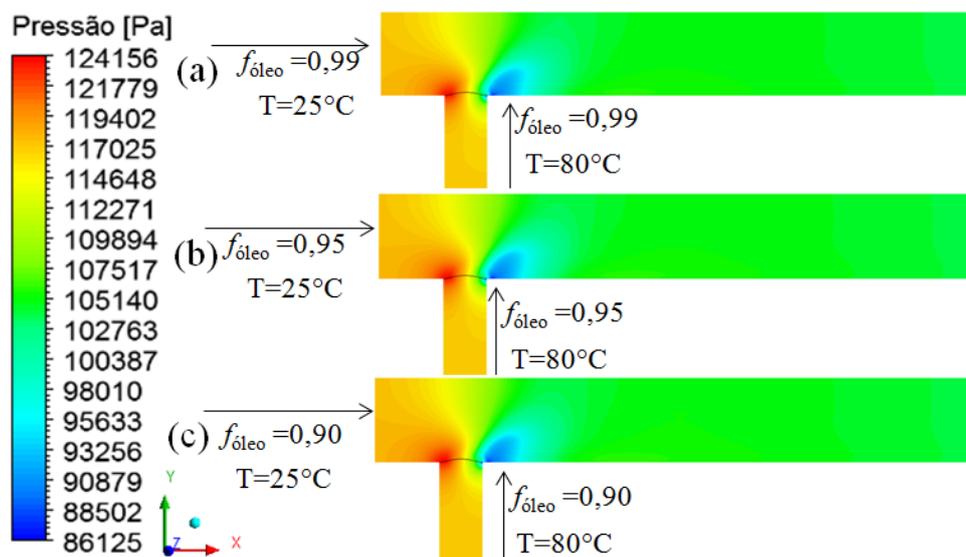


Figura 56: Campo de pressão sobre o plano longitudinal xy com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a)  $f_{\text{oleo}} = 0,99$  (Caso 09); (b)  $f_{\text{oleo}} = 0,95$  (Caso 10) e (c)  $f_{\text{oleo}} = 0,90$  (Caso 11).

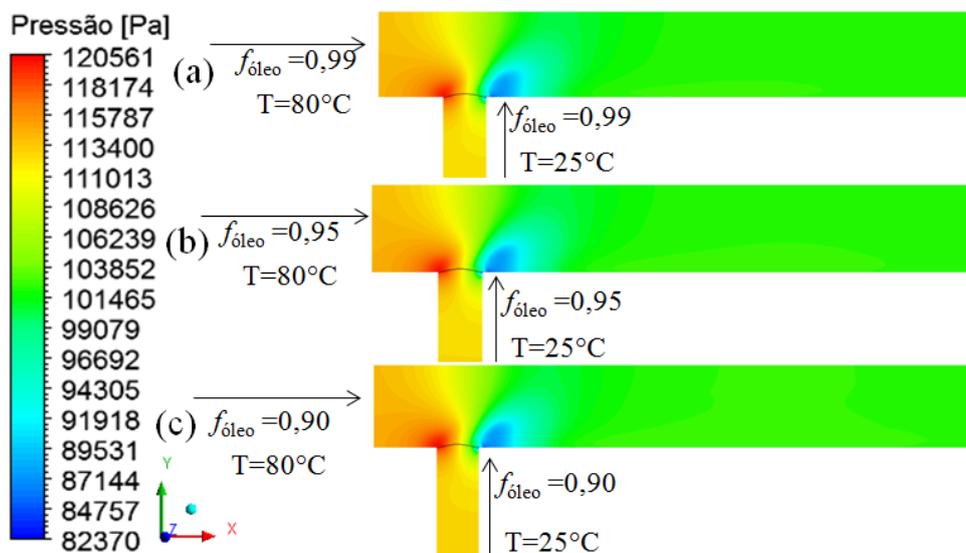


Figura 57: Campo de pressão sobre o plano longitudinal xy com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a)  $f_{\text{oleo}} = 0,99$  (Caso 12); (b)  $f_{\text{oleo}} = 0,95$  (Caso 13) e (c)  $f_{\text{oleo}} = 0,90$  (Caso 14).

#### 4.2.4 Efeito da fração volumétrica de óleo e da temperatura sobre os campos de velocidade na ausência de vazamento

Para avaliar os campos vetoriais da velocidade do óleo nas regiões próximas à interseção do duto principal com o duto secundário ao longo do eixo y, foi plotado o plano xz em diferentes posições y (Figura 58), tomando o Caso 09 como referência, e variou-se o

plano  $xz$  em diferentes posições  $y$ . Sobre cada plano foi representado o campo vetorial de velocidade e o campo de velocidade, conforme ilustra a Figura 59. Observa-se, nos diferentes planos, desde o centro até a parede inferior do tubo, que o comportamento do fluido no duto principal ao encontrar o fluido do duto secundário se assemelha a um escoamento em torno de um cilindro, como pode ser observado nas Figuras 59 c, d e e. Este tipo de comportamento favorece uma mistura eficiente e, conseqüentemente variações no gradiente de temperatura como foi observado nas Figuras 50 e 51.

O comportamento observado na Figura 61 é ratificado ao se observar os campos de velocidade representados nos planos  $xy$  e  $xz$  (Figura 62) conforme ilustra a Figura 63. Ainda na Figura 63, observa-se que o plano  $xz$  foi representado em diferentes posições  $y$  (0; -0,01; -0,016 m). Os resultados indicam os maiores gradientes de velocidade do óleo, indicando possíveis zonas de recirculação.

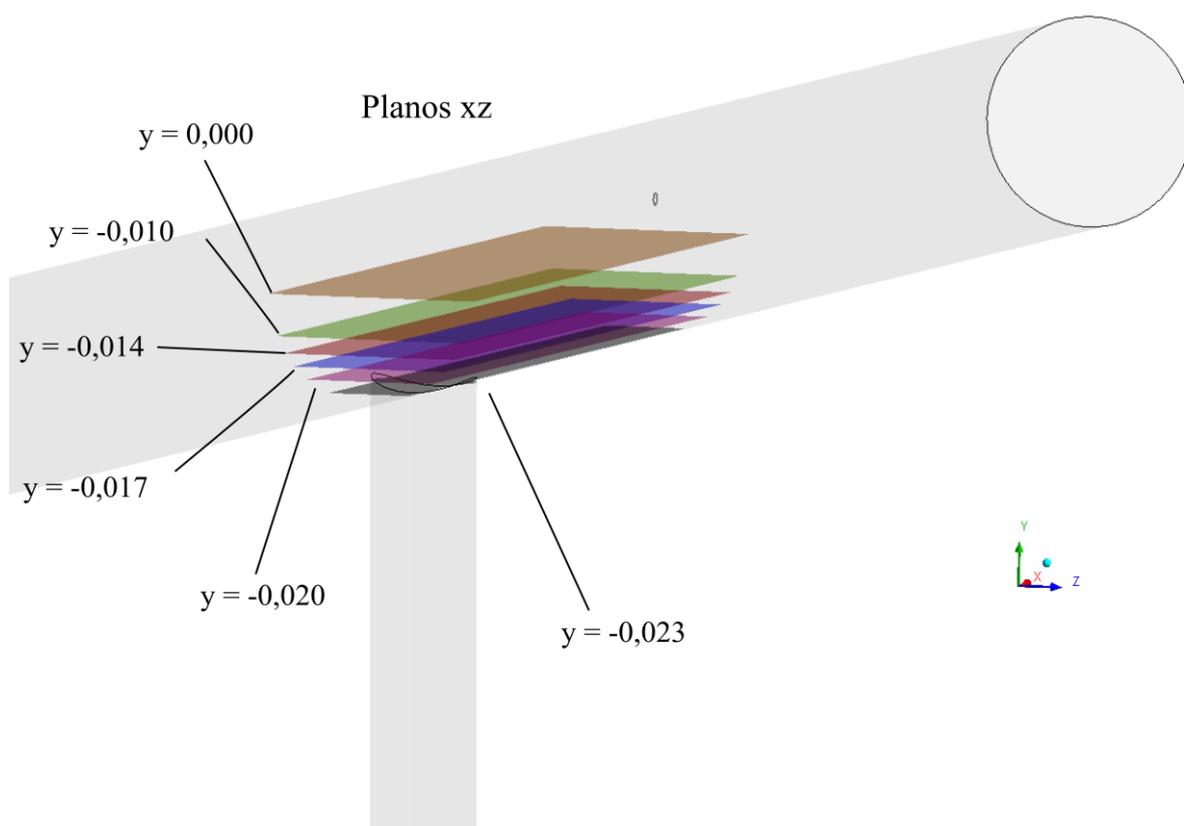
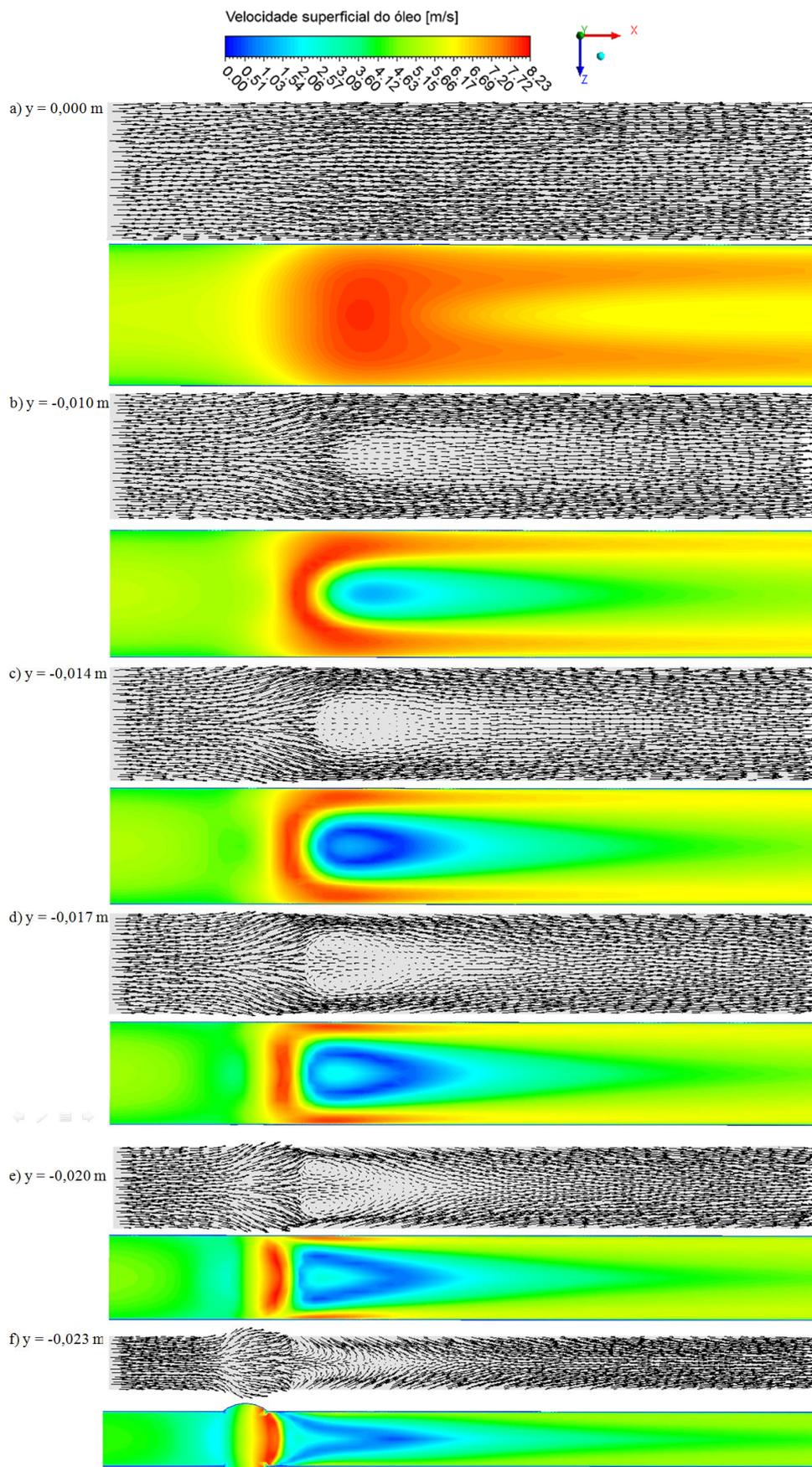


Figura 58: Plano  $xy$  utilizado para plotar os campos vetoriais



**Figura 59:** Vista superior dos campos vetoriais da velocidade do óleo sobre o plano  $xy$  nas posições (a)  $y = 0$  m, (b)  $y = -0,01$ m, (c)  $y = -0,014$  m, (d)  $y = -0,017$  m, (e)  $y = -0,020$  m e (f)  $y = -0,023$  m.

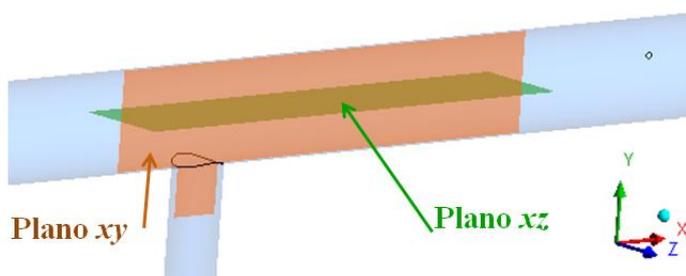


Figura 60: Planos  $xy$  e  $xz$  utilizados para plotar os campos de velocidade do óleo

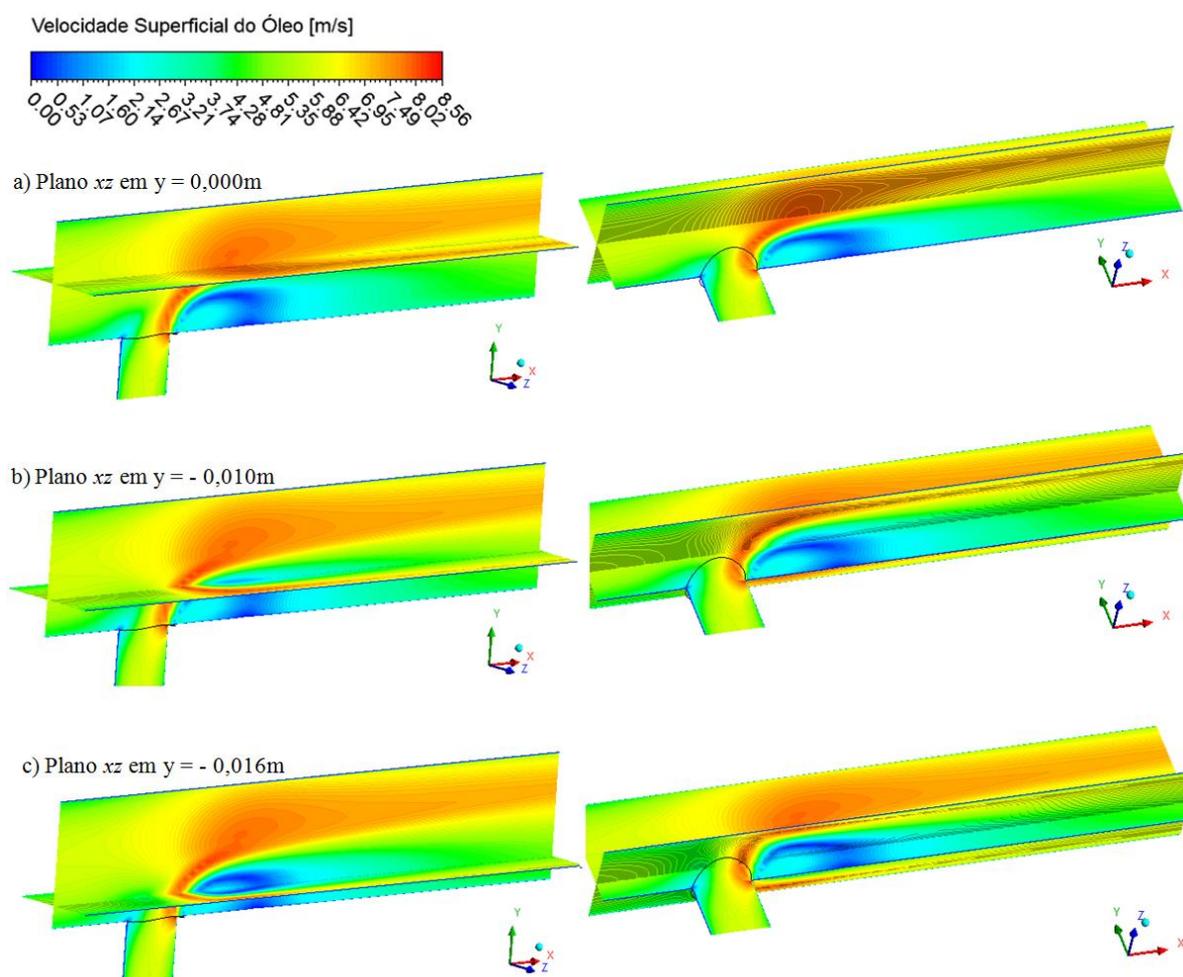


Figura 61: Campo de velocidade do óleo sobre o plano  $xy$  e sobre o plano  $xz$  nas posições (a)  $y = 0\text{ m}$ , (b)  $y = -0,01\text{ m}$  e (c)  $y = -0,016\text{ m}$ .

Para avaliar a como a fração volumétrica de óleo e a mudança nas temperaturas de entrada nas seções A e C influenciam nos campos de velocidade, foram representados os campos de velocidade da fase óleo sobre o plano longitudinal  $xy$ , conforme ilustrado nas Figuras 62 e 63.

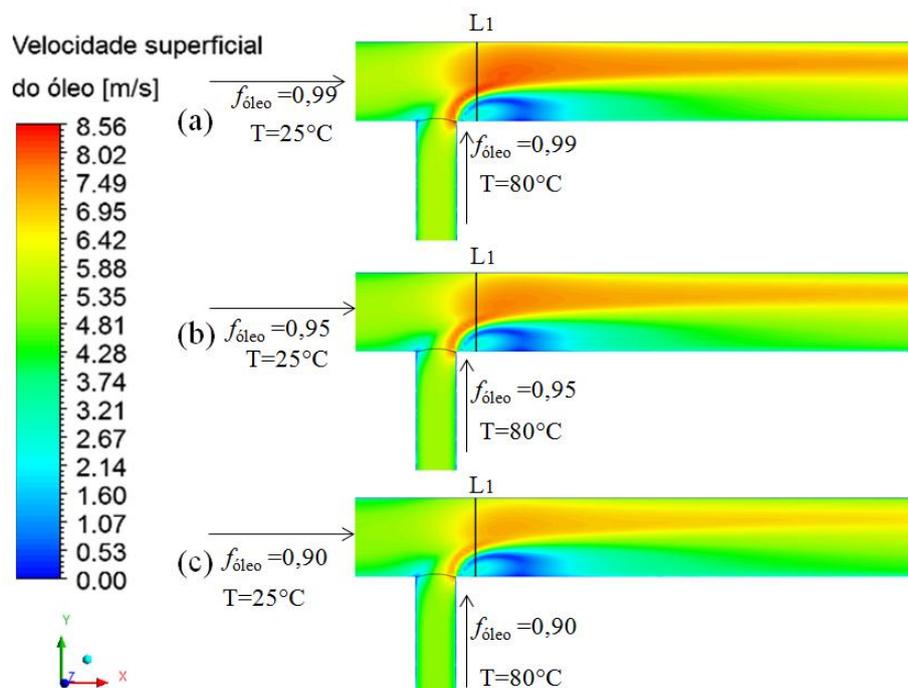


Figura 62: Campo de velocidade superficial do óleo o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A 25°C e Seção C 80°C: (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 15); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 16) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 17).

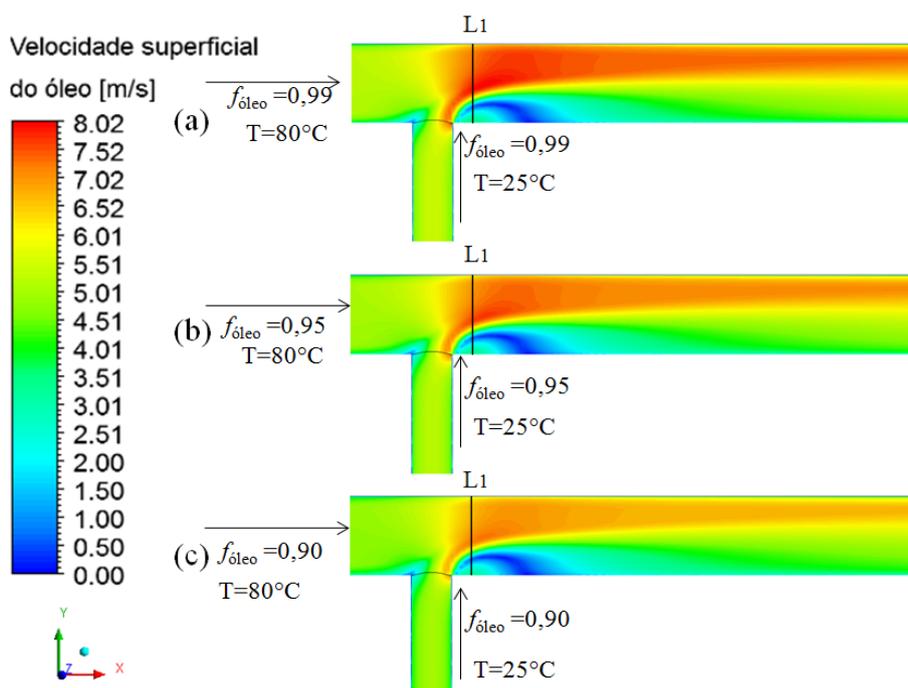


Figura 63: Campo de velocidade superficial do óleo sobre o plano longitudinal  $xy$  com a temperatura na Seção A 80°C e Seção C 25°C: (a)  $f_{\text{óleo}} = 0,99$  (Caso 18); (b)  $f_{\text{óleo}} = 0,95$  (Caso 19) e (c)  $f_{\text{óleo}} = 0,90$  (Caso 20).

Nas Figuras 64 e 65 estão representados os perfis de velocidade superficial do óleo em função da posição  $y^*$  sobre a linha  $L_1$ . Observa-se que os perfis de velocidade são praticamente idênticos na região próxima da parede inferior imediatamente após a

bifurcação T ( $y^* \leq -0,3$ ). Por outro lado, na parte superior observa-se que a fração volumétrica influencia no comportamento da velocidade do óleo.

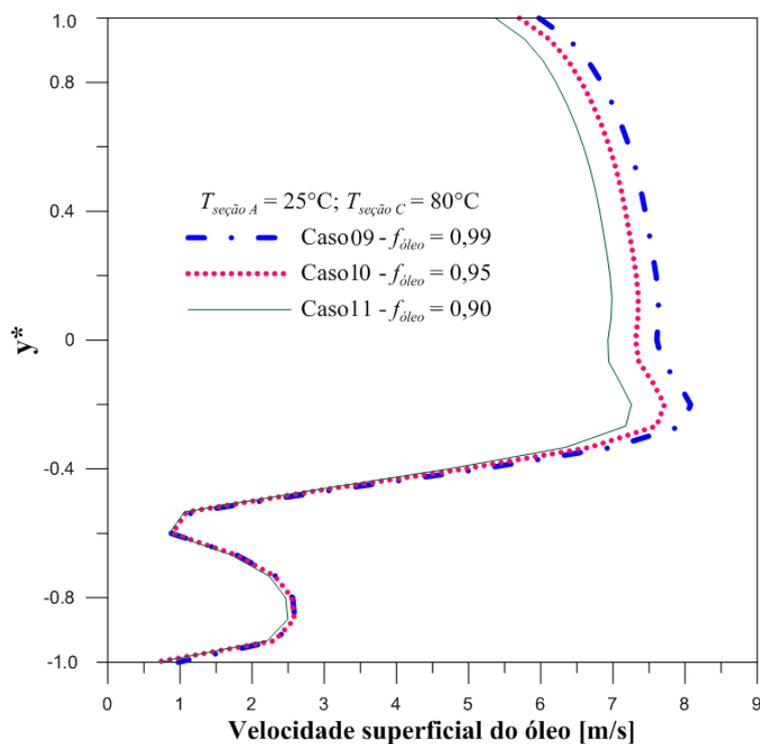


Figura 64: Velocidade superficial do óleo na linha  $L_1$  para os Casos 09, 10 e 11.

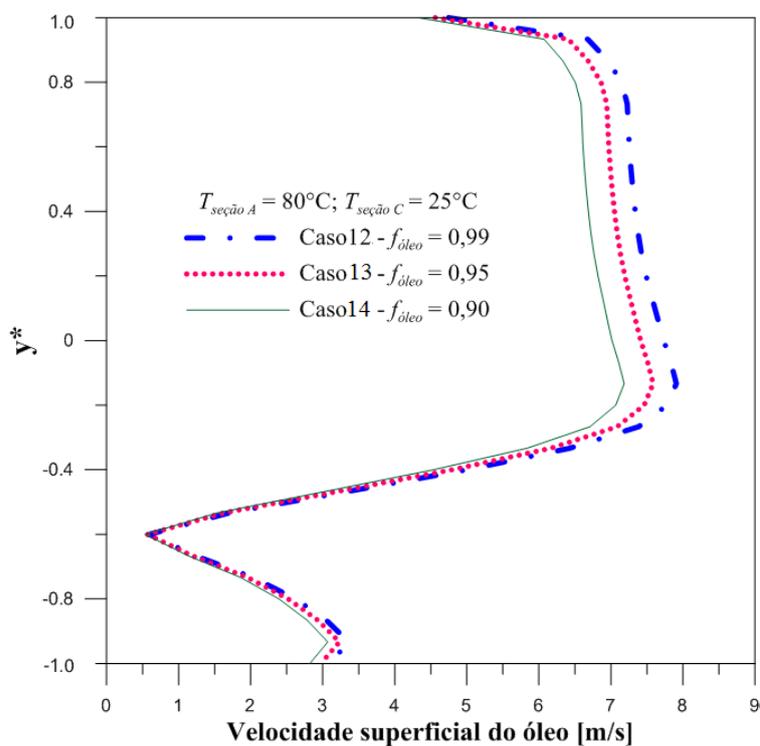
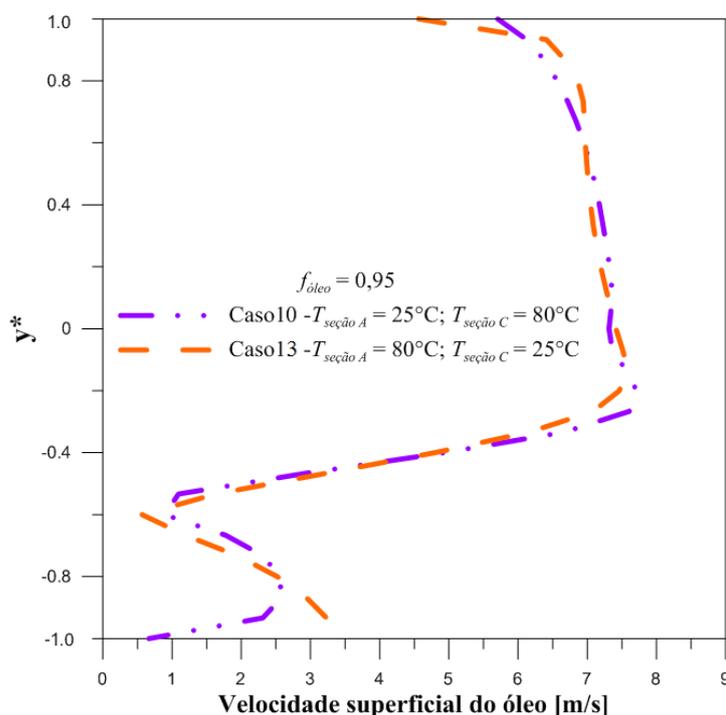


Figura 65: Velocidade superficial do óleo na linha  $L_1$  para os Casos 12, 13 e 14.

Observa-se, ainda, nas Figuras 64 e 65, que a inversão dos valores das temperaturas nas seções A e C modificam o comportamento dos perfis de velocidade, em especial, na parte superior do tubo ( $y^* > 0,4$ ). Nota-se nas vizinhanças da parede ( $y^* > 0,8$ ) maiores variações de velocidade ou gradientes de velocidade, quando, na seção A, a temperatura do fluido é igual a  $80^\circ\text{C}$ . Este fato pode ser explicado pela redução das forças viscosas.

Na Figura 66 estão representados os perfis de velocidade superficial do óleo para os casos 10 e 13, alternando os valores das temperaturas nas seções A e C. De acordo esta figura é possível ver como são afetados os perfis de velocidade.



**Figura 66: Velocidade superficial do óleo na linha  $L_1$  para os Casos 10 e 13.**

#### 4.2.5 Efeito da fração volumétrica de óleo sobre o escoamento na presença de vazamento

Para verificar a influência da fração volumétrica de óleo na mistura escoando na conexão tê sobre a evolução da pressão, medida a montante da bifurcação, com o tempo medido a partir do instante que ocorre o vazamento, foram tomados os casos 15 a 20, organizados em dois grupos, de forma que a única variável seja a fração volumétrica de óleo. O primeiro grupo (Casos 15, 16 e 17) refere-se aos casos onde a mistura entra na seção A a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e na seção C a uma temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . No segundo grupo (Casos 18, 19 e 20), a mistura adentra a seção A à  $80^\circ\text{C}$  e a seção C à  $25^\circ\text{C}$ . Em seguida, foram representadas as pressões na seção A em função do tempo, nas Figuras 67 e 68.

Os resultados plotados nas Figuras 67 e 68, com comportamento similares, indicam um pico decrescente da pressão no intervalo inicial de 0,0025 s indicando a perturbação causada pela presença do vazamento. Em seguida, o escoamento atinge um novo regime permanente, após 0,005 s.

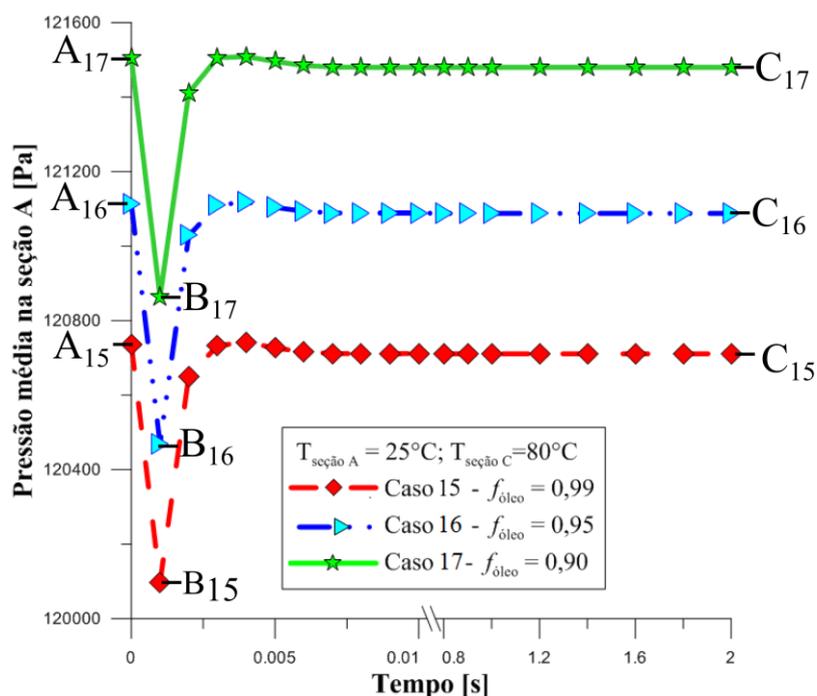


Figura 67: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 15, 16 e 17.

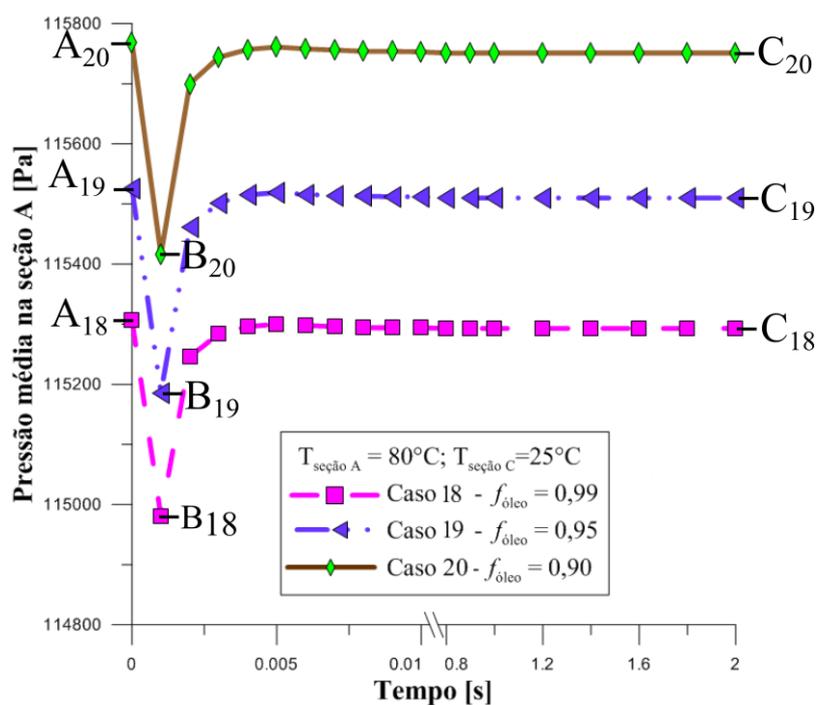


Figura 68: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 18, 19 e 20.

A Tabela 13 exhibe, para Figuras 67 e 68, os valores de pressão antes do vazamento ( $A_{15}$  a  $A_{20}$ ), no instante que surge o vazamento ( $B_{15}$  a  $B_{20}$ ) e após a estabilização da pressão ( $C_{15}$  a  $C_{20}$ ).

Considerando a diferença entre a pressão antes da existência do vazamento e a pressão no instante inicial do surgimento deste ( $\Delta P_{\text{máximo}} = \text{Ponto A} - \text{Ponto B}$ ), nota-se que as maiores diferenças de pressões iniciais são observadas nos casos onde a fração volumétrica de óleo é reduzida. A redução da fração volumétrica de óleo causa um aumento da densidade da mistura água-óleo, elevando a pressão dinâmica.

O cálculo da diferença de pressão final ( $\Delta P_{\text{final}} = \text{Ponto A} - \text{Ponto C}$ ) fornece os mesmos valores para os casos 15 a 17 e valores bem próximos para os casos 18 a 20.

**Tabela 13: Dados de pressões medidas na seção A na presença de vazamento**

Parâmetro	Casos 15 a 17			Casos 18 a 20		
	$f_{\text{óleo}} = 0,99$	$f_{\text{óleo}} = 0,95$	$f_{\text{óleo}} = 0,90$	$f_{\text{óleo}} = 0,99$	$f_{\text{óleo}} = 0,95$	$f_{\text{óleo}} = 0,90$
Ponto A [Pa]	120737	121114	121506	115307	115526	115769
Ponto B [Pa]	120094	120470	120863	114980	115186	115416
Ponto C [Pa]	120711	121088	121480	115293	115510	115751
$\Delta P_{\text{máximo}}$ [Pa]	640	644	643	327	340	353
$\Delta P_{\text{final}}$ [Pa]	26	26	26	14	16	18

#### 4.2.6 Efeito da temperatura sobre o escoamento na presença de vazamento

Na Figura 69 é apresentada uma comparação entre as evoluções das pressões medidas na seção A para o caso 15 (temperatura de 25°C na seção A e 80°C na seção C), e o Caso 18 (temperatura de 80°C na seção A e 25°C na seção). Os resultados indicam dois picos decrescentes (pontos mínimos) com grandezas bem distintas. Este fato pode ser explicado por:

- a) Inicialmente, note que a seção A possui uma área maior que a seção C, e como as velocidades em ambas as seções são as mesmas, pode-se concluir que a vazão volumétrica que adentra a tubulação pela seção A é maior que pela seção C. Logo, a mistura que entra pela seção A vai ter uma maior contribuição na pressão na região da tubulação onde se encontram as duas correntes.

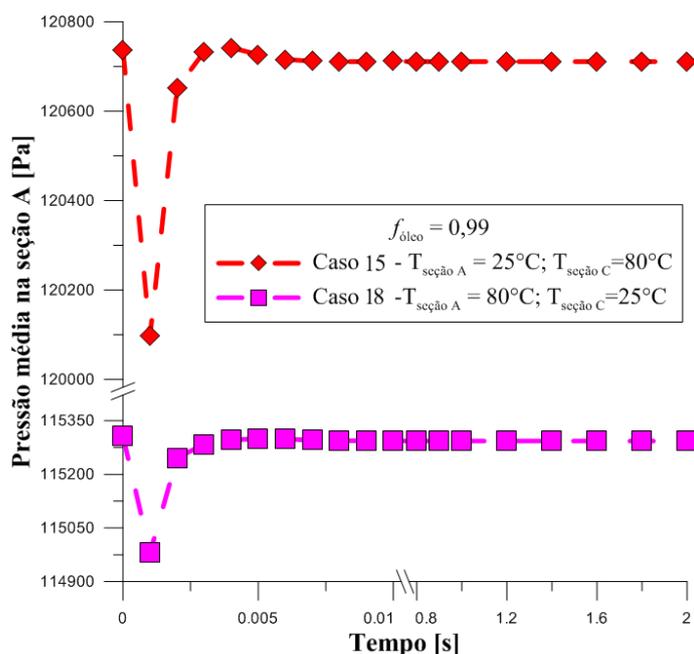


Figura 69: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 15 e 18.

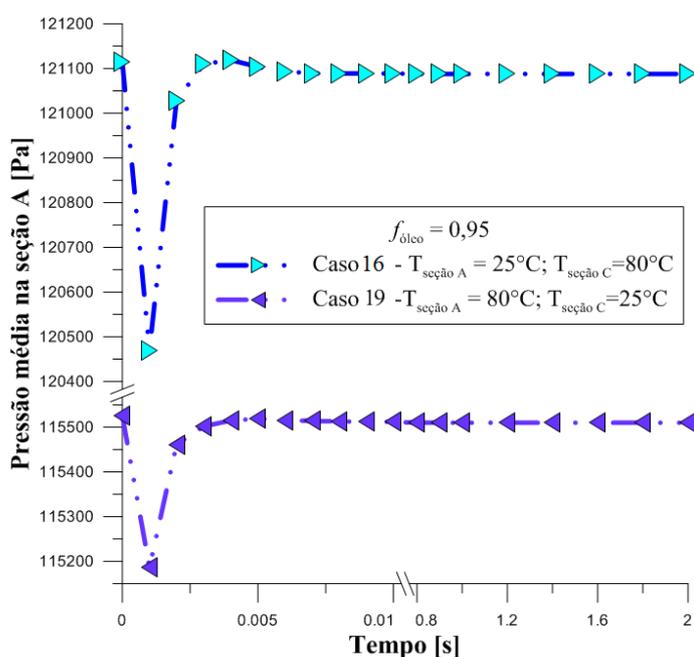


Figura 70: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 16 e 19.

b) Lembrando que na seção de saída (seção B) foi inserida a condição de pressão 101325 Pa, e na seção A uma condição de velocidade, a simulação calcula a pressão na seção A e esta deverá, obviamente, ser maior que 101325 Pa. Em escoamentos no interior de tubulações, a variação de pressão em um determinado trecho é diretamente proporcional à viscosidade. Então, quanto maior for a viscosidade da mistura que adentra pela seção A, maior será a pressão medida na referida seção. Esse comportamento físico é percebido na Figura 69 ao notar que no Caso 15

(mistura na seção A com baixa temperatura e alta viscosidade) apresenta maiores pressões que o Caso 18 (mistura na seção A com alta temperatura e baixa viscosidade). O mesmo comportamento é repetido na Figura 70 (Casos 16 e 19) e Figura 71 (Casos 17 e 20).

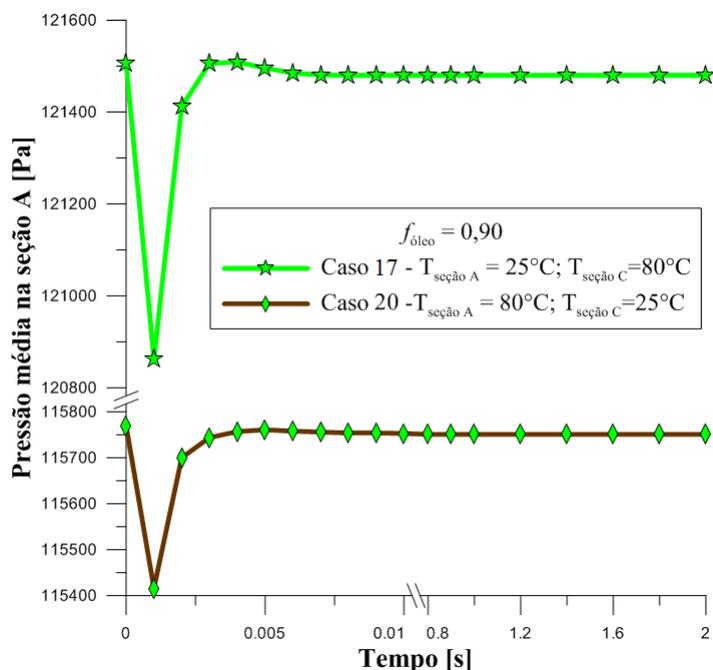


Figura 71: Variação da pressão média na Seção A em função do tempo para os Casos 17 e 20.

#### 4.2.7 Efeito do vazamento sobre os campos de pressão

Nas Figuras 73 a 75 estão representados os campos de pressão sobre o plano transversal  $yz$  em  $x$  igual a 0,90 m (no centro do orifício), Figura 72, para diferentes tempos (0; 0,001; 0,003 e 0,010 s). Observa-se que no instante  $t = 0$  s não há vazamento. Logo em seguida,  $t = 0,001$  s, observa-se uma redução da pressão em toda a seção transversal e nota-se claramente o gradiente de pressão na vizinhança do vazamento que se mantém nos tempos iguais a 0,003 e 0,010 s.

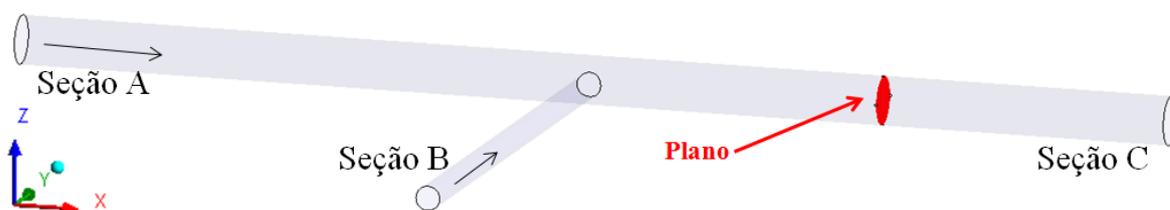


Figura 72: Plano  $yz$  utilizado para os campos de pressão radiais

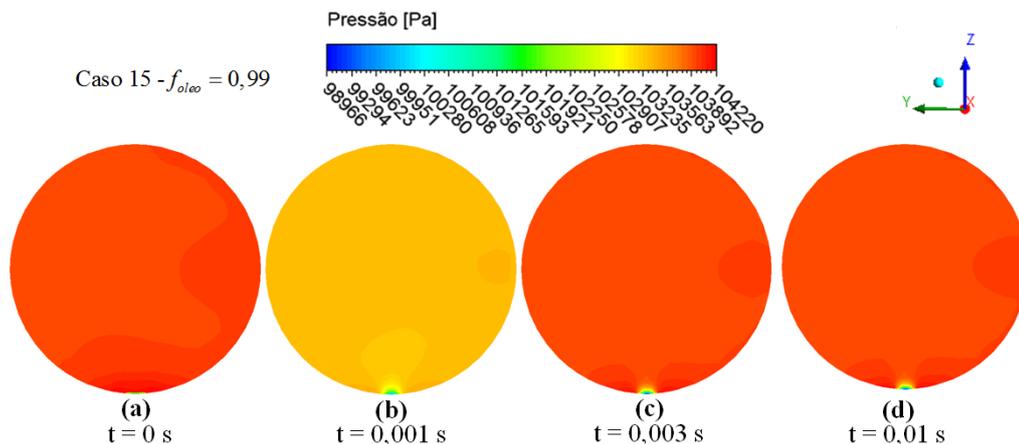


Figura 73: Campo de pressão axial no Caso 15 sobre o plano A nos instantes (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 0,001$  s, (c)  $t = 0,003$  s e (d)  $t = 0,01$  s.

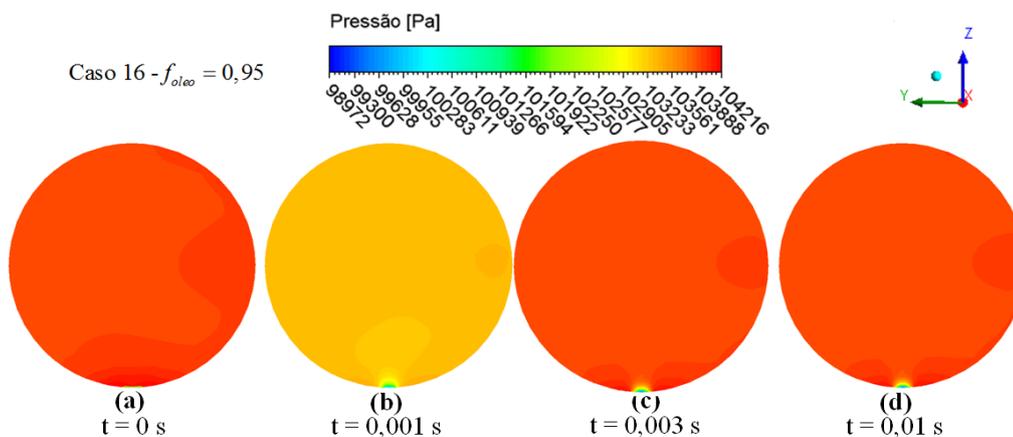


Figura 74: Campo de pressão axial no Caso 16 sobre o plano A nos instantes (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 0,001$  s, (c)  $t = 0,003$  s e (d)  $t = 0,01$  s.

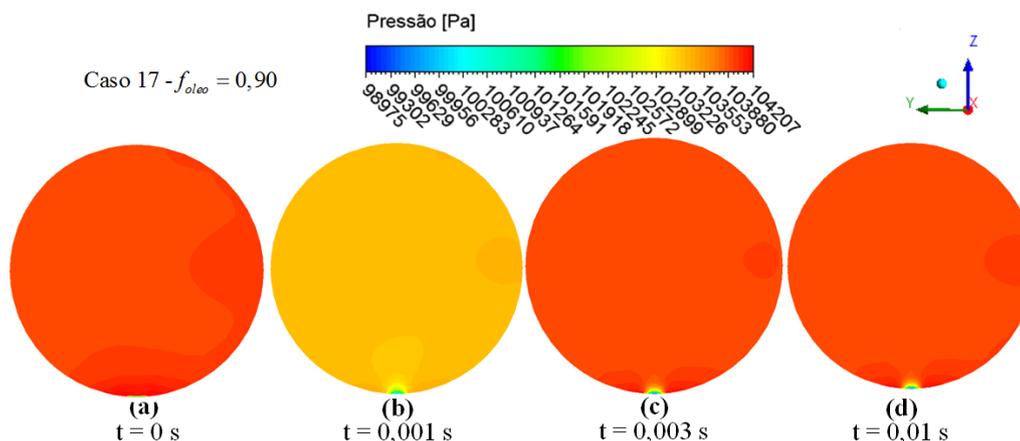


Figura 75: Campo de pressão axial no Caso 17 sobre o plano A nos instantes (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 0,001$  s, (c)  $t = 0,003$  s e (d)  $t = 0,01$  s.

Traçando-se uma linha paralela à linha central e 1 mm abaixo do vazamento em  $y = -2,4$  cm (Figuras 76,77 e 78), observa-se uma queda brusca na pressão seguida de um leve aumento na posição aproximada entre  $x = 0,5$  m e  $x = 0,7$  m devido à bifurcação. A

queda da pressão seguida da elevação ocorrente na região em destaque ( $x = 0,9$  m) caracteriza a ocorrência do vazamento.

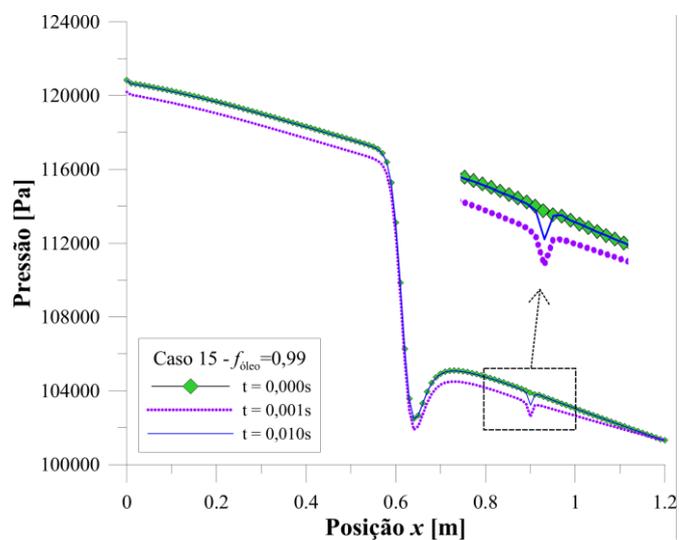


Figura 76: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 15

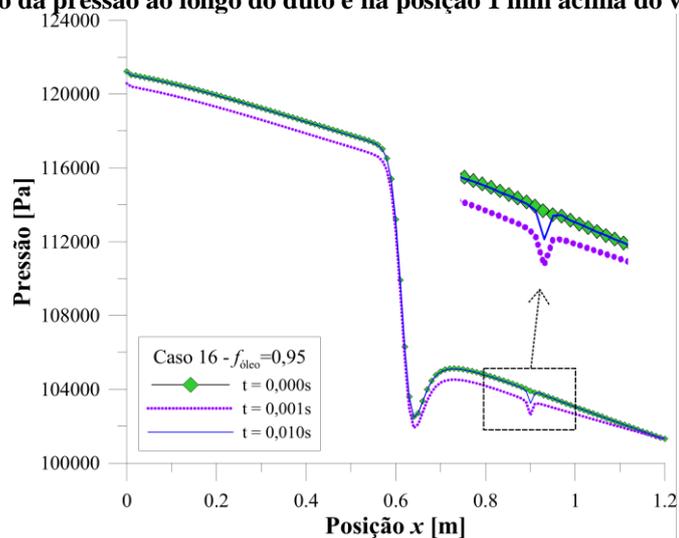


Figura 77: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 16

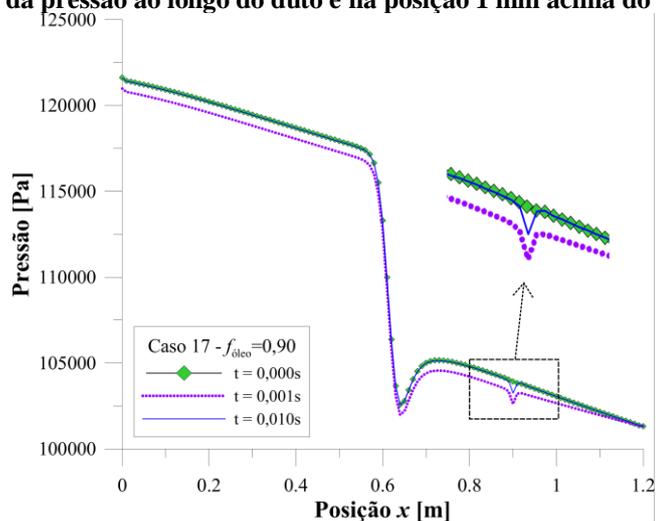


Figura 78: Variação da pressão ao longo do duto e na posição 1 mm acima do vazamento - Caso 17

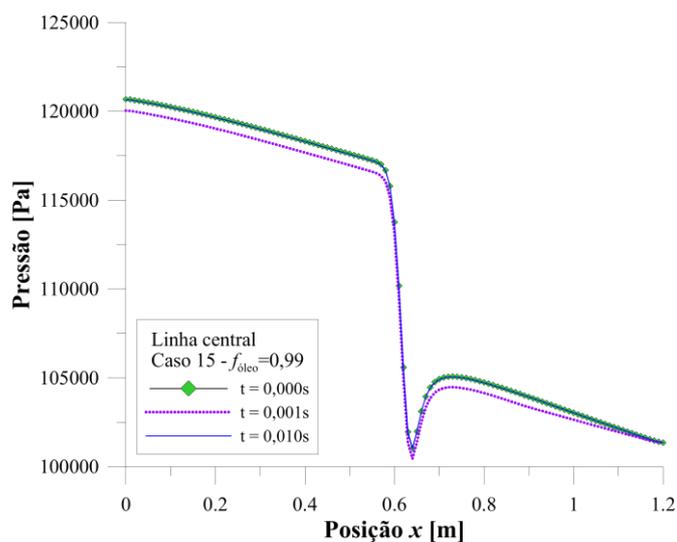


Figura 79: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 15

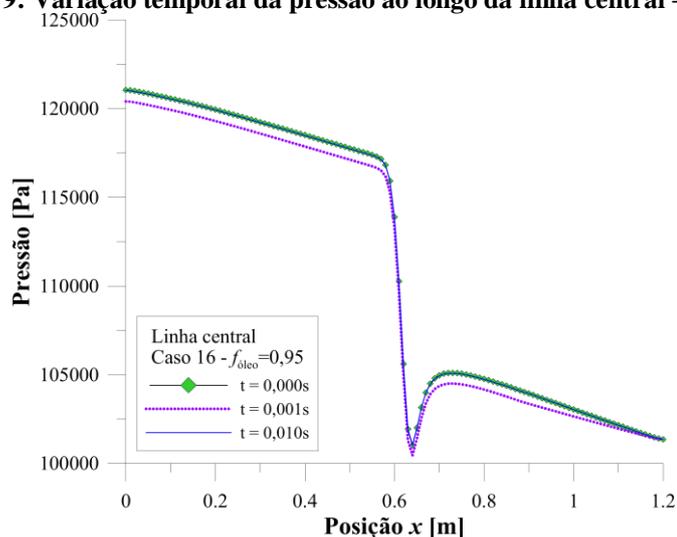


Figura 80: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 16

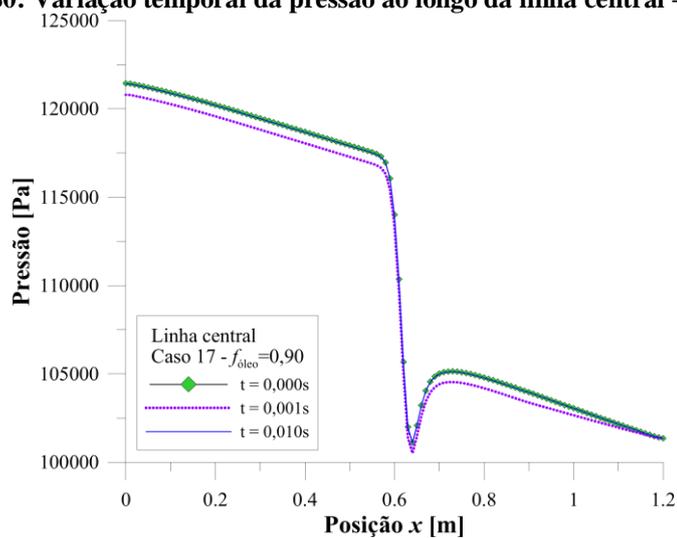


Figura 81: Variação temporal da pressão ao longo da linha central – Caso 17

Observando a linha central em  $y = 0$  m (Figuras 79, 80 e 81), e percebe-se novamente a queda brusca na pressão seguida de um leve aumento na região da bifurcação, porém a

queda de pressão devido ao vazamento não foi percebida, confirmando que, quanto mais distante a linha estiver do vazamento, mais difícil torna-se a percepção deste.

## 5 CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos são descritas as seguintes conclusões:

- A malha utilizada permitiu a obtenção de resultados consistentes fisicamente, mostrando-se apta para utilização nas simulações;
- O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão representou satisfatoriamente o comportamento do escoamento de água não-isotérmico quando comparado com os dados experimentais disponibilizados na literatura;
- As simulações numéricas indicam que a mistura ao entrar pelo duto principal com temperatura maior que a do duto secundário apresenta uma distribuição da fração volumétrica de óleo homogênea nas situações avaliadas;
- As variações das frações volumétricas de óleo não tiveram influência significativa sobre os campos de temperatura;
- O gradiente de velocidade superficial do óleo cresceu com o aumento da fração volumétrica de óleo
- Os maiores gradientes de pressão foram observados na região de encontro entre o duto principal e o duto secundário;
- O comportamento do fluido no ramal principal ao encontrar o fluxo do ramal secundário se assemelha a um escoamento em torno de um cilindro;
- Quanto menor a fração volumétrica de óleo no escoamento, maior a pressão a montante do vazamento;
- A existência de um vazamento no duto causa inicialmente uma queda de pressão que se estende ao longo da tubulação, seguida de uma elevação até atingir a estabilidade.

## 6 BIBLIOGRAFIA

AGBAKWURU, Jasper. **Pipeline potential leak detection technologies: assessment and perspective in the nigeria niger delta region.** Journal of Environmental Protection, v. 2, n. 8, p. 1055-1061, 2011.

AGUIAR, F. G. **Utilização de redes neurais artificiais para detecção de padrões de vazamentos em dutos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ASEL-TECH. **Sistema integrado de detecção de vazamentos.** Acesso em 04 de Abril de 2013, disponível em <<http://www.asel-tech.com.br/>>

BARBOSA, L. M.; LIMA, A. G. e FARIAS NETO, S. R. **Non-isothermal transient three-phase flow (heavy oil, water and gas) in vertical pipeline: the effect of leakage.** International Journal of Modeling and Simulation for Petroleum Industry, v. 6, n.2, p. 23-31, 2012.

BEN-MANSOUR, R.; HABIB, M.; KHALIFA, A.; YUCEF-TOUMI, K. e CHATZIGEORGIOU, D. **Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines.** Computers & Fluids, v. 57, p. 110-123, 2012.

BRATLAND, Ove. **Pipe flow 1: single-phase flow assurance.** Apostila, 2009.

BRANTLAND, Ove. **Pipe flow 2: multi-phase flow assurance.** Apostila, 2010.

CARVALHO, André C. P. de L. F. de. (s.d.). Acesso em 05 de março de 2013, disponível em <<http://www2.icmc.usp.br/~andre/research/neural/index.htm>>

COLOMBAROLI, P. L. **Sistema de detecção de vazamento em dutos de petróleo.** Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

CSO, C. d. **Relatório anual de segurança operacional das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural.** ANP, Coordenadoria de Segurança Operacional, 2011.

CUNHA, A. L. **Recuperação avançada não-isotérmica de óleos pesados em reservatórios de petróleo via simulação numérica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

DUDIC, S.; IGNJATOVIC, I.; ŠEŠLIJA, D.; BLAGOJEVIC, V. e STOJILJKOVIC, M. **Leakage quantification of compressed air using ultrasound.** Measurement, v. 45, n. 7, p. 1689–1694, 2012.

EDRISI, A. e KAM, S. I. **Mechanistic leak-detection modeling for single gas-phase pipelines: lessons learned from fit to field-scale experimental data.** *Advances in Petroleum Exploration and Development*, v. 5, n. 1. p. 22-36, 2012.

FRANK, T.; LIFANTE, C.; PRASSER, H.-M. e MENTERA, F. **Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX.** *Nuclear Engineering and Design*, v. 240, n. 9, p. 2313–2328, 2010.

GAN, G. e RIFFATI, S. B. **Numerical determination of energy losses.** *Applied Energy*, v. 67, n. 3, p. 331-340, 2000.

KAMAYA, M. e NAKAMURA, A. **Thermal stress analysis for fatigue damage evaluation at a mixing tee.** *Nuclear Engineering and Design*, v. 241, n. 8, p. 2674– 2687, 2011.

LULA, F. A. C. M. **Estudo de um misturador tipo “T” com as técnicas PIV e PLIF.** Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MESQUITA, J. **UOL Notícias.** Acesso em 08 de 04 de 2013, disponível em <<http://noticias.uol.com.br/album/2013/04/06/6abr2013---funcionarios-trabalham-para-conter-o-oleo-que-vazou-de-uma-linha-do-tebar-terminal-maritimo-almirante-barroso-da-transpetrobras-em-sao-sebastiao-litoral-norte-de-sao.htm#fotoNav=1>>

MING, T. e ZHAO, J. **Large-eddy simulation of thermal fatigue in a mixing tee.** *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 37, p. 93-108, 2012.

NAIK-NIMBALKAR, V. S.; PATWARDHAN, A.; BANERJEE, I.; PADMAKUMAR, G. e VAIDYANATHAN, G. **Thermal mixing in T-junctions.** *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 22, p. 5901-5911, 2010.

PAVAN, A. M. **Detecção on-line de vazamentos em vasos de pressão utilizando sistemas sônicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SANDBERG, C.; HOLMES, J.; MCCOY, K. e KOPPITSCH, H. **The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 25, n. 5, p. 906-909, 1989.

SOUSA, E. O. **Detecção de vazamentos em tubulações através de método acústico e da análise de transientes de pressão.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SOUSA, J. V.; SODRÉ, C. H.; LIMA, A. G. e FARIAS NETO, S. R. **Numerical analysis of heavy oil-water flow and leak detection in vertical pipeline.** *Advances in Chemical Engineering and Science*, v. 3, n. 1, 2013.

SPEAR, S. P. **Proposed Natural Gas Pipeline Through Ohio Raises Grave Concern.** Acesso em 07 de março de 2013, disponível em <Cutting-Edge Environmental News Service: <http://ecowatch.org/2012/pipeline-raises-grave-concern/>>

VAN DER MEIJDE, M.; KNOX, N. M.; CUNDILL, S. L.; NOOMEN, M. L.; VAN DER WERFF, H. M. A.; HECKER, C. **Detection of hydrocarbons in clay soils: a laboratory experiment using spectroscopy in the mid- and thermal infrared.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 23, p. 384–388, 2012.

WANG, L.-Y.; WU, Y.-X.; ZHENG, Z.-C.; GUO, J.; ZHANG, J. e TANG, C. **Oil-water two-phase flow inside t-junction.** Journal of Hydrodynamics, v. 20, n. 2, p. 147-153, 2008.

XU, J.; LI, D.; GUO, J E WU, X. **Investigations of phase inversion and frictional pressure gradients in upward and downward oil-water flow in vertical pipes.** International Journal of Multiphase Flow, v. 36, n. 11-12, p. 930-939, 2010.

## APÊNDICE

## D) CÁLCULO DOS ERROS NO AJUSTE DO MODELO DE TURBULÊNCIA

As Tabelas I e II mostram os valores das velocidades radiais tomados nas Linhas 1 e 2 e na mesma localização dos pontos experimentais.

Tabela I – Velocidade radial na Linha 1 sobre os pontos experimentais

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
$y/R_m$	0,59	0,39	0,19	-0,01	-0,21	-0,41	-0,61	-0,81
V [m/s] Experimental – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	1,14	1,22	1,25	1,27	1,38	1,36	0,97	0,49
V [m/s] Numérico – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	1,29	1,32	1,35	1,37	1,35	1,36	0,25	-0,37
V [m/s] Modelo $\kappa-\varepsilon$	1,32	1,34	1,35	1,38	1,39	1,24	0,49	0,33
V [m/s] Modelo SST	1,34	1,36	1,37	1,40	1,40	1,24	0,38	0,26
V [m/s] Modelo RNG $\kappa-\varepsilon$	1,34	1,36	1,37	1,39	1,40	1,23	0,35	0,03

Tabela II – Velocidade radial na Linha 2 sobre os pontos experimentais

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
$y/R_m$	0,59	0,39	0,19	-0,01	-0,21	-0,41	-0,61	-0,81
V [m/s] Experimental – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	1,24	1,28	1,27	1,32	1,34	1,04	0,49	0,37
V [m/s] Numérico – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	1,33	1,35	1,36	1,34	1,19	0,77	0,36	0,27
V [m/s] Modelo $\kappa-\varepsilon$	1,36	1,38	1,38	1,38	1,28	0,74	0,33	0,22
V [m/s] Modelo SST	0,39	1,41	1,41	1,42	1,29	0,57	0,09	0,20
V [m/s] Modelo RNG $\kappa-\varepsilon$	1,40	1,41	1,42	1,43	1,33	0,40	0,12	0,14

As tabelas III e IV mostram os valores das temperaturas normalizadas radiais tomados nas Linhas 1 e 2 e na mesma localização dos pontos experimentais.

**Tabela III – Temperaturas normalizadas radiais na Linha 1 sobre os pontos experimentais**

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9
Y/R <sub>m</sub>	0,797	0,599	0,403	0,201	-0,006	-0,21	-0,41	-0,61	-0,81
V [m/s] Experimental – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,03	0,06	0,42	0,86	0,88
V [m/s] Numérico – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)					0,01	0,08	0,62	0,90	0,87
V [m/s] Modelo $\kappa$ - $\varepsilon$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,62	0,98	0,97
V [m/s] Modelo SST	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,72	0,98	0,97
V [m/s] Modelo RNG <i>k-e</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,87	0,93	0,95

**Tabela IV – Temperaturas normalizadas radiais na Linha 2 sobre os pontos experimentais**

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9
Y/R <sub>m</sub>	0,801	0,599	0,396	0,197	-0,006	-0,204	-0,403	-0,602	-0,805
V [m/s] Experimental – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> (2010)	0,00	0,006	0,006	0,014	0,100	0,170	0,575	0,735	0,756
V [m/s] Numérico – Naik-Nimbalkar <i>et al.</i> , 2010.					0,04	0,22	0,47	0,63	0,70
V [m/s] Modelo $\kappa$ - $\varepsilon$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,66	0,84	0,90
V [m/s] Modelo SST	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,24	0,76	0,91	0,93
V [m/s] Modelo RNG <i>k-e</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,038	0,72	0,98	0,98