



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE RECURSOS HUMANOS DA
AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO PARA O
SETOR DE PETRÓLEO E GÁS
PRH/ANP/MCT



**AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO NA PRESENÇA DE VAZAMENTO
EM OLEODUTOS HORIZONTAIS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Morgana de Vasconcellos Araújo

Campina Grande
2012

Morgana de Vasconcellos Araújo

**AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO NA PRESENÇA DE VAZAMENTO
EM OLEODUTOS HORIZONTAIS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Monografia apresentada ao Programa de Recursos
Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-
25/ANP) para o Setor de Petróleo, Gás Natural e
Biocombustíveis.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação
Orientadores: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande-PB, Agosto/2012

MORGANA DE VASCONCELLOS ARAÚJO


**AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO NA PRESENÇA DE VAZAMENTO
EM OLEODUTOS HORIZONTAIS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Monografia avaliada em: 09/08/2012

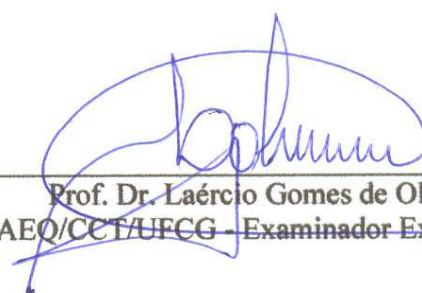
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
UAEM/CCT/UFCG - Orientador



Prof. Dr. Laércio Gomes de Oliveira
UAEQ/CCT/UFCG - Examinador Externo



Dr. Enivaldo Santos Barbosa
UAEM/CCT/UFCG - Examinador Externo

Campina Grande-PB, Agosto/2012

DEDICATÓRIA

À Deus pelas bênçãos derramadas e à minha família pelo seu alicerce.

AGRADECIMENTOS

À Deus – Autor do Universo – pela saúde, pelo amor e pela iluminação.

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.

Aos colegas e amigos do LPFI e do LCTF, por todas as contribuições técnicas e pelos inúmeros momentos de descontração. E em especial à Daniela Passos, Dr. Enivaldo, Lorena Monteiro e João Victor.

Aos colegas e amigos da graduação pelo companheirismo na trilha desse caminho.

Às minhas amigas Kaline e Débora pela amizade, pelos bons momentos e por estarem próximas quando mais precisei.

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, ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela autorização na utilização do LCTF e por sua valiosa orientação.

A ANP, PRH-25, CT BRASIL, CTPETRO, FINEP, PETROBRAS, RPCMOD e a UFCG pela parceria na realização deste trabalho.

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

MUITO OBRIGADA!

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará.”
(Salmo 37:1-5)

RESUMO

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Avaliação do escoamento bifásico na Presença de Vazamento em Oleodutos Horizontais: Modelagem e Simulação.** Campina Grande: Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2012. Monografia.

O transporte de petróleo e seus derivados é realizado, em sua grande maioria, por meio de dutos. Problemas de vazamento em oleodutos/gasodutos ainda são frequentes apesar do avanço tecnológico na construção destes. As indústrias têm investido em tecnologias que possibilitem a rápida detecção do vazamento a fim de se efetuar a parada de bombas e fechamento rápido de válvulas impedindo, assim, o desastre ambiental, sendo, portanto, o tempo de detecção de vazamento um parâmetro essencial. As técnicas de detecção de vazamento disponíveis variam desde a inspeção visual até o uso de técnicas computacionais. No presente trabalho foi avaliada a fluidodinâmica do escoamento bifásico (água – óleo) em oleodutos horizontais com vazamento. As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento foram resolvidas numericamente usando o software ANSYS CFX[®] com o auxílio de uma malha estruturada do tubo horizontal com três orifícios de vazamento. Foi adotado o modelo Euleriano-Euleriano com o óleo em fase contínua e a água em fase dispersa. As propriedades físico-químicas são constantes. Com os perfis de pressão e fração volumétrica avaliou-se a influência dos vazamentos sobre o escoamento monofásico (óleo) e bifásico (óleo – água).

Palavras-chave: Escoamento bifásico; Duto horizontal; Vazamento; Simulação numérica; CFX.

ABSTRACT

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Evaluation of Two-phase Flow in horizontal pipeline with leak: Modeling and Simulation.** Campina Grande: Graduate in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2012. Monograph.

The transport of oil and their derivatives is done, mostly, by pipeline. Leakage problems in oil / gas are still common despite the advanced technology in their construction. The industry has been investing in technologies that allow a fast detection of leak in order to make the pumps stop and close valves quickly, preventing, consequently, an environmental disaster, showing the importance of detection time of leak. The techniques available of leak detection vary from visual inspection to the use of computational techniques. In the present study the fluid dynamics of two-phase flow (oil – water) in horizontal oil pipelines with leak was evaluated. The equations of the conservation of mass and momentum are numerically solved using the ANSYS ® CFX with the aid of a structured mesh in the horizontal pipe with three holes of leaks. The Eulerian-Eulerian model was adopted with oil in continuous phase and water in dispersed phase. The physicochemical properties are constant. With profiles of pressure and volume fraction the influence of leakage flow on the single-phase (oil) and biphasic was evaluated (oil – water).

Keywords: Two phase flow; Horizontal duct; Leak; Numerical simulation; CFX.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SIGLAS.....	v
NOMENCLATURA.....	vi
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Justificativa.....	02
1.2. Objetivo.....	03
1.3. Objetivos específicos.....	03
2. REVISÃO BIBLIOGRAFIA.....	04
2.1. Petróleo.....	04
2.2. Vazamento em tubulações.....	05
2.3. Classificações de vazamentos.....	07
2.4. Métodos de detecção de vazamentos.....	08
2.4.1. <i>Método da observação</i>	08
2.4.2. <i>Método de detecção direta</i>	09
2.4.3. <i>Método de detecção indireta</i>	10
2.5. Caracterização do vazamento.....	11
2.6. Padrões de escoamento.....	12
2.6.1. <i>Padrões de Escoamentos Bifásicos em Dutos</i>	12
2.6.1.1. <u>Padrões de escoamento bifásico líquido-gás</u>	13
2.6.1.2. <u>Padrões de escoamento bifásico água-óleo</u>	14
2.6.2. <i>Escoamento monofásico em tubos</i>	15
2.7. Estado da Arte.....	19
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. Descrição do problema.....	23
3.2. Malha numérica.....	23
3.2.1. Geometria.....	23
3.2.2. Geração da malha.....	24
3.2.3. Análise da dependência da malha.....	25

3.3. Modelagem matemática.....	25
3.4. Propriedades físico-químicas.....	28
3.5 Estudos de caso.....	28
3.5.1 <i>Estudo de caso: escoamento na presença de vazamento e regime permanente..</i>	29
3.5.2. <i>Estudo de caso: escoamento na presença de vazamento e regime transiente....</i>	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Dependência da malha.....	31
4.2. Escoamento bifásico (água-óleo) na presença de vazamento em regime permanente.....	33
4.3. Escoamento bifásico (água-óleo) na presença de vazamento em regime transitório.....	36
5. CONCLUSÕES.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DA MALHA.....	49
A.1 CRIAÇÃO DAS GEOMETRIAS.....	49
A.2 GERAÇÃO DA MALHA.....	51
A.2.1 Geometria sem vazamento.....	52
A.2.2 Geometria com vazamentos.....	55
APÊNDICE B - VALIDAÇÃO DA MALHA.....	61

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1: Armazenamento de hidrocarbonetos no subsolo.....	04
Figura 2.2: Gasoduto rompido.....	07
Figura 2.3: Tubulação com pequeno vazamento.....	08
Figura 2.4: Fases de um vazamento.....	11
Figura 2.5: Configurações adotadas por sistemas líquido-gás em dutos horizontais. a) Escoamento de Bolhas; b) Escoamento Pistonado (<i>Plug flow</i>); c) Escoamento Estratificado; d) Escoamento Ondulatório (<i>wavy flow</i>); e) Escoamento Pistonado (<i>Slug flow</i>); e) Escoamento Anular (<i>annular flow</i>); f) Escoamento disperso em gotas (<i>drop flow</i>).....	14
Figura 2.6. Padrões de escoamento água-óleo.....	15
Figura 2.7. Volume de controle para um fluxo em um tubo circular.....	16
Figura 2.8: Geometria em três dimensões da seção de duto.....	21
Figura 2.9: Seção experimental de duto de aço inox.....	21
Figura 2.10: Perfis de velocidade para entrada de água à (a) 2 m/s e à (b) 10 m/s.....	22
Figura 2.11: (a e b) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 2 m/s; (c e d) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 10 m/s.....	22
Figura 3.1: Geometria com as regiões de vazamento.....	24
Figura 3.2: Ilustração dos blocos usados na construção da malha estruturada para a geometria com duas regiões de vazamento.....	24
Figura 4.1: Perfis de velocidade analítico e numérico (Malha 2 e 5) para o escoamento laminar de óleo.....	32
Figura 4.2: perfis de velocidade analíticos e numéricos para malha 5 com escoamento bifásico água-óleo.....	32
Figura 4.3: Campos de pressão sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.....	33
Figura 4.4: Campos vetoriais de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.....	34
Figura 4.5: Campos de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.....	34

Figura 4.6: Linhas de tomadas de pressão no tubo.....	35
Figura 4.7: Distribuição de pressão ao longo da linha em três posições radiais com vazamento à (a) 5 m e (b) 7,5 m da entrada.....	35
Figura 4.8: Distribuição da pressão sobre a linha na posição 9,9 cm do eixo central com o vazamento à (a) 5 m e (b) 7,5 m da entrada.....	36
Figura 4.9: Representação da malha no tubo e detalhe das seções (a) dos vazamentos em $x = 5\text{m}$, (b) do vazamento em $x = 7,5\text{m}$, (c) da entrada e (d) da saída.....	37
Figura 4.10: Vazão volumétrica de óleo no orifício de vazamento à 5 m da entrada e 1,6 cm de diâmetro em função do tempo para diferentes valores de frações volumétricas de óleo injetados no tubo (a) Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 e (b) Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12.....	38
Figura 4.11: Evolução da vazão de vazamento de óleo com o tempo ocorrendo no orifício de 1,6 cm de diâmetro à 5 m antes e após ativar o vazamento à 7,5 m da entrada (a) Casos 1 e 2 e (b) Casos 11 e 12.....	38
Figura 4.12: Vazão volumétrica do óleo no vazamento em função do tempo para os Casos 1 e 13.....	39
Figura 4.13: Vazão volumétrica do óleo no vazamento em função do tempo para os (a) Casos 7 e 14 e (b) Casos 11 e 15.....	40
Figura 4.14: Vazão da mistura água-óleo no vazamento em função da fração volumétrica de óleo na entrada para vazamentos com diâmetro de 1,6 cm e 3 cm.....	40
Figura 4.15: Diferença de pressão média entre a secção de entrada e a de saída do duto em função do tempo e na presença de vazamento para os (a) Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 e (b) Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12.....	41
Figura 4.16: Comportamento da pressão média ao longo do duto em função do tempo de escoamento a partir do início do vazamento para os casos com apenas um vazamento.....	42
Figura 4.17: Comportamento da pressão média ao longo do duto em função do tempo de escoamento a partir do início do vazamento para os casos com dois vazamentos.....	43
Figura 4.18: Diferença de pressão média entre a secção de entrada e a de saída do duto em função do tempo e na presença de vazamento (Casos 1 e 13) e na ausência de vazamento (curva de referência).....	44

Figura A.01: Criação de pontos, curvas e superfícies: (a) Criação dos pontos e das curvas; (b) criação das superfícies.....	49
Figura A.02: Árvore de comando para a Geometria 1.....	50
Figura A.03: Criação de pontos e curvas na região de vazamento: (a) Destaque para as regiões de vazamento; (b) Geometria final.....	50
Figura A.04: Árvore de Comandos para a Geometria 2.....	51
Figura A.05: Criação do bloco: (a) Janela de Comando; (b) Bloco criado.....	52
Figura A.06: Subdivisão do bloco: (a)Janela de Comando; (b) Ogrid no bloco.....	52
Figura A.07: Parâmetros iniciais para a construção de uma malha refinada “grosseira”: (a) Janela de comando da função Global Mesh Setup; (b) Janela de comando da função Pre-Mesh Params.....	53
Figura A.08: Detalhes dos refinamentos na secção de entrada das tubulações sem vazamento para as (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.....	54
Figura A.09: Detalhes dos refinamentos ao longo do comprimento das tubulações sem vazamento para as (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.....	55
Figura A.10: Multiplicação do contorno da região de entrada da tubulação: (a) Janela de comando da função Transformation Tools; (b) Destaque para as curvas copiadas na tubulação.....	56
Figura A.11: Criação de pontos no contorno dos vazamentos: (a)Janela de comando da função Create Point; (b) Destaque para os pontos criados.....	56
Figura A.12: Corte dos blocos nas curvas multiplicadas: (a)Janela de comando da função Split Block; (b) Destaque para os blocos cortados.....	57
Figura A.13: Manuseio do bloco abaixo do vazamento: (a)Janela de comando da função Blocking Associations; (b) Destaque na região do vazamento.....	57
Figura A.14: Desenvolvimento dos blocos da malha com vazamento.....	58
Figura A.15: Detalhes dos refinamentos na secção de entrada das tubulações com vazamento para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.....	59
Figura A.16: Detalhes dos refinamentos ao longo do comprimento das tubulações com vazamento para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.....	60
Figura A.17: Detalhes dos refinamentos nos vazamentos para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.....	61
Figura B.1: Planos gerados para o cálculo das pressões médias.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: °API sugerido por alguns instituições/setores da indústria petrolífera.....	05
Tabela 2.2: Algumas das Autorizações de Operação concedidas a dutos no Brasil....	06
Tabela 3.1: Refino das malhas e seus respectivos números de elementos.....	25
Tabela 3.2: Propriedades do óleo.....	28
Tabela 3.3: Propriedades da água.....	28
Tabela 3.4: Dados usados nas simulações para vazamentos menores localizados na parte superior do duto.....	29
Tabela 3.5: Simulações numéricas com variações da quantidade e do tamanho do vazamento para distintas frações volumétricas de óleo no escoamento.....	30
Tabela 4.1: Diferença de pressão em função da densidade de volumes de controle na malha.....	31

LISTA DE SIGLAS

ADA – Analógica-Digital-Analógica
ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API - *American Petroleum Institute*
CAD – *Computer-aided designer*
CFD - *Computational Fluid Dynamics*
CLP – Controlador Lógico Programável
DCP – Distribuidora e Comércio de Petróleo
GB - Gigabyte
GLP – Gás Liquefeito do Petróleo
LCTF - Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos
LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem
OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PETROBRAS S.A. – Petróleo Brasileiro S.A.
PVC – Cloreto de Polivinila
RAM - *Random Access Memory*
REDUC – Refinaria Duque de Caxias/RJ
REMAN – Refinaria Isaac Sabbá/Manaus-AM
REPAR – Refinaria Presidente Getúlio Vargas/Araucária-PR
RLAM – Refinaria Landulpho Alves/São Francisco do Conde-BA
SIM – Sistema de Informações de Movimentação de Produtos
TEMADRE – Terminal Madre de Deus/BA
US – United States

NOMENCLATURA

Letras Latinas e/ou Gregas

D	Diâmetro do duto	[m]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
L	Comprimento do tubo	[m]
L_e	Comprimento equivalente	[m]
r	Posição radial no duto	[m]
R	Raio do duto	[m]
P	Pressão	[Pa]
P_α	Pressão na fase alfa	[Pa]
$P _x$	Pressão na posição x	[Pa]
$P _{x+\Delta x}$	Pressão na posição $x+\Delta x$	[Pa]
U_x	Velocidade média no eixo x	[$m.s^{-1}$]
$U_{x,Max}$	Velocidade máxima no eixo x	[$m.s^{-1}$]
$\overrightarrow{U}_\alpha$	Vetor velocidade da fase <i>alfa</i>	[$m.s^{-1}$]
\overrightarrow{U}_β	Vetor velocidade da fase <i>beta</i>	[$m.s^{-1}$]
w	Vazão mássica	[$kg.s^{-1}$]
t	Tempo	[s]
ρ	Densidade	[$kg.m^{-3}$]
ρ_α	Densidade da fase <i>alfa</i>	[$kg.m^{-3}$]
μ	Viscosidade dinâmica	[$Pa.s$]
μ_α	Viscosidade dinâmica da fase <i>alfa</i>	[$Pa.s$]
$S_{M\alpha}$	Termo das forças externas sobre volume	[$N.m^{-3}$]
M_α	Forças interfaciais agindo na fase <i>alfa</i>	[$N.m^{-2}$]
Re	Número de Reynolds	[-]
f_o	Fração volumétrica de óleo	[-]
f_w	Fração volumétrica de água	[-]
f_α	Fração volumétrica da fase <i>alfa</i>	[-]
C_D	Coeficiente de arraste	[-]

Letras Especiais

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

1. INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo e seus derivados é, em sua grande maioria, realizado por meio de dutos que interligam as fontes de produção, refinarias e, em algumas situações, os centros consumidores. Os dutos tornaram-se o meio de transporte preferencial para interligar estes pontos distintos.

Os materiais utilizados para a confecção de dutos vêm passando, na última década, por melhorias tecnológicas, onde há uma utilização expressiva de materiais à base de aços especiais, mais leves e resistentes. No entanto, embora se tenha observado um avanço significativo na qualidade do material, tem-se observado problemas de vazamento em oleodutos/gasodutos, o que tem gerado grande interesse por parte da indústria petrolífera tendo em vista os altos custos financeiros suportados pelos serviços, os potenciais de riscos e os encargos ambientais.

Desastres ambientais relacionados ao vazamento de óleo além de degradar o meio ambiente, são responsáveis por gastos de milhões de reais na remediação.

“Pesquisas recentes na indústria de petróleo no Brasil estimaram que um vazamento custa R\$ 150.000,00 por metro cúbico vazado. Portanto, um pequeno vazamento de 15 metros cúbicos dará um prejuízo de mais de 2 milhões de reais e um vazamento de 100 metros cúbicos representa perdas de 15 milhões. Todo vazamento de produtos químicos provocam desastres ambientais e em alguns casos mortes de pessoas, plantas e animais que se transformam em altos custos. A Lei Brasileira de Crimes Ambientais é uma das mais severas do mundo, punindo desastres ambientais com pesadas multas e até mesmo com a prisão dos responsáveis.” (COLOMBAROLI, 2008).

Existe atualmente uma variedade de técnicas disponíveis para a detecção do vazamento, variando desde a simples inspeção física até os métodos acústicos. ZHANG (1996) classificou os métodos de detecção em três categorias: observação (talvez a mais simples e antiga, onde é realizada uma inspeção visual observando se há formação de poças na

superfície do solo ou crescimento anômalo da vegetação), métodos de detecção direta (onde utiliza-se dispositivos para a detecção e localização do vazamento) e métodos de detecção indireta (onde utiliza-se de softwares baseados em modelos matemáticos que permitem realizar a detecção por meio de dados de fluxo, pressão, temperatura, etc.).

1.1. Justificativa

Segundo Curitiba (2012), a Justiça Federal do Paraná condenou a estatal Petrobrás a pagar 102 milhões de reais para recuperar uma área na Serra do Mar, no litoral do estado, atingida por um vazamento no oleoduto em 2001. A companhia fechou o acordo com o Ministério Público Federal e estadual e com o Instituto Ambiental do Paraná. Deste total, 12 milhões serão voltados apenas para a recuperação, 25 milhões para o Instituto Chico Mendes, e outros 65 milhões para outras esferas governamentais.

De acordo com Engelbrecht *et al.* (2008), em 18 de janeiro de 2000, a Baía de Guanabara foi transformada num mar espesso e morto após o vazamento de 1,3 milhão de litros de óleo de um duto da Refinaria Duque de Caxias (Reduc), onde em poucas horas a fauna e a flora foram gravemente afetadas. Ainda em 2000 outro acidente ocorreu, dessa vez na Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Repar), em Araucária, onde cerca de 4 milhões de litros de óleo cru invadiram os rios Barigui e Iguaçu. Em suma, vazamentos em oleodutos/gasodutos causam prejuízos financeiros e ambientais.

Em geral, é de fundamental importância que, quando ocorra um vazamento num duto, o mesmo seja identificado e alertado para que se faça o fechamento de válvulas e parada das bombas o que impedirá uma catástrofe. No entanto, para que se faça a detecção e identificação com precisão da posição do vazamento se faz necessário conhecer o comportamento do(s) fluido(s) no interior do duto, o que possibilita a determinação da perda de carga ou queda de pressão entre dois pontos do duto que está sendo avaliado. Neste contexto, a proposta de pesquisa vem dar uma contribuição no estudo de vazamento e auxiliar na compreensão dos fenômenos envolvidos via técnica da fluidodinâmica computacional.

1.2. Objetivo

Estudar numericamente o escoamento bifásico água-óleo em tubos horizontais na presença de vazamento.

1.3. Objetivos específicos

- Propor um modelo matemático capaz de prever o escoamento de fluido em uma tubulação horizontal com vazamento;
- Avaliar o comportamento dinâmico da pressão, velocidade e fração volumétrica das fases envolvidas no escoamento na presença de vazamento;
- Avaliar o efeito da posição do vazamento sobre a queda de pressão e sobre o perfil de velocidades no escoamento bifásico;
- Analisar a influência das dimensões do orifício do vazamento sobre o comportamento fluidodinâmico do escoamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Petróleo

O petróleo é originado a partir da matéria orgânica depositada junto com os sedimentos. A interação entre fatores como a matéria orgânica, o sedimento e condições termodinâmicas determinam o início da cadeia de processos que leva à formação do petróleo. A constituição da matéria orgânica original e a intensidade do processo térmico atuante sobre ela determinam o tipo de hidrocarboneto gerado, óleo ou gás.

De uma maneira geral, a ocorrência do acúmulo de petróleo parte do processo de geração, pela migração e interrupção por alguma armadilha geológica. O petróleo é gerado por uma rocha dita fonte, ou geradora, e flui para outra, onde se acumula, chamada reservatório. Esta última pode ter qualquer origem ou natureza, mas para caracterizar um reservatório deve apresentar espaços vazios no seu interior (porosidade) e estes espaços devem ser interconectados para conferir-lhe a característica de permeabilidade (Figura 2.1).

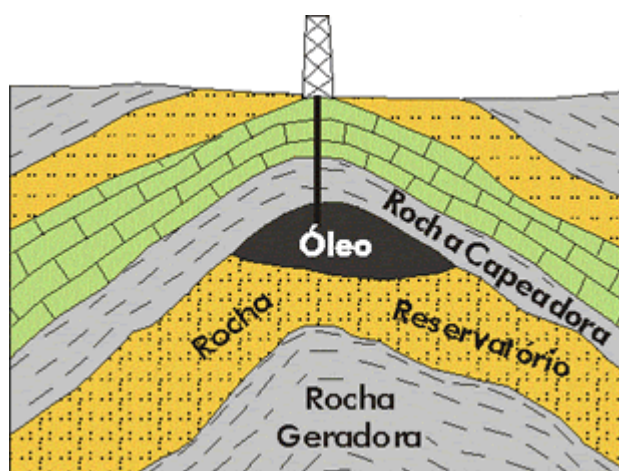


Figura 2.1: Armazenamento de hidrocarbonetos no subsolo

Fonte: Castro, 2011.

Os hidrocarbonetos presentes no reservatório alcançam a superfície através do poço em funcionamento. Essa elevação pode ser tanto natural, por diferença de pressão entre o reservatório e a superfície, como artificial, com a utilização de equipamentos específicos.

Os diversos tipos de óleos existentes na natureza apresentam uma gama de valores de densidade e viscosidade. A classificação de um óleo é realizada a partir de sua densidade, visto que a viscosidade é altamente influenciada pela temperatura. A indústria do petróleo considera a densidade para classificar os petróleos crus em leve, pesado e ultra pesado, utilizando a expressão °API (American Petroleum Institute), como referência para a densidade do óleo medida em relação à água. Quanto maior o grau API, mais leve será o petróleo e maior valor de mercado ele terá. O grau API é determinado a partir da correlação:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho} - 131,5 \quad (2.1)$$

na qual ρ é a densidade relativa do óleo (densidade do óleo/densidade da água).

O grau API é medido nas chamadas “condições standard-std”, nas condições padrão de 25°C e 1 atm. De acordo com algumas instituições ligadas à indústria de petróleo existem várias classificações de óleos crus em relação ao grau API, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: °API sugerido por alguns instituições/setores da indústria petrolífera

Órgão	°API (Grau API)			
	Óleo leve	Óleo médio	Óleo pesado	Óleo ultra pesado
Governo de Alberta/Canadá	≥34	25-34	10-25	≤10
Departamento de Energia dos EUA	≥35,1	25-35,1	10-25	≤10
OPEP	≥32	26-32	10,5-26	≤10,5
Petrobras offshore	≥32	19-32	14-19	≤14
Petrobras onshore	≥32	18-32	13-18	≤13
ANP/Brasil	≥31,1	22,3-31,1	12-22,3	≤12

Fonte: Mothe *et al*, 2007.

2.2. Vazamento em tubulações

O abastecimento de petróleo e seus derivados possui três etapas distintas: fontes de produção, refinarias e centros de consumo. Esses três pontos são ligados por meio de tubulações ou dutos.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) fornece os dados dos 482 dutos autorizados para o transporte de hidrocarbonetos no Brasil. A Tabela 2.2 apresenta algumas dessas autorizações.

Tabela 2.2: Algumas das Autorizações de Operação concedidas a dutos no Brasil

Nº de ordem		2	3	5	11	35	208
Código	i SIMP	700001	700002	700004	700010	700035	700338
	DCP	472	476	478	485	526	1802
Sigla		AMazongas Glp	E&P Est. São Paulo Rlam	E&P Est. Recife Rlam 20	Bs 12/6	Ramal Sen. Canedo 4	Mpc-2/1
Proprietário		Petrobrás	Petrobrás	Petrobrás	Petrobrás	Petrobrás	Braskem
Operador		Petrobrás	Petrobrás	Petrobrás	Transpetro	Transpetro	Braskem
Tipo		Transferência	Transf.	Transf.	Transporte	Transporte	Transf.
Instalação de origem		REMAN (Manaus / AM)	Estação São Paulo (São Francisco do Conde/BA)	Estação Recife (Pojuca / BA)	Temadre (Madre de Deus / BA)	Terminal Senador Canedo (Senador Canedo / GO)	Terminal Aratu (Candeias / BA)
Instalação de destino		AMazongas (Manaus / AM)	Rlam (São Francisco do Conde / BA)	Rlam (São Francisco do Conde / BA)	Rlam (São Francisco do Conde / BA)	Pool/BR (Goiânia / GO)	Km 4 (Candeias / BA)
Produto		GLP	Petróleo	Petróleo	Lubrificantes	Gasolina	Nafta
Diâmetro (Pol)		8	8	20	12	4	36
Extensão (Km)		1,52	3	43	8	15	4
Operação		1992	1962	1968	1978	1997	2003
Autorização		004/2011	297/2006	297/2006	170/2001	170/2001	135/2003
Data		02/10/2008	24/10/2006	24/10/2006	28/09/2001	28/09/2001	18/06/2003

Fonte: ANP, 2011.

Os sistemas de transporte de fluido, de um modo geral, são formados por um conjunto de tubulações, conexões, registros, válvulas e outros elementos. Acidentes causados por vazamento em tubulações comprometem os aspectos econômicos, segurança, saúde e meio ambiente.

Um grande desafio no transporte dos fluidos está na detecção dos vazamentos. Para aprofundar o entendimento sobre vazamentos em tubulações, torna-se necessário conhecer as classificações de vazamentos, assim como as possibilidades de causas e aplicações de métodos para a sua detecção.

Com o conhecimento absorvido, tem-se uma base para o desenvolvimento de novas técnicas de detecção de vazamento em tubulações.

2.3. Classificações de vazamentos

Os vazamentos podem ter diversas causas e formas. A Figura 2.2 ilustra um trecho de um gasoduto que foi rompido e a Figura 2.3 mostra um duto com um pequeno vazamento. De acordo com Buiatti (1995), os vazamentos que aparecem em redes de tubulações podem ser divididos em duas classes:

- Vazamento por “ruptura” do tubo - Ocorre em menor frequência, mas possui alta periculosidade devida à quantidade de produto derramada nos arredores do vazamento. Porém estas rupturas são de fácil detecção devido a serem acompanhadas de elevadas quedas de pressão e diferenças volumétricas.
- Vazamento de pequenas proporções - Vazamentos pequenos da ordem de 5 litros por hora. São de difícil detecção devido ao seu tamanho, podendo ocasionar grandes perdas de produtos até serem notados. Podem ser proporcionados pela corrosão, pela fadiga do material que compõe a tubulação ou pela falha em soldas. Existem poucos métodos capazes de detectar vazamentos dessa ordem.



Figura 2.2: Gasoduto rompido

Fonte: International, 2010.



Figura 2.3: Tubulação com pequeno vazamento

Fonte: Board, 2010.

2.4. Métodos de detecção de vazamentos

Os métodos para a detecção de vazamento em tubulações são classificados em três categorias: observação, métodos de detecção direta e métodos de detecção indireta. Segue-se uma rápida introdução sobre cada método.

2.4.1. Método da observação

Talvez o mais simples e antigo método de detecção seja a observação. Na aplicação deste método é realizada uma inspeção visual ao longo da tubulação observando se há condições anormais de operação, odores e sons que podem ocorrer ao longo da tubulação, assim como a formação de poças na superfície do solo ou crescimento anômalo da vegetação. Estas inspeções devem ser realizadas com frequência, pois este método não é muito eficaz se comparado aos outros métodos, dependendo muito da experiência das pessoas envolvidas.

2.4.2. Método de detecção direta

Na detecção direta há o uso de dispositivos (sensores) para detecção e localização do vazamento. Terminais dispostos ao longo da tubulação emitem sinais que denunciam a presença do vazamento. O método subdivide-se em:

- Sensores acústicos - Ao longo da tubulação são instalados detectores acústicos (microfones) que captam a energia acústica gerada pelo escape do fluido, detectando pequenos vazamentos. Porém seu funcionamento é afetado pela interferência do ruído de válvulas e compressores.
- Sensores ultra-sônicos – Os sensores detectam ruídos causados pelo vazamento, ruídos estes na faixa de frequências ultra-sônicas.
- Sensores de infravermelho – Mudanças de temperatura nas proximidades da tubulação podem indicar vazamentos. Segundo Bezerra (2008) são utilizados sensores remotos que monitoram metano e etano na atmosfera através de seu espectro infravermelho. Este método pode ser usado com patrulha em veículos, helicópteros ou sistemas portáteis, podendo cobrir vários quilômetros da tubulação em um dia.
- Sensor de pressão negativa – Os sensores de pressão detectam vazamentos a partir dos métodos de ondas de pressão negativa e de gradiente de pressão. Um vazamento provoca uma queda de pressão local que gera uma onda de pressão negativa que se propaga a montante e a jusante do local do vazamento. Usualmente utilizam-se dois transdutores piezoelétricos de pressão instalados nas extremidades das seções a fim de calcular a posição do vazamento com razoável precisão. Vale ressaltar que alguns procedimentos normais da operação da tubulação, bombas e fechamento de válvulas podem gerar uma onda de pressão negativa, tornando-se necessário filtrar os dados para uma melhor detecção.
- Pig Instrumentado Magnético – Neste sistema, um campo magnético é aplicado sobre a superfície de interesse, sensores colocados na parte central deste campo monitoram de forma contínua o fluxo magnético e detectam a fuga do magnetismo proveniente de discontinuidades volumétricas, especialmente devido à corrosão. Estes pigs normalmente se deslocam no interior dos dutos impulsionados pelo próprio fluido,

sendo capazes de armazenar os registros da operação em curso para posteriores análises e avaliações. Quanto maior o número de sensores, maior será considerada a resolução dos pigs. Os pigs de alta resolução permitem o auxílio de softwares modernos para a melhor caracterização e quantificação das discontinuidades.

2.4.3. Método de detecção indireta

Utilizam softwares de computadores em auxílio à detecção de vazamentos. Neste caso, podem-se citar os seguintes métodos:

- **Balanço de massa** - Aqui se faz um balanço entre a massa que entra e sai na tubulação ou sistema. Qualquer diferença considera-se que há um vazamento. A precisão na detecção dependerá da influência de parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade) e do arranjo da tubulação. Este método não fornece a localização do vazamento.
- **Análise de medidas de pressão** - Neste método admite-se que a ocorrência do vazamento está ligada a uma alta taxa de mudança da pressão a montante e a jusante. O vazamento é detectado no momento em que a taxa de mudança de pressão for maior que um padrão definido. Vale lembrar que este método deve ser aplicado somente em escoamentos de fluidos incompressíveis em estado estacionário, caso contrário alarmes falsos podem ocorrer.
- **Modelagem matemática** - Nesta técnica modela-se matematicamente o fluxo do fluido na tubulação utilizando-se de equações de conservação de massa, momento linear, energia, matéria e as equações de estado do fluido, que são resolvidas por meio de técnicas computacionais utilizando-se de códigos comerciais ou desenvolvidos pelo usuário. O método requer que sejam medidas nas seções de entrada e saída da tubulação o fluxo, pressão e temperaturas e, então, utilizadas para detectar o vazamento, via discrepâncias dos valores medidos e calculados. Apesar deste método fornecer a localização do vazamento, é necessária uma manutenção muito especializada e seu custo é alto.

2.5. Caracterização do vazamento

Os sistemas de detecção de vazamento normalmente monitoram as grandezas físicas vazão e pressão, pois estas são inter-relacionadas e são mais sensíveis às alterações no balanço de massa do duto. Os sensores desses sistemas são dispostos ao longo do comprimento dos dutos.

Ao ocorrer um vazamento, observa-se que ocorre uma perturbação no comportamento de pressão do duto e esta pode descrever o local, o tamanho e a altimetria do vazamento. A dinâmica associada ao vazamento se propaga ao longo do duto a partir do ponto do vazamento e a uma velocidade variável, sendo percebida em momentos distintos pelos sensores instalados no duto. A localização do duto é calculada a partir do intervalo de tempo entre a percepção da dinâmica pelos sensores somados aos dados de distância entre cada sensor.

Azevedo (2009) propôs a divisão da evolução temporal de um vazamento em três fases (Figura 2.4):

- Pré-vazamento: corresponde ao comportamento de dutos antes do fenômeno do vazamento e reflete as condições de escoamento estacionário normal;
- Transitório: corresponde ao comportamento de acomodação do duto desde o momento inicial do vazamento até o instante de alcance de um novo regime estacionário;
- Pós-vazamento: corresponde ao comportamento do duto após a ocorrência de um vazamento e estabilização das condições de escoamento, refletindo as condições de escoamento estacionário do duto com a presença de um vazamento.

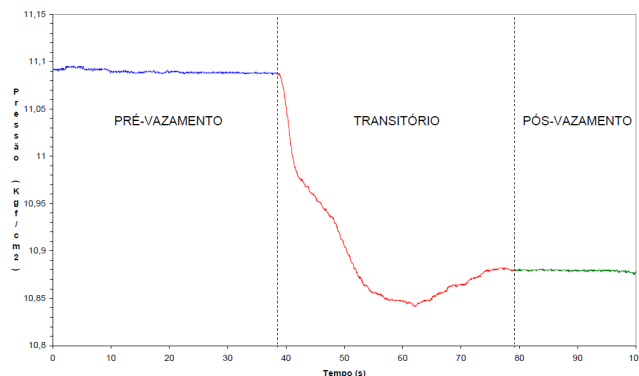


Figura 2.4: Fases de um vazamento
Fonte: Azevedo, 2009.

2.6. Padrões de escoamento

2.6.1. Padrões de Escoamentos Bifásicos em Dutos

Na indústria do petróleo e gás são mais encontrados escoamentos de duas ou mais fases do que os escoamentos monofásicos, sendo observado na produção, no transporte e no refino de petróleo e gás natural.

Segundo Paladino (2005) um sistema multifásico é definido como uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluídos imiscíveis separados por uma interface, podendo ser esta conexa (por ex. escoamento estratificado, anular etc.) ou desconexa (por ex. escoamento de bolhas, gotas etc.) ou uma combinação de ambos os casos onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa (padrão anular com gotas, etc.).

Quatro tipos de escoamentos bifásicos são encontrados em função das possíveis combinações de fases:

- Escoamentos líquido-líquido: nesse escoamento a capacidade de transferência de quantidade de movimento interfacial é grande e, devido a pouca diferença entre as massas específicas se comparado aos outros sistemas, os efeitos de empuxo gravitacional são menores.
- Escoamentos líquido-sólido ou gás-sólido: nesses sistemas as partículas sólidas constituem sempre uma fase dispersa, cuja morfologia permanece sempre dispersa, embora possa existir mudança na forma e diâmetro da particular devido quebra ou agregação das mesmas;
- Escoamentos líquido-gás: aqui a forma das gotas ou bolhas são variáveis. A depender da fração volumétrica e velocidade de cada fase, os padrões deixam de ser dispersos (gotas ou bolhas) para formar complexas morfologias, dando lugar a diferentes padrões de escoamento.

2.6.1.1 Padrões de escoamento bifásico líquido-gás

Em dutos horizontais e inclinados, os padrões de escoamento adotam formas mais complexas em comparação ao escoamento em dutos verticais. Os padrões mais comuns, conforme mostrado na Figura 2.5, são:

- a) Escoamento de Bolhas: as bolhas tendem a escoar na parte superior do duto quando a fase dispersa é menos densa do que a contínua. Quando as velocidades de escoamento aumentam, a fase dispersa tende a ocupar toda a secção do duto, tendo em vista que os efeitos de dispersão turbulenta começam a se tornar mais importantes que a gravidade.
- b) Escoamento Pistonado (*Plug flow*): As bolhas tendem a escoar pela metade superior do duto. Neste caso, esta condição assimétrica é mantida independentemente da velocidade de escoamento devido ao maior tamanho das bolhas.
- c) Escoamento Estratificado: Acontece em velocidades muito baixas de líquido e gás; as duas fases escoam separadas por uma interface suave e sem ondulações
- d) Escoamento Ondulatório (*wavy flow*): Ocorre aumentando-se a velocidade do gás e velocidade intermediária do líquido, a partir do escoamento estratificado. Neste tipo de escoamento aparecem oscilações na interface entre as fases, gerando um padrão caótico de escoamento, na forma de ondas rolantes do líquido.
- e) Escoamento Pistonado (*Slug flow*): Ocorre quando as ondas existentes no escoamento ondulatório começam a ser maiores e a fração volumétrica de líquido aumenta. Neste caso, o líquido começa a molhar a parede superior do duto gerando grandes bolhas de gás presas entre duas ondas, surgindo um padrão análogo ao pistonado, porém, com bolhas maiores, já que este padrão se dá com maiores frações volumétricas de gás.
- f) Escoamento Anular (*annular flow*): Ocorre quando se aumenta ainda mais a velocidade do gás num escoamento estratificado. De forma geral, com baixas frações de líquido, se formará um núcleo de gás com um filme de líquido na periferia do duto formando um anel, similar ao caso descrito para escoamentos em dutos verticais. No núcleo (fase gasosa), há gotículas de líquido.
- g) Escoamento disperso em gotas (*drop flow*): É caracterizado por frações de líquido muito baixas e velocidades de escoamento altas, sendo que a fase gasosa escoar de

forma contínua e o líquido na forma de gotas dispersas. Em gasodutos, este regime pode ser encontrado no escoamento de gás com presença de condensados em baixas frações volumétricas.

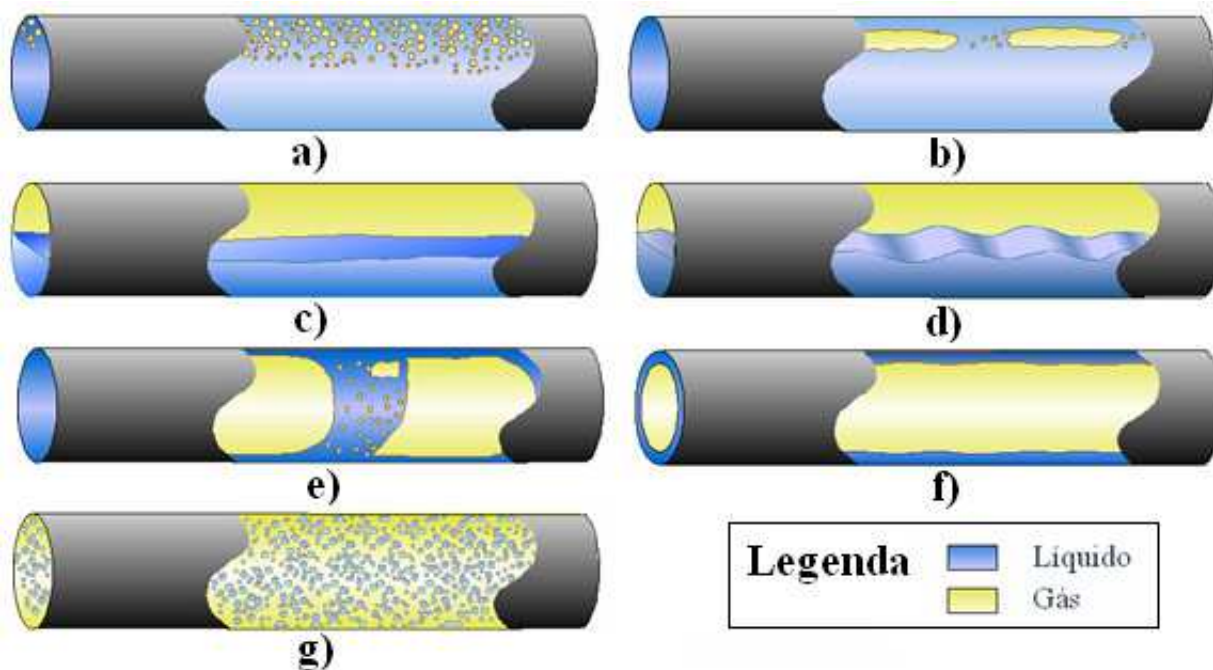


Figura 2.5: Configurações adotadas por sistemas líquido-gás em dutos horizontais. a) Escoamento de Bolhas; b) Escoamento Pistonado (*Plug flow*); c) Escoamento Estratificado; d) Escoamento Ondulatório (*wavy flow*); e) Escoamento Pistonado (*Slug flow*); e) Escoamento Anular (*annular flow*); f) Escoamento disperso em gotas (*drop flow*).

2.6.1.2. Padrões de escoamento bifásico água-óleo

Vários trabalhos apresentam descrições para o escoamento bifásico água-óleo. Paladino (2005) achou mais interessante, e de caráter mais geral, a classificação apresentada por Arirachakaran *et al.* (1989) que classifica, a partir da morfologia das fases envolvidas, os padrões de escoamento em cinco tipos.

- a) Estratificado: Pode ter mistura dispersa na interface;
- b) Dispersão de óleo em água sobre água;
- c) Dispersos de óleo em água ou água em óleo;
- d) Intermitente: Equivalente ao escoamento pistonado em sistemas líquido-gás;

- e) Anular: *Core* central de uma fase, com um anel da outra. Pode ter dispersão da fase “externa” no *core* central.

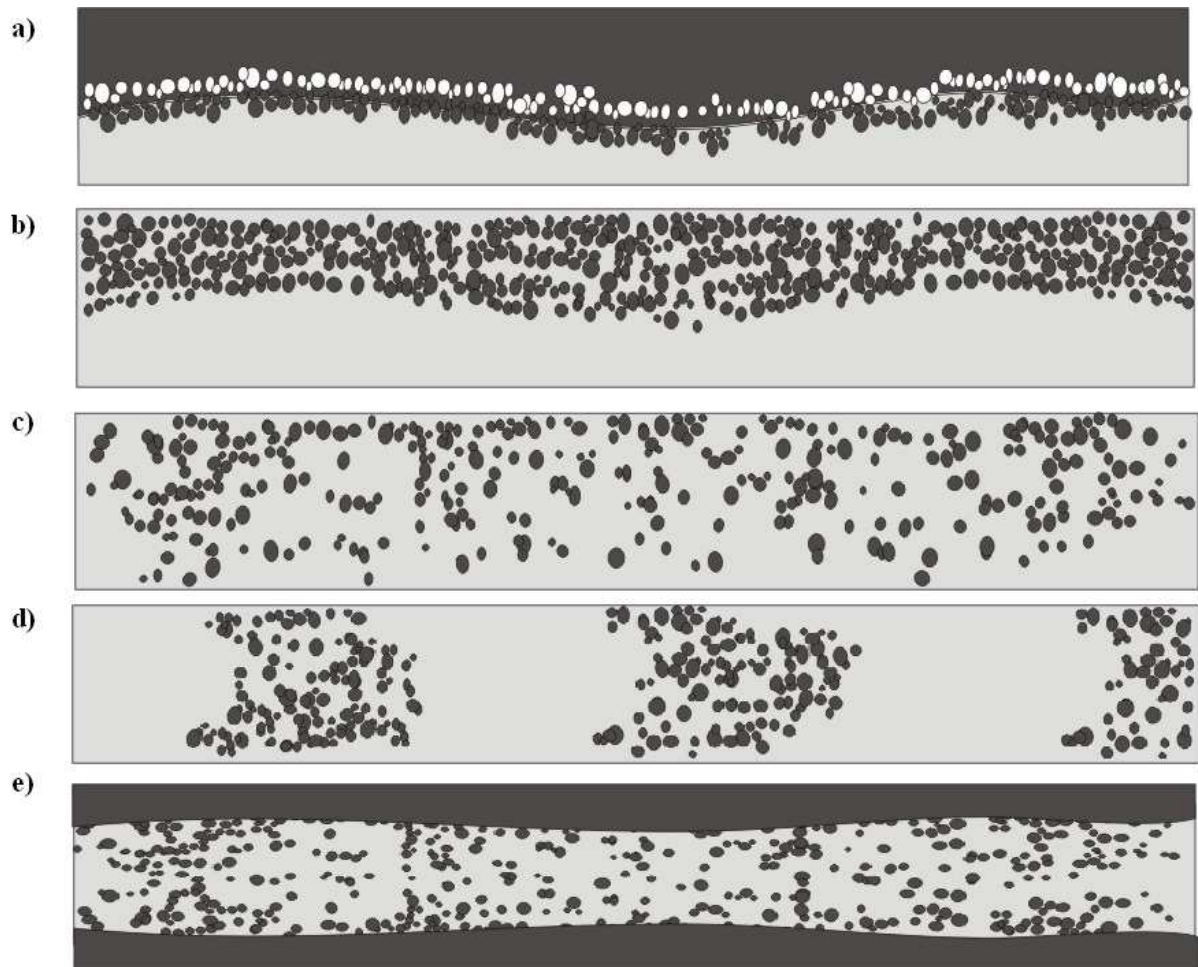


Figura 2.6: Padrões de escoamento água-óleo.
Fonte: Paladino, 2005.

2.6.2. Escoamento monofásico em tubos

Escoamentos se classificam em laminar ou turbulento. No escoamento laminar as partículas seguem trajetórias regulares, sendo que as trajetórias de duas partículas vizinhas não se cruzam. Já no escoamento turbulento as trajetórias das partículas são irregulares e as partículas podem estar próximas da parede do tubo e em outro instante estar próximas do eixo do tubo, o que justifica o fato de a velocidade em um dado ponto variar constantemente em grandeza e direção.

Para classificar o escoamento monofásico em laminar ou turbulento é utilizado o número de Reynolds, Equação 2.2, quando:

- $Re < 2000$, o escoamento é laminar;
- $2000 < Re < 4000$, o escoamento é transitório;
- $Re > 4000$, o escoamento é turbulento.

$$Re = \frac{\rho \langle v_x \rangle D}{\mu} \quad (2.2)$$

onde D é o diâmetro do tubo onde o fluido está escoando, v é a velocidade média de escoamento, ρ é a densidade do fluido e μ a viscosidade do fluido.

Com base na Figura 2.7 o líquido esco da esquerda para a direita sob a influência de uma diferença de pressão. Considerando que o comprimento do tubo é grande o suficiente ao ponto de desprezarem-se os “efeitos de extremidades”, de acordo com Bird *et al.* (2004), o comportamento do fluido está completamente desenvolvido quando se atinge o comprimento equivalente dado por:

$$L_e = 0,035D Re \quad (2.3)$$

Ao se aplicar o balanço de forças em coordenadas cilíndricas sobre o volume de controle o perfil de velocidade é dado por:

$$v_x = \frac{(P|_x - P|_{x+\Delta x}) R^2}{4\mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

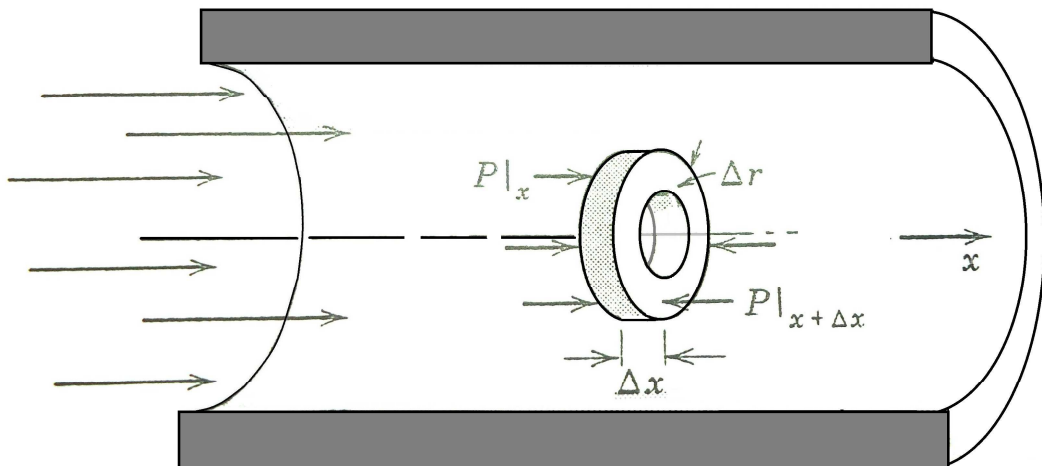


Figura 2.7: Volume de controle para um fluxo em um tubo circular
Fonte: Welty *et al.*, 1984.

Com base na Equação 2.4 é possível determinar algumas grandezas, como por exemplo:

- A velocidade máxima, $v_{x,\max}$, quando o valor de r é nulo:

$$v_{x,\max} = \frac{(P|_x - P|_{x+\Delta x}) R^2}{4\mu L} \quad (2.5)$$

- A velocidade média $\langle v_x \rangle$:

$$\langle v_x \rangle = \frac{1}{2} v_{x,\max} \quad (2.6)$$

- A vazão mássica ω (equação de Hagen-Poiseuille):

$$\omega = \frac{\pi (P|_x - P|_{x+\Delta x}) R^4 \rho}{8\mu L} \quad (2.7)$$

Em um escoamento permanente (onde os parâmetros de escoamento não variam com o tempo) de um fluido de densidade constante em uma tubulação reta de secção transversal uniforme existirá uma força exercida pelo fluido sobre as superfícies sólidas. Convenientemente, essa força é dividida em duas partes: \overline{F}_s , a força que seria exercida pelo fluido ainda que o mesmo estivesse em repouso (força estática) e \overline{F}_k , força associada ao movimento do fluido (força cinética, que possui a mesma direção que a velocidade média do escoamento no tubo).

De acordo com Bird *et al.* (2004), a magnitude da força \overline{F}_k é proporcional a uma área característica A e a uma energia cinética característica K por unidade de volume; assim,

$$\overline{F}_k = AKf \quad (2.8)$$

onde a constante de proporcionalidade f é denominada fator de atrito.

Para escoamento em tubos, A é usualmente tomada como a área da superfície molhada e K equivale a $\frac{1}{2}\rho\langle v \rangle^2$. Para tubos circulares de raio R e comprimento L , logo:

$$\vec{F}_k = (2\pi RL) \left(\frac{1}{2}\rho\langle v \rangle^2 \right) f \quad (2.9)$$

O balanço de forças permite mostrar que:

$$\vec{F}_k = \left[(p_0 - p_L) + \rho g (h_0 - h_L) \right] \pi R^2 = (P_0 - P_1) \pi R^2 \quad (2.10)$$

Logo, a definição do fator de atrito é obtida ao substituir a Equação 2.10 na Equação 2.9, como segue:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{P_0 - P_L}{\frac{1}{2}\rho\langle v \rangle^2} \right) \quad (2.11)$$

onde $D = 2R$ é o diâmetro do tubo.

O atrito entre os fluidos em escoamento e a parede da tubulação faz com que haja sempre uma perda de energia provocando a redução da pressão total do fluido ao longo do escoamento, ocasionando o fenômeno conhecido como de perda de carga. Logo, quanto maior for a rugosidade da parede da tubulação ou mais viscoso for o fluido maior será a perda de energia, classificadas em distribuídas e localizadas.

As perdas de cargas localizadas ocorrem em função do aumento da resistência que o fluido encontrará pela variação da forma, da direção, da seção do conduto e pela presença de acessórios como, por exemplo, conexões, registros, válvulas, medidores, curvas, etc.

Para considerar as perdas localizadas no cálculo da perda de carga utiliza-se o método dos comprimentos equivalentes, o qual consiste na adição ao comprimento real da tubulação, somente para efeito de cálculo, de comprimentos de tubos capazes de provocar as mesmas perdas de carga produzidas pelas peças que substituem. Cada peça possui um comprimento equivalente (L_{equi}) que varia de acordo com o seu formato e o material que a compõe.

$$\Delta P = \frac{f}{D} \rho \frac{v^2}{2} L_{equi} \quad (2.12)$$

As perdas de cargas distribuídas ocorrem ao longo do comprimento do tubo, o que faz com que a pressão total diminua gradativamente ao longo do comprimento. A equação de Darcy-Weisbach modela essas perdas, dada por:

$$\Delta P = f \rho \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (2.13)$$

Em resumo, tem-se que:

$$\frac{v}{v} = 2 \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (2.14)$$

onde v é a velocidade média do escoamento laminar completamente desenvolvido em um tubo.

2.7. Estado da Arte

A velocidade na detecção de vazamentos é de fundamental importância para a tomada das devidas providências, como o fechamento das válvulas e/ou a parada das bombas, em um espaço de tempo suficiente de modo a se evitar uma catástrofe.

A alta tecnologia atualmente empregada vem tratando de minimizar os efeitos negativos de possíveis vazamentos, que normalmente vem sendo empregada aos modernos polidutos. Com os desgastes de polidutos mais antigos, faz-se necessária a elaboração de uma estratégia de prevenção que seja capaz de contemplar ao mesmo tempo baixo custo, grande eficiência e rapidez de execução. Os hidrocarbonetos ao escaparem de dutos, contaminam o solo. Glória (2002) propõe metodologias da prospecção terrestre, detecção e localização de emanções em superfície, que, quando utilizadas em conjunto, são potencialmente capazes de detectar e localizar possíveis vazamentos em tempo hábil de tentar reduzir ao máximo os

danos ao meio ambiente. Este mesmo autor fez uma revisão bibliográfica sobre os métodos de prospecção biogeoquímica, geofísica e de fuga de gás e concluiu que cada uma das metodologias pode ser a melhor alternativa dependendo do tipo de vazamento e que, em geral, quando as metodologias são utilizadas em conjunto sua eficiência na detecção de vazamento é amplificada.

Braga (2001) avaliou uma tubulação com 1250 metros de comprimento para escoar ar-água, operando com um sistema de aquisição de dados, onde esse sistema de detecção possui quatro transdutores de pressão conectados a um computador equipado com uma placa conversora ADA (Analógica – Digital – Analógica). Os regimes de escoamentos adotados foram de três tipos diferentes: bolhas isoladas de ar em duto sem vazamento, única bolha de ar no duto na presença de vazamento e escoamento contínuo ar-água na presença de vazamento. Os experimentos mostraram que a presença do ar na tubulação gera reflexões de ondas (efeito elástico) que interferem na detecção do vazamento. O autor concluiu que dependendo da quantidade de ar na tubulação, este pode agir como um amortecedor da onda de choque reduzindo o impacto produzido pelo vazamento e assim, diminuindo a sensibilidade do sistema.

A técnica de detecção de vazamento por transitório de pressão consiste em distribuir transdutores de pressão na tubulação, para se obter o comportamento da pressão ao longo da mesma. Os transdutores convertem as variações de pressão em variação de uma grandeza elétrica (tensão ou corrente) para que o CLP (controlador lógico programável) possa trabalhar com essas informações. Bezerra (2008) construiu uma tubulação em PVC (cloreto de polivinila), cujo diâmetro é de 2,5 centímetros e o comprimento de 5,56 metros, para o escoamento de ar comprimido. Dois transdutores foram colocados ao longo da tubulação e mediram-se os transitórios de pressão (variação da pressão na tubulação com o tempo) simultaneamente. O método detectou a presença do vazamento na tubulação, porém foi observada uma dificuldade de se obter a localização do vazamento e isto é explicado pelo fato de os dois transitórios ocorrerem com uma diferença de tempo muito pequena, o que é justificado pelo fato de a tubulação ter um comprimento curto. Bezerra (2008) concluiu que para que o programa obtenha sucesso na localização é necessário que os transdutores sejam instalados em uma distância maior que 12,24 metros entre si.

Em uma tubulação de plástico enterrada e transportando água, Gao (2004) coletou sinais acústicos em sensores localizados à montante e à jusante do vazamento. Os sinais de ruído de vazamento passam por filtros de banda antes de serem analisados pela técnica da

correlação cruzada. Como o plástico produz sinais acústicos de faixa estreita e baixa frequência, o modelo de correlação cruzada foi compatível com o uso do filtro passa-baixa no corte das frequências emitidas e incompatível com o uso do filtro passa-baixa.

Garcia *et al.* (2011) representaram com o auxílio do software comercial COMSOL Multiphysics 4.0a[®], uma seção de duto de 2 metros de comprimento, 10 centímetros de diâmetro e um orifício de vazamento de 4 mm de diâmetro, bem como um volume cilíndrico junto ao duto para observar o jato do vazamento. No início a seção de duto estava preenchida completamente com água à pressão de 101325 Pa e o volume de observação continha ar à pressão de 0 Pa. Inicialmente um teste de vazamento com a bancada experimental foi realizado, Figura 2.9, onde dentro da tubulação havia água e injetou-se ar para estudar o comportamento na região de vazamento. Em seguida foram realizadas simulações numéricas com o auxílio de uma malha com 21376 elementos tetraédricos, Figura 2.8, com injeções de ar com velocidades de 2 m/s e 10 m/s durante um intervalo de tempo de 1 segundo, considerando o regime laminar.

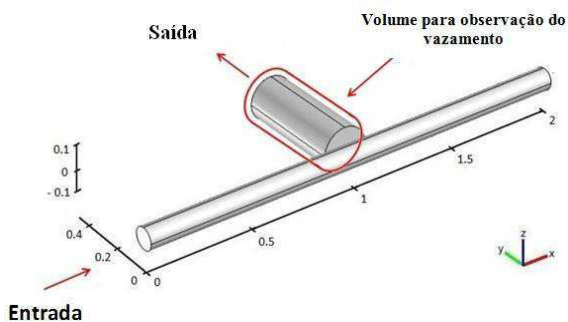


Figura 2.8: Geometria em três dimensões da seção de duto.
Fonte: Garcia *et al.* (2011)



Figura 2.9: Seção experimental de duto de aço inox.
Fonte: Garcia *et al.* (2011)

Sabe-se que o número de Mach (Ma) é um número adimensional definido como a relação entre a velocidade do objeto e a velocidade do som. Essa velocidade é dividida em cinco categorias: subsônica ($Ma < 1$), transônica ($0,8 < Ma < 1,2$), sônica ($Ma = 1$), supersônica ($1,2 < Ma < 5$) e hipersônica ($Ma > 5$). Garcia *et al.* (2011) analisaram os perfis de magnitude da velocidade em um plano central da seção de duto com uma velocidade de entrada de 2 e 10 m/s no tempo de 1 s de vazamento de água, Figura 2.10, e observaram que na região de vazamento há o aumento da velocidade, e na simulação de velocidade de entrada maior os valores na região de vazamento chegam a 425,5 m/s caracterizando um comportamento supersônico nessa região.

A evolução do escoamento de água na seção de duto ao longo do tempo é observada para diferentes velocidades de entrada de ar no tempo de 0,3 e 1s, conforme Figura 2.11.

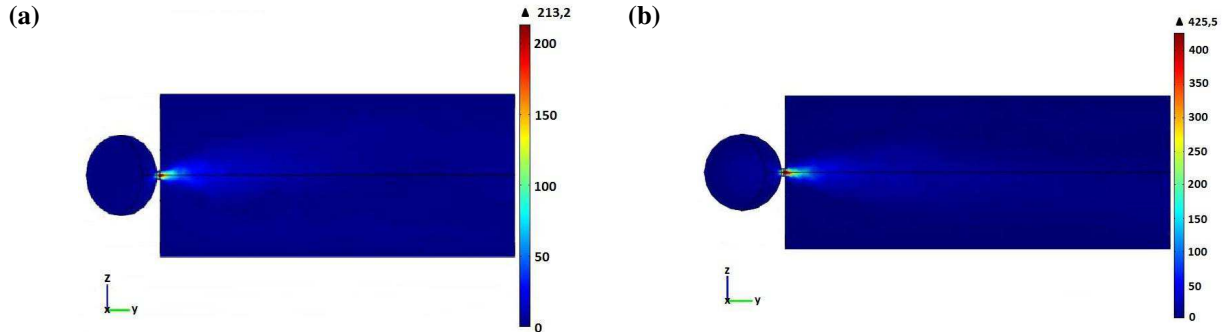


Figura 2.10: Perfis de velocidade para entrada de água à (a) 2 m/s e à (b) 10 m/s.
Fonte: Garcia *et al.* (2011)

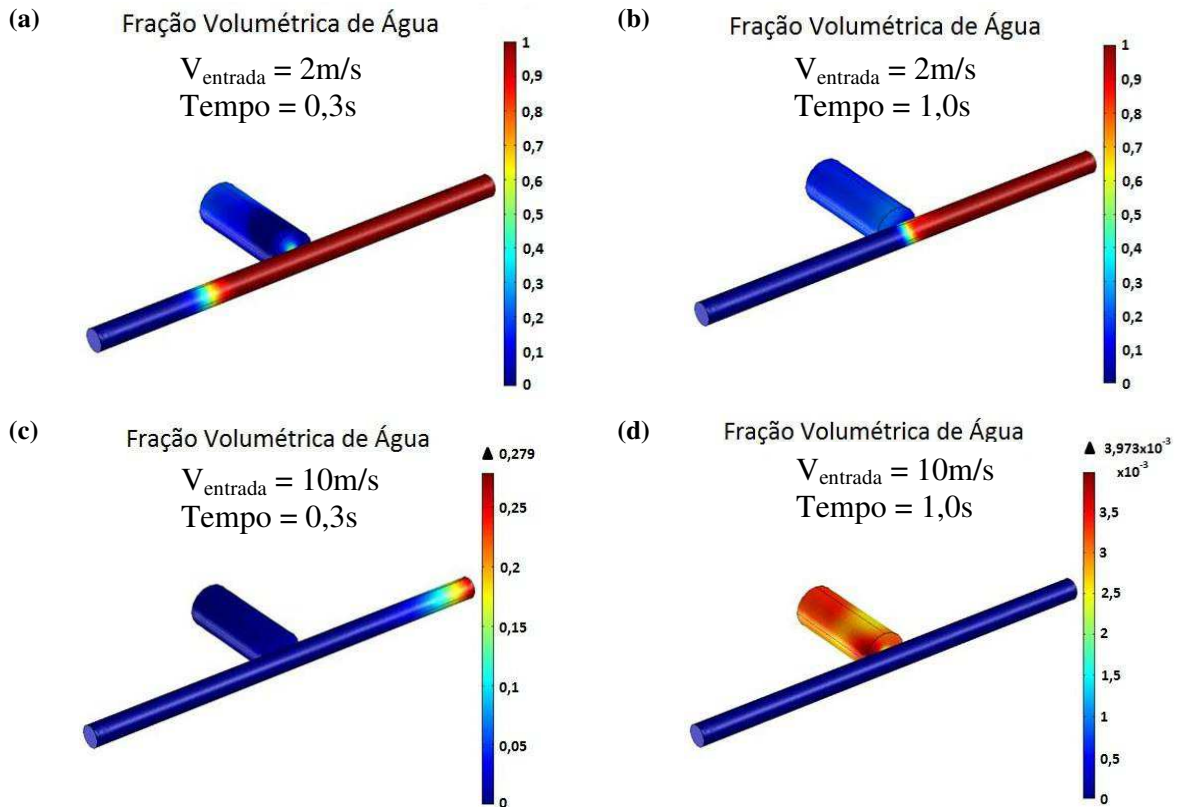


Figura 2.11: (a e b) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 2 m/s; (c e d) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 10 m/s.

Fonte: Garcia *et al.* (2011)

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição do problema

Para realizar o estudo da dependência do refinamento da malha com os resultado e, em seguida, estudar a influência do vazamento na hidrodinâmica do escoamento bifásico óleo-água em um tubo horizontal, foram adotados dois domínios de estudo. O primeiro domínio é composto por uma tubulação horizontal de 10 metros de comprimento e 20 centímetros de diâmetro. O segundo corresponde ao mesmo tubo porém com um orifício no centro do tubo de 1,6 cm de diâmetro e outro de mesma dimensão à 7,5 m da secção de entrada, ambos localizados na parte superior do duto, e um terceiro orifício de diâmetro de 3 cm na parte inferior central do duto.

3.2. Malha numérica

3.2.1 Geometria

Por questões técnicas de visualização no aplicativo computacional (Ansys CFX) torna-se inviável a construção de dutos de quilômetros de extensão. Então optou-se pela construção de um tubo de 10 metros de comprimento. Com base nas informações da Tabela 2.2 (ver seção 2.2), o tubo foi construído com 20 cm de diâmetro, que está aproximadamente na faixa de diâmetros para o transporte de petróleo que é de 8 polegadas (20,32 centímetros) à 20 polegadas (50,8 centímetros).

A representação do tubo com e sem vazamento no domínio computacional foi feita com o auxílio do ICEM-CFD 12.1 a partir de pontos, curvas e superfícies (Figura 3.1), onde o detalhamento da construção das geometrias encontra-se no Apêndice A.

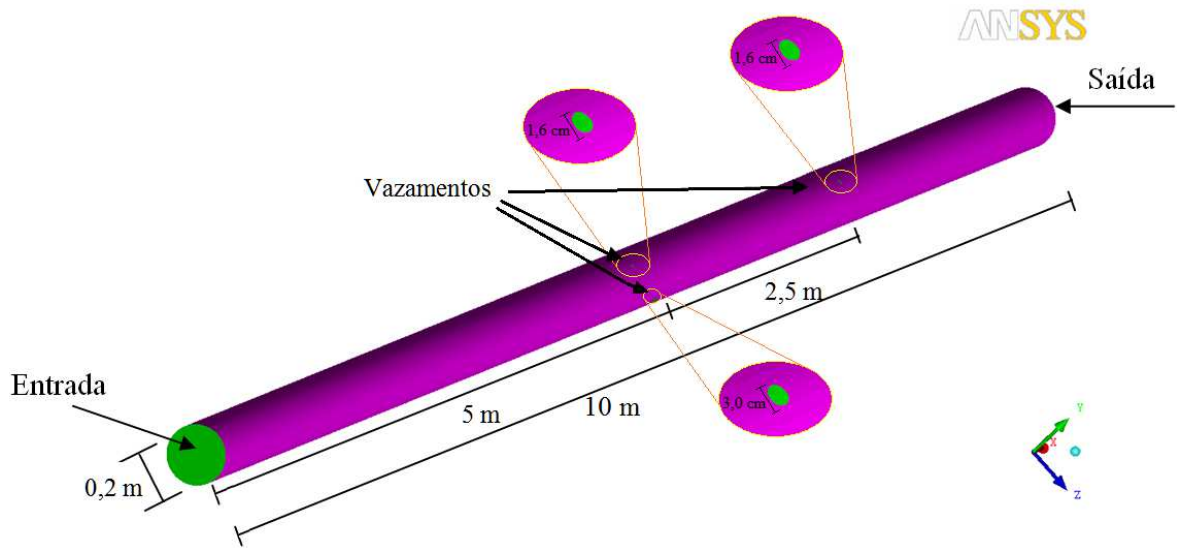


Figura 3.1: Geometria com as regiões de vazamento

3.2.2. Geração da malha

A malha representativa da tubulação (Figura 3.1) foi gerada empregando a estratégia de blocagem, onde inicialmente é criado um único bloco envolvendo ou contornando o domínio de estudo (Figura 3.2.a). Neste caso, o bloco possibilita a geração de uma malha com elementos hexaédricos. Posteriormente o bloco foi subdividido em cinco outros blocos, conforme se observa na Figura 3.2.b. Em seguida, estes blocos foram subdivididos nas regiões dos orifícios, Figura 3.2.c, de forma a se ter um controle maior do refinamento da malha nessas regiões. Maiores detalhes podem ser vistos no Apêndice A.

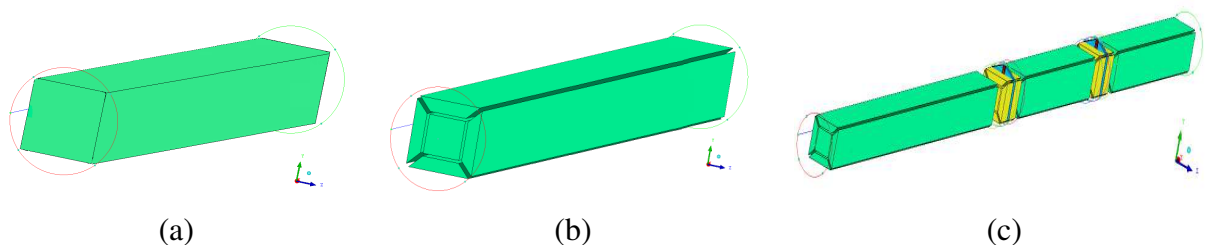


Figura 3.2: Ilustração dos blocos usados na construção da malha estruturada para a geometria com duas regiões de vazamento

3.2.3. Análise de dependência da malha

Para cada domínio de estudo (tubo com ou sem vazamento) foram geradas três malhas com diferentes níveis de refinamento, conforme apresentado na Tabela 3.1, visando analisar a dependência dos resultados com o refinamento da malha e escolher aquela que melhor representará o sistema em estudo. Os fluidos na tubulação escoam com velocidade de 0,2 m/s. Os vazamentos estão desativados. O detalhamento do teste encontra-se no Apêndice B.

Tabela 3.1: Refino das malhas e seus respectivos números de elementos

	Malha	Número de elementos hexaédricos
Sem refinamento na região do orifício	1	112 904
	2	317 384
	3	419 516
Com refinamento na região do orifício	4	152 397
	5	326 768
	6	464 472

3.3. Modelagem matemática

Nos escoamentos estudados, tanto os monofásicos (óleo) quanto os bifásicos (água – óleo), são adotadas as seguintes condições de contorno sobre as fronteiras do domínio de estudo (Figura 3.1):

- Fluido newtoniano incompressível com propriedades físico-químicas constantes;
- Regime de escoamento isotérmico;
- Não há ocorrência de reações químicas;
- Foi considerado o efeito gravitacional;

- Não há transferência de massa e de momento interfacial entre as correntes de água e óleo.
- As forças interfaciais de não arraste (forças de sustentação, lubrificação de parede, massa virtual, dispersão turbulenta e pressão de sólido) foram desprezadas;
- Condições na saída: pressão estática prescrita e igual à 101325 Pa;
- Condições na parede:
 - Não deslizamento $u_x = u_y = u_z = 0$;
 - Tubo liso;
 - Paredes estáticas.
- No vazamento: pressão estática média – 101325 Pa.
- Pressão de referência: 0 atm;
- Valor máximo de iterações: 15;

O escoamento monofásico, além de ter as condições citadas acima, possui as características:

- Regime de escoamento laminar com número de Reynolds 102,2;
- Velocidade de entrada de óleo – $u_o = 0,2$ m/s;
- Comprimento de entrada: $L_e = 1,43$ m.

O escoamento bifásico (água – óleo) difere do escoamento monofásico de óleo por ter as seguintes condições:

- Condições na entrada:
 - Velocidade da mistura água e óleo – $u_x = 0,2$ m/s (regime laminar);
 - Fração de óleo – f_o (Tabela 3.4 e 3.5);
- Foi adotado o modelo de partícula Euleriano-Euleriano onde o óleo se comporta como fluido contínuo e a água como partículas esféricas dispersas;
- Diâmetro da partícula esférica da água: 10^{-4} m;
- Considera-se a equação da conservação de massa e a equação da quantidade de movimento.

As equações de conservação de massa e momento linear são:

- Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial (f_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (3.1)$$

onde o sub-índice grego α representa a fase envolvida na mistura bifásica água/óleo, f , ρ , e \vec{U} são respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade. Para a fase α , o vetor velocidade é dado por $\vec{U}_\alpha = (u, v, w)$.

- Equação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p_\alpha \\ + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde p é a pressão, $\vec{S}_{M\alpha}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, \vec{M}_α descreve a força total por unidade de volume (forças de arraste interfacial), onde:

$$\vec{M}_\alpha = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3.3)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste determinado utilizando a correlação de Schiller-Neumann.

$$C_D = \max \left[\frac{24}{\text{Re}} (1 + 0,15 \text{Re}^{0,687}); 0,44 \right] \quad (3.4)$$

Nos regimes permanentes a simulação ocorreu com mil iterações e o tempo total de simulação foi de 100 segundos. Para os regimes transientes foram aplicados passos de tempo com 15 iterações cada e entre o período de 0 à 0,01 s de escoamento o passo de tempo utilizado foi de 0,001 s, no período de 0,01 s à 0,1 s o valor do passo de tempo subiu para 0,01 s e a partir do tempo de 0,01 s o passo de tempo adotado foi de 0,1 s.

3.4. Propriedades físico-químicas

As propriedades dos fluidos, óleo e água, utilizados no presente trabalho, estão representadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3.2: Propriedades do óleo

Propriedades físicas	Fase contínua (óleo)	Fonte
Densidade (kg/m ³)	868,7	<i>Cunha</i> (2010)
Tensão superficial (N/m)	0,03	<i>Cunha</i> (2010)
Massa molar (kg/kmol)	105,47	<i>Cunha</i> (2010)
Viscosidade (Pa.s)	0,17	<i>Cunha</i> (2010)

Tabela 3.3: Propriedades da água

Propriedades físicas	Fase dispersa (água)	Fonte
Densidade (kg/m ³)	997	Welty <i>et al.</i> (1984)
Massa molar (kg/kmol)	18,02	Welty <i>et al.</i> (1984)
Viscosidade (Pa.s)	0,0008899	Welty <i>et al.</i> (1984)
Diâmetro da partícula (mm)	0,001	

3.5. Estudos de caso

As simulações foram investigadas empregando computadores com processadores Quad-Core Intel Dual Xeon Processador E5430 de 2.66GHz com 8GB de memória RAM disponibilizados nos laboratórios LPFI (Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem) e LCTF (Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) das Unidades Acadêmicas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. Os estudos de caso estão descritos nos tópicos seguintes.

3.5.1. Estudo de caso: escoamento na presença de vazamento e regime permanente

Para avaliar a distribuição de pressão ao longo da tubulação em um escoamento bifásico, os vazamentos menores foram posicionados na parte superior do tubo e estudaram-se dois casos, expostos na Tabela 3.4, onde estão explícitos os valores dos seguintes parâmetros: velocidade do óleo, velocidade da água, fração volumétrica do óleo, fração volumétrica da água e localização do vazamento. As condições de contorno adotadas são para o escoamento bifásico (água – óleo) em regime permanente.

Tabela 3.4: Dados usados nas simulações para vazamentos menores localizados na parte superior do duto

Caso	$U_{\text{óleo}}$ na entrada [m/s]	$U_{\text{água}}$ na entrada [m/s]	Fração volumétrica do óleo f_o	Fração volumétrica da água f_w	Vazamento à 5 metros da seção de entrada (D=1,6cm) P [Pa]	Vazamento à 7,5 metros da seção de entrada (D=1,6cm) P [Pa]	Vazamento à 5 metros da seção de entrada (D=3,0cm) P [Pa]
A	0,2	0,2	0,95	0,05	101325 Pa	-	-
B	0,2	0,2	0,95	0,05	-	101325 Pa	-

3.5.2. Estudo de caso: escoamento na presença de vazamento em regime transiente

Para a análise da influência da fração volumétrica de óleo do escoamento na quantidade de óleo vazado, assim como a influência da presença de dois vazamentos na hidrodinâmica do escoamento, realizaram-se novas simulações. A influência do tamanho do orifício de vazamento no escoamento monofásico de óleo e bifásico de óleo e água também foi estudado. Nas simulações, os vazamentos em estudo estão localizados na parte inferior do duto. As condições de contorno adotadas são as equivalentes ao escoamento bifásico (água – óleo) para regime de escoamento transiente. Para observar o comportamento do escoamento com o tempo foram analisados os casos listados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Simulações numéricas com variações da quantidade e do tamanho do vazamento para distintas frações volumétricas de óleo no escoamento

Caso	Fração volumétrica do óleo f_o	Fração volumétrica da água f_w	Vazamento à 5 metros da seção de entrada de fluido (Diâmetro do furo = 1,6cm) P	Vazamento à 7,5 metros da seção de entrada de fluido (Diâmetro do furo = 1,6cm) P	Vazamento à 5 metros da seção de entrada de fluido (Diâmetro do furo = 3,0cm) P
1	1,000	0,000	101325 Pa	-	-
2	1,000	0,000	101325 Pa	101325 Pa	-
3	0,990	0,005	101325 Pa	-	-
4	0,990	0,005	101325 Pa	101325 Pa	-
5	0,975	0,025	101325 Pa	-	-
6	0,975	0,025	101325 Pa	101325 Pa	-
7	0,950	0,050	101325 Pa	-	-
8	0,950	0,050	101325 Pa	101325 Pa	-
9	0,925	0,075	101325 Pa	-	-
10	0,925	0,075	101325 Pa	101325 Pa	-
11	0,900	0,100	101325 Pa	-	-
12	0,900	0,100	101325 Pa	101325 Pa	-
13	1,000	0,000	-	-	101325 Pa
14	0,950	0,050	-	-	101325 Pa
15	0,900	0,100	-	-	101325 Pa

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dependência da malha

Em todas as malhas foram tomados valores médios de pressões entre a seção transversal em $x = 2$ m e a seção de saída do duto, conforme detalhado no apêndice B. Na Tabela 4.1 estão representados os resultados da diferença de pressão para as malhas com e sem vazamento (Tabela 3.1), assim como os valores de pressão analíticos obtidos pelas Equações 2.5 e 2.6 e os erros percentuais entre os valores numéricos e analíticos. Comparando-se as malhas pouco refinadas (malhas 1 e 4) com as de refinamento intermediário (malhas 2 e 5), observa-se que o aumento da densidade da malha influenciou nos valores de diferença de pressão. Ao comparar as de refinamento médio (malhas 2 e 5) com as de alto refino (malhas 3 e 6), vê-se que os valores das diferenças de pressão permanecem praticamente constantes. As malhas 2, 3, 5 e 6 podem, portanto, serem utilizadas, mas as malhas mais refinadas exigem um esforço computacional maior para gerar os resultados, o que leva a maiores tempos de simulação. Portanto, adotaram-se as malhas 2 e 5 para o restante dos estudos que vão ser apresentados a partir de então.

Tabela 4.1: Diferença de pressão em função da densidade de volumes de controle na malha

	Malha	ΔP [Pascal] numérico	ΔP [Pascal] analítico	Erro percentual
Sem refinamento na região do orifício	1	131	217,6	66,1
	2	130	217,6	67,4
	3	130	217,6	67,4
Com refinamento na região do orifício	4	131	217,6	66,1
	5	130	217,6	67,4
	6	130	217,6	67,4

Na Figura 4.1 estão representados os perfis parabólicos de velocidade numéricos e analíticos. Os valores numéricos foram tomados em uma linha que percorre o eixo y e está

localizada em $x = 5$ m e $z = 0$ m. Os valores analíticos foram obtidos a partir da Equação 2.4. Para esta análise, a região de vazamento foi considerada impermeável.

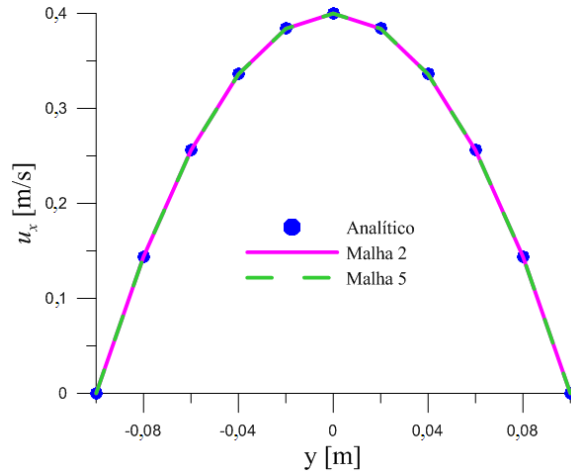


Figura 4.1: Perfis de velocidade analítico e numérico (Malha 2 e 5) para o escoamento laminar de óleo.

Os resultados mostram que o refino nas regiões de vazamento não influenciou nos resultados, indicando que a malha 5 pode ser utilizada nas simulações com o vazamento ativado ou desativado.

Com a malha escolhida (malha 5) realizou-se um teste para o escoamento laminar bifásico de água e óleo, em regime permanente com uma fração volumétrica de 0,999955 de óleo (fase contínua) e 0,000045 de água (fase dispersa). Essas frações foram escolhidas de forma que o resultado do escoamento seja equivalente à um escoamento monofásico de óleo. A velocidade de escoamento para a água e para o óleo são iguais à 0,2 m/s.

A comparação do perfil de velocidades entre a solução numérica, em $x = 5$ m e $z = 0$ m, e a analítica é exposta na Figura 4.2.

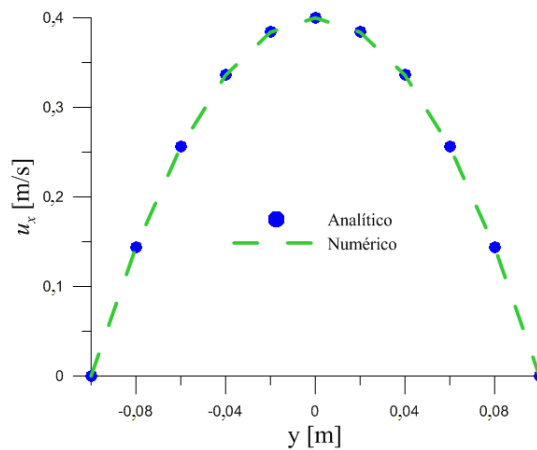


Figura 4.2: Perfis de velocidade analíticos e numéricos para malha 5 com escoamento bifásico água-óleo.

Conclui-se que a malha 5 e as condições de contorno adotadas são adequadas para estudo de casos previamente estabelecidos.

4.2. Escoamento bifásico (água-óleo) na presença de vazamento em regime permanente

Na Figura 4.3 estão representados os campos de pressão sobre o plano longitudinal xy referente aos casos A e B (Tabela 3.4) onde se observa um decréscimo da pressão ao longo da tubulação e no vazamento, caracterizando um escape de fluido.

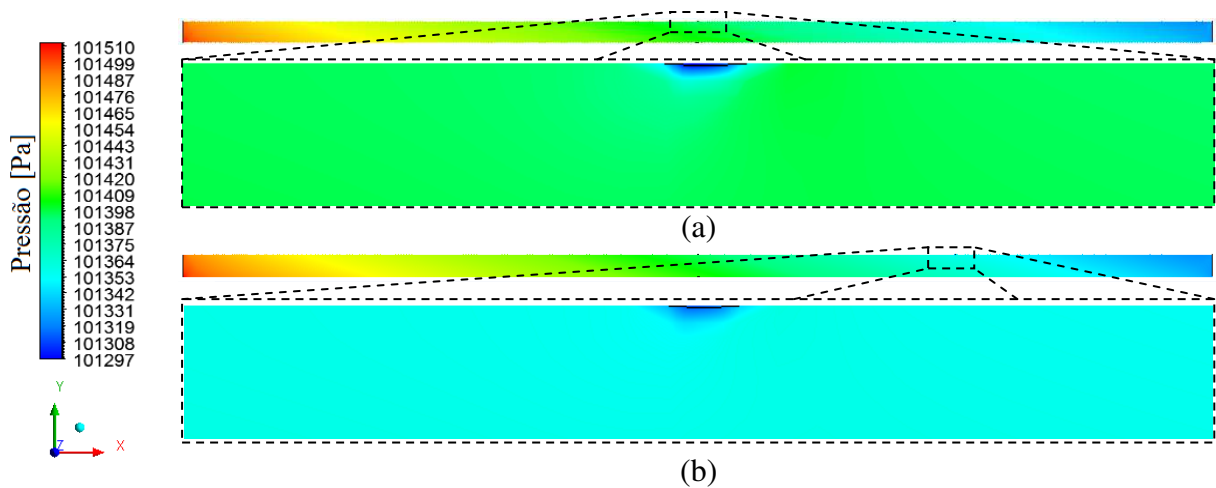


Figura 4.3 Campos de pressão sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.

Na Figura 4.4 estão representados os campos vetoriais de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal xy também referente aos casos A e B, onde é possível perceber a trajetória do fluido que escoar na tubulação.

Em um escoamento laminar de uma mistura bifásica de óleo, o óleo, por ser menos denso que a água, tende a escoar na parte superior. Isto pode ser observado nos campos de fração volumétrica de óleo, Figura 4.5, onde rente à parede inferior há uma menor concentração de óleo.

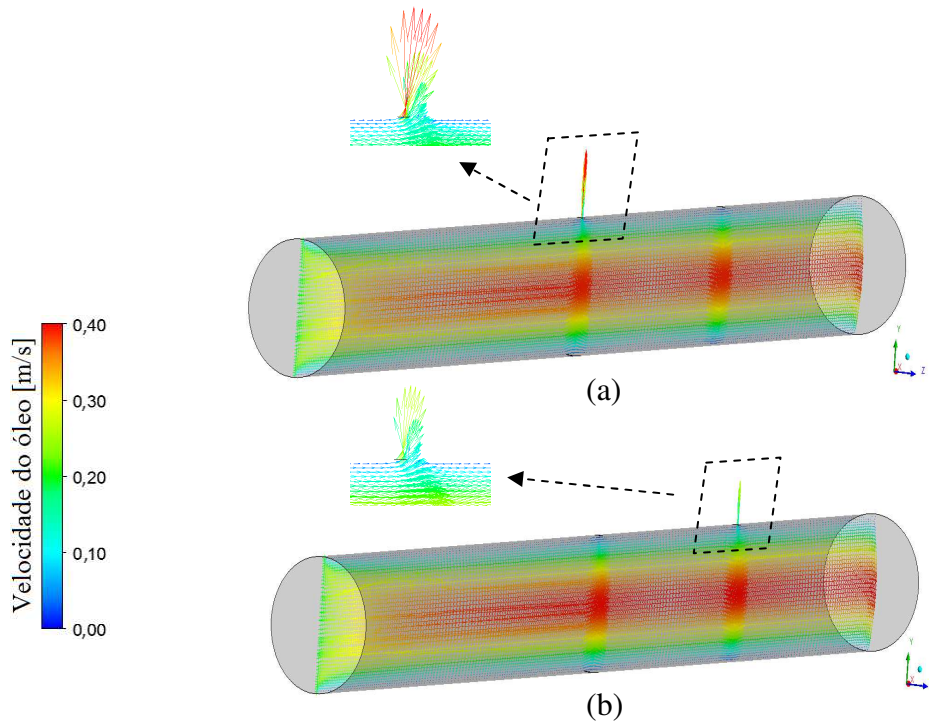


Fig 4.4 Campos vetoriais de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.

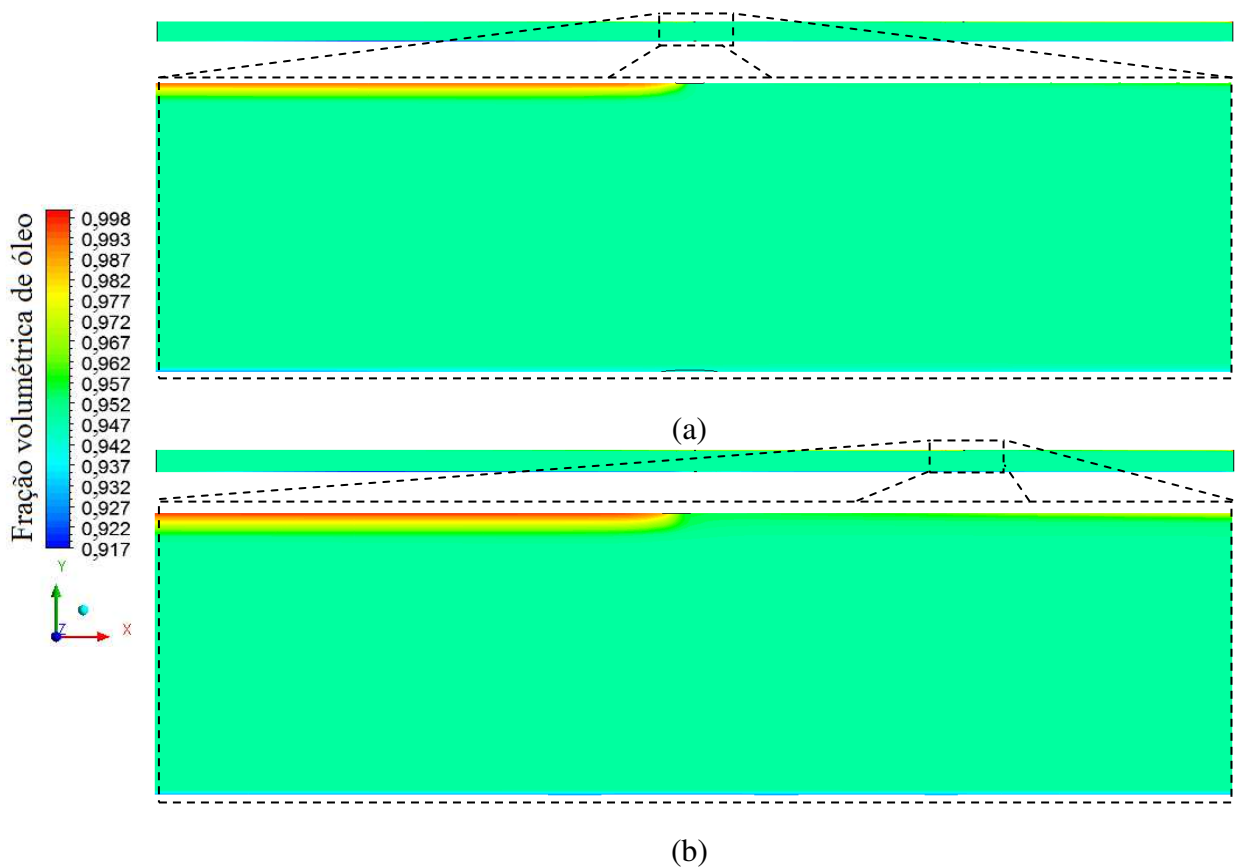


Figura 4.5 Campos de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal xy com o vazamento à (a) 5 m e à (b) 7,5 m da entrada.

Na Figura 4.6 estão representadas três linhas no tubo onde foram tomados os valores de pressão nas posições $y = 0$ cm, $y = 7,5$ cm e $y = 9,9$ cm ao longo do eixo x . É importante destacar a flutuação da componente da pressão nas proximidades do vazamento, o que torna possível a sua localização. Essas flutuações são melhores observadas nas tomadas de pressão para a posição radial próxima a parede do tubo ($y = 9,9$ cm). Os valores de pressão estão representados na Figura 4.7.

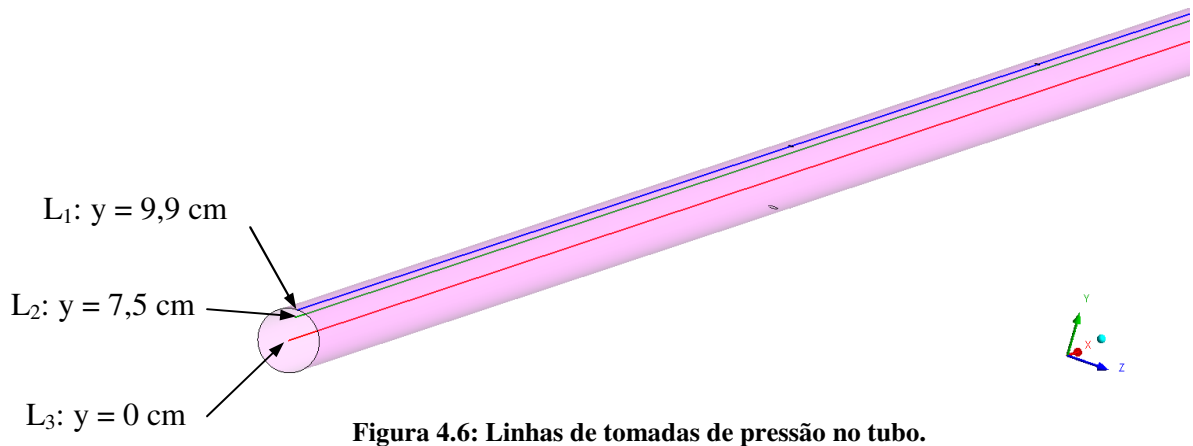


Figura 4.6: Linhas de tomadas de pressão no tubo.

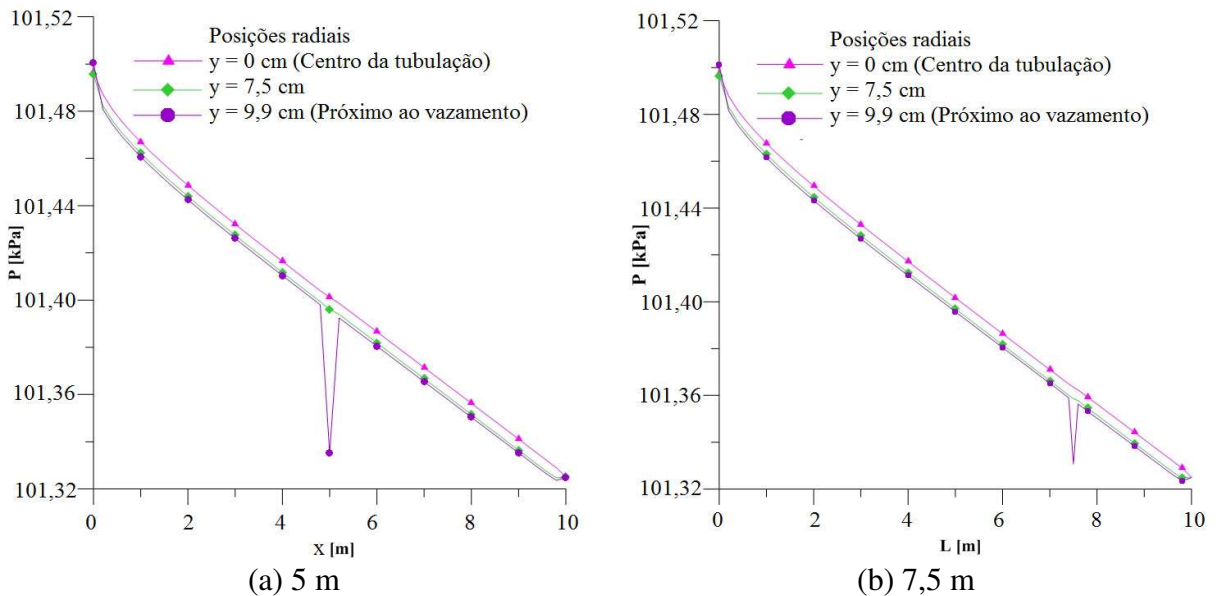


Figura 4.7: Distribuição de pressão ao longo das linhas em três posições radiais com vazamento à (a) 5 m e (b) 7,5 m da entrada.

Na Figura 4.8 está representada a pressão em função da posição axial ao longo do tubo, para a posição radial próxima ao vazamento ($L_1: y = 9,9$ cm). Sobre esta curva foram definidas as curvas de tendência (equação de uma reta) em duas regiões: antes e após a região do vazamento. Essas curvas mostram que existe uma pequena mudança de inclinação da reta

quando esta passa pela região do vazamento. As retas foram construídas desprezando o comprimento de entrada e os efeitos de saída, de forma a se obter aquelas que melhor descrevem o real comportamento do fluido no interior do duto.

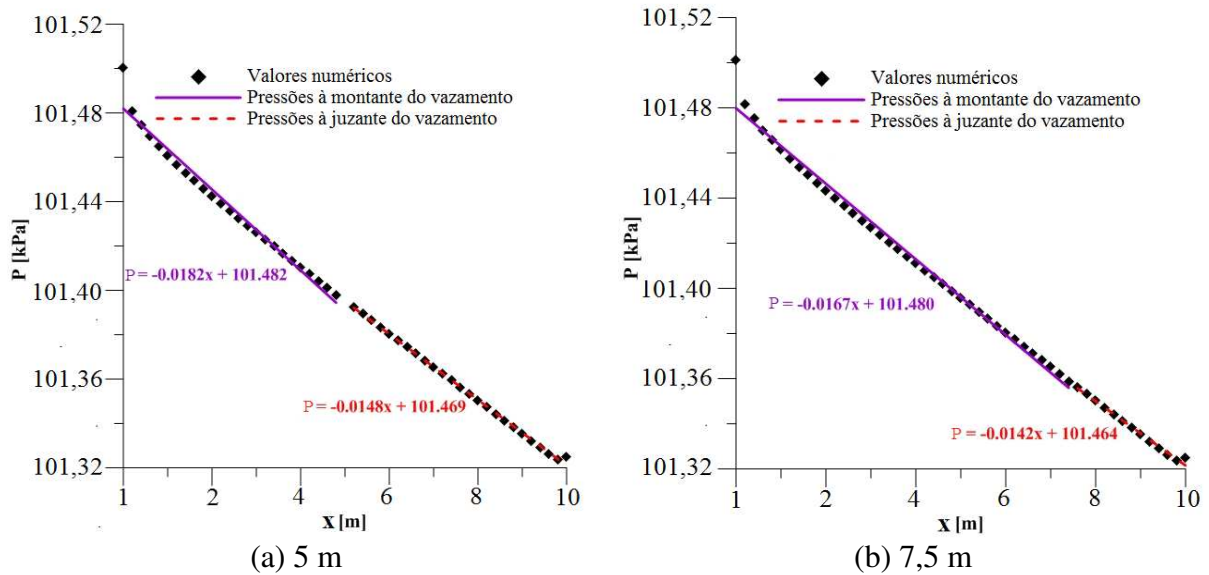


Figura 4.8: Distribuição da pressão sobre a linha L_1 com o vazamento à (a) 5 m e (b) 7,5 m da entrada.

4.3. Escoamento bifásico (água-óleo) na presença de vazamento em regime transitório

Os resultados do escoamento bifásico água-óleo foram obtidos com a malha ilustrada na Figura 4.9 constituída de 327 mil elementos hexaédricos.

Na Figura 4.10 está representada a evolução da vazão do óleo no vazamento de diâmetro de 1,6 cm e à 5 m da seção de entrada para diferentes frações volumétricas de óleo na entrada da tubulação. A Figura 4.10(a) mostra a evolução para os casos onde há apenas um vazamento ativado (Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11) e a Figura 4.10(b) mostra a mesma evolução para os casos onde dois vazamentos de mesma dimensão estão ativados (Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12). Observa-se que a diminuição da fração volumétrica de óleo no duto conduz à uma redução da vazão de óleo pelo orifício de vazamento.

A Figura 4.11 mostra que, ao se considerar a existência de vazamento no segundo orifício do duto, observa-se que este influencia no escape de fluidos do primeiro vazamento. A linha contínua equivale à vazão volumétrica de óleo no Caso 1, onde ativa-se apenas o vazamento à 5 metros da seção de entrada e diâmetro de 1,6 cm. A linha tracejada equivale à

vazão de óleo na mesma região, porém com os dois vazamentos menores do duto ativados (Caso 2). Comparando-se as duas curvas citadas, a contínua se estabiliza com uma vazão mais alta e mais rapidamente que a tracejada. O mesmo comportamento é observado para os Casos 11 e 12.

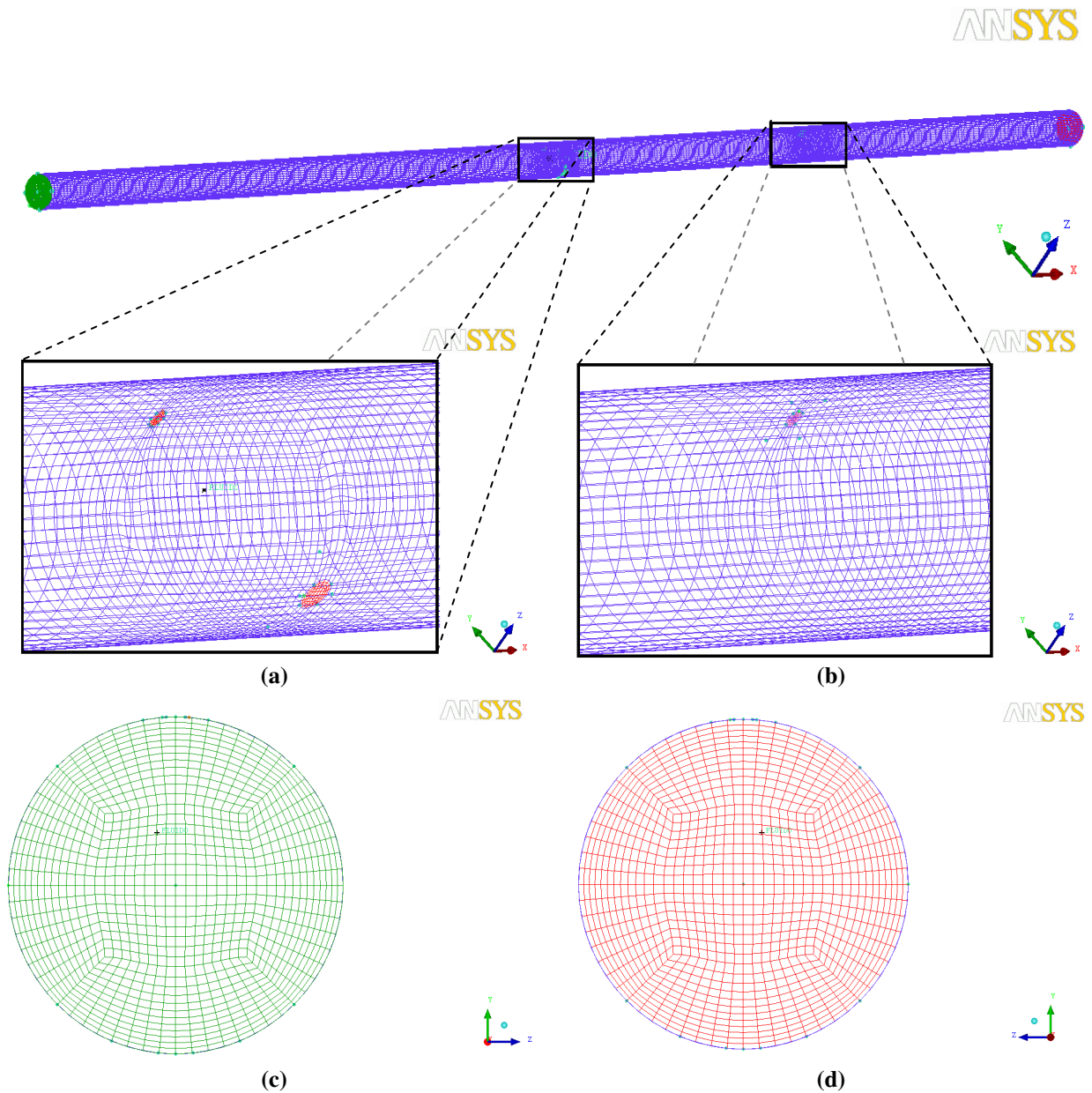


Figura 4.9: Representação da malha no tubo e detalhe das seções (a) dos vazamentos em $x = 5\text{m}$, (b) do vazamento em $x = 7,5\text{m}$, (c) da entrada e (d) da saída.

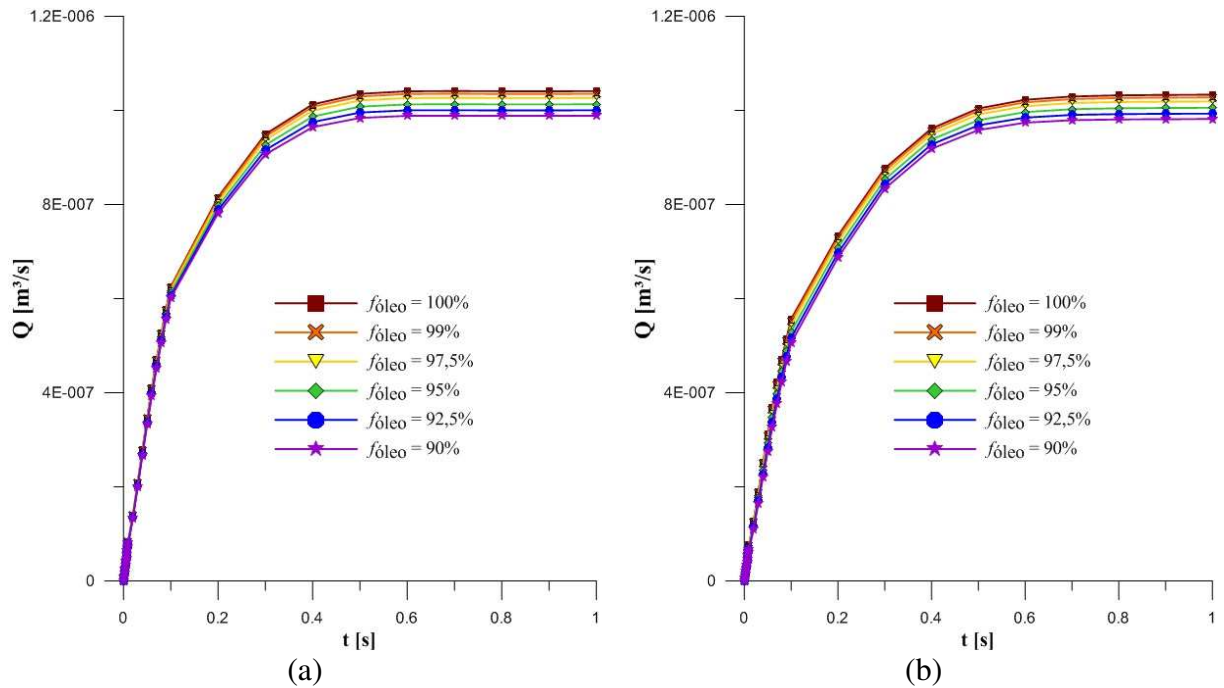


Figura 4.10: Vazão volumétrica de óleo no orifício de vazamento à 5 m da entrada e 1,6 cm de diâmetro em função do tempo para diferentes valores de frações volumétricas de óleo injetados no tubo (a) Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 e (b) Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12.

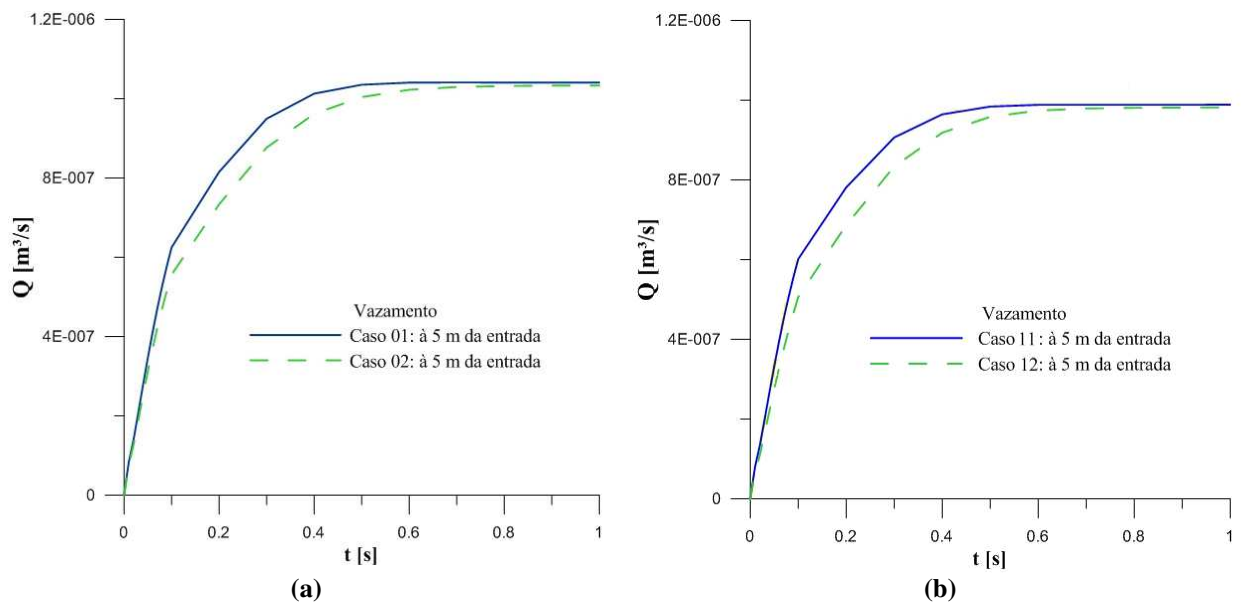


Figura 4.11: Evolução da vazão de óleo no vazamento com o tempo ocorrendo no orifício de 1,6 cm de diâmetro à 5 m antes e após ativar o vazamento à 7,5 m da entrada (a) Casos 1 e 2 e (b) Casos 11 e 12.

Ao aumentar o diâmetro do orifício do vazamento, observa-se que há um crescimento da vazão volumétrica de escape de óleo. A curva contínua da Figura 4.12 equivale à vazão volumétrica de óleo no Caso 1, onde o vazamento à 5 metros da seção de entrada está ativado

e possui diâmetro de 1,6 cm. A curva tracejada refere-se à vazão volumétrica de óleo no Caso 13, onde o vazamento à 5 metros da seção de entrada está ativado e possui diâmetro de 3,0 cm. É de fácil percepção que a vazão volumétrica no orifício de 3,0 cm (curva tracejada da Figura 4.12 e 4.13) é maior do que para um orifício de 1,6 cm (curva contínua). É também interessante observar que ao aumentar o diâmetro do orifício de vazamento, mais tempo decorre para que a vazão volumétrica de escape atinja o equilíbrio. O mesmo comportamento é observado para os Casos 07 e 14 (Figura 4.13(a)) e para os Casos 11 e 15 (Figura 4.13(b)).

Para uma melhor visualização do gráfico, adotou-se o tempo adimensional como segue:

$$t^* = \frac{t}{t_{total}} \quad (4.1)$$

onde t é o tempo e t_{total} é o tempo total da simulação. Para os Casos 01, 07 e 11 adotou-se o tempo total igual à 1 segundo. Para os Casos 13, 14 e 15 o valor sobe para 2 segundos.

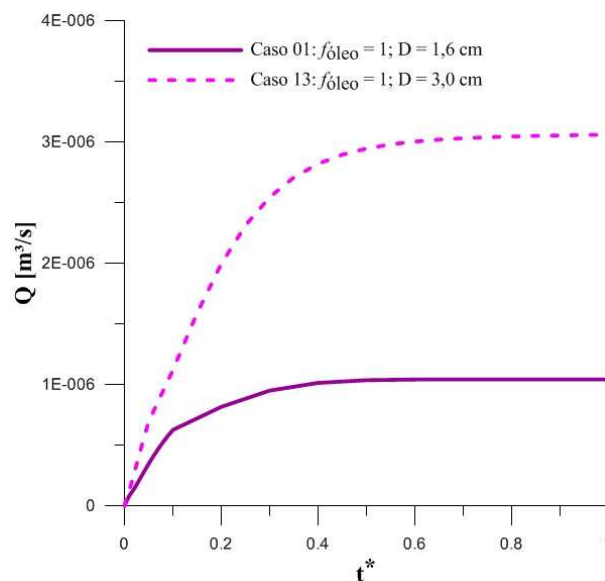


Figura 4.12: Vazão volumétrica do óleo no vazamento em função do tempo para os Casos 1 e 13.

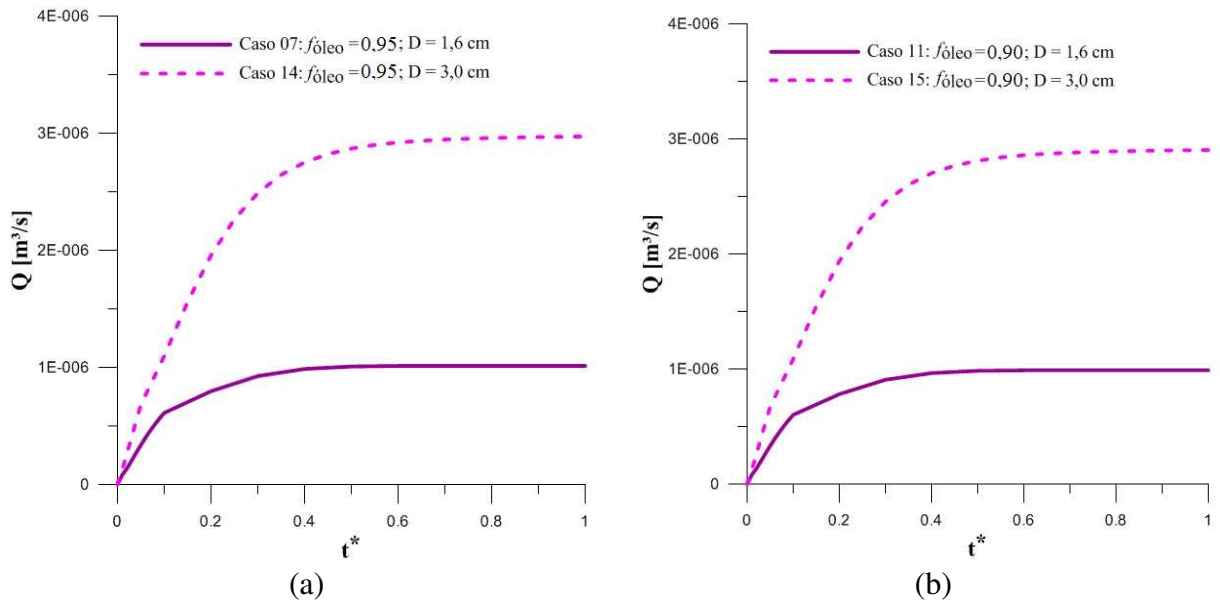


Figura 4.13: Vazão volumétrica do óleo no vazamento em função do tempo para os (a) Casos 7 e 14 e (b) Casos 11 e 15

A Figura 4.14 ilustra a variação da vazão volumétrica de água e óleo no vazamento ao final de um segundo em função do tamanho do vazamento. Observa-se que quanto menor a fração de óleo na mistura, tem-se um acréscimo de fluidos saindo pelo orifício, o que pode ser atribuído a uma redução da viscosidade da mistura. Como se espera, quanto maior o orifício de vazamento maior é o vazamento, como se observa na Figura 4.14.

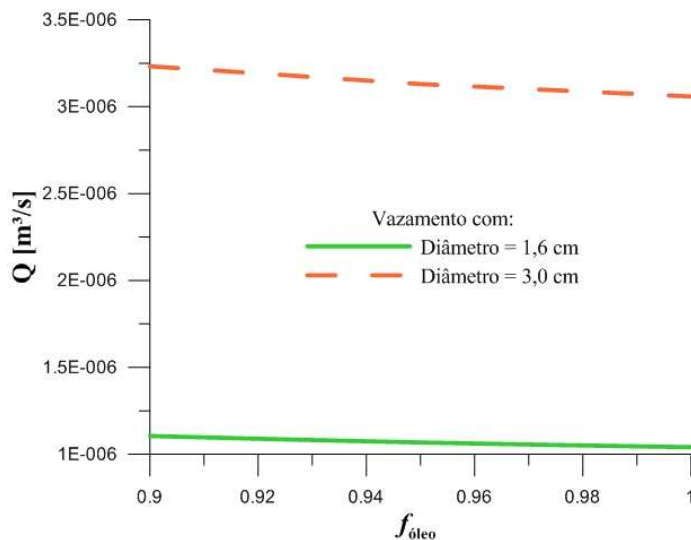


Figura 4.14: Vazão da mistura água-óleo no vazamento em função da fração volumétrica de óleo na entrada para vazamentos com diâmetro de 1,6 cm e 3 cm.

Na Figura 4.15(a) estão representadas as evoluções da queda de pressão, entre a entrada e a saída do tubo, em função do tempo para diferentes frações volumétricas de óleo de alimentação quando apenas um vazamento está ativo (Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11). Observa-se um comportamento semelhante, mas com grandezas diferentes, para cada valor de fração volumétrica de óleo e que após 0,6 segundos do início do vazamento há uma estabilização do comportamento de pressão.

O mesmo comportamento da queda de pressão entre a seção de entrada e saída é observado para os casos onde há dois vazamentos ativos, Figura 4.15(b) (Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12). Porém nota-se que a estabilização do comportamento de pressão só ocorre após 0,7s de vazamento iniciado. Este comportamento é justificado pelo fato de dois vazamentos em uma mesma tubulação causar uma maior alteração em comparação com a mesma tubulação contendo apenas 1 vazamento.

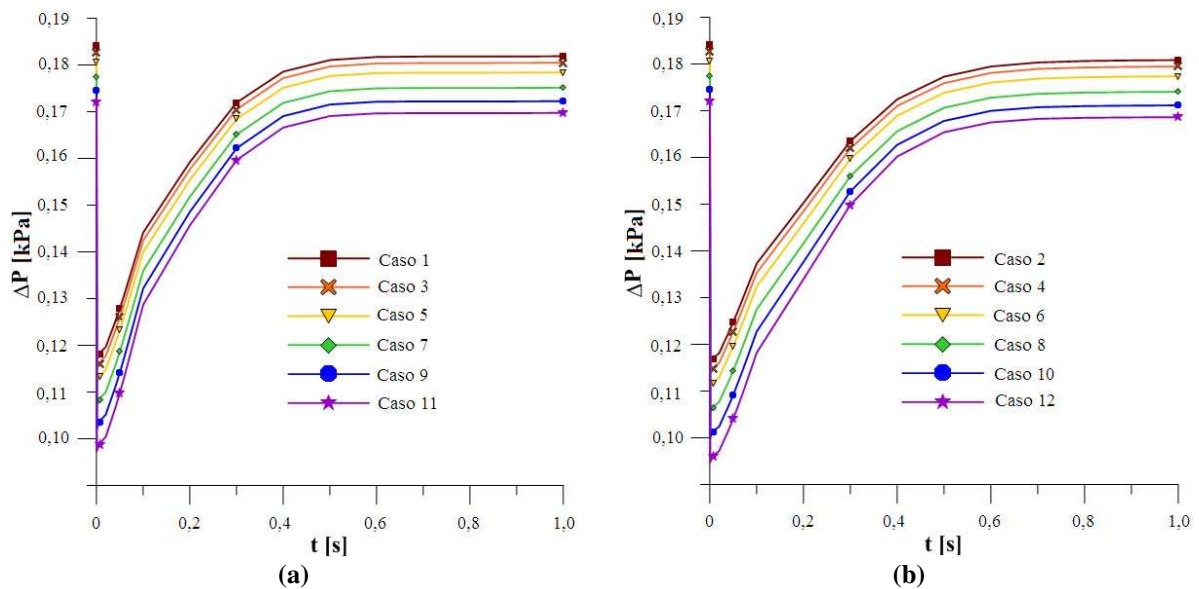


Figura 4.15: Diferença de pressão média entre a seção de entrada e a de saída do duto em função do tempo e na presença de vazamento para os (a) Casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 e (b) Casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12.

A fim de observar o comportamento da pressão ao longo do duto, tomaram-se valores de pressão média em diferentes planos yz distribuídos ao longo do tubo (0 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 4,5 m, 5 m, 5,5 m, 6 m, 7 m, 7,5 m, 8 m, 9 m e 10 m). Com estas pressões médias traçaram-se curvas representadas na Figura 4.16 para os casos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 e na Figura 4.17 para os casos 2, 4, 6, 8, 10 e 12 (Tabela 3.5), que demonstram o comportamento da pressão ao longo do duto. Estas curvas foram captadas no início do vazamento ($t = 0,001$ s), em $t = 0,05$ s, em $t = 0,1$ s, em $t = 0,3$ s e no tempo onde o comportamento já foi estabilizado

($t = 1$ s). Em todos os casos podem ser observados nitidamente a mudança de comportamento da pressão antes e após o vazamento.

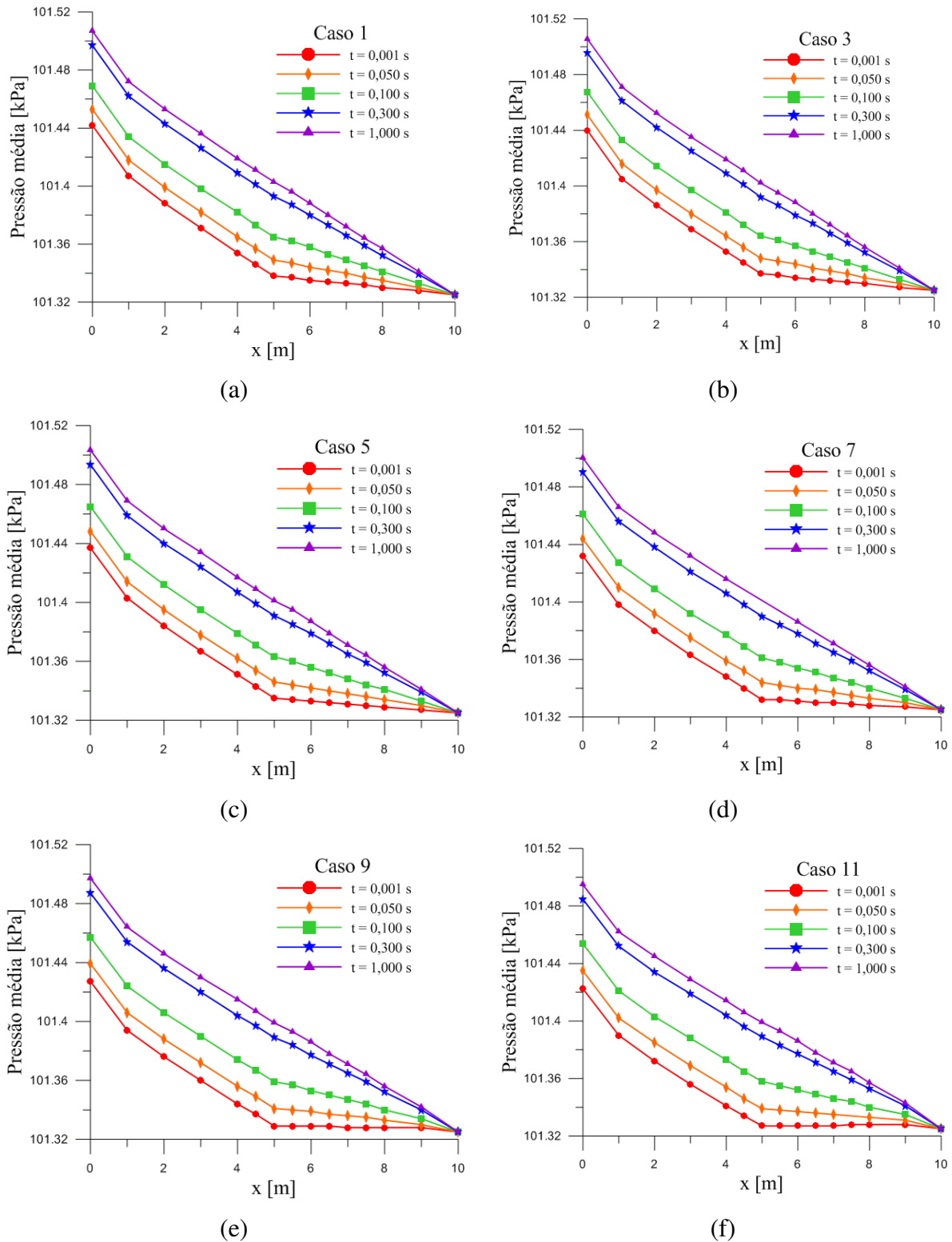


Figura 4.16: Comportamento da pressão média ao longo do duto em função do tempo de escoamento a partir do início do vazamento para os casos com apenas um vazamento.

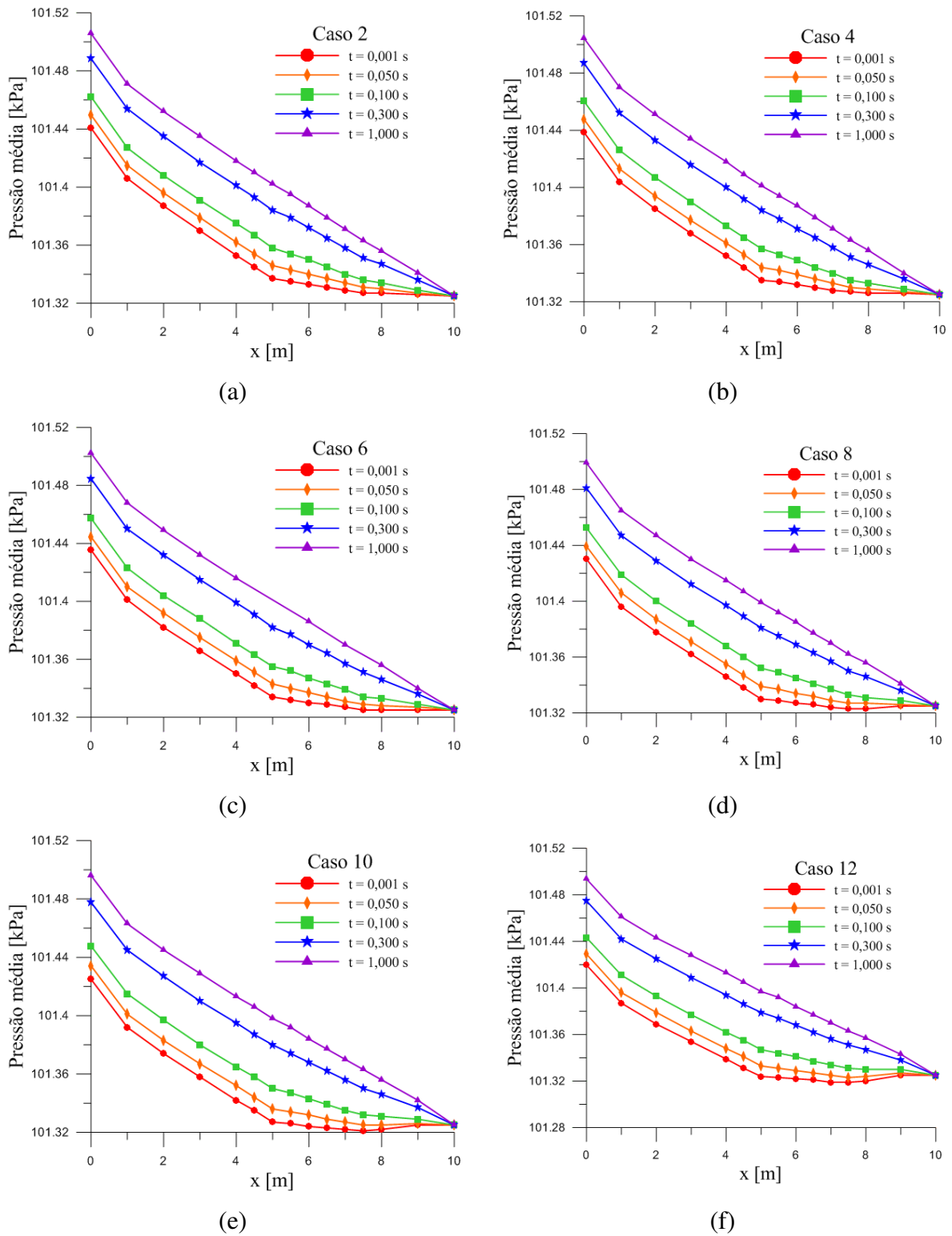


Figura 4.17: Comportamento da pressão média ao longo do duto em função do tempo de escoamento a partir do início do vazamento para os casos com dois vazamentos.

Ao ativar os vazamentos de 1,6 cm e de 3,0 cm de diâmetro, espera-se que estes perturbam o comportamento da pressão no duto. Os resultados já comprovaram que após certo espaço de tempo a pressão no duto volta a se estabilizar. A Figura 4.18 (escoamento

monofásico de óleo) mostra que ao variar-se o diâmetro do vazamento, o período de estabilização da pressão varia também. Quanto maior o vazamento, maior será a perturbação e, conseqüentemente, o tempo gasto para a estabilização do comportamento de pressão. Para a confecção do gráfico fez-se uso da Equação 4.1 (seção 2.2), onde o tempo total para o Caso 1 é de 1 segundo e para o Caso 13 é de 1,8 segundos.

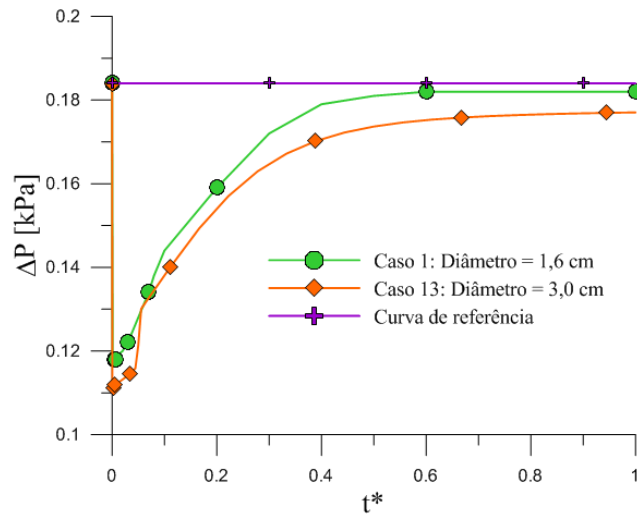


Figura 4.18: Diferença de pressão média entre a seção de entrada e a de saída do duto em função do tempo na presença de vazamento (Casos 1 e 13) e na ausência de vazamento (Curva de referência).

5. CONCLUSÕES

Com os resultados numéricos da simulação do processo de escoamento monofásico (óleo) e bifásico (água – óleo) nas tubulações, pode-se concluir que:

- O modelo matemático adotado foi capaz de avaliar o problema proposto;
- Os campos de pressão mostram que a presença dos vazamentos expressa um maior gradiente de pressão na região próxima ao orifício;
- Os campos vetoriais de velocidade de óleo mostram a trajetória da mistura bifásica no escoamento, comprovando a presença de vazamento;
- Os campos de fração volumétrica do óleo certificam uma maior concentração deste na parte superior do duto, diferentemente a água, que apresenta uma fração volumétrica maior na região inferior por apresentar maior densidade que o óleo;
- A fração volumétrica de óleo no escoamento influencia na quantidade de volume de óleo vazado;
- A presença de um segundo vazamento no duto influencia na vazão de óleo do primeiro vazamento;
- Ao aumentar o diâmetro de orifício de vazamento, maior o volume de fluido que sai pelo orifício;
- Observou-se que a linha de tomada dos valores de pressão ao longo do duto mais próxima da parede (L_1) de onde se tem o vazamento apresentou uma melhor identificação do mesmo;
- Observou-se uma pequena variação dos valores da pressão antes e após o vazamento;
- O tempo necessário para que o comportamento de pressão atinja a estabilidade após o vazamento depende do diâmetro do orifício de escape dos fluidos do tubo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Autorizações de operação**. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?pg=14450&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1324693972185>>. Acesso em: 23 dez. 2011.

AZEVEDO, Fabiano Medeiros de. **Proposta de Algoritmo para Detecção de Vazamento em Oleodutos utilizando Análise Freqüencial de Sinais de Pressão**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 105f, 2009.

BEZERRA, B. A. F. **Detecção de vazamentos em tubulações de gás pelo método de transitório de pressão utilizando CLP e sensores**. Monografia (Conclusão de curso de especialização) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 77f, 2008.

BIRD, Robert Byron, STEWART, Warren Earl, LIGHTFOOT, Edwin. **Fenômenos De Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004.

BOARD, National Transportation Safety. **NTSB releases update on investigation into fatal PG&E pipeline explosion in San Bruno**. 2010. Disponível em: <<http://www.feintl.com/main/FEI-Page.asp?p=4>>. Acesso em: 13 jan. 2011.

BRAGA, Candice Ferreira. **Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando misturas gás-líquido**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 108f, 2001.

BUIATTI, Claudio Malagoni. **Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line**. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 133f, 1995.

CASTRO, Ricardo Defeo; MOHRIAK, Webster U.; MEDEIROS, Felipe; MANSUR Kátia. **As Bacias Sedimentares e o Petróleo: da formação até a exploração**. Disponível em: <http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/pg_placa.php?p=25>. Acesso em: 08 fev. 2011.

COLOMBAROLI, Pedro Lucio Stefani. **Detecção acústica de vazamentos em dutos de petróleo**. Artigo (conclusão de curso) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2008.

CUNHA, Acto Lima. **Recuperação avançada não-isotérmica de óleos pesados em reservatórios de petróleo via simulação numérica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 88f, 2010.

CURITIBA, Bandnews FM. **Petrobrás é condenada a pagar R\$ 102 mi por vazamento na Serra do Mar.** Disponível em: <<http://bandnewsfmc Curitiba.com/2012/04/30/petrobras-e-condenada-a-pagar-r-102-mi-por-vazamento-na-serra-do-mar/>>. Acesso em: 13 de jul. 2012.

ENGELBRECHT, D.; BOTTARI, E.; MARQUEIRO, P.; BRANDÃO, T. **Após 8 anos do vazamento de óleo da Petrobras, única punição foi para operador de duto.** O Globo, 20 de março de 2008. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/mat/2008/03/19/apos_8_anos_do_vazamento_de_oleo_da_petrobras_unica_punicao_foi_para_operador_de_duto-426328650.asp>. Acesso em: 01 mar. 2010.

FUENTES, Liége; VILELLA, Ricardo. **A mancha da impunidade:** Numa série de erros, a Petrobras deixa vazar 4 milhões de litros de óleo e emporcalha dois rios no Paraná. Revista Veja, 26 jul. 2000. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/260700/p_110.html>. Acesso em: 13 jul. 2012.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; HUNAIDI, O. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. **Journal of Sound and Vibration**, V. 277, p. 133-148, 2004.

GARCIA, Flávia Morini; GIARETTON, Jeferson; QUADRI, Marinho Bastos; BOLZAN, Ariovaldo. **Simulação Fluidodinâmica do Vazamento de Água em uma Seção de Duto para Aplicações na Indústria de Petróleo e Gás.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 6, 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 8f, 2011.

GLÓRIA, Karine da Silva. Metodologias alternativas para detecção e localização de vazamentos. **Boletim Técnico da Petrobrás**, Rio de Janeiro, p. 114-127, abr./jun. 2002

INTERNATIONAL, Forensic Engineering. **Project Photos:** Pipeline leak from corrosion. Disponível em: <http://www.pennenergy.com/index/power/display/0661956335/articles/pennenergy/power/tranmission/2010/12/ntsb-releases_update.html>. Acesso em: 13 jan. 2011.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 472f, 2004.

MARINHO, José Luís Gomes. **Estudo do escoamento Multifásico Tipo Bolha de Taylor em Dutos e Conexões Curvadas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2008.

MEYER, Anselmo. **Petrobrás ataca novamente!** Óleo diesel vaza na Serra do Mar. Sefloral, 2001. Disponível em: <<http://www.sefloral.com.br/petrobras21.htm>>. Acesso em: 29 dez. 2010.

MOTHE, Cheila Gonçalves; JUNIOR, Clenilson Silva S. Petróleo pesado e ultrapesado: reservas e produção mundial. **Revista TN Petróleo**, Rio de Janeiro, n. 57, p. 76-81, nov./dez. 2007.

PALADINO, Emilio Ernesto. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 263f, 2005.

PALHARES, Juliana Barbosa. **Detecção de Fugas em Tubulações através do Método de Resposta em Frequência e Reflexões de Pulsos de Alta Frequência**. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 126f, 2005.

WELTY, James R.; WICKS, Charles E.; WILSON, Robert E. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 3. ed. E. U. A.: John Wiley & Sons, 803f, 1984.

ZHANG, Jun. Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system. In: PIPELINE RELIABILITY CONFERENCE, Houston, EUA, 1996.

APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DA MALHA

A.1 CRIAÇÃO DAS GEOMETRIAS

Esta secção apresenta as etapas na criação das geometrias a serem trabalhadas, onde estas foram confeccionadas com o auxílio do ICEM-CFD 12.1.

Inicialmente dois pontos foram definidos e a partir desses pontos gerou-se um cilindro de raio igual a 10 centímetros e comprimento de 10 metros conforme ilustra Figura A.01. Criaram-se partes e a geometria foi armazenada e denominada Geometria 1.

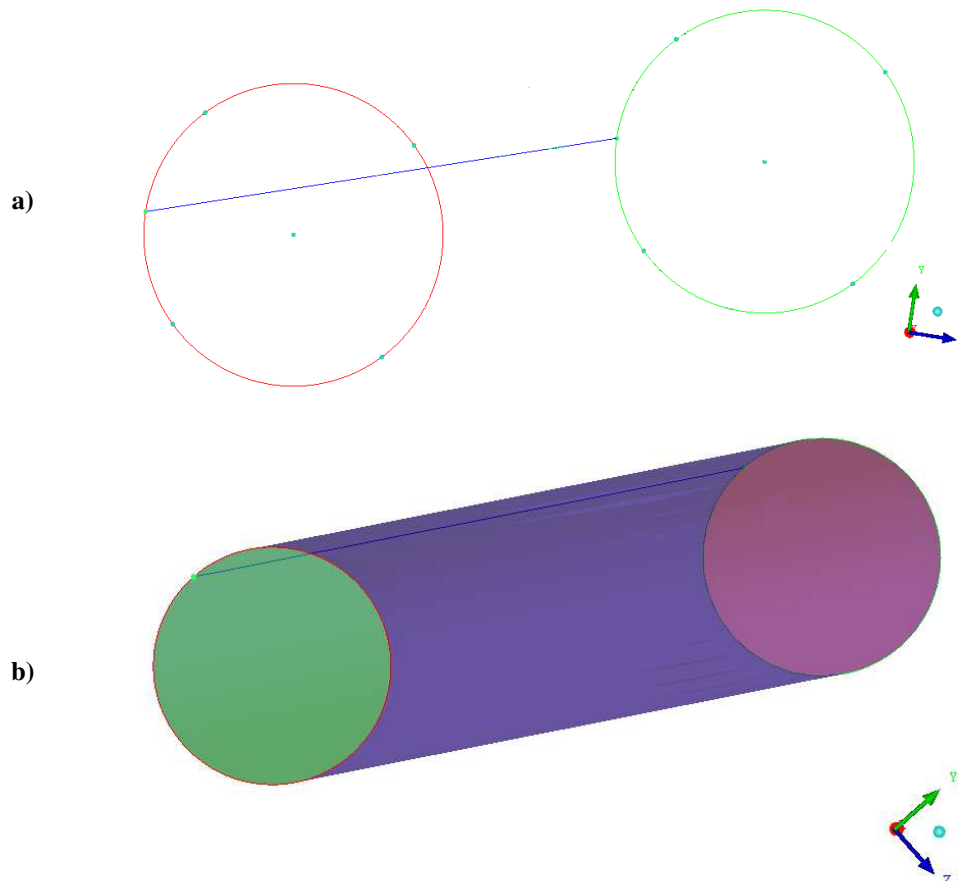


Figura A.01: Criação de pontos, curvas e superfícies: (a) Criação dos pontos e das curvas; (b) criação das superfícies

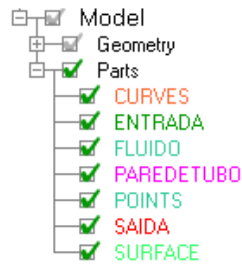


Figura A.02: Árvore de comando para a Geometria 1

Criou-se uma cópia da geometria anterior e esta foi denominada Geometria 2. A partir desta criam-se dois pontos ($\{500 \ 10 \ 0\}$ $\{750 \ 10 \ 0\}$). Ativando a função *Drill a Hole* formam-se duas regiões vazias sobre a superfície da tubulação.

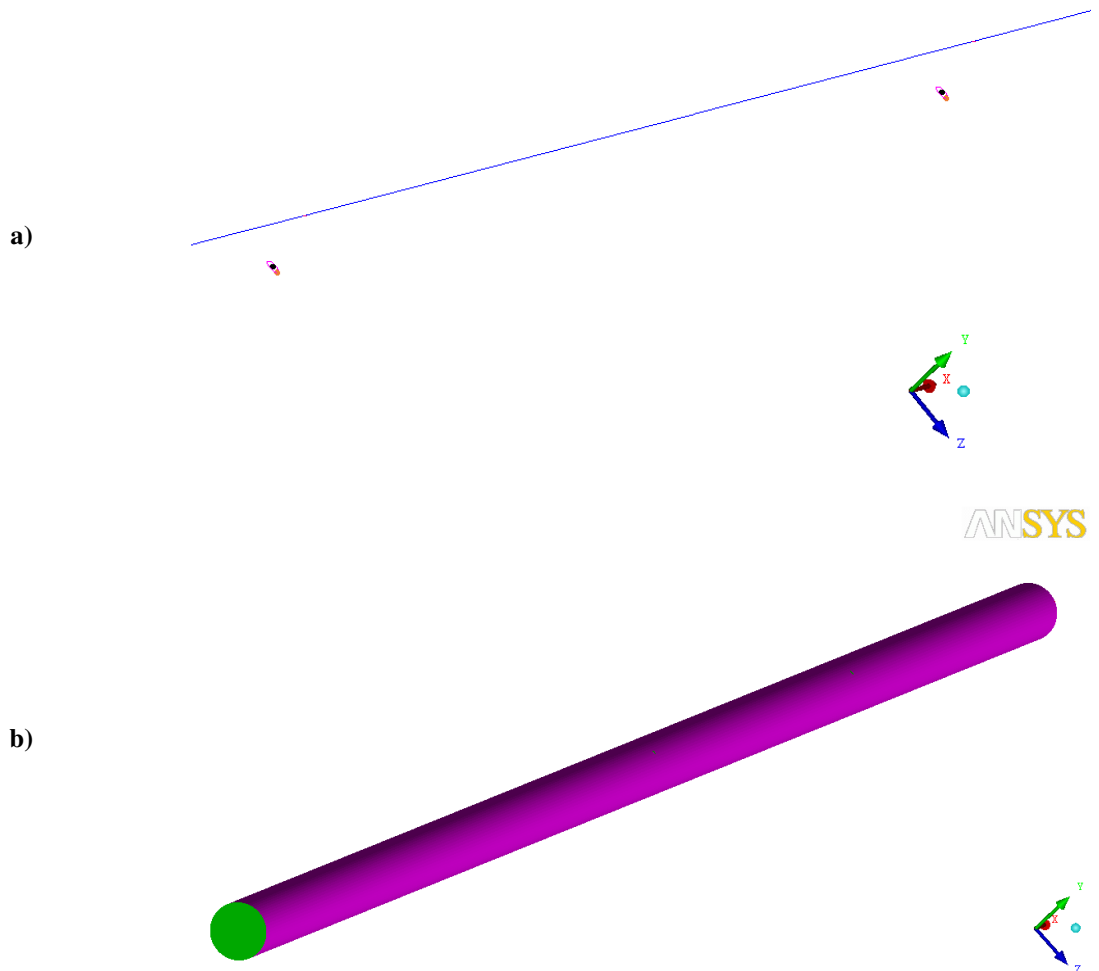


Figura A.03: Criação de pontos e curvas na região de vazamento: (a) Destaque para as regiões de vazamento; (b) Geometria final

Sobre essas regiões criam-se superfícies que são denominadas de vazamento 1 e vazamento 2, respectivamente. Após esses passos as partes da Geometria 2 foram denominadas.

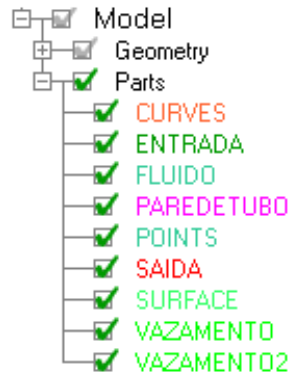


Figura A.04: Árvore de Comandos para a Geometria 2

A.2 GERAÇÃO DA MALHA

Existem dois tipos de malhas que podem ser construídas sobre uma geometria: a malha tetraédrica e a hexaédrica. A primeira não é estruturada, sendo formada por elementos triangulares, e em geometrias complexas, consegue-se gerá-la com relativa facilidade. Porém, essa desestruturação dificulta o manuseio do refinamento da malha, além de prejudicar a alocação da memória de um computador.

A segunda é formada por elementos quadriláteros e é considerada estruturada, onde o manuseio do seu refinamento é facilitado. Todavia fazer uma malha estruturada não é tão simples e, em casos bastante complicados, chega a ser impossível.

As geometrias do projeto são simples, como vistas anteriormente, sendo possível a construção de uma malha estruturada. Decidiu-se optar pela malha estruturada para facilitar o refinamento próximo às bordas da tubulação e às regiões de vazamentos, que são as zonas de maior interesse da pesquisa.

Vários meses foram despendidos para aprender a construir uma malha estruturada. A metodologia de construção das malhas é descrita a seguir.

A.2.1 Geometria sem vazamento

Sobre a Geometria 1, cria-se um bloco, onde este é utilizado quando deseja-se obter uma malha estruturada.

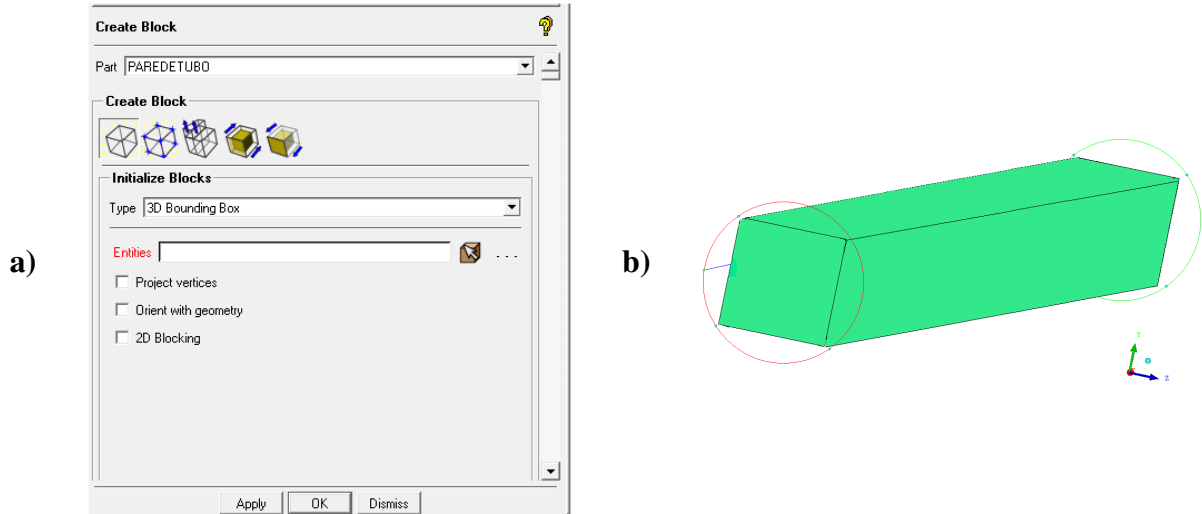


Figura A.05: Criação do bloco: (a) Janela de Comando; (b) Bloco criado

Com a função *Ogrid Block* o bloco inicialmente criado foi subdividido em cinco partes. Esta função é utilizada para um melhor manuseio do refinamento da malha a ser criada.

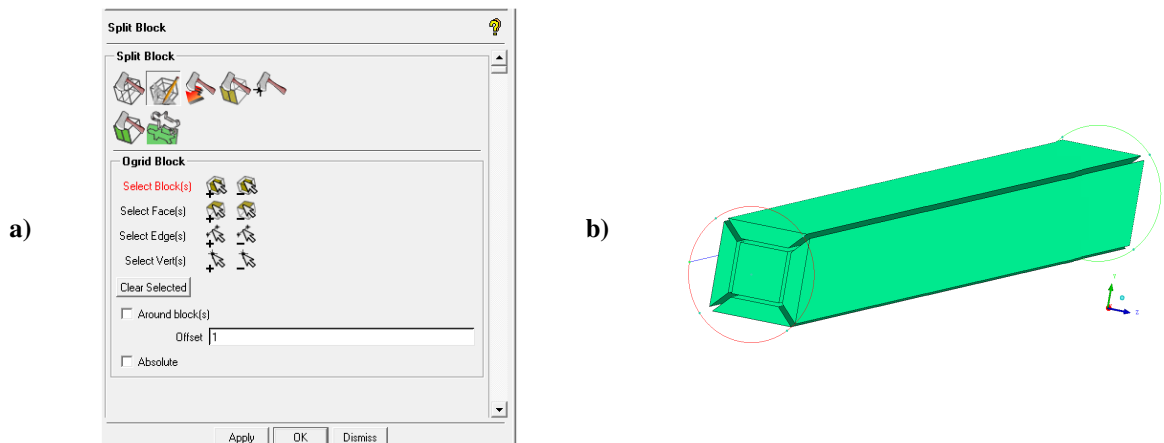


Figura A.06: Subdivisão do bloco: (a) Janela de Comando; (b) *Ogrid* no bloco

Com o auxílio das funções *Global Mesh Setup* e *Pre-Mesh Params* a malha estruturada foi construída.

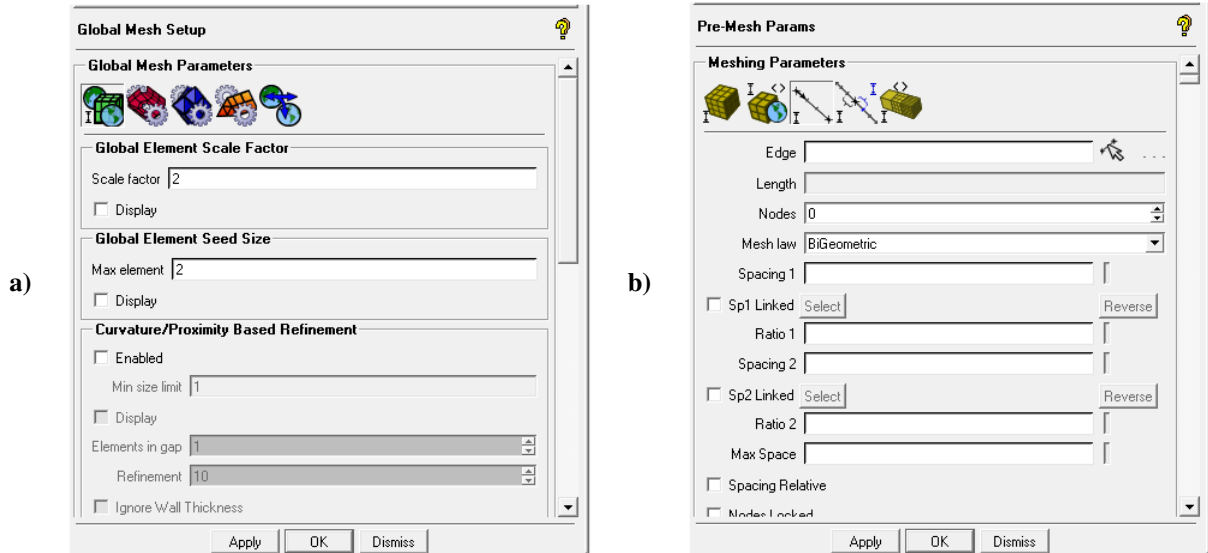


Figura A.07: Parâmetros iniciais para a construção de uma malha refinada “grosseira”: (a) Janela de comando da função *Global Mesh Setup*; (b) Janela de comando da função *Pre-Mesh Params*

A malha criada foi refinada três vezes, a fim de se escolher um refinamento que gere um resultado mais próximo possível da realidade, mas que possua uma quantidade de elementos na qual a malha seja processável pelos computadores disponíveis no laboratório de pesquisa, ou seja, uma malha de um máximo de 500 mil elementos. A Figura A.08 ilustra detalhes dos refinamentos da malha na secção de entrada, que equivale ao mesmo refinamento da secção de saída e a Figura A.09 ilustra os detalhes para os refinamentos ao longo do comprimento da tubulação (eixo x). A Malha 1 possui 112.904 elementos hexaédricos, a Malha 2 tem 317.384 elementos hexaédricos e a Malha 3 é composta por 419.516 elementos hexaédricos.

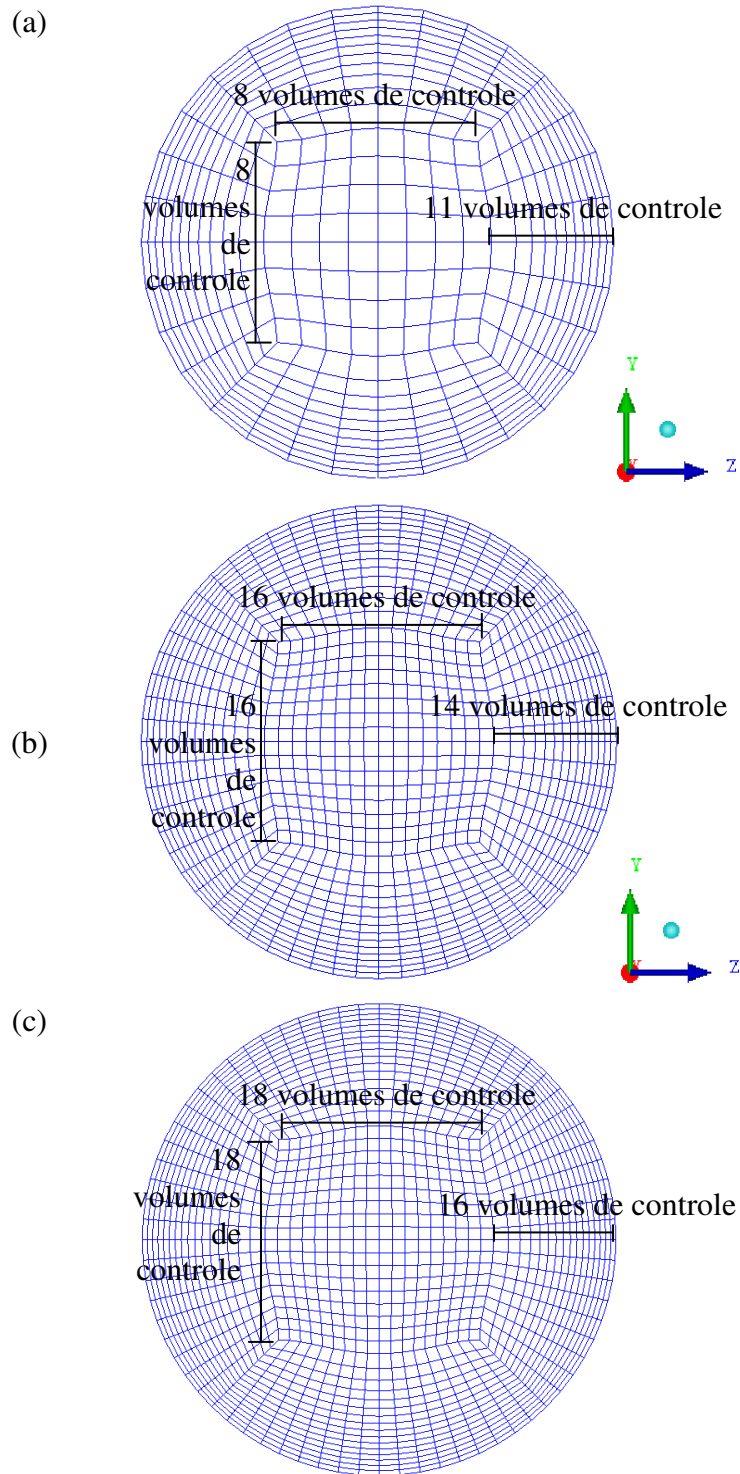


Figura A.08: Detalhes dos refinamentos na secção de entrada das tubulações sem vazamento para as (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.

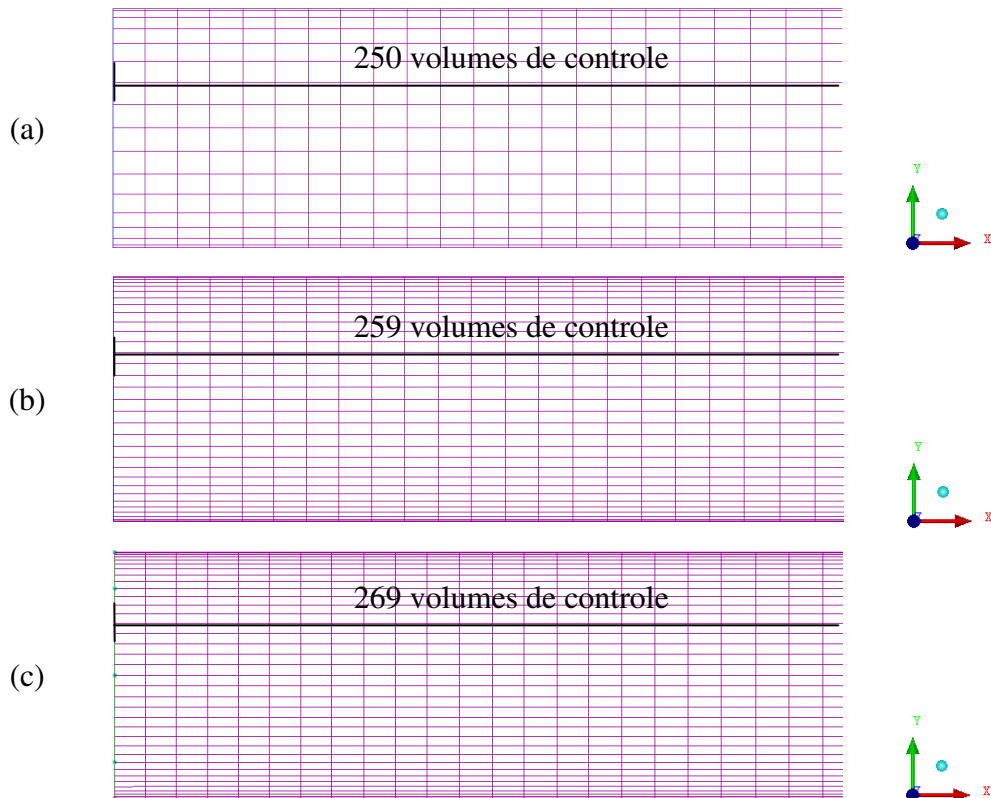


Figura A.09: Detalhes dos refinamentos ao longo do comprimento das tubulações sem vazamento para as (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.

A.2.2 Geometria com vazamentos

A partir da Geometria 2, ativou-se a função *Transform Geometry > Transformation Tools > Translate Geometry* e a curva que contorna a entrada da tubulação foi copiada para as posições (480, 0, 0), (498, 0, 0), (502, 0, 0), (520, 0, 0), (730, 0, 0), (748, 0, 0), (752, 0, 0), (770, 0, 0).

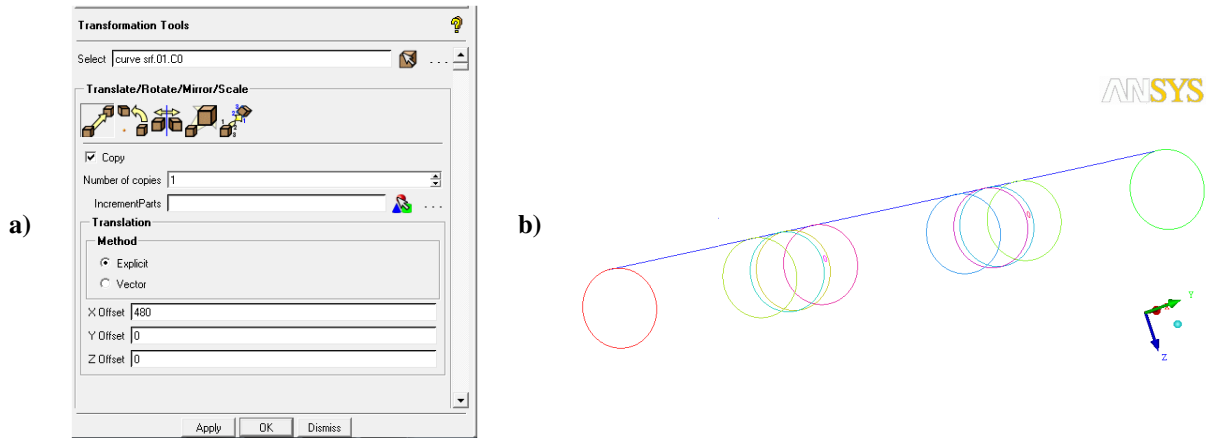


Figura A.10: Multiplicação do contorno da região de entrada da tubulação: (a) Janela de comando da função *Transformation Tools*; (b) Destaque para as curvas copiadas na tubulação

Ativando a função *Create Point > Parameter along a Curve* criaram-se oito pontos ao longo da curva de contorno de cada região de vazamento.

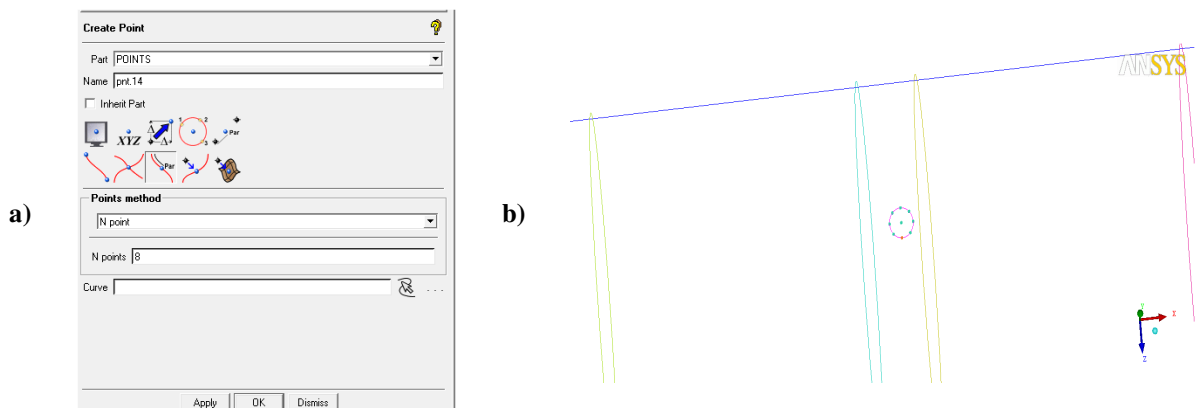


Figura A.11: Criação de pontos no contorno dos vazamentos: (a) Janela de comando da função *Create Point*; (b) Destaque para os pontos criados

Criou-se um bloco em torno da geometria a partir da função *Create Block*. Dividiu-se o bloco em cinco partes com a função *Split Block > Ogrid Block*. Utilizando a função *Split Block > Split Block* cortou-se o bloco inicial em cada uma das oito cópias da curva de contorno da região de entrada.

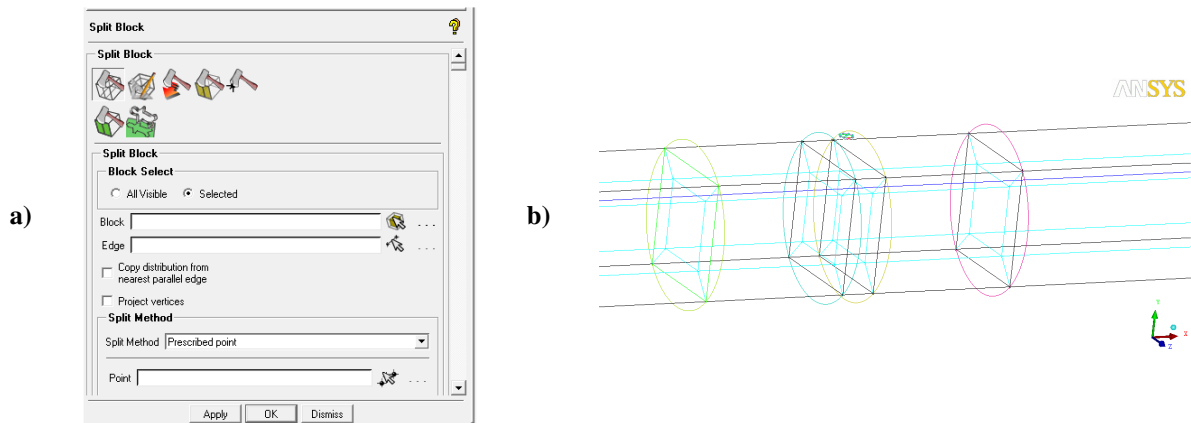


Figura A.12: Corte dos blocos nas curvas multiplicadas: (a)Janela de comando da função *Split Block*; (b) Destaque para os blocos cortados

Os vértices do bloco localizado abaixo do vazamento foram associados aos pontos sobre a região do vazamento com o auxílio da função *Blocking Associations > Edit Associations > Associate Edge to Curve*. Alinharam-se as curvas com a função *Move Vertices*. Sobre o bloco retangular foi feito um *Ogrid* com a face sob cada vazamento.

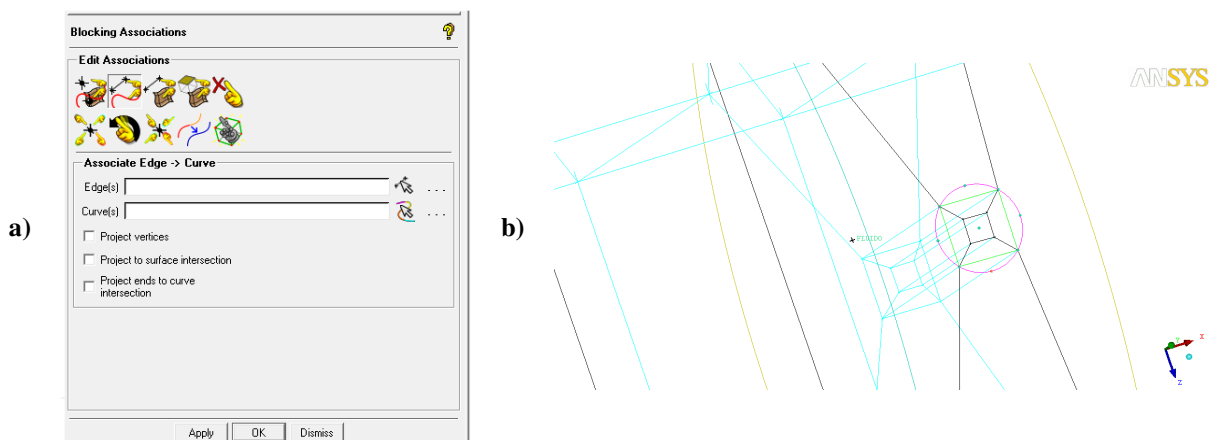


Figura A.13: Manuseio do bloco abaixo do vazamento: (a)Janela de comando da função *Blocking Associations*; (b) Destaque na região do vazamento

A organização final dos blocos é visualizada na Figura A.13.

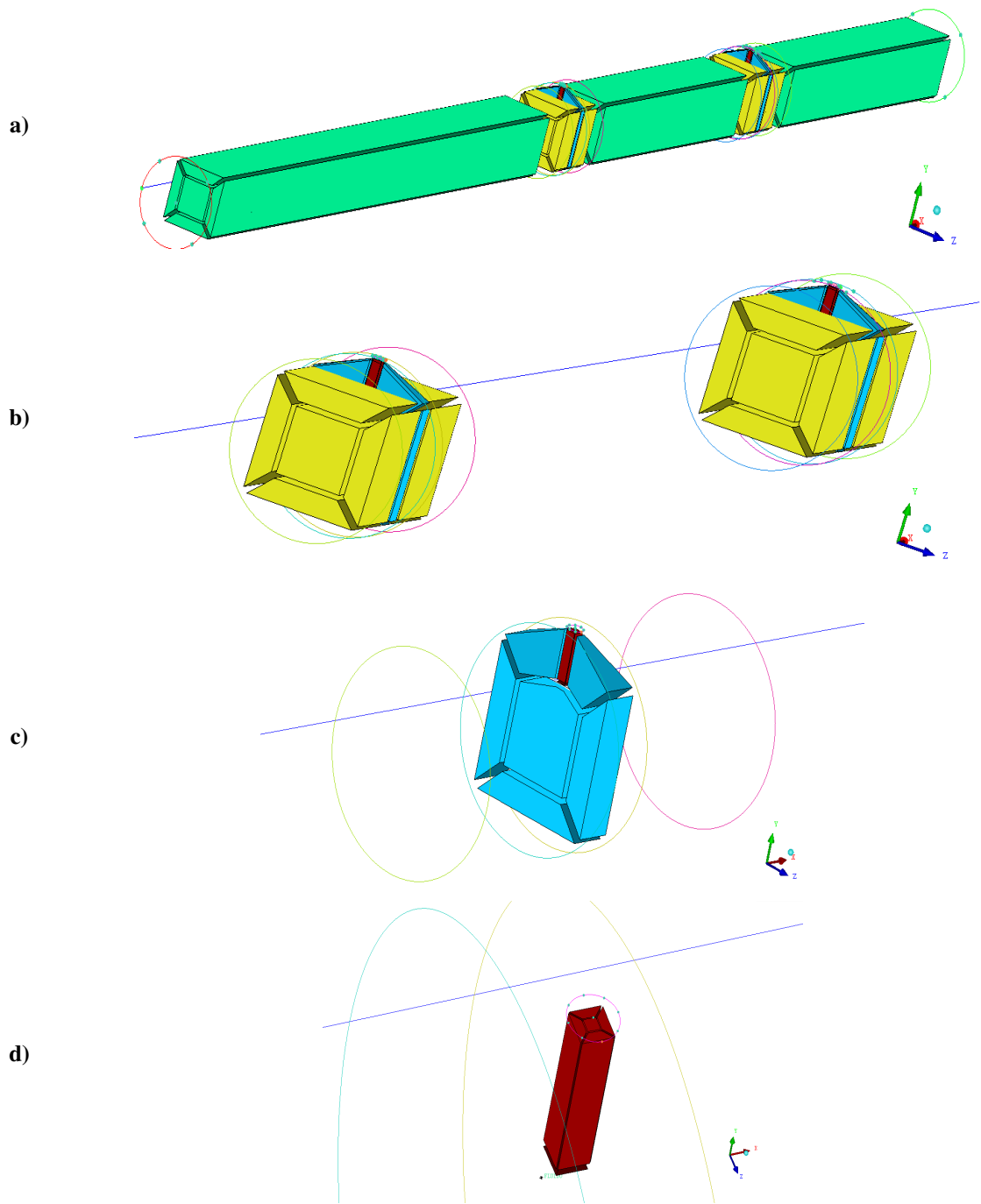


Figura A.14: Desenvolvimento dos blocos da malha com vazamento

Ativando as funções *Global Mesh Setup* e *Pre-Mesh Params* construiu-se uma malha estruturada pouco refinada. A partir dessa malha, três refinamentos foram obtidos. A Figura A.15 ilustra os detalhes dos refinamentos da malha na secção de entrada, que equivale ao mesmo refinamento da secção de saída, a Figura A.16 ilustra os detalhes para os refinamentos

ao longo do comprimento da tubulação (eixo x) e a Figura A.17 mostra os refinamentos no local de um dos vazamentos. A Malha 4 possui 152.397 elementos hexaédricos, a Malha 5 tem 326.768 elementos hexaédricos e a Malha 6 é composta por 464.472 elementos hexaédricos.

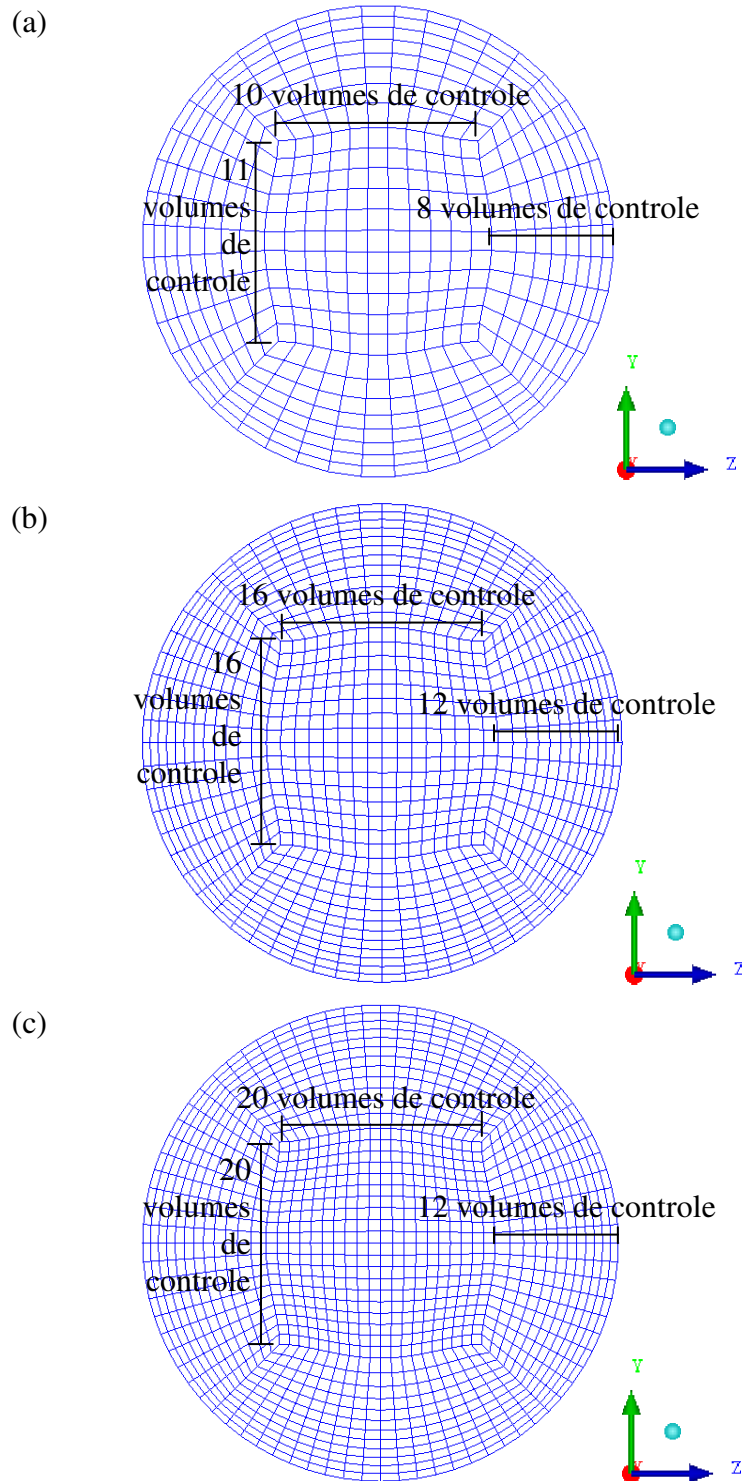


Figura A.15: Detalhes dos refinamentos na secção de entrada das tubulações com vazamento para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.

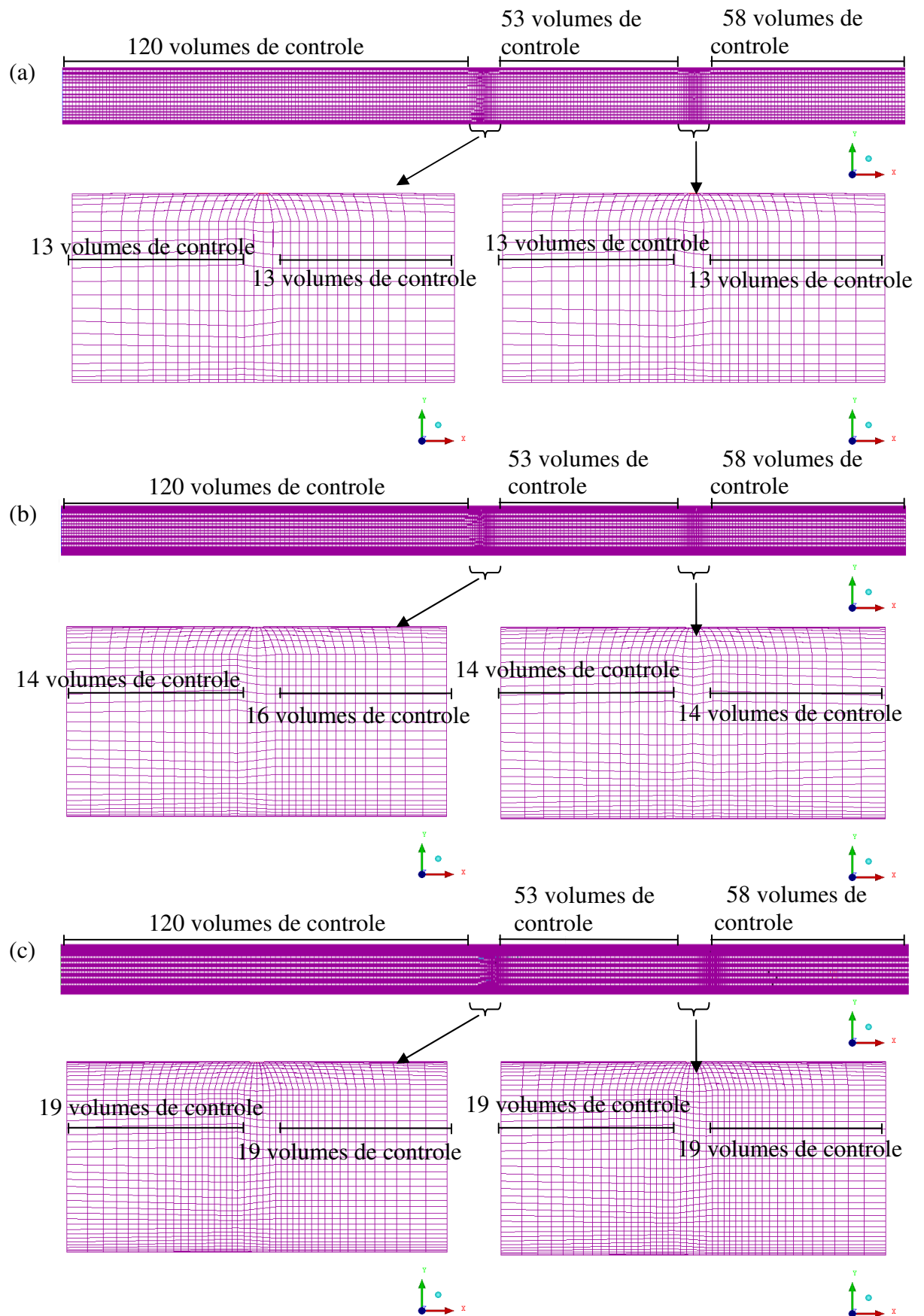


Figura A.16: Detalhes dos refinamentos ao longo do comprimento das tubulações com vazamento para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.

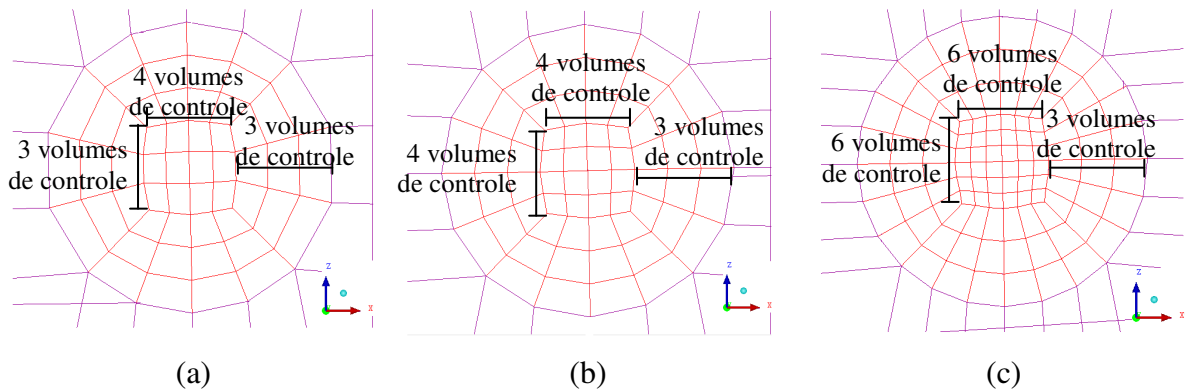


Figura A.17: Detalhes dos refinamentos nos vazamentos para as (a) Malha 4, (b) Malha 5 e (c) Malha 6.

APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DA MALHA

Foram geradas três malhas com diferentes refinamentos para cada o primeiro e segundo domínio descrito no tópico 3 e ilustrados na Figura 3.1.

Para estudar a dependência do refinamento das malhas com os resultados, realizou-se um estudo da variação da diferença de pressão com o refino. A partir da Equação 2.2 calculou-se o número de Reynolds para o escoamento monofásico de óleo e com esse valor calculou-se o comprimento de entrada (Equação 2.3). É no comprimento de entrada em que o fluido sofre efeitos de borda e a partir desse valor o escoamento laminar adquire o perfil parabólico. Por isso, para uma melhor análise do escoamento, devem-se tomar valores após esse comprimento.

$$Re = \frac{D \langle v_x \rangle \rho}{\mu} = 204,4$$

$$L_e = 1,43m$$

A fim de simplificar os cálculos adotou-se o valor de 2 metros como comprimento de entrada. Em todas as seis malhas simulou-se um escoamento com as seguintes condições de contorno:

- Escoamento estacionário, monofásico e isotérmico;
- Na seção de entrada da tubulação adotou-se uma velocidade média de óleo igual a 0,2m/s;

- Na seção de saída do vazamento considerou-se uma pressão média de 101325 Pa;

Com os resultados foi determinada a diferença de pressão no trecho da tubulação situado entre 2 metros da entrada (P_1) e a saída do tubo (P_2), conforme ilustrado na Figura B.1.

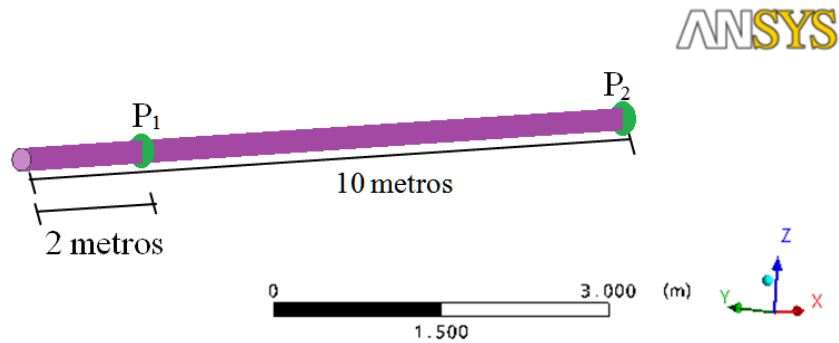


Figura B.1: Planos gerados para o cálculo das pressões médias

Após a escolha das malhas de refinamento intermediário como as mais adequadas, estas foram testadas para saber se fornecem resultados condizentes com a realidade. Optou-se por traçar o perfil de velocidades analiticamente e comparar com os dados fornecidos pela simulação numérica, adotando as mesmas condições de contorno para ambos os perfis.

Os resultados mostraram que a malha com duas regiões de vazamento e com 327 mil volumes de controle é a mais adequada para prosseguir com o projeto.

Com a malha escolhida realizou-se um teste para o escoamento laminar bifásico de água e óleo. Simulou-se um escoamento estacionário com uma fração volumétrica de 0,999955 de óleo (meio dispersante) e 0,000045 de água (partículas em suspensão). Essas frações foram escolhidas de forma com que o resultado do escoamento seja equivalente à um escoamento monofásico de óleo. A velocidade de escoamento para a água e para o óleo são iguais à 0,2m/s. Os vazamentos permanecem desativados. O perfil de velocidades numérico foi comparado com um perfil analítico monofásico de óleo e comprovou-se que a malha escolhida fornece resultados condizentes com a realidade.

Com o intuito de estudar a influência do tamanho do vazamento no comportamento do escoamento de fluidos, inseriu-se um terceiro vazamento na malha, de diâmetro de 3 cm, representado pelo domínio descrito na Figura 3.2.