



UTILIZAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS

Amanda Briggs da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Rio de Janeiro
Setembro de 2016

UTILIZAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA
SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS

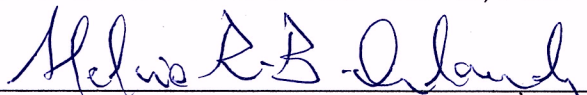
Amanda Briggs da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

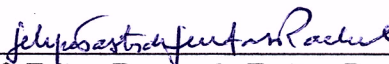
Examinada por:



Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, Ph.D.



Prof. Hécio Rangel Barreto Orlande, Ph.D.



Prof. Felipe Bastos de Freitas Rachid, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2016

Silva, Amanda Briggs da

Utilização de Fluidodinâmica Computacional (CFD) na Simulação de Vazamentos em Dutos/Amanda Briggs da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVI, 118 p. 29,7cm.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 111 – 114.

1. Vazamento em Dutos. 2. Fluidodinâmica Computacional. 3. Perda de Carga. I. Bodstein, Gustavo César Rachid. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Posso todas as coisas em Cristo que me fortalece.

Filipenses 4:13

Agradecimentos

A Deus, em quem deposito toda a minha confiança, o único que é digno de toda a honra, todo o louvor e toda a glória.

À minha mãe Hilsirema, amiga mais fiel e técnica mais crítica, por seu grande amor por mim.

À minha tia Fátima, por seu amor, cuidado e incentivo presentes em todos os momentos de minha vida.

Ao meu noivo Rafael, por sua paciência e compreensão pelas horas dedicadas a este trabalho.

Ao meu orientador Gustavo Bodstein, e à Vera Noronha, por ajudarem a tornar este trabalho possível.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UTILIZAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS

Amanda Briggs da Silva

Setembro/2016

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Programa: Engenharia Mecânica

Vazamentos em tubulações podem ser extremamente prejudiciais em termos econômicos, ambientais e de segurança. É portanto necessário detectá-los e localizá-los o mais rapidamente possível. Este trabalho apresenta uma modelagem de simulação de vazamentos em dutos, através de fluidodinâmica computacional (CFD), para líquidos, gases e misturas bifásicas de líquidos e gases. Foi considerado escoamento tridimensional e turbulento. As variações de pressão e vazão no duto a jusante do vazamento são utilizadas para caracterizar o vazamento, e os resultados são comparados a dados experimentais disponíveis e às correlações unidimensionais utilizadas em sistemas de detecção de vazamento em operação. Deste modo, esses resultados podem ser úteis em futuros esforços no desenvolvimento de modelos específicos para detecção e localização de vazamentos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

USE OF COMPUTATIONAL FLUID-DYNAMICS (CFD) ON SIMULATING LEAKS IN PIPELINES

Amanda Briggs da Silva

September/2016

Advisor: Gustavo César Rachid Bodstein

Department: Mechanical Engineering

Leaks in pipelines can be extremely damaging, in terms of economics, environmental risk, and populational safety. It is therefore necessary to detect and locate them as quickly as possible. This work presents a modeling approach for leak simulation in pipelines, through computational fluid dynamics (CFD), for both liquids, gases and two-phase mixtures of liquid and gas. A three-dimensional, turbulent flow was considered. The pressure and mass flow variation in the pipeline, downstream from the leak, were employed to characterize the leak, and the results were compared to experimental data available and to one-dimensional correlations used in operating leak detection systems. In this way, the results may be useful in future efforts in developing specific leak detection and localization systems.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Métodos de Detecção e Localização de Vazamentos	2
1.1.1 Métodos Baseados em Software	4
1.1.2 Métodos Baseados em Hardware	8
1.2 Resumo Bibliográfico	9
1.3 Objetivos do Trabalho	11
2 Revisão Bibliográfica	13
2.1 Modelagem de Vazamentos em Regime Transiente	13
2.2 Modelagem de Vazamentos em Regime Permanente	26
3 Formulação Matemática	37
3.1 Equações Gerais de Dinâmica dos Fluidos	37
3.2 Equações Governantes em Escoamentos Incompressíveis	39
3.3 Modelagem de Turbulência	40
3.3.1 Formulação do Modelo SST	43
3.4 Modelagem de Escoamentos Bifásicos	47
4 Procedimento de Modelagem	49
4.1 Fluidodinâmica Computacional	49
4.2 Verificação Numérica	51
4.3 Definição da Malha Computacional	52
4.3.1 Tipos de Elemento	53

4.3.2	Qualidade dos Elementos	54
4.3.3	Convergência e Sensibilidade de Malha	56
4.4	Análise de Convergência	57
5	Resultados: escoamento líquido	59
5.1	Avaliação de Malha	59
5.2	Validação	66
5.3	Linhas com Dimensões Reais	67
6	Resultados: escoamento gasoso	81
6.1	Avaliação de Malha	81
6.2	Validação	86
6.3	Linhas com Dimensões Reais	88
7	Resultados: escoamento bifásico	99
7.1	Validação	99
7.2	Análise de Parâmetros	102
8	Conclusões	113
9	Referências Bibliográficas	115

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de um gráfico de características operacionais para dois SDV's (Geiger, 2006).	3
1.2	Gráfico esquemático da classificação de alguns métodos de detecção (Zhang, 1996).	5
1.3	Gradientes de pressão em uma tubulação com vazamento (Geiger, 2006).	6
2.1	Amostra de resultados encontrados por Billmann e Isermann (1987).	15
2.2	Geração e propagação de ondas a partir de um ponto de vazamento (Sun, 2012).	16
2.3	Correlação entre grandezas elétricas e o escoamento em um duto (a) sem vazamento e (b) com vazamento (Sun, 2012).	17
2.4	Exemplo de resultados encontrados por Sun (2012).	19
2.5	Sistema estudado por Elaoud et al. (2010).	20
2.6	Discretização proposta por Elaoud et al. (2010).	20
2.7	Amostra de resultados encontrados por Elaoud et al. (2010), em regime permanente (a) e transiente (b).	22
2.8	Esquemático e foto de um sensor FBG (Hou et al., 2014).	23
2.9	Aparato experimental utilizado no estudo (Hou et al., 2014).	24
2.10	Amostra de resultados encontrados por Hou et al. (2014).	25
2.11	Condição de escoamento estudado por Baghdadi e Mansy (1988).	27
2.12	Aparato experimental utilizado por Baghdadi e Mansy (1988) para testar o modelo desenvolvido.	28
2.13	Distribuição de pressão ao longo do duto, com a condição de contorno de pressão e vazão.	29

2.14	Resultados de Molina-Espinosa et al. (2013) para a condição de contorno de pressão-pressão, sendo (a) a distribuição de pressão ao longo do duto e (b) o aumento de pressão na região de vazamento.	30
2.15	Detalhes geométricos do modelo estudado por Ben-Mansour et al. (2012).	30
2.16	Amostra de resultados de Ben-Mansour et al. (2012) para(a) distribuição de pressão e (b) gradiente de pressão ao longo do duto.	31
2.17	Geometria estudada por Shehadeh e Shahata (2013).	32
2.18	Validação entre resultados numéricos e experimentais (Shehadeh e Shahata, 2013).	33
2.19	Amostra de resultados obtidos por Shehadeh e Shahata (2013).	34
2.20	Amostra de resultados obtidos por Kam (2010).	35
2.21	Amostra de resultados obtidos por Bueno et al. (2014).	36
3.1	Médias de Reynolds em regime transiente (a) e permanente (b).	41
3.2	Influência do y^+ na resolução do modelo SST (ANSYS®, 2015).	46
4.1	Tipos de malha computacional: estruturada (a), não estruturada (b), ou híbrida (c) (ANSYS®, 2015).	50
4.2	Principais tipos de elementos: (a) hexaédrico e (b) tetraédrico (ANSYS®, 2015).	53
4.3	Impacto na solução, considerando uma malha de (a) baixa qualidade e (b) boa qualidade.	54
4.4	Vetores empregados no cálculo de qualidade ortogonal.	55
4.5	Medida de qualidade ortogonal.	55
4.6	Exemplo de um estudo de convergência de malha.	56
5.1	Disposição de elementos para a Malha 3.	61
5.2	Regiões estudadas para convergência e sensibilidade de malha.	62
5.3	Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo do Vazamento para velocidade.	64
5.4	Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo do Vazamento para perda de carga.	65
5.5	Contornos de (a) velocidade e (b) pressão para a Malha 3.	65

5.6	Validação do modelo com o experimento de Molina-Espinosa et al. (2013).	67
5.7	Malha para o oleoduto na região do vazamento.	69
5.8	Estruturas de pós processamento para o modelo do oleoduto.	70
5.9	Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando toda a extensão do duto.	70
5.10	Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando a região próxima ao vazamento.	71
5.11	Diferença entre as metodologias 1D e 3D na região do vazamento.	71
5.12	Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.	72
5.13	Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento.	72
5.14	Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.	73
5.15	Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento.	73
5.16	Resultados de (a) perda de carga e (b) velocidade para $d_L = D/5$.	75
5.17	Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.	76
5.18	Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.	77
5.19	Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.	78
5.20	Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.	78
5.21	Comparação de perda de carga ao longo do duto para $d_L = D/5$.	79
5.22	Comparação de perda de carga para $d_L = D/5$.	79
5.23	Comparação de velocidade ao longo do duto para $d_L = D/5$.	80
5.24	Comparação de velocidade na saída para $d_L = D/5$.	80
6.1	Massa específica do gás natural.	82
6.2	Disposição de elementos para a Malha 2.	83
6.3	Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo Central para velocidade.	85
6.4	Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo Central para pressão.	85
6.5	Contornos de (a) velocidade e (b) pressão para a Malha 2.	86
6.6	Validação do modelo com os resultados de Elaoud e Hadj-Taïeb (2008).	87
6.7	Número de Mach observado na região do vazamento.	91

6.8	Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando toda a extensão do duto.	91
6.9	Diferença entre as metodologias 1D e 3D na região do vazamento. . .	92
6.10	Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.	92
6.11	Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento. . .	93
6.12	Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.	94
6.13	Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento. .	94
6.14	Percentual de vazão mássica perdida pelo vazamento.	95
6.15	Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.	96
6.16	Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.	97
6.17	Perfis de pressão para os diâmetros estudados na seção transversal do vazamento.	98
6.18	Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na seção transversal do vazamento.	98
7.1	Validação do modelo com os resultados de Kam (2010).	101
7.2	Comparação de perda de carga para diferentes posições tangenciais de vazamento.	103
7.3	Comparação de velocidade para diferentes posições tangenciais de vazamento.	104
7.4	Perfis de pressão para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.	105
7.5	Perfis de velocidade para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.	106
7.6	Perfis de fração volumétrica de líquido para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.	106
7.7	Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.	107
7.8	Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento. . .	107
7.9	Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.	108
7.10	Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento. .	108
7.11	Perfis de pressão para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.	110

7.12 Perfis de velocidade para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.	111
7.13 Perfis de fração volumétrica de líquido para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.	112

Lista de Tabelas

1.1	Resumo de bibliografia acerca de vazamentos.	9
3.1	Constantes empregadas na modelagem de turbulência.	45
5.1	Propriedades geométricas do modelo empregado nos testes de malha.	60
5.2	Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo empregado nos testes de malha.	60
5.3	Malhas avaliadas para escoamento líquido.	61
5.4	Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto Central.	62
5.5	Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto do Vazamento.	63
5.6	Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Axial.	63
5.7	Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Trans- versal.	64
5.8	Propriedades geométricas do duto modelado.	67
5.9	Propriedades do fluido e condições de contorno do oleoduto.	68
5.10	Propriedades de malha definidas para o oleoduto.	69
5.11	Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.	73
5.12	Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.	76
5.13	Propriedades do escoamento para um vazamento de $d_L = D/5$, variando-se a vazão de entrada.	80
6.1	Propriedades geométricas do modelo empregado nos testes de malha.	81
6.2	Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo empregado nos testes de malha.	82
6.3	Malhas avaliadas para escoamento gasoso.	83

6.4	Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto do Vazamento.	84
6.5	Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Transversal.	84
6.6	Propriedades geométricas do duto modelado.	88
6.7	Propriedades do fluido e condições de contorno do gasoduto.	89
6.8	Propriedades de malha definidas para o gasoduto.	89
6.9	Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.	93
6.10	Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.	95
7.1	Propriedades geométricas do modelo empregado na validação do modelo bifásico.	99
7.2	Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo bifásico. . .	100
7.3	Propriedades de malha definidas para a análise bifásica.	100
7.4	Propriedades do escoamento, variando-se a posição tangencial do furo.	104
7.5	Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.	108
7.6	Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.	109

Capítulo 1

Introdução

A necessidade de transportar fluidos de seu ponto de produção à região de consumo causou um crescimento acelerado no número e tamanho de tubulações nas últimas décadas. Muitas dessas tubulações transportam produtos tóxicos ou perigosos, e frequentemente passam por áreas populadas, ou regiões ambientalmente sensíveis. Sendo assim, tanto fatores econômicos quanto ambientais têm grande influência na operação de linhas de tubulações, e a operação de sistemas complexos depende de sua manutenção.

Perdas de capacidade em redes de tubulações não são incomuns, mesmo em condições permanentes de escoamento. Vazamentos em tubulações podem ser resultados de ação corrosiva, variações súbitas de pressão ou operação fora dos parâmetros de projeto, entre outros motivos. Os efeitos associados a um vazamento podem causar sérios problemas ambientais, econômicos ou de segurança. Podem-se citar, como exemplo, vazamentos de:

- Redes de esgoto ou água potável, que causam graves inconveniências: perda de capital, danos potenciais à infraestrutura próxima, desperdício de recursos e possível carência em pontos a jusante da falha.
- Fluidos altamente inflamáveis ou venenosos, que podem ser letais em regiões populadas, e causam dificuldades em termos de classificação de áreas para funcionamento de outros equipamentos.
- Linhas de exploração e transporte de combustíveis, que constituem graves perdas econômicas e de potencial energético. Particularmente em linhas sub-

mersas ou enterradas, vazamentos de combustível são de difícil acesso e causam significativos impactos ambientais.

Para mitigar esses efeitos nocivos, é preciso desenvolver métodos eficientes de garantir a integridade de dutos. Algumas medidas são geralmente incluídas no monitoramento de tubulações (Liu, 2003):

1. Inspeção visual das partes externas de dutos expostos. No Brasil, a maior parte das tubulações são enterradas, logo esse tipo de monitoramento não é eficiente.
2. Inspeção do exterior de tubulações subaquáticas através de mergulhadores ou equipamentos submarinos especializados. Esta opção apresenta limitações econômicas, principalmente no Brasil, onde grande parte das linhas subaquáticas estão em águas profundas.
3. Inspeção por *pigs*, para detectar possíveis rachaduras, amassamentos e regiões de perda de material por ovalização ou corrosão. Esta é uma área de pesquisas intensas, devido principalmente à possibilidade de detecção de micro fraturas via sensores de *pigs*.
4. Checagem de válvulas, reguladores de pressão e sensores de medição. Bombas e outras máquinas rotativas também devem ser verificadas regularmente.
5. Detecção e localização de vazamentos através de diversas técnicas computacionais ou experimentais, que serão abordadas detalhadamente na seção 1.1. A utilização destes métodos exige uma análise específica para cada linha, já que é necessário equilibrar as exigências de operação (segurança, produção, etc.) e fatores econômicos, que podem ser significativos dependendo da técnica selecionada.

1.1 Métodos de Detecção e Localização de Vazamentos

Diferentes metodologias são utilizadas para a detecção de vazamentos em tubulações. Geiger (2006) apresenta algumas características desejáveis para um sistema

de detecção de vazamentos (SDV), que devem ser consideradas na escolha da técnica mais adequada para cada operação. As principais são:

- **Confiabilidade:** está diretamente relacionada com a habilidade de um SDV encontrar vazamentos se eles existem, e a probabilidade de um falso alarme, ou seja, a detecção de um vazamento que na realidade não existe. Um sistema dito confiável é capaz de detectar um vazamento quando ele existe, sem gerar declarações incorretas de falha.
- **Sensibilidade:** A API 1155 (1995) define sensibilidade como uma medida do tamanho do vazamento que um SDV consegue detectar, e do tempo necessário para que um alarme de falha seja dado. Note que esses parâmetros são frequentemente interdependentes, ou seja, quanto menor o vazamento, maior o tempo necessário para que ele seja detectado. A performance de um SDV é descrita por um Gráfico de Características Operacionais, que é exemplificado pela Figura 1.1.

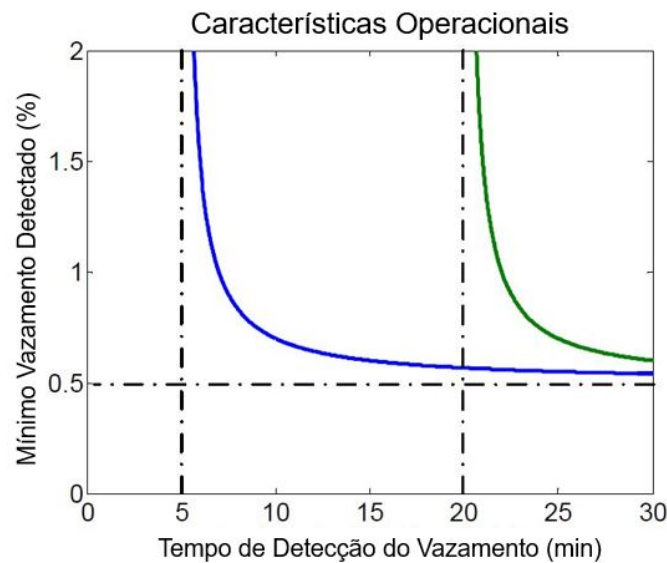


Figura 1.1: Exemplo de um gráfico de características operacionais para dois SDV's (Geiger, 2006).

Note que, mesmo para tempos muito longos de detecção, há um limite mínimo de vazamentos detectáveis para o qual o SDV converge assintoticamente. Em tempos curtos de resposta, apenas vazamentos relativamente grandes são encontrados pelo SDV.

- **Acurácia:** trata-se da validade de informações extras fornecidas pelo SDV, como por exemplo a vazão percentual perdida pelo vazamento, ou sua localização.
- **Robustez:** é definida como a capacidade de um SDV de continuar operante e eficiente em condições de operação diferentes das de projeto, ou em que dados são perdidos ou considerados suspeitos. SDV's robustos são capazes de, por exemplo, lidar com falhas em sensores e medidores instalados na linha.

Outro fator utilizado na avaliação de um SDV é a "probabilidade de detecção", definida por EPA (1990) como o número de falhas que um sistema detectaria se todos os trechos de tubulação avaliados por ele estivessem vazando, expresso como um fator percentual.

Zhang (1996) classifica SDV's em três categorias: observação, métodos baseados em software, e métodos baseados em hardware. A observação é, naturalmente, a forma mais simples de detecção de vazamentos, sendo feita através de uma patrulha que percorre a tubulação fazendo inspeções visuais. Não é um método muito eficaz, e depende fortemente da experiência da equipe envolvida.

Métodos baseados em software utilizam modelos computacionais e softwares como auxílio à detecção. Os sistemas supervisórios SCADA são os mais comumente empregados para realizar a detecção a partir de dados de vazão, pressão, temperatura, dentre outros. Métodos baseados em hardware são os que utilizam diferentes dispositivos para a verificação, como por exemplo sensores acústicos, detectores de gás, ou de pressão negativa, ou sensores térmicos de infravermelho.

A Figura 1.2 apresenta de forma esquemática a classificação de SDV's proposta por Zhang (1996).

1.1.1 Métodos Baseados em Software

Método de Balanço de Massa

O Método de Balanço de Massa utiliza a equação de continuidade para um escoamento unidimensional entre dois pontos do duto. Dessa forma, é possível calcular a vazão de fluido perdida em um possível vazamento.



Figura 1.2: Gráfico esquemático da classificação de alguns métodos de detecção (Zhang, 1996).

Para determinar corretamente a dimensão do vazamento, $\dot{m}_L$, é necessário tomar medidas acuradas em dois pontos de referência da linha, $\dot{m}_1$ e $\dot{m}_2$. A partir dessas medidas, e considerando escoamento monofásico no duto, a vazão mássica do vazamento, em regime permanente, é simplesmente $\dot{m}_L = \dot{m}_2 - \dot{m}_1$.

Deve-se destacar que mesmo os equipamentos mais modernos de medição têm uma incerteza mínima de pelo menos 0,25%, e portanto o Método de Balanço de Massa é limitado à detecção de vazamentos de cerca de 1% da vazão do duto.

Como essa técnica é limitada pela precisão de medição, é necessária uma estimativa correta de seu erro (McAllister, 2002). A incerteza de medição é composta em geral por fatores de base e componentes aleatórios. Os fatores de base formam usualmente um erro fixo entre o valor medido e o escoamento real. Entretanto, esse erro pode aumentar conforme o medidor é desgastado, e recalibrações periódicas devem ser realizadas. Incertezas aleatórias são oriundas de flutuações temporais, e possivelmente espaciais, da medição instantânea, e geralmente podem ser filtradas e desprezadas.

Baptista et al. (2001) estudou a incerteza do processo de localização de vazamentos, e encontrou que o método torna-se impreciso se a incerteza total da medida de vazão exceder a 1,5% da vazão nominal do duto, para vazamentos de até 15% da vazão nominal.

Outra dificuldade ao uso deste método é que a distância entre medidores de vazão em uma linha de transporte pode ser de vários quilômetros, o que inviabiliza a localização do vazamento. Sendo assim, este método deve ser utilizado em conjunto com outras técnicas. Baptista et al. (2001) indica que, para vazamentos da ordem

de 1% da vazão do duto, a incerteza associada a sua localização é alta mesmo com medidores de alta precisão, podendo chegar a 36% do comprimento do duto.

Apesar dessas limitações, o Método de Balanço de Massa é bastante útil e confiável, e amplamente utilizado na indústria atual.

Método de Perda de Carga

A perda de carga ao longo de um duto também pode ser utilizada para indicar um vazamento. Novamente, esse método é limitado pela acurácia dos transdutores de pressão e vazão na linha, e o espaçamento entre eles.

Como a perda de carga em uma tubulação com escoamento turbulento é proporcional ao quadrado da vazão volumétrica Q , a queda de pressão relativa a um vazamento é mais fácil de captar (Liu, 2003). Por exemplo, se um vazamento causa perda de 2% da vazão mássica ou volumétrica de uma tubulação, a perda de carga correspondente será de 4%. A diferença entre uma tubulação com e sem vazamentos é exemplificada na Figura 1.3, demonstrando a metodologia de localização de vazamentos através da interseção de gradientes de pressão (Geiger, 2006).

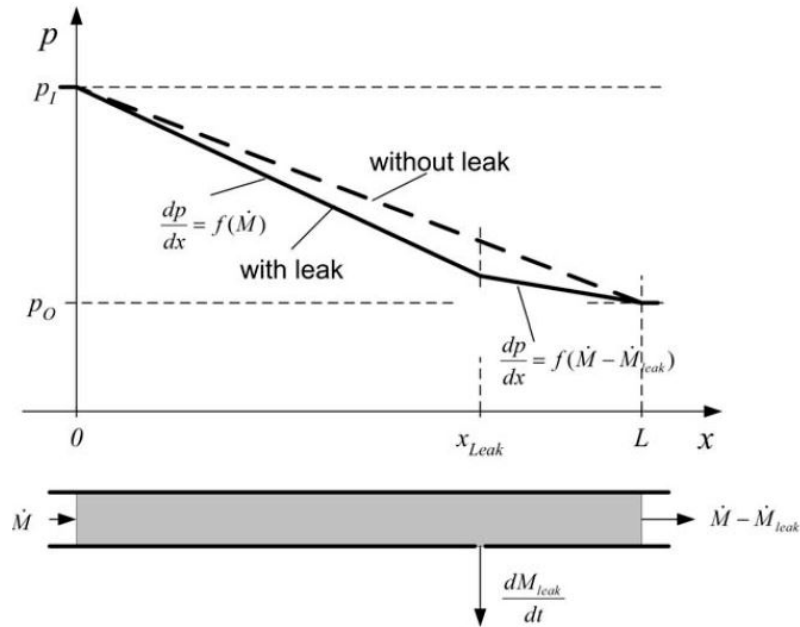


Figura 1.3: Gradientes de pressão em uma tubulação com vazamento (Geiger, 2006).

Adicionalmente, transdutores de pressão são consideravelmente mais baratos que medidores de vazão, e podem ser inseridos em uma tubulação com mais facilidade, tornando esse método mais eficiente.

Entretanto, ele é mais suscetível a flutuações locais, e necessita de calibragem frequente dos medidores. Idealmente, deve apenas ser aplicado para escoamentos incompressíveis e permanentes, já que o número de alarmes falsos gerados aumentaria em regime transiente, levando a perda de confiabilidade.

SDV's Baseados em Modelagem Matemática

Esta técnica é baseada em tentativas de modelar o escoamento no interior da tubulação. Vazamentos são detectados através de discrepâncias encontradas entre essa modelagem e os dados dos valores medidos (Liu, 2003).

São resolvidas para a modelagem as equações de continuidade, conservação de quantidade de movimento e de energia, e as devidas equações de estado. Podem ser utilizados métodos de diferenças ou volumes finitos, métodos de resposta por frequência ou discretização espacial, entre outros.

É necessário aplicar condições de contorno realistas à modelagem numérica, e portanto deve-se ter dados do escoamento à montante e à jusante do trecho que se quer estudar.

Como os métodos completos de modelagem de escoamento exigem longos tempos de simulação, é comum utilizar simplificações, como por exemplo, a modelagem de escoamentos uni e bidimensionais. Esse tipo de artifício diminui o tempo de resposta do método, porém acarreta perda de informações acerca do escoamento, que podem ser significativas na presença de vazamentos.

Métodos Estatísticos

Nesse caso, vazamentos são detectados a partir da análise estatística de medidas de pressão e vazão (Geiger, 2006). Se a queda no valor médio de uma propriedade for maior que um nível predefinido, um alarme é ativado. Essa técnica é capaz de estimar o tamanho e localização aproximada de um vazamento, dependendo dos parâmetros estudados.

É realizado um registro das variações causadas por mudanças operacionais, tornando o sistema mais adaptável, e por isso a ocorrência de alarmes falsos é baixa.

1.1.2 Métodos Baseados em Hardware

SDV's baseados em hardwares tendem a ser mais confiáveis e sensíveis, e muitos são capazes de captar a localização do vazamento. Entretanto, são normalmente mais caros e de difícil instalação, sendo em geral limitados para aplicações de alto risco.

Sensores Acústicos

Sensores acústicos utilizam a energia acústica gerada pelo escape do fluido para detectar um vazamento. São capazes de captar até pequenos vazamentos, e são altamente confiáveis e sensíveis (Geiger, 2006). São também capazes de perceber a localização do vazamento.

Por serem altamente sensíveis, ruídos decorrentes de válvulas, turbomáquinas, e outros equipamentos, podem afetar seu funcionamento (Liu, 2003). Adicionalmente, sua escala de detecção é limitada, portanto é necessário instalar diversos sensores ao longo da tubulação para obter respostas satisfatórias, tornando o sistema caro e de difícil manutenção.

Sensores de Infravermelho

O vazamento de alguns tipos de fluido, especialmente hidrocarbonetos, pode ser detectado através da identificação de variações de temperatura no entorno das tubulações. Nesse caso, são utilizados sensores remotos que monitoram o espectro infravermelho na região de interesse (Ben-Mansour et al., 2012).

Esses sensores podem ser portáteis, e carregados com uma patrulha de monitoramento, podendo cobrir vários quilômetros de tubulação rapidamente. Essa é a sua melhor opção de uso, já que, por não serem muito confiáveis, seus alarmes necessitam da confirmação de um técnico experiente.

Sensores de Pressão Negativa

Esse tipo de sensor transforma medidas de pressão em tensões elétricas, de modo geral através de transdutores piezoelétricos. A detecção de vazamentos é feita através da captação de ondas de pressão negativa e de gradiente de pressão. O método é conhecido também como Método de Transiente de Pressão (Zhang, 1996).

O gradiente de pressão na tubulação é medido ao longo do tempo. Durante um vazamento, a queda de pressão no local gera uma onda de pressão negativa, que se propaga a montante e a jusante do ponto de vazamento. Teoricamente, esta onda viaja com a velocidade do som, apresentando uma diminuição gradual ao se propagar, devido ao atrito. Chuanhu et al. (2008) apresenta detalhadamente a modelagem matemática envolvida neste método.

1.2 Resumo Bibliográfico

As principais referências bibliográficas encontradas sobre a detecção e localização de vazamentos são discutidas detalhadamente no Capítulo 2. Entretanto, para melhor compreensão dos objetivos do trabalho, a Tabela 1.1 resume as principais características destes trabalhos.

Tabela 1.1: Resumo de bibliografia acerca de vazamentos.

Trabalho	Principais Características
Billmann e Isermann (1987)	Escoamento 1D, isotérmico e transiente, modelado por diferenças finitas centradas. Validado experimentalmente, para fluidos líquidos e gasosos. Este trabalho é um dos mais antigos disponíveis em vazamentos.
Geiger et al. (2000)	Escoamento 1D, isotérmico e transiente, modelado através de parâmetros concentrados. Validação experimental realizada, utilizando provavelmente uma linha de fluido líquido.
Sun (2012)	Escoamento 1D, isotérmico e transiente, utilizando o princípio de propagação de ondas e uma analogia à sistemas elétricos para a modelagem. Validação experimental realizada para gás natural e óleo.
Elaoud et al. (2010)	Escoamento 1D, isotérmico e transiente, modelado através do Método de Características, para fluidos gasosos. Foi verificada a influência da posição do vazamento no escoamento interno ao duto.

Tabela 1.1 – continuação da página anterior.

Trabalho	Principais Características
Hou et al. (2014)	Análise experimental de vazamentos, através de sensores de deformação circunferencial do duto (FBG), em linhas de gás natural.
Baghdadi e Mansy (1988)	Escoamento 1D, incompressível e permanente, modelado por diferenças finitas. Textos experimentais foram feitos com água, para validação. Este trabalho é um dos mais antigos disponíveis sobre vazamentos.
Molina-Espinosa et al. (2013)	Análise experimental de vazamentos de água em dutos curtos. Foi avaliada a influência do diâmetro do vazamento no escoamento interno ao duto, em duas configurações de pressão interna.
Ben-Mansour et al. (2012)	Escoamento 3D, isotérmico e permanente de água, modelado por fluidodinâmica computacional (CFD). Foi avaliada a influência da pressão operacional do duto em situações de vazamento. Não houve validação dos resultados.
Shehadeh e Shahata (2013)	Escoamento 3D, compressível e permanente, modelado por CFD. Foi estudada a influência do diâmetro do furo no escoamento. O estudo foi considerado validado, porém a diferença encontrada entre os resultados de simulação e a referência foi superior a 25%, tornando a validação questionável.
Kam (2010)	Escoamento 1D, isotérmico, bifásico (óleo e gás natural), horizontal e estratificado. Foram avaliados diversos diâmetros de furo, considerando gás compressível e incompressível.

Tabela 1.1 – continuação da página anterior.

Trabalho	Principais Características
Bueno et al. (2014)	Escoamento 1D, isotérmico, bifásico (água e ar), horizontal e estratificado, modelado pelo método Transporte de Fluxo Corrigido (FCT). Foi verificada a influência do tamanho e da posição do furo.

1.3 Objetivos do Trabalho

A maior parte dos SDV's utiliza dados obtidos de medidores instalados ao longo das tubulações. Entretanto, devido à natureza pontual das medições, as informações disponíveis sobre os perfis de escoamento ao longo de uma linha com um vazamento são limitadas.

Além disso, como citado previamente, os métodos de detecção em geral trabalham com simplificações de escoamentos uni ou bidimensionais, acarretando perda de informações sobre o escoamento ao longo de cada seção transversal. Em situações normais de operação, essa simplificação é suficiente para caracterizar o escoamento, porém em situações de vazamento, ela pode se tornar inadequada e comprometer o emprego do SDV.

Este trabalho busca simular numericamente o escoamento interno de dutos com vazamentos de diferentes tamanhos e posicionamentos, através do software ANSYS CFX©. É utilizada uma abordagem tridimensional de estudo, buscando potenciais melhorias em futuras modelagens de SDVs.

O projeto visa expandir os dados sobre o escoamento a montante e a jusante do vazamento, tanto para fluidos líquidos quanto para gases, e misturas bifásicas de líquido e gás. Deste modo, esses resultados poderão ser úteis em futuros esforços no desenvolvimento de modelos específicos para detecção e localização de vazamentos. É desejável, especificamente, determinar o efeito do tamanho do vazamento, e de sua localização, sobre o escoamento no interior do duto.

O trabalho objetiva também estimar, através de fluidodinâmica computacional, quão precisa é a hipótese de escoamento unidimensional na presença de vazamentos, através de um estudo do comportamento médio nas seções transversais da tubulação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, são discutidos resumidamente alguns trabalhos relevantes na área de vazamentos, com destaque para dois tipos principais de modelagem: vazamentos em regime permanente e transiente. Em regime permanente, os resultados são analisados em função do comprimento do duto. Essas análises, apesar de serem válidas para qualquer tipo de escoamento, são mais utilizadas para fluidos incompressíveis. Para fluidos compressíveis, é em geral necessário estudar o comportamento transiente do escoamento, já que a previsão de vazamentos através de características permanentes tende a causar falsos alarmes na operação real.

2.1 Modelagem de Vazamentos em Regime Transiente

O escoamento através de uma tubulação é governado pelas equações clássicas de conservação da mecânica dos fluidos, que podem ser encontradas na literatura (Kundu e Cohen, 2002). Essas equações são apresentadas em sua forma completa no Capítulo 3, onde é discutida a modelagem matemática para o modelo tridimensional a ser resolvido.

Para fins de detecção de vazamentos, essas equações geralmente são escritas segundo uma modelagem unidimensional, ou seja, simplificadas de modo a desconsiderar os efeitos radiais e tangenciais do escoamento. Billmann e Isermann (1987) apresenta as equações governantes do escoamento unidimensional e transiente em

uma tubulação:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -F - H \quad (2.2)$$

onde ρ , u e P são a massa específica, velocidade e pressão em função da direção axial x e do tempo. Os termos F e H representam, respectivamente, os componentes de atrito e da gravidade, que contabiliza as variações de altura entre seções diferentes do tubo através de um ângulo de inclinação α . Esses termos podem ser definidos através das equações 2.3 e 2.4, se o diâmetro D do duto for constante.

$$F = \frac{\lambda \rho u^2}{2D} \quad (2.3)$$

$$H = \rho g \sin(\alpha) \quad (2.4)$$

onde λ é o fator de fricção.

Em Billmann e Isermann (1987), foi considerada a hipótese de fluido isotérmico, de modo que a equação de energia não é resolvida, e as variações de massa específica são decorrentes apenas da variação de pressão. Utilizou-se o método das diferenças finitas para resolver este sistema de equações, com a formulação de diferenças centradas (Equações 2.5 e 2.6).

$$\frac{\partial \psi^k}{\partial t}_x = \frac{3\psi_x^{k+1} - \psi_x^k + \psi_x^{k-1}}{2\Delta t} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \psi^k}{\partial x}_x = \frac{\psi_{x+1}^{k+1} - \psi_{x-1}^{k+1} + \psi_{x+1}^k - \psi_{x-1}^k}{4\Delta x} \quad (2.6)$$

Foram gerados dados experimentais para utilizar como comparação à solução proposta, e boa concordância foi encontrada, tanto para líquidos quanto para gases. Resultados de pressão e vazão foram apresentados como função do tempo na entrada e saída do duto estudado, como exemplificado na Figura 2.1. A solução numérica de Billmann e Isermann (1987) é uma das mais antigas disponíveis para vazamentos, e foi utilizada como base de comparação e aperfeiçoamento, especialmente nos modelos utilizados no Método de Transiente de Pressão.

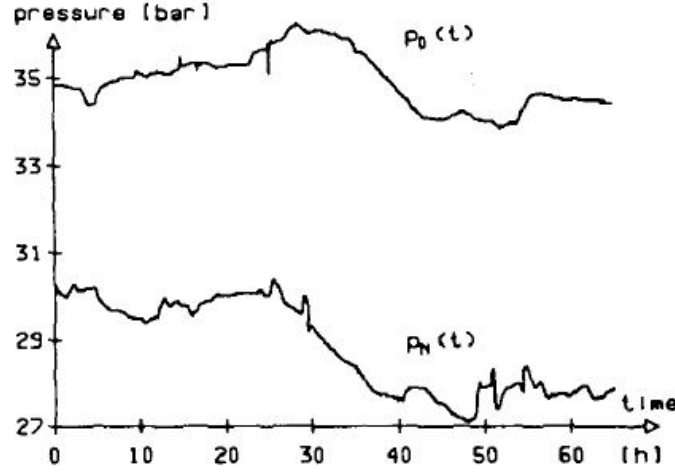


Figura 2.1: Amostra de resultados encontrados por Billmann e Isermann (1987).

Geiger et al. (2000) utilizou as mesmas hipóteses de Billmann e Isermann (1987), acrescentando a condição de que a massa específica do fluido seja constante e homogênea, igual a $\bar{\rho}$. Neste caso, o problema foi modelado através da formulação de parâmetros concentrados. As Equações 2.5 e 2.6 são transformadas em quatro equações diferenciais ordinárias, e agrupadas em dois pares para serem resolvidas. Esse modelo foi verificado através de dados experimentais de uma tubulação real, cujos dados foram especificados. Um vazamento de 2% da vazão mássica no duto foi gerado em um tempo $t = 300s$. O modelo de parâmetros concentrados foi capaz de detectar o vazamento rapidamente, e de estimar satisfatoriamente a sua dimensão. A perda de vazão obtida teve erro menor que 10% quando comparada aos dados experimentais. Não há informação sobre o fluido utilizado no experimento, porém a ordem de grandeza de suas propriedades sugere que se trata de um líquido.

Sun (2012) considerou o escoamento unidimensional e isotérmico em um duto sem inclinação ($\alpha = 0$). Neste cenário, a equação de conservação de quantidade de movimento no duto pode ser reduzida à Equação 2.7. A equação de continuidade permanece a mesma (2.1).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\lambda \rho u^2}{2D} \quad (2.7)$$

O modelo estudado por Sun (2012) é baseado no Método de Transiente de Pressão, e relaciona a propagação das ondas de pressão formadas em um vazamento abrupto às suas características.

Considere a Figura 2.2. Seja L o comprimento total do duto, e L_r o comprimento até o vazamento. As grandezas C_0 e C^* são as curvas características em regime permanente, antes e depois do vazamento, respectivamente. Uma vez que a onda de pressão negativa atinge o fim do duto, as condições de contorno são afetadas, e o fenômeno se torna fortemente transiente.

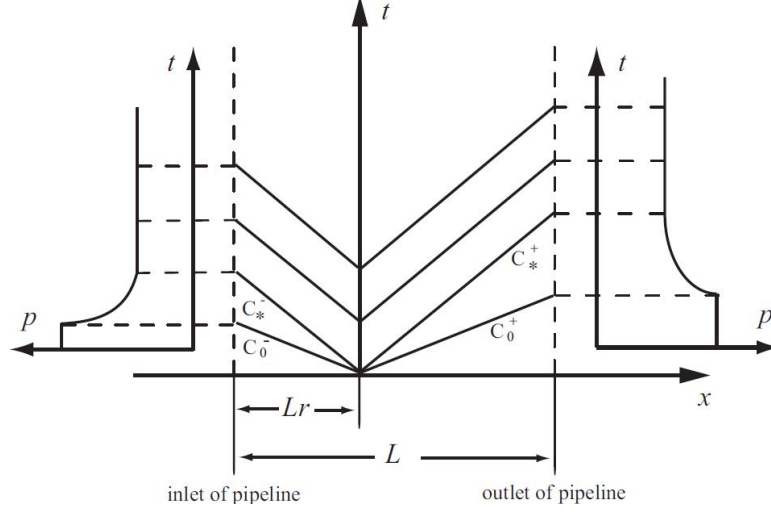


Figura 2.2: Geração e propagação de ondas a partir de um ponto de vazamento (Sun, 2012).

Supondo que a seção transversal do duto é constante, o escoamento de um gás ideal por um duto intacto é dado pela Equação 2.8.

$$\frac{P_Q^2 - P_Z^2}{G^2 RT} - 2 \ln \left(\frac{P_Q}{P_Z} \right) = \frac{\bar{\lambda} L}{D} \quad (2.8)$$

onde $\bar{\lambda}$ é o coeficiente médio de fricção, $G = \rho w$ é o fluxo de massa pelo duto, P_Q e P_Z são as pressões de entrada e saída, respectivamente, R é a constante universal dos gases, e T a temperatura média do fluido através do duto.

Uma vez que o vazamento ocorre, e o processo se torna transiente, o duto deve ser dividido em dois trechos, conforme a Figura 2.2. O trecho C_*^- é definido pela Equação 2.9, e o trecho C_*^+ pela equação 2.10.

$$\frac{P_Q^2 - P_L^2}{G_q^2 RT} - 2 \ln \left(\frac{P_Q}{P_L} \right) = \frac{\bar{\lambda} L_r}{D} \quad (2.9)$$

$$\frac{P_L^2 - P_Z^2}{G_z^2 RT} - 2 \ln \left(\frac{P_L}{P_Z} \right) = \frac{\bar{\lambda} (L - L_r)}{D} \quad (2.10)$$

A taxa de vazamento K é então calculada pela Equação 2.11.

$$K = \frac{G_q - G_z}{G_q} \quad (2.11)$$

As equações 2.9 a 2.11, apesar de serem simples, formam um sistema indefinido (5 variáveis - P_Q , P_L , P_Z , G_q e G_z , para 3 equações). A pressão na entrada do duto, P_Q pode ser considerada como constante e igual à pressão anterior ao início do vazamento (regime permanente). Mesmo assim, uma equação adicional é necessária para a determinação do escoamento.

Em um artifício para resolver o sistema de equações diferenciais, o trecho da tubulação a ser estudado é tratado como um circuito elétrico equivalente, conforme a Figura 2.3. A analogia entre fenômenos é feita da seguinte forma: a pressão é tratada como voltagem, e a vazão mássica como corrente.

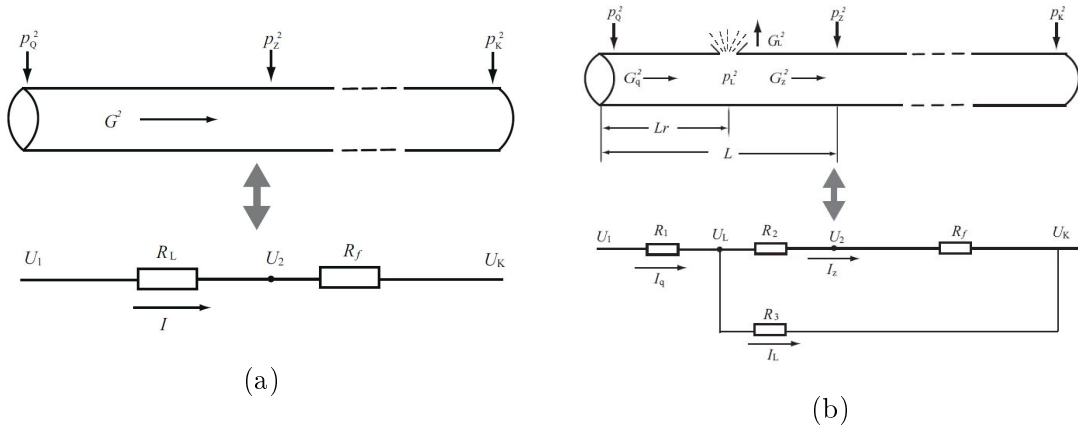


Figura 2.3: Correlação entre grandezas elétricas e o escoamento em um duto (a) sem vazamento e (b) com vazamento (Sun, 2012).

Na Figura 2.3a, por exemplo, P_K é a pressão de referência e $U_K = P_K^2$ é a voltagem equivalente. Os símbolos P_Q e P_Z correspondem aos termos de transporte de fluido ao longo do duto, e os resistores contabilizam os termos de dissipação. Neste caso, o termo de fricção $\frac{\bar{\lambda} L R T}{D}$ é equivalente a R_L , e o termo resistivo R_f pode ser calculado através das pressões, segundo a Equação 2.12.

$$R_f = \frac{P_Z^2 - P_K^2}{G^2} \quad (2.12)$$

O vazamento em si pode ser encarado como um circuito secundário, que divide a resistência R_L em R_1 e R_2 , sendo $R_1 = \frac{\bar{\lambda} L_r R T}{D}$ e $R_2 = \frac{\bar{\lambda} (L - L_r) R T}{D}$. Somadas, essas

resistências serão iguais à do escoamento original, R_L . A terceira resistência, R_3 é equivalente à resistência pneumática a partir da qual o fluido escoar para a atmosfera.

A "corrente" I_q é correspondente à vazão G_q ao quadrado, I_z corresponde a G_z^2 e I_L a G_L^2 . A voltagem U_L pode ser relacionada com P_L^2 . Sendo assim, em uma analogia à Equação 2.11, a relação entre as "correntes" é dada pela Equação 2.13.

$$I_z = I_q(1 - K)^2 \quad (2.13)$$

É agora possível resolver o sistema de equações relativos à onda de pressão negativa, desde que a localização do vazamento, L_r , e sua taxa K de perda de fluido sejam conhecidas. Para linearizar e simplificar o problema, os termos logaritmos nas equações 2.9 e 2.10 podem ser desprezados, já que são muito menores que os outros fatores.

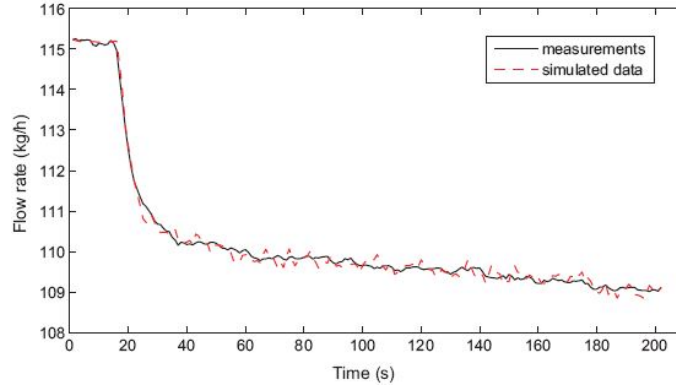
O modelo desenvolvido por Sun (2012) foi comparado a dados experimentais levantados para gás natural e óleo, como exemplificado na Figura 2.4. Os dados geométricos da tubulação, e as propriedades dos vazamentos estudados foram disponibilizados no artigo. Foi encontrada boa concordância, tanto para as pressões (inicial e final) quanto para as vazões em regime transiente.

Elaoud et al. (2010) também trabalhou com transientes rápidos de escoamento, porém as ondas de pressão são geradas não pela ruptura abrupta do duto, mas pelo fechamento de uma válvula a jusante do vazamento. O fluido estudado foi uma mistura homogênea de gás natural e hidrogênio, cujas massas específicas foram definidas através da lei de isentropia, conforme a Equação 2.14.

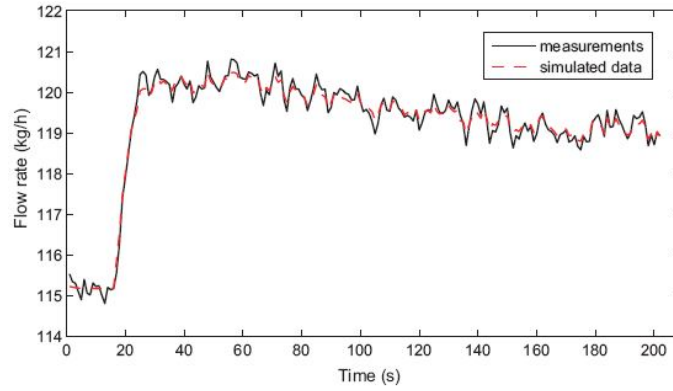
$$\rho_i = \rho_{i,0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\gamma_i} \quad (2.14)$$

A massa específica da mistura é definida através da fração mássica θ do hidrogênio. Pode-se definir C como a velocidade do som no meio, dada por 2.15.

$$C = \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)^{-1/2} = \left[\frac{\theta}{\rho_{h,0}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma_h} + \frac{1-\theta}{\rho_{g,0}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma_g} \right] \cdot \left\{ \frac{1}{P} \left[\frac{1}{\gamma_h} \frac{\theta}{\rho_{h,0}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma_h} + \frac{1}{\gamma_g} \frac{\theta}{\rho_{g,0}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma_g} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$



(a)



(b)

Figura 2.4: Exemplo de resultados encontrados por Sun (2012).

O sistema estudado por Elaoud et al. (2010) é exposto esquematicamente através da Figura 2.5. Um único vazamento é modelado, a uma distância x de um reservatório mantido à pressão constante. O duto, de comprimento L é subdividido em dois segmentos, sendo o ponto de vazamento a conexão entre eles.

Ao invés da analogia com um circuito elétrico, Elaoud et al. (2010) utilizou uma discretização numérica, através de intervalos de tempo e espaço especificados, conforme exemplificado na Figura 2.6.

Note que, se a condição de escoamento é conhecida para os pontos A , B e E , fixos pela malha, enquanto que os pontos R e S podem ser avaliados por interpolação linear. Na Equação 2.16,

$$\frac{X_E - X_R}{X_E - X_A} = \frac{V_E - V_R}{V_E - V_A} \quad (2.16)$$

$X_E - X_A = \Delta x$, e $X_E = X_P$. As relações para $X_P - X_R$ e $X_P - X_S$ são

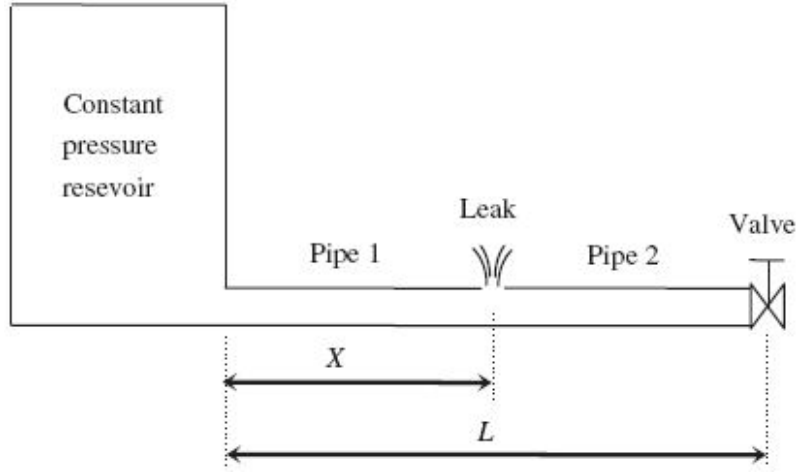


Figura 2.5: Sistema estudado por Elaoud et al. (2010).

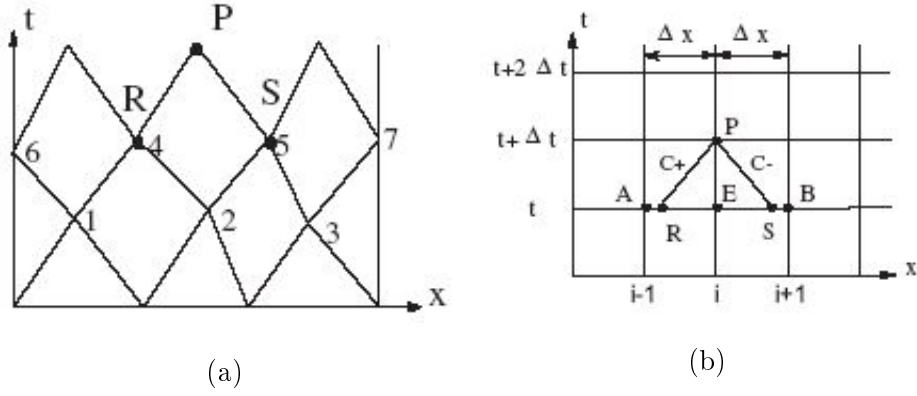


Figura 2.6: Discretização proposta por Elaoud et al. (2010).

conhecidas, e dadas pelas Equações 2.17 e 2.18.

$$X_P - X_R = \int_R^P (V + C) dt \quad (2.17)$$

$$X_P - X_S = \int_S^P (V - C) dt \quad (2.18)$$

Definindo-se $\sigma = \Delta t / \Delta x$, e $J = \frac{\lambda \rho V^2}{2D}$, tem-se que o sistema a ser resolvido é dado pelas Equações de 2.19 a 2.24.

$$V_R = \frac{V_R - \sigma C_R (V_E - V_A)}{1 + \sigma (V_E - V_A)} \quad (2.19)$$

$$P_R = P_E - \sigma (V_R + C_R) (P_E - P_A) \quad (2.20)$$

$$V_S = \frac{V_S - \sigma C_S(V_E - V_B)}{1 - \sigma(V_E - V_B)} \quad (2.21)$$

$$P_S = P_E + \sigma(V_S + C_S)(P_E - P_B) \quad (2.22)$$

$$(V_P - V_R) + \frac{1}{(\rho C)_R}(P_P - P_R) + J_R \Delta t = 0 \quad (2.23)$$

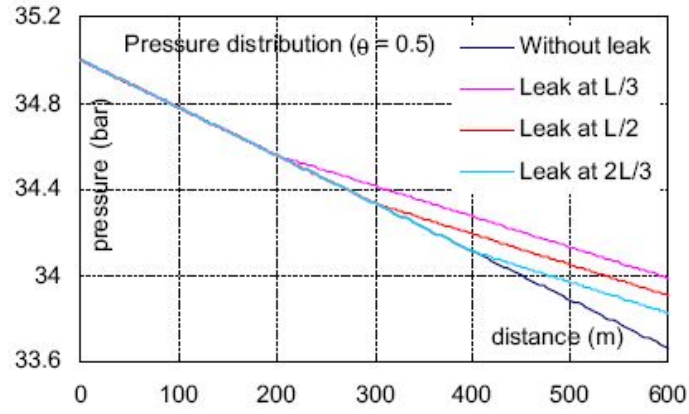
$$(V_P - V_S) - \frac{1}{(\rho C)_S}(P_P - P_S) + J_S \Delta t = 0 \quad (2.24)$$

Para testar o modelo proposto, foi considerado um duto de 0,4 m de diâmetro e 600 m de comprimento. Esse duto é conectado a um reservatório que é mantido a pressão constante, de 35 Bar. O vazamento é modelado através de um furo circular de 6 cm de diâmetro, que resulta em uma perda de cerca de 30% da vazão passante pelo duto ($Q_{total} = 55$ kg/s). Diversas frações mássicas de hidrogênio, θ , foram estudadas.

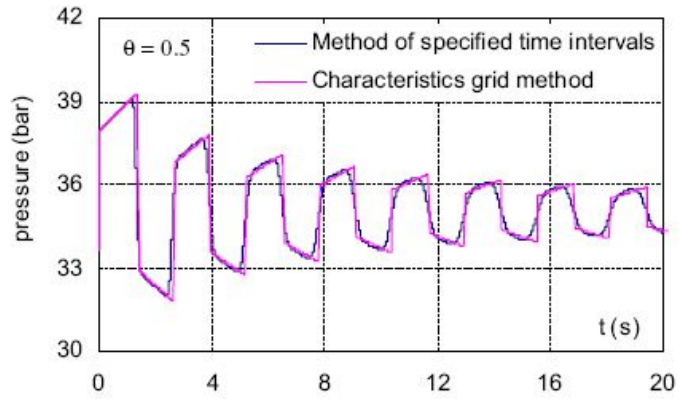
Foram apresentados resultados do modelo em regime permanente, antes do fechamento da válvula a jusante do furo. Esses resultados são apresentados em função da coordenada axial do duto, da fração mássica de hidrogênio, e da distância do furo ao reservatório, conforme demonstrado na Figura 2.7a.

Em seguida, são apresentados os resultados em regime transiente, que são comparados com o método de Características, cuja formulação é explicada em Elaoud e Hadj-Taïeb (2008). Nestes resultados, é possível visualizar o padrão de ondas de pressão gerados pelo fechamento da válvula, conforme a Figura 2.7b.

O método foi capaz de simular o perfil do vazamento transiente, e apresentou bons resultados em comparação ao método de Características.



(a)



(b)

Figura 2.7: Amostra de resultados encontrados por Elaoud et al. (2010), em regime permanente (a) e transiente (b).

Em Hou et al. (2014), foram realizados experimentos acerca dos transientes de pressão formados em um vazamento. Para isso, foram utilizados sensores do tipo FBG, que utilizam a deformação circunferencial do duto para medir sua pressão interna. A Equação 2.25 relaciona as duas grandezas, considerando para isso que a tensão axial causada pela pressão é desprezível.

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_z}{E} = \frac{PR}{tE} \quad (2.25)$$

onde σ_y e σ_z são as tensões circunferencial e axial, respectivamente, E é o Módulo de Young e ν o coeficiente de Poisson, P é a pressão interna, e R e t são o raio interno e a espessura do duto.

Sensores FBG devem ser instalados de forma a rodear uma seção do duto, conforme a Figura 2.8. A deformação do sensor seguirá o diâmetro do duto a medida

que ele expanda ou contraia. Esse tipo de sensor é menos suscetível a ruídos em suas medições, e são de fácil calibragem e manutenção. Foi feita uma comparação entre sensores FBG e medidores de pressão tradicionais, e encontrada alta precisão na medição através da deformação.

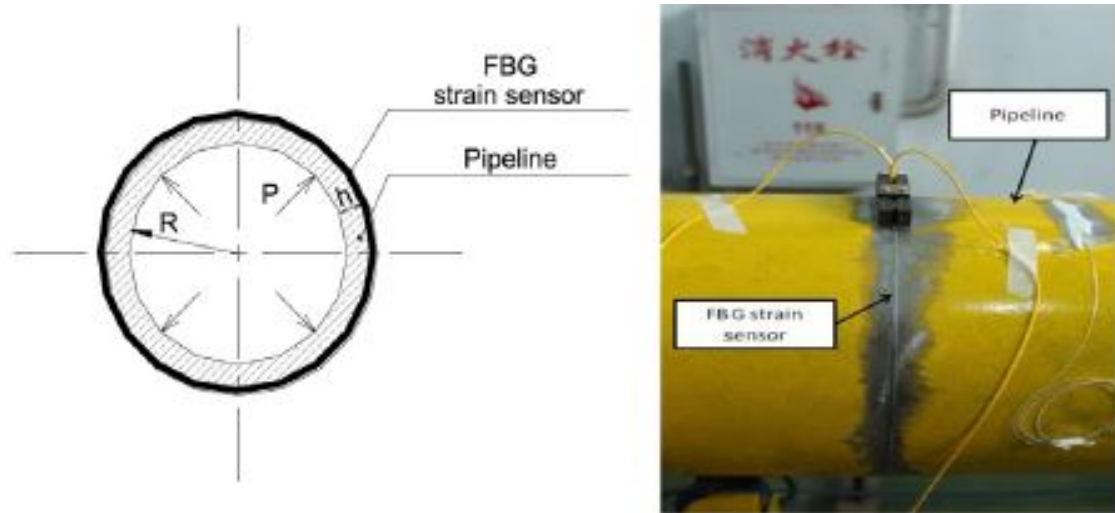


Figura 2.8: Esquemático e foto de um sensor FBG (Hou et al., 2014).

O aparato experimental construído consiste de um trecho de tubulação ($D = 273$ mm e $L = 11$ m), um compressor e dois tanques de gás. Originalmente, desejava-se estudar gás natural, mas por razões de segurança, os experimentos foram realizados com ar.

Os vazamentos podem ser simulados em três pontos distintos, conforme a Figura 2.9, através da abertura da válvula correspondente. A pressão máxima do sistema foi de 1,0 MPa. Devido ao curto período em que os vazamentos foram gerados (menor que 400 segundos), a influência de possíveis variações de temperatura no sensor foi desprezada.

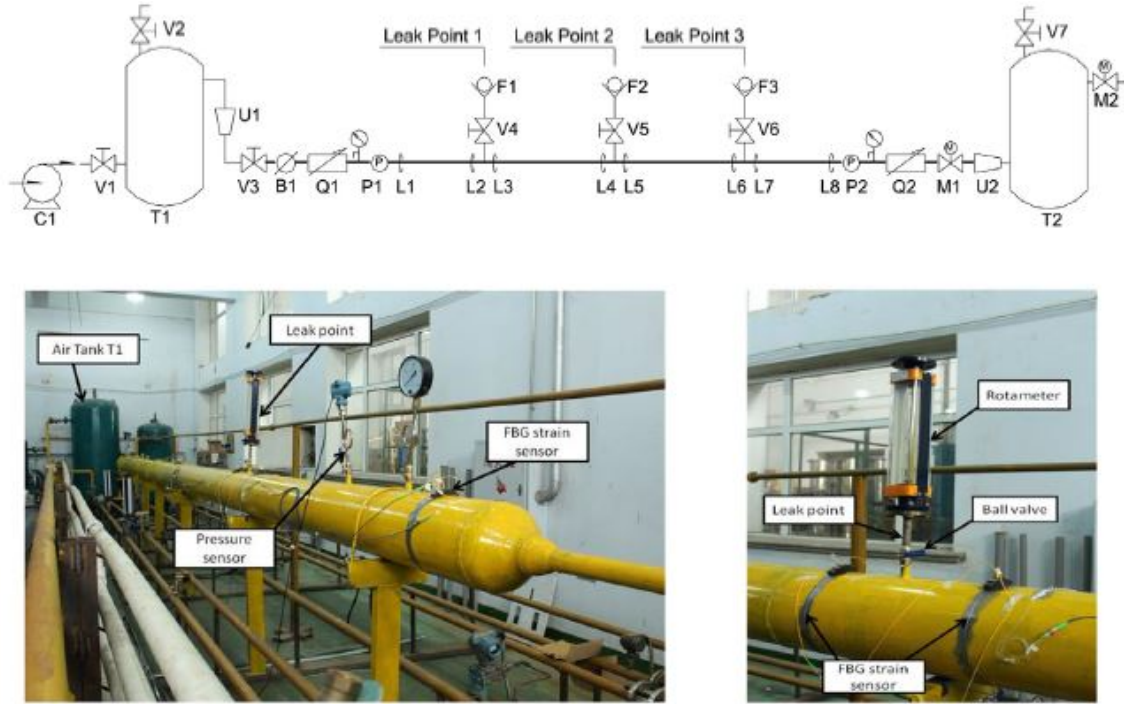


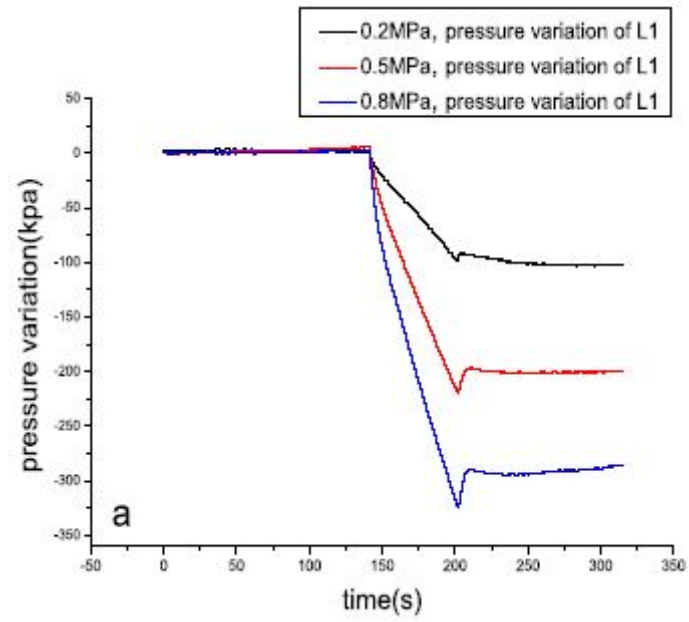
Figura 2.9: Aparato experimental utilizado no estudo (Hou et al., 2014).

Os experimentos foram realizados levando em consideração três níveis de pressurização do duto (0,8; 0,5 e 0,2 MPa), para um mesmo diâmetro de vazamento ($d/D = 9\%$). Foi também analisada a influência do tamanho do vazamento, estudando três diâmetros de vazamento ($d/D = 9\%$; 6% e 3%) para um mesmo nível de pressurização ($P = 0,5\text{MPa}$). Alguns dos resultados estão exemplificados em 2.10.

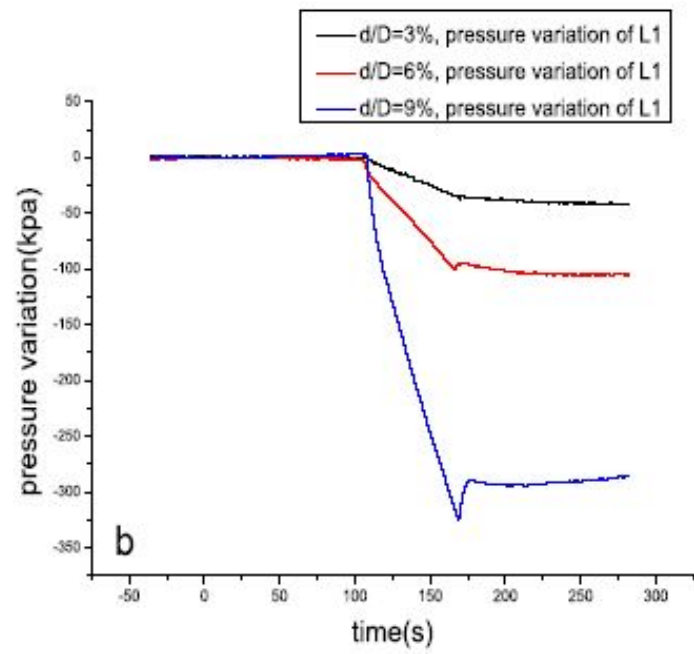
Deve-se destacar que, apesar do foco dado neste trabalho ao estudo de um único vazamento, é possível traçar modelos semelhantes aos apresentados aqui para situações de múltiplos vazamentos em um duto. Verde (2001) e Verde (2005) apresentam uma proposta de modelagem para esse cenário, considerando transientes de pressão.

Adicionalmente, é possível detectar vazamentos em dutos (únicos ou múltiplos) sem considerar diretamente as variações em seu escoamento interno. Pode-se citar, por exemplo, a análise do campo acústico fora do duto, na qual podem ser captadas variações da pressão sonora e da vibração do duto. Não serão dados detalhes desta abordagem de detecção, já que ela foge ao escopo do trabalho. Entretanto, a fim de dar uma visão mais geral do problema de detecção, foi considerado importante mencioná-la.

A pressão sonora do jato formado por um vazamento, em função da velocidade do fluido através do duto, é conhecida e dada pela Equação 2.26 (Wei et al., 2013).



(a)



(b)

Figura 2.10: Amostra de resultados encontrados por Hou et al. (2014).

Nesta equação, K é a constante de Lighthill e c a velocidade do som.

$$P_S = \sqrt{\frac{K}{\pi}} \frac{\rho U^2}{c^2} \quad (2.26)$$

Wei et al. (2013) utilizou ANSYS APDL® para simular o comportamento acústico do duto, via pressão sonora, e construir um modelo de vibração de uma tubulação, através de análise harmônica. Foram avaliados diferentes diâmetros de furo, mantendo uma pressão interna ao duto constante, bem como diferentes pressões internas, em um furo fixo. A partir desses resultados, foi criado um modelo simplificado de detecção e localização de vazamentos, calibrando a formulação clássica de detecção acústica através das simulações.

Este sistema foi instalado em uma tubulação industrial de gás, de aproximadamente 156km, e monitorado em conjunto com os SDVs já utilizados. O modelo foi capaz de detectar e localizar um pequeno vazamento real na tubulação (0,9% da vazão), com um tempo de resposta inferior a 2 minutos. Esse vazamento foi confirmado pelo time de segurança responsável.

2.2 Modelagem de Vazamentos em Regime Permanente

Baghdadi e Mansy (1988) estudaram vazamentos em regime permanente e unidimensional, com a hipótese de escoamento incompressível. Figura 2.11 apresenta o problema estudado por Baghdadi e Mansy (1988), onde os pontos 1 e 2 são, respectivamente, o início e final do duto, e o ponto X é o local do vazamento.

Nesta situação, o escoamento pode ser definido por cinco equações, a saber:

- Equação de continuidade:

$$Q_1 - Q_2 = Q_x \quad (2.27)$$

- Perda de carga (h) no duto, antes do ponto X de vazamento:

$$h_1 - h_{x,1} = \lambda_1 \frac{X}{D} \frac{Q_1^2}{2gA^2} \quad (2.28)$$

λ_1 é o fator de fricção correspondente à velocidade V_1 .

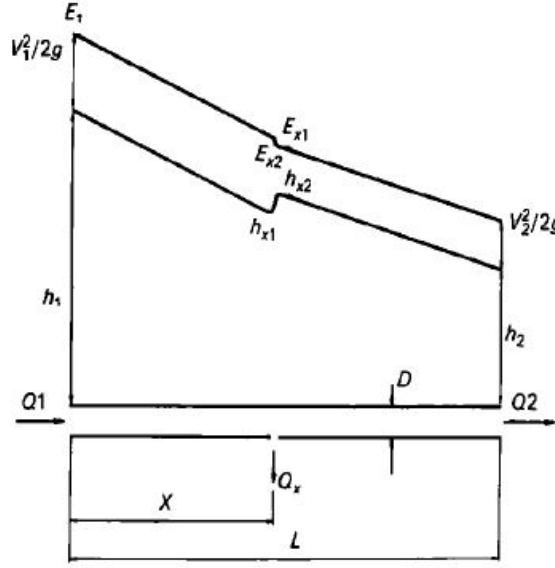


Figura 2.11: Condição de escoamento estudado por Baghdadi e Mansy (1988).

- Perda de carga no duto, após do ponto X de vazamento:

$$h_{x,2} - h_2 = \lambda_2 \frac{L - X}{D} \frac{Q_2^2}{2gA^2} \quad (2.29)$$

λ_2 é o fator de fricção correspondente à velocidade V_2 .

- Vazão de fluido perdida no vazamento:

$$Q_x = c_d A \sqrt{2gE_{x,1}} \quad (2.30)$$

O termo $c_d A$ é a área efetiva do furo. $E_{x,1}$ é a energia total no ponto X . A energia de um ponto i qualquer é definida através da Equação 2.31.

$$E_i = h_i + \frac{V_i^2}{2g} \quad (2.31)$$

- Balanço global de energia:

$$\begin{aligned} E_{leak} &= Q_1 E_1 - Q_2 E_2 - Q_1 (E_1 - E_{x,1}) - Q_2 (E_{x,2} - E_2) \\ &= Q_1 E_{x,1} - Q_2 E_{x,2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

E_{leak} representa a energia perdida pelo sistema através do vazamento.

A partir dessas equações, é possível detectar não só a existência de um vazamento, como também sua localização. Note que, combinando-se as Equações 2.28, 2.29 e 2.32, e resolvendo para X , a posição do vazamento pode ser facilmente estimada.

A fim de testar o modelo proposto, foi montado um aparato experimental, exposto esquematicamente na Figura 2.12. Os testes foram realizados com água. Na região da seção de teste, doze pontos de medição de pressão foram utilizados para analisar suas variações em torno do furo.

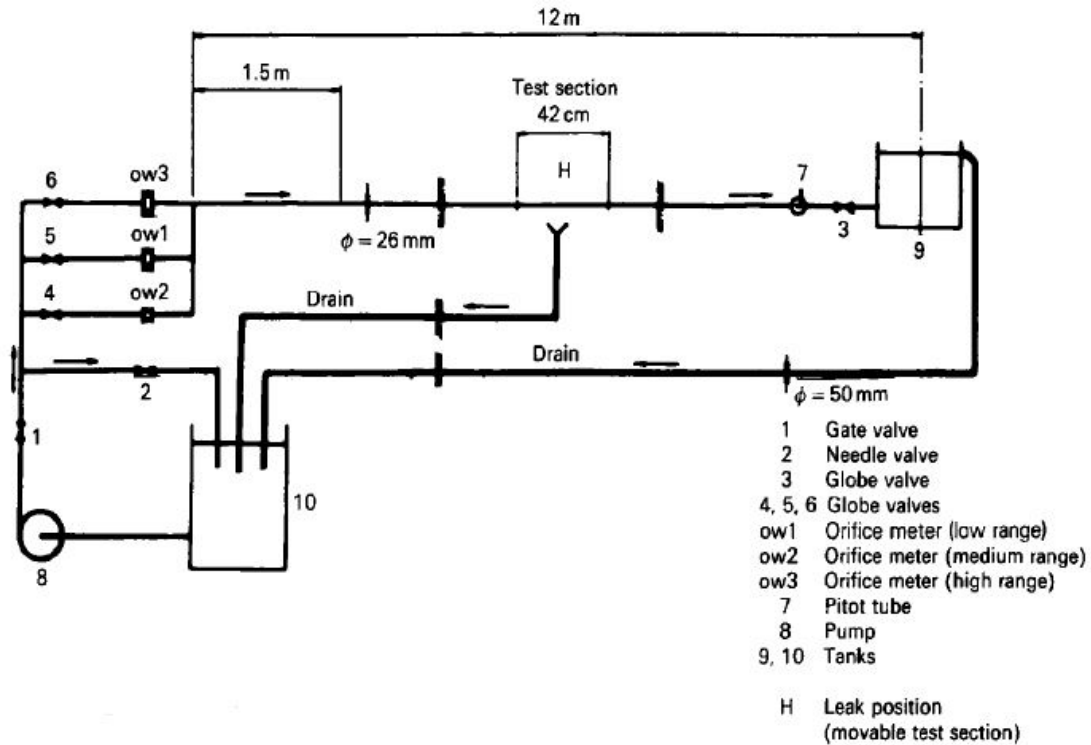


Figura 2.12: Aparato experimental utilizado por Baghdadi e Mansy (1988) para testar o modelo desenvolvido.

Foram avaliadas duas geometrias diferentes de furo, a primeira circular, com 7mm de diâmetro, e a segunda retangular, com dimensões de 12x2mm. Cinco localizações de vazamento foram testadas. Os resultados foram apresentados em função do comprimento adimensional do duto x/L . O modelo proposto provou ser realista e válido para ambas as geometrias de furo testadas.

Como esperado, os experimentos mostraram diminuição da velocidade a jusante do vazamento, facilmente explicada pela diminuição em vazão mássica correndo pelo duto. Consequentemente, houve uma descontinuidade no perfil de perda de carga no duto, e a pressão sobe logo após o furo.

Molina-Espinosa et al. (2013) também investigou o comportamento de um fluido incompressível (água) em situação de vazamento. Foram realizados experimentos com dutos curtos.

Foram realizados dois tipos de experimentos, visando levantar dados para sistemas sob diferentes condições de contorno:

1. O primeiro experimento controlou diretamente a pressão na entrada do duto, e a vazão do vazamento. Foram estudadas três vazões, bem como um caso sem vazamento. O objetivo era quantificar a influência do vazamento no perfil de pressão ao longo do comprimento do duto, conforme a Figura 2.13. Para todos os casos, o vazamento foi localizado no mesmo ponto, a 0,73 m do início da seção de teste, cujas dimensões eram de 2,23 m de comprimento e 12,7 mm de diâmetro.

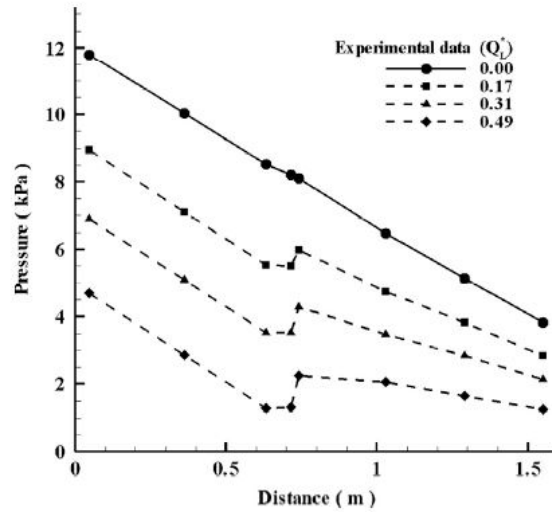


Figura 2.13: Distribuição de pressão ao longo do duto, com a condição de contorno de pressão e vazão.

2. Uma segunda configuração permitiu o estudo de um sistema com pressões fixas nas duas extremidades do duto, sendo água bombeada de um reservatório de pressão constante a outro. Neste teste, o comprimento do duto foi estendido para alcançar o segundo reservatório, e sua nova dimensão é de 3,35 m. Novamente foram avaliadas três diferentes vazões no vazamento, e um caso sem vazamento. Novamente, foi encontrado um aumento de pressão a jusante do vazamento. O aumento de pressão na região do vazamento foi quantificado, em função do percentual de vazão do vazamento em relação à total. Os resultados podem ser vistos na Figura 2.14.

Ben-Mansour et al. (2012) utilizou fluidodinâmica computacional para estudar

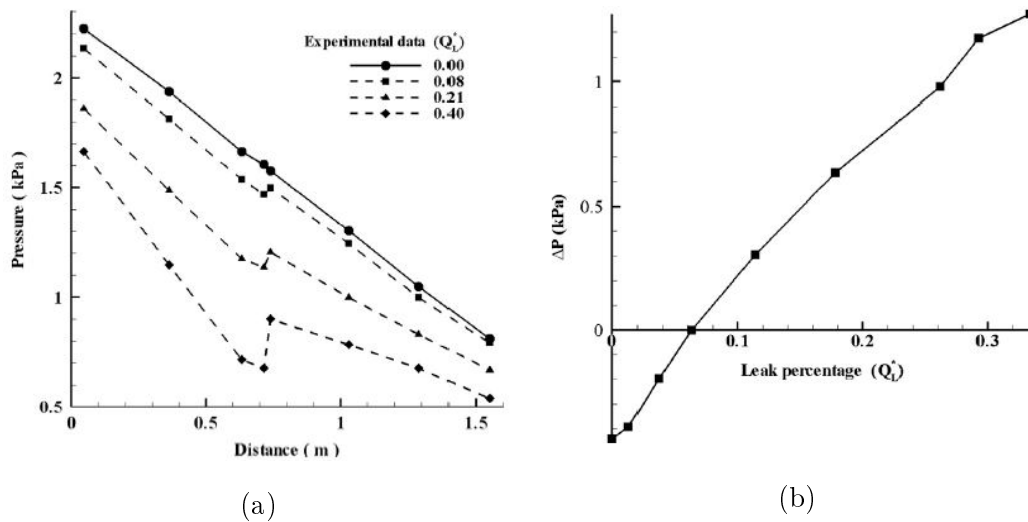


Figura 2.14: Resultados de Molina-Espinosa et al. (2013) para a condição de contorno de pressão-pressão, sendo (a) a distribuição de pressão ao longo do duto e (b) o aumento de pressão na região de vazamento.

vazamentos de fluidos incompressíveis. Nesse caso, foi feita uma modelagem completa tridimensional e turbulenta, em regime permanente e transiente. É enfatizado nesta seção apenas a formulação permanente.

A geometria global do modelo é apresentada na Figura 2.15. Foi estudado um furo quadrado de 1mm de lado.

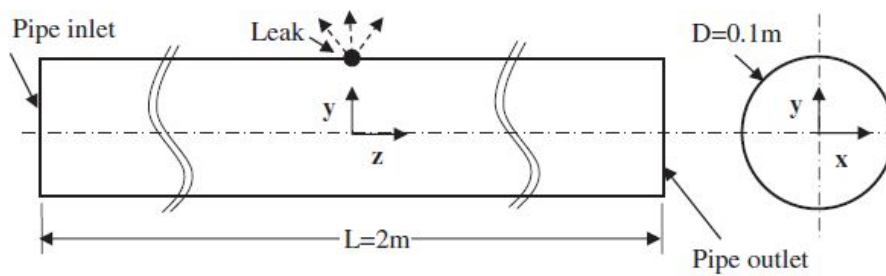


Figura 2.15: Detalhes geométricos do modelo estudado por Ben-Mansour et al. (2012).

As simulações foram realizadas no software Fluent 6.2. Para isso, foi gerada uma malha hexaédrica com aproximadamente 540 mil elementos, e uma discretização do furo de 16 elementos. A velocidade de entrada e pressão de saída do fluido foram prescritas como $V = 1 \text{ m/s}$ e $P = 1 \text{ Bar}$. A turbulência foi considerada através do modelo $k-\epsilon$.

Foram estudadas tanto a variação de pressão causada pelo vazamento quanto o

seu gradiente, conforme exemplificado na Figura 2.16. Os resultados foram apresentados em função do comprimento do duto e da pressão de operação prescrita para a tubulação.

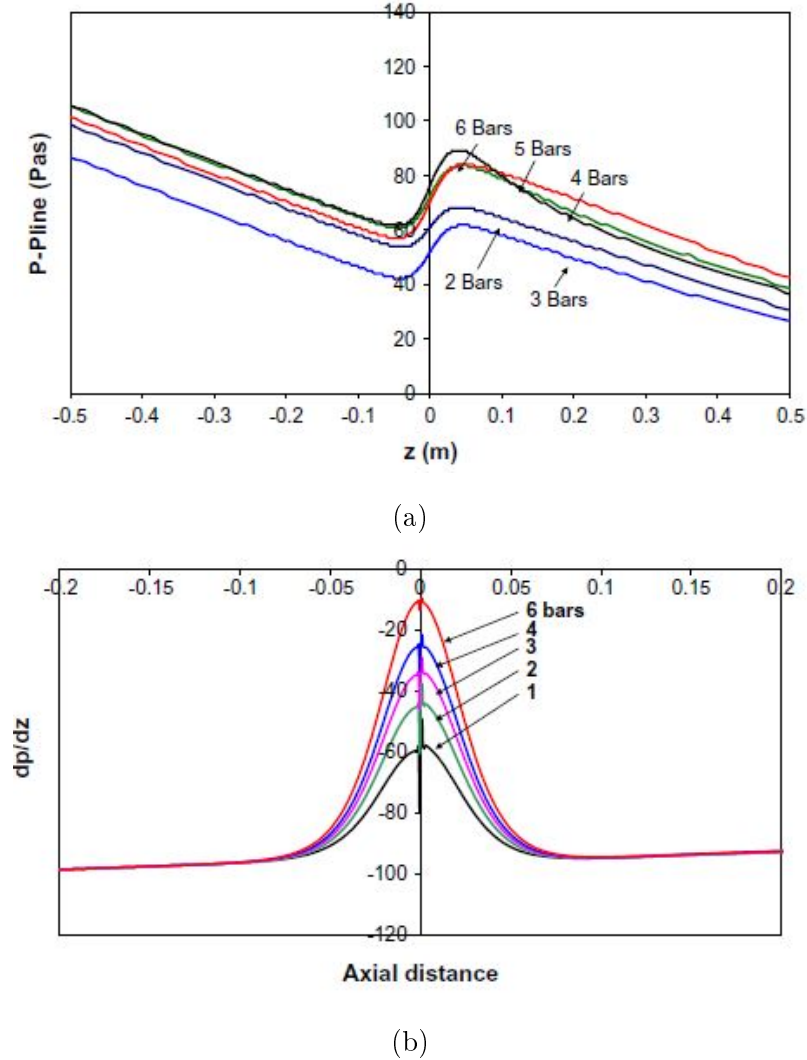


Figura 2.16: Amostra de resultados de Ben-Mansour et al. (2012) para (a) distribuição de pressão e (b) gradiente de pressão ao longo do duto.

Infelizmente, Ben-Mansour et al. (2012) não fez comparações entre os resultados encontrados nas simulações e dados experimentais, ou modelos existentes de vazamento, embora haja menção deste tipo de comparação para publicações futuras.

Ainda assim, este trabalho é relevante já que, após árdua pesquisa bibliográfica, foi uma das únicas publicações encontradas em que foi utilizada fluidodinâmica computacional para modelar vazamentos.

Shehadeh e Shahata (2013) também estudou vazamentos de água em tubulações

através de ferramentas CFD. Foi considerado, por hipótese, que o escoamento é incompressível e isotérmico, e que o tubo é idealmente liso. As forças de corpo foram desprezadas. Quanto aos parâmetros numéricos, foi utilizado o modelo $k-\epsilon$ para resolver a turbulência, e realizado um estudo de independência de malha numérica.

O modelo estudado, apresentado na Figura 2.17, engloba um duto de 53 mm de diâmetro interno e 0,5 m de comprimento. O diâmetro do furo varia entre 1 e 5 mm. A espessura do duto e a região externa são consideradas, já que o foco do estudo está no fluido que é liberado e como suas propriedades variam.

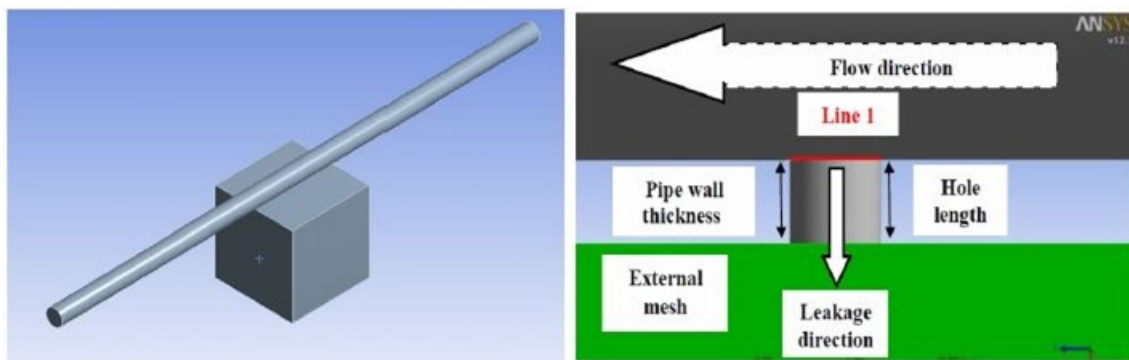


Figura 2.17: Geometria estudada por Shehadeh e Shahata (2013).

A fim de validar as simulações CFD, foram feitos experimentos com um furo de 1 mm de diâmetro, e variando a velocidade da linha antes do vazamento. A comparação entre os resultados experimentais e numéricos são apresentados na Figura 2.18. Um erro máximo de 25% foi encontrado para o menor número de Reynolds estudado, e portanto o modelo numérico foi considerado validado.

Uma vez validado o estudo, foram estudados cinco diâmetros de furo, e levantada a variação da vazão mássica do vazamento em função da velocidade, pressão e intensidade turbulenta. Uma amostra destes resultados é apresentada na Figura 2.19.

Foi concluído que, para furos pequenos (1mm), a variação da condição do escoamento global tem pouca influência nas propriedades do vazamento. Em diâmetros maiores, a vazão mássica perdida pelo furo tem relação direta com a variação de velocidade, pressão e intensidade turbulenta.

Kam (2010) e Bueno et al. (2014) estudaram vazamentos em linhas com escoamento bifásico. Apesar deste tipo de escoamento não ser o principal foco desta

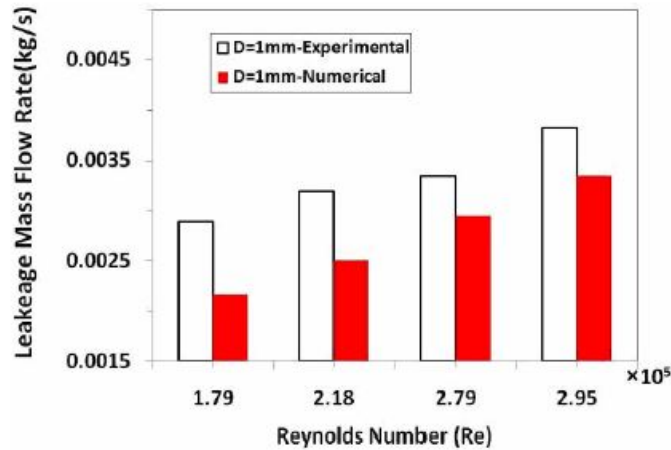


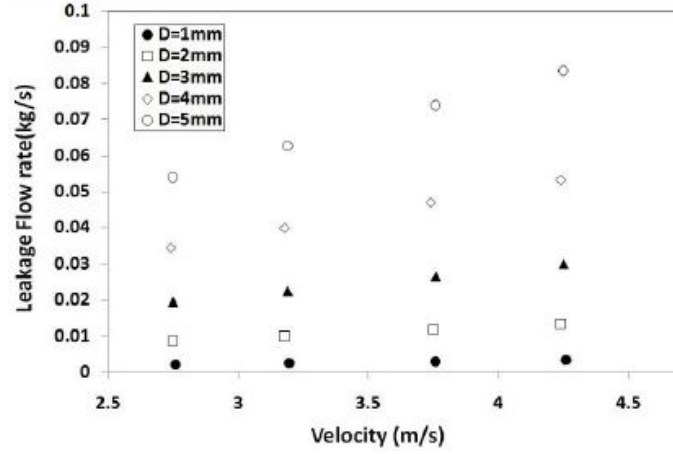
Figura 2.18: Validação entre resultados numéricos e experimentais (Shehadeh e Shahata, 2013).

dissertação, foi realizado uma estudo preliminar acerca de escoamentos bifásicos (óleo e gás natural), conforme é apresentado no Capítulo 7, visando analisar a viabilidade e dificuldade de realizar simulações tridimensionais neste tipo de escoamento. Sendo assim, uma breve revisão será apresentada dessas duas referências.

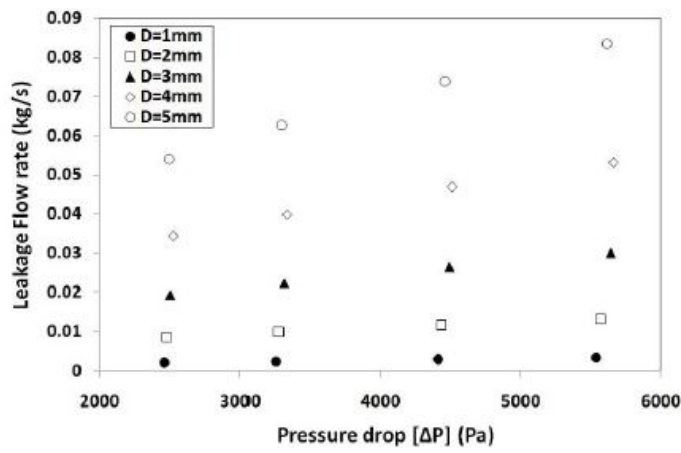
Kam (2010) desenvolveu um modelo mecanicista de detecção de vazamentos por diferenças finitas, com ênfase em linhas *subsea* horizontais. As medições de pressão e vazão na entrada e saída de um trecho de linha em operação foram utilizadas para calibrar o modelo.

Foi estudado o escoamento bifásico, unidimensional, isotérmico e em regime estratificado, de óleo e gás natural, e considerou-se inicialmente ambas as fases de fluido sob regime incompressível. Equações de conservação de massa e momento são empregadas em cada fase, e o vazamento é encarado como um termo de sumidouro nas equações de continuidade. O desenvolvimento das equações utilizadas no modelo não serão descritas nesta dissertação, por serem manipulações das equações padrão de conservação. Elas são discutidas minuciosamente no trabalho de Kam (2010).

O modelo foi testado em uma linha de 3" de diâmetro e 2000 ft de comprimento, considerando um vazamento centralizado na linha, de múltiplos diâmetros. Fixou-se uma vazão de entrada de $0,011 m^3/s$ de líquido e $0,442 m^3/s$ de gás, e uma pressão de saída de 1000 psi. As propriedades do óleo e gás natural utilizados são conhecidas, e a fração volumétrica de gás na entrada é de 0,334. A Figura 2.20 apresenta uma amostra dos resultados encontrados por Kam (2010).



(a)



(b)

Figura 2.19: Amostra de resultados obtidos por Shehadeh e Shahata (2013).

Em seguida, efeitos preliminares de compressibilidade do gás foram acrescentados ao modelo. Entretanto, as propriedades compressíveis do gás não são informadas. Foi concluído que, para linhas longas e de alta pressão, a variação de vazão em uma linha com vazamento é um melhor indicador de vazamentos que a variação de pressão. Entretanto, conforme discutido anteriormente, medidores de pressão são mais frequentes em uma linha que medidores de vazão, permitindo maior resolução na medição. Portanto, o indicador de variação de pressão deve ser encarado como um importante suporte na detecção de vazamentos.

Bueno et al. (2014) estudou também a modelagem de vazamentos bifásicos unidimensionais, em regime estratificado de escoamento, considerando-se uma abordagem isotérmica, com gás compressível e líquido incompressível. Novamente, o vazamento é modelado como um termo de sumidouro nas equações de conservação de massa.

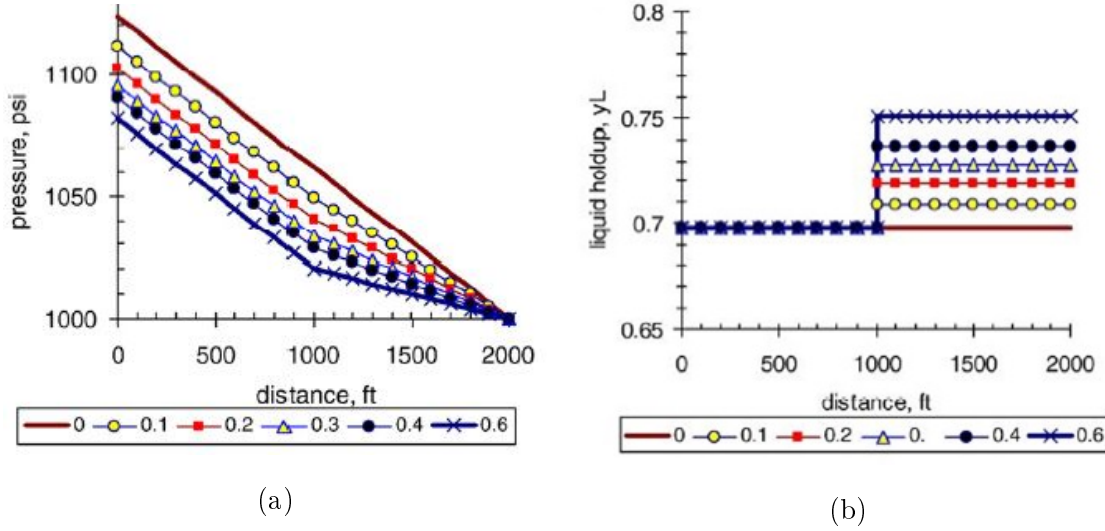


Figura 2.20: Amostra de resultados obtidos por Kam (2010).

É suposto que o escoamento ocorre em um duto quasi-horizontal.

O método de Transporte de Fluxo Corrigido (*flux-corrected transport* - FCT) foi empregado na resolução das equações, por ser capaz de capturar potenciais ondas de choque, e produzir bons resultados nas proximidades de descontinuidades.

O modelo foi construído a partir das Equações 2.33 a 2.36, onde u_k representa a velocidade da fase k e α_k sua fração volumétrica; $\Gamma_k \delta_k x_l$ é a vazão mássica instantânea do vazamento por unidade de volume; $T_k w$ é o termo de cisalhamento relativo à fricção entre cada fase e a parede, e T_i o cisalhamento referente à interface entre fluidos; B_{fk} representa as forças de corpo da fase; e finalmente p_c é um termo de correção de pressão na interface.

$$\frac{\partial \rho_L \alpha_L}{\partial t} + \frac{\partial \rho_L \alpha_L u_L}{\partial x} = -\Gamma_L \delta_L x_l \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \rho_G \alpha_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho_G \alpha_G u_G}{\partial x} = -\Gamma_G \delta_G x_l \quad (2.34)$$

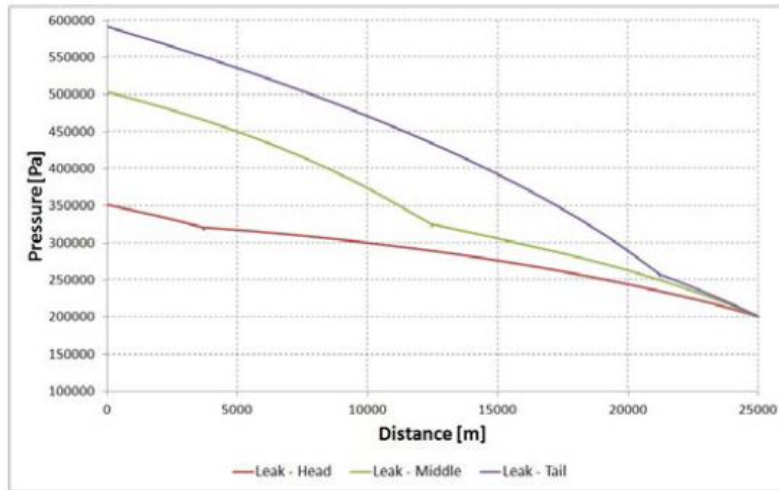
$$\frac{\partial \rho_G \alpha_G u_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho_G \alpha_G u_G^2}{\partial x} = -\alpha_G \frac{\partial p}{\partial x} + B_{fG} + T_i + T_{Gw} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \rho_L \alpha_L u_L}{\partial t} + \frac{\partial \rho_L \alpha_L u_L^2}{\partial x} = -\alpha_L \frac{\partial p}{\partial x} - p_c \frac{\partial \alpha_L}{\partial x} + B_{fL} + T_i + T_{Lw} \quad (2.36)$$

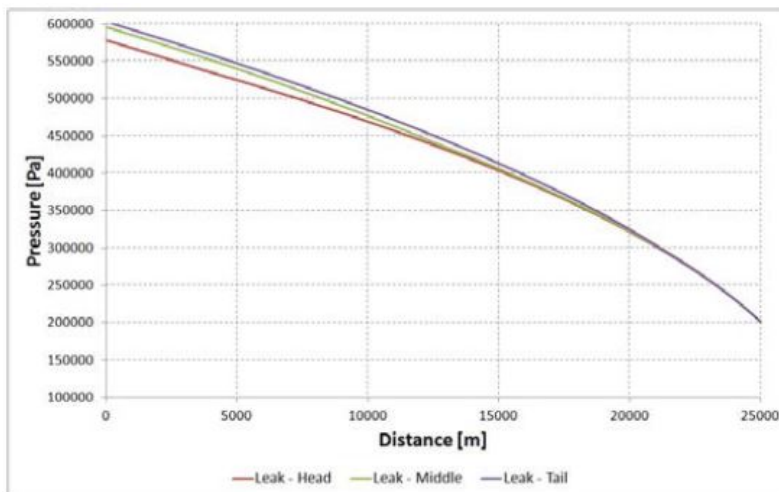
Foi avaliado um duto de 12" de diâmetro e 25km de comprimento. Diversos tamanhos e posições de vazamentos foram estudados, considerando-se velocidades

de entrada fixas para cada fase, e pressão constante na saída do duto. A fração volumétrica do gás foi também fixada em 0,058.

A Figura 2.21 exemplifica resultados encontrados por Bueno et al. (2014) para dois diâmetros de vazamentos.



(a)



(b)

Figura 2.21: Amostra de resultados obtidos por Bueno et al. (2014).

Concluiu-se que, dependendo do tamanho do vazamento, a estratégia de interseção de pressões, comumente utilizada na avaliação de escoamentos monofásicos, pode ser estendida também para escoamentos bifásicos em regime estratificado.

Capítulo 3

Formulação Matemática

Neste capítulo são apresentadas as equações governantes utilizadas na solução de um problema de vazamento. Essas equações sofrem variações resultantes, por exemplo, do número de dimensões consideradas, da condição de modelagem do fluido (compressível ou incompressível), e da hipótese temporal utilizada (escoamento transiente ou permanente).

Serão explicitadas aqui as equações para escoamento tridimensional, compressível e incompressível, já que o escopo do trabalho inclui líquidos e gases. O passo a passo do desenvolvimento destas equações não será demonstrado, já que é amplamente documentado em livros textos de mecânica dos fluidos, como por exemplo Kundu e Cohen (2002).

3.1 Equações Gerais de Dinâmica dos Fluidos

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento, e energia podem ser escritas da seguinte forma (Malalasekera e Versteeg, 1995):

- Equação de Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3.1)$$

- Equações de Quantidade de Movimento Linear:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (3.2)$$

onde τ é o tensor de tensões, e é definido, para fluidos newtonianos, pela seguinte equação constitutiva 3.3.

$$\tau = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} \delta \right) \quad (3.3)$$

sendo δ o tensor delta de Kronecker; $\mathbf{S}_M$ engloba os termos fontes de *momentum* presentes no modelo, inclusive o gravitacional.

- Equação de Energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \Delta T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \tau) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (3.4)$$

sendo $\mathbf{S}_E$ o somatório de termos fontes da equação de energia; $\nabla \cdot (\mathbf{U} \tau)$ representa a dissipação viscosa, modelando o aquecimento interno devido à viscosidade do fluido, e é desprezível na maioria das aplicações; h_{tot} é a entalpia total, formada pela entalpia estática h e por energia cinética por unidade de massa, conforme a Equação 3.5;

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}(\mathbf{U} \cdot \mathbf{U}) \quad (3.5)$$

Essas equações são válidas para fluidos compressíveis. Em escoamentos incompressíveis, é possível simplificar a modelagem consideravelmente, como será discutido na Seção 3.2.

A equação de energia não será resolvida neste trabalho, pois será considerado escoamento isotérmico. Esse modelo é utilizado na maior parte dos estudos sobre vazamentos, conforme visto no Capítulo 2.

Em fluidos compressíveis, já que a temperatura é tida como constante, a massa específica do fluido varia apenas com a pressão. Nesse caso, será utilizada a hipótese de gases ideais, que segue a equação constitutiva definida na Equação 3.6.

$$\rho = \frac{w p_{abs}}{R_0 T} \quad (3.6)$$

onde w é o peso molecular do gás, p_{abs} a pressão absoluta e R_0 a constante universal dos gases.

Como neste trabalho serão avaliados apenas dutos horizontais, não é esperado que a variação de massa específica cause um termo de empuxo muito alto. Entretanto, ANSYS® (2015) recomenda a modelagem do termo de empuxo sempre que o escoamento for multifásico ou multicomponente, ou houver qualquer variação de massa específica ao longo da simulação.

Sendo assim, o termo gravitacional será modelado, conforme a Equação 3.7. A diferença de massa específica $\rho - \rho_{ref}$ é calculada diretamente através da formulação de Empuxo Pleno (*Full Buoyancy Model*).

$$\mathbf{S}_{M,buoy} = (\rho - \rho_{ref})\mathbf{g} \quad (3.7)$$

3.2 Equações Governantes em Escoamentos Incompressíveis

Fluidos incompressíveis são caracterizados por ter sua massa específica constante. Nesse caso, as equações que regem seu escoamento podem ser reduzidas às Equações 3.8 e 3.9.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3.8)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (3.9)$$

Note que, para o caso incompressível, o tensor de tensões é simplificado através da Equação de Continuidade (3.8), e o termo de dissipação é dado pela Equação 3.10.

$$\nabla \boldsymbol{\tau} = \mu \nabla [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] = \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (3.10)$$

Sendo assim, a equação de conservação de quantidade de movimento é reescrita como 3.11, que é a forma clássica da equação de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{S}_M \quad (3.11)$$

3.3 Modelagem de Turbulência

A turbulência consiste em flutuações do campo de escoamento no tempo e espaço. Por ser uma condição irregular do fluido, tem um impacto significativo nas características do escoamento.

Como a maior parte dos escoamentos de interesse da engenharia são turbulentos, a modelagem apropriada da turbulência é um dos fatores principais de uma simulação CFD bem sucedida.

A princípio, as equações de Navier-Stokes descrevem tanto escoamentos laminares quanto turbulentos. Entretanto, escoamentos turbulentos em velocidades realistas englobam uma faixa ampla de escalas de tempo e espaço, incluindo escalas muito menores que uma malha de elementos finitos média. Essa característica inviabiliza a solução numérica direta da turbulência (DNS) para a maior parte das aplicações, pois haveria necessidade de poder computacional ordens de grandeza maior do que está disponível atualmente.

Sendo assim, foram desenvolvidos diversos modelos para a previsão da turbulência, a maior parte deles com base estatística. Os mais utilizados são os baseados em médias de Reynolds (RANS), que separa as características do escoamento em um termo médio e uma flutuação, como na Equação 3.12 (Pope, 2000). O mesmo princípio é aplicado de maneira análoga a outras propriedades do escoamento (pressão, massa específica, temperatura, etc).

$$\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u} \quad (3.12)$$

A velocidade média é dada através da Equação 3.13, na qual Δt é uma escala de tempo considerada grande em relação às flutuações permanentes, mas pequeno em relação à escala de solução das equações.

$$\bar{U}_i = \int_t^{t+\Delta t} U_i dt \quad (3.13)$$

O princípio desta aproximação é exposto graficamente através da Figura 3.1. É importante destacar que, apesar da turbulência ser intrinsecamente transiente, os modelos RANS permitem sua simplificação para estado permanente, onde se considera que a variação da turbulência em termos macroscópicos é pequena o suficiente

para ser descartada (Figura 3.1b).

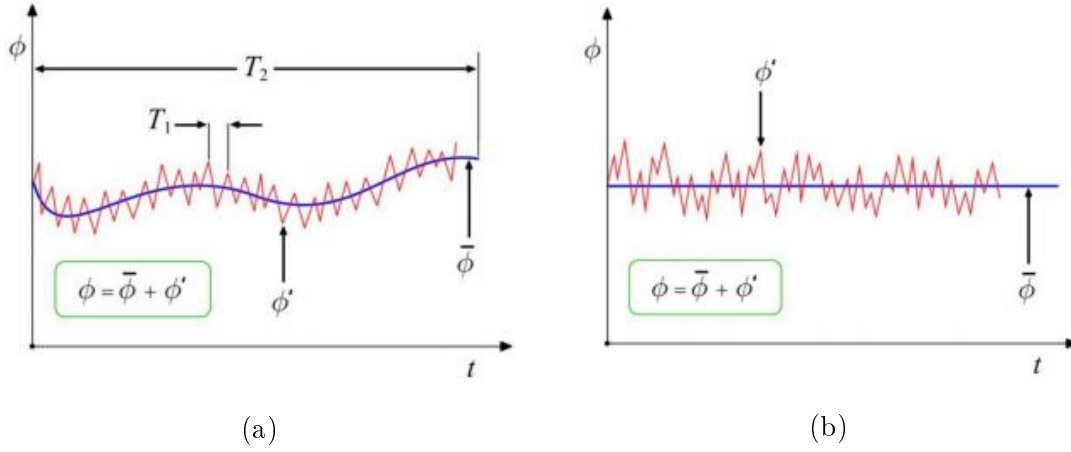


Figura 3.1: Médias de Reynolds em regime transiente (a) e permanente (b).

Utilizando o conceito de médias de Reynolds, as equações de transporte se tornam equivalentes às Equações 3.14 e 3.15. Por simplicidade, o símbolo $\bar{U}$ será substituído por U em relação às médias turbulentas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M \quad (3.15)$$

O termo $\overline{u_i u_j}$ é interpretado fisicamente como a contribuição média das flutuações turbulentas de velocidade à quantidade de movimento, e denominado Tensor de Reynolds.

As tensões de Reynolds são cruciais para a modelagem turbulenta, já que as tensões extras geradas em um escoamento turbulento são consideravelmente maiores que a contribuição viscosa $\mu[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T]$ na região de escoamento livre (Pope, 2000). Apenas próximo a paredes, onde as flutuações são pequenas, os termos viscoso e turbulento são equiparáveis.

O tensor de Reynolds, em três dimensões, é composto por nove componentes. As componentes na diagonal são as tensões normais presentes, e as tensões cisalhantes estão fora da diagonal. Se as flutuações turbulentas puderem ser consideradas

completamente isotrópicas, o tensor de Reynolds é simétrico, e dado por 3.16.

$$\begin{bmatrix} -\rho \overline{u^2} & -\rho \overline{uv} & -\rho \overline{uw} \\ -\rho \overline{uv} & -\rho \overline{v^2} & -\rho \overline{vw} \\ -\rho \overline{uw} & -\rho \overline{vw} & -\rho \overline{w^2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Observando-se as equações 3.14 e 3.15, pode-se perceber que o sistema a ser resolvido para um escoamento turbulento apresenta dez variáveis independentes (três componentes de velocidade U_i , pressão e os seis componentes do tensor de Reynolds), para quatro equações de conservação (continuidade e três equações de quantidade de movimento linear). Esse desbalanceamento no sistema caracteriza o chamado problema de fechamento da turbulência, e é contornado através dos modelos de turbulência.

Dentre os modelos RANS, os mais populares são os de duas equações, nos quais a viscosidade e a difusividade turbulentas são determinadas. Códigos comerciais de CFD disponibilizam diversos modelos RANS de duas equações, dentre os quais destacam-se os modelos $k - \epsilon$, $k - \omega$ e SST (*Shear Stress Transport*).

O modelo $k - \epsilon$ baseia-se nas escalas turbulentas de altos número de Reynolds. Sendo assim, é preciso na região de escoamento livre, porém não obtém bons resultados em regiões próximas à camada limite, já que nessas regiões a velocidade é muito baixa.

O modelo $k - \omega$, ao contrário de $k - \epsilon$, foi desenvolvido para atingir melhores resultados próximo a paredes. Entretanto, ele é mais sensível às condições de contorno, principalmente na região de escoamento livre. Dependendo dos valores especificados para ω no contorno, uma variação significativa nos resultados é observada (Wilcox, 1988).

O modelo SST, introduzido por Menter (1994), combina as vantagens de $k - \epsilon$ e $k - \omega$, selecionando automaticamente entre os dois. Nesse caso, $k - \omega$ é utilizado em regiões próximas à parede, e $k - \epsilon$ na região de escoamento livre. Na Seção 3.3.1 serão discutidos os principais conceitos do modelo SST.

3.3.1 Formulação do Modelo SST

A proposta básica do modelo SST consiste em encarar a turbulência como pequenos "turbilhões" sendo continuamente formados e dissipados (Pope, 2000). Nestes "turbilhões", as tensões de Reynolds são consideradas proporcionais aos gradientes médios de velocidade, conforme a Equação 3.17.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.17)$$

onde μ_t é definida como a viscosidade turbulenta, que precisa ser modelada, e k é a energia cinética turbulenta, dada por $k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2}$. Note que, a partir da Equação 3.17, as flutuações turbulentas podem ser expressas através das velocidades médias, desde que a viscosidade turbulenta e a energia cinética sejam conhecidas.

Considerando uma viscosidade efetiva, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, a equação de conservação de quantidade de movimento é reescrita segundo 3.18.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3.18)$$

O termo p^* é uma pressão modificada definida como:

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$$

O termo relacionado ao divergente de velocidade, $\frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$, é desprezado nos softwares ANSYS, apesar desta simplificação não ser estritamente correta em escoamentos compressíveis (ANSYS®, 2015).

O modelo SST modela a viscosidade turbulenta a partir de energia e frequência turbulentas, respectivamente k e ω , segundo as Equações 3.19 e 3.20.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ & + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b} \end{aligned} \quad (3.20)$$

As funções de transição, F_1 e F_2 , são os elementos de ligação entre os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$, permitindo ao modelo SST selecionar automaticamente entre os dois de acordo com a região do domínio a ser resolvida. São definidas através das Equações 3.21 e 3.22.

$$F_1 = \tanh(arg_1^4) \quad (3.21)$$

$$F_2 = \tanh(arg_2^2) \quad (3.22)$$

Os argumentos das funções de transição são

$$arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right]$$

$$arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right)$$

sendo y a distância desde a parede. O termo $CD_{k\omega}$ é dado por:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$$

Nos modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$, as equações base contém uma série de constantes, conforme a Tabela 3.1. O índice 1 corresponde ao modelo $k-\epsilon$ e o índice 2 ao $k-\omega$.

No modelo SST, é utilizado o índice 3 nas Equações 3.19 e 3.20 para indicar uma combinação linear entre essas constantes, e incluindo a função de transferência, conforme 3.23.

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (3.23)$$

Ao simular um escoamento turbulento, a malha computacional é de extrema importância, especialmente a discretização da região de camada limite. Isso é especialmente verdadeiro no modelo SST, já que as funções de transição dependem da distância de um elemento à parede.

Para que as vantagens do modelo SST sejam alcançadas, é preciso que a resolução da malha na camada limite seja de pelo menos dez nós, e que tenha elementos de tamanhos apropriados. Isso porque, longe da parede, o modelo SST remonta ao

Tabela 3.1: Constantes empregadas na modelagem de turbulência.

Constante	Valor
β'	0,09
α_1	5/9
β_1	0,075
σ_{k1}	2
$\sigma_{\omega 1}$	2
α_2	0,44
β_2	0,0828
σ_{k2}	1
$\sigma_{\omega 2}$	1/0,856

$k - \epsilon$, que usa funções de parede baseadas em dados empíricos para aproximar o escoamento na camada limite.

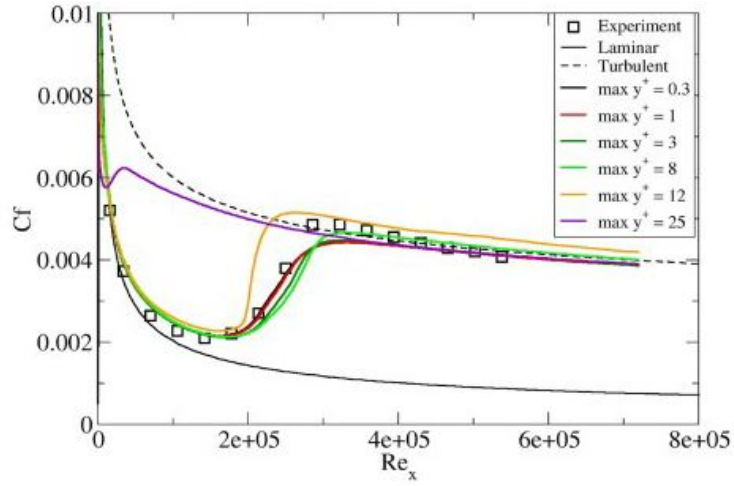
O parâmetro y^+ , definido segundo a Equação 3.24, é utilizado tradicionalmente nas leis de parede da teoria de camada limite, e utilizado em CFD para definir se um elemento utiliza o modelo de baixo Reynolds ou de alto Reynolds. Um $y^+ < 5$ representa um elemento inteiramente na subcamada viscosa, e portanto com perfil de velocidade laminar. Já um $y^+ > 30$ adota um comportamento totalmente turbulento, sob a lei logaritma de velocidade (Ariff et al., 2009).

$$y^+ = \frac{u_\tau \Delta y}{\nu} \quad (3.24)$$

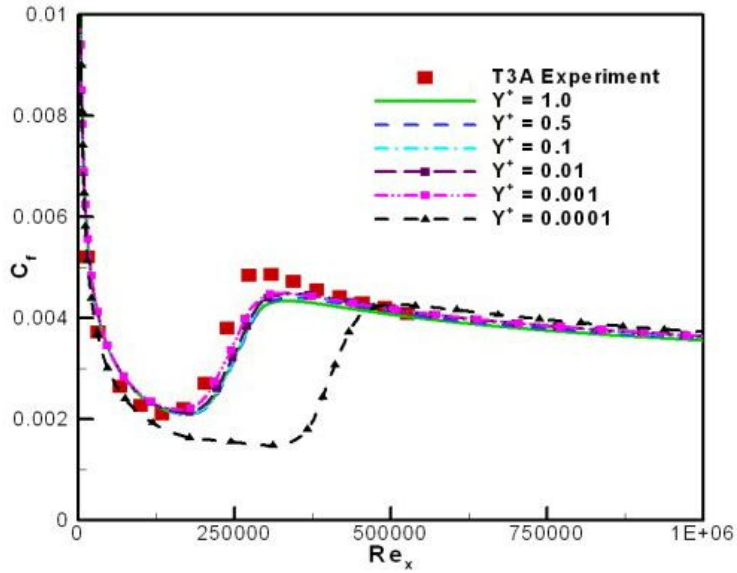
onde $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ é a velocidade de fricção. A tensão cisalhante na parede, τ_w , pode ser aproximada através de correlações conhecidas na literatura. Δy é o tamanho de um elemento a partir da parede.

É comum que seja indicada, dentre as limitações de um modelo de turbulência, a faixa aceitável de y^+ do primeiro elemento em relação à superfície. Isso ocorre em geral mesmo que o y^+ não seja usado diretamente no modelo, como um indicador de que a malha é representativa o bastante para uma boa solução.

No modelo SST, o y^+ dito ideal é 1 . Entretanto, esse valor frequentemente implica em tamanhos de malha proibitivos em termos de custo computacional. É



(a)



(b)

Figura 3.2: Influência do y^+ na resolução do modelo SST (ANSYS®, 2015).

portanto recomendável não exceder $y^+ = 10$, acima do qual o modelo perde precisão, conforme pode ser observado na Figura 3.2a.

Há também um limite mínimo de y^+ , observado na Figura 3.2b, abaixo do qual o modelo SST não é mais válido. Esse limite é raramente atingido, a não ser em testes de modelo, devido ao excessivo poder computacional necessário para simular uma malha nessas condições.

Os testes apresentados na Figura 3.2 representam a influência de y^+ no escoamento sobre uma placa plana. Esses testes estão disponíveis no manual de verificação da ANSYS (ANSYS®, 2015)

3.4 Modelagem de Escoamentos Bifásicos

A metodologia de modelagem numérica de escoamentos multifásicos depende essencialmente da topologia das fases, a saber, escoamento disperso (bolhas, partículas) ou separado (fases de fluido com interfaces bem definidas), segundo Ishii (1990). Neste trabalho, é realizada uma análise preliminar de um escoamento bifásico estratificado, portanto algumas definições para escoamento separado serão resumidas nesta seção.

Primeiramente, são definidas as principais propriedades empregadas na análise de escoamentos bifásicos, sempre ponderadas pela fração volumétrica das fases, definidas por:

- Fração Volumétrica de cada fase q , α_q . A soma das frações volumétricas de todas as fases é igual a 1.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.25)$$

- Velocidade de mistura:

$$V = \sum_{q=1}^n \alpha_q v_q \quad (3.26)$$

- Pressão total de mistura:

$$P = P_s + \sum_{q=1}^n \frac{1}{2} \alpha_q \rho_q v_q^2 \quad (3.27)$$

Foi empregada a formulação Euleriana-Euleriana para modelar o escoamento bifásico. Esta abordagem permite que múltiplas fases sejam tratadas como independentes, havendo interação entre elas apenas em suas interfaces. Esta metodologia considera que um perfil de pressão único é compartilhada por todas as fases, e resolve as equações de continuidade (3.28) e conservação de quantidade de movimento (3.29) para cada uma das fases (ANSYS®, 2015).

$$\nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3.28)$$

$$\nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_q + \rho_q \alpha_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_p - \dot{m}_{qp} \mathbf{v}_q) + \mathbf{F}_q \quad (3.29)$$

onde $\dot{m}_{pq}$ representa a transferência de massa da fase p para a fase q ; o termo τ é o tensor de tensões da fase; $\mathbf{R}_{pq}$ representa a interação entre fases; $\mathbf{F}_{\mathbf{q}}$ são forças externas que atuam sobre a fase, referentes a rugosidade, lubrificação, efeitos turbulentos, ou outros termos fontes.

A interação entre fases, $\mathbf{R}_{pq}$, necessita de uma equação adicional de fechamento, que depende da pressão, fricção, coesão entre fases, entre outros fatores. Como duas fases têm interações opostas e de mesmo módulo entre si, por conservação, a equação de fechamento é sujeita à condição de que $\mathbf{R}_{pq} = \mathbf{R}_{qp}$. A interação entre fases é dada pela Equação 3.30.

$$\sum_{p=1}^n \mathbf{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq}(\mathbf{v}_{\mathbf{p}} - \mathbf{v}_{\mathbf{q}}) \quad (3.30)$$

sendo K_{pq} o coeficiente de transferência de *momentum* interfacial, calculado através do coeficiente de atrito e da área interfacial entre fases.

Capítulo 4

Procedimento de Modelagem

Neste capítulo, são resumidos alguns princípios básicos da modelagem por fluidodinâmica computacional, suas principais etapas, segundo Malalasekera e Versteeg (1995), princípios de verificação e validação numérica (Roy, 2005), definição de malhas computacionais, e métodos de análise de convergência (ANSYS®, 2015).

4.1 Fluidodinâmica Computacional

A técnica CFD permite agregar diversas informações sobre um problema físico, ou equipamento, com menor custo e em um espaço mais curto de tempo, pois diminui significativamente o número de protótipos ou experimentos necessários. Possibilita também avaliar mais detalhadamente o fenômeno, já que não é limitada aos locais de instalação de sensores e medidores para obtenção de resultados.

O modelo CFD empregado neste trabalho se utiliza de técnicas numéricas para a discretização do domínio de fluido estudado, e emprega o método de volumes finitos para converter as equações diferenciais apresentadas no Capítulo 3 em sistemas de equações algébricas.

A discretização é realizada através da geração de malhas, que podem ser estruturadas (uniformes ou não), não estruturadas, ou híbridas, conforme exemplificado na Figura 4.1. Malhas estruturadas são formadas por elementos hexaédricos, e cada elemento possui sempre o mesmo número de elementos vizinhos. Malhas não estruturadas possuem elementos de geometrias diversas, como tetraedros, prismas e pirâmides, cujo número de células vizinhas não é uniforme ao longo da malha. É um

tipo de malha mais adequado a geometrias complexas, por sua facilidade de geração. Já malhas híbridas são uma combinação dos dois tipos de malha, sendo cada um utilizado em uma região do domínio.

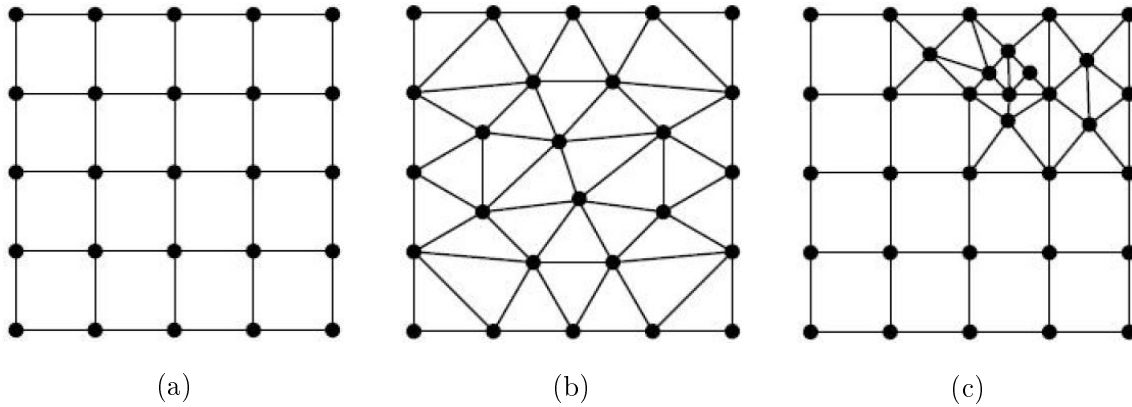


Figura 4.1: Tipos de malha computacional: estruturada (a), não estruturada (b), ou híbrida (c) (ANSYS®, 2015).

O procedimento de solução para modelos CFD passa pelas seguintes etapas:

- **Definição da região fluida:** é necessário primeiramente definir qual é a região de interesse a ser modelada em uma simulação, e que simplificações podem ser feitas. Esse processo inclui a retirada de elementos considerados não essenciais ao escoamento (adoçamentos, elementos de ligação, etc.); definição de simetria, axisimetria, ou periodicidade, quando apropriado; e adaptação do domínio fluido a áreas onde as condições de contorno são conhecidas.
- **Geração de geometria e malha**
- **Definição dos modelos físicos:** nesta etapa, as condições de contorno são prescritas, bem como as propriedades dos fluidos em estudo. Os modelos computacionais apropriados (transiência, turbulência, empuxo, entre outros.) também são determinados.
- **Solução do problema:** integração e resolução numérica das equações de interesse em todos os elementos da malha, de forma iterativa, mediante critérios de convergência. O critério padrão é definido a partir da diferença de resultados (pressão, componentes de velocidade, entalpia, etc.), em cada elemento entre uma iteração e outra. Outros critérios podem ser definidos, sendo o mais

comum o monitoramento das variáveis de conservação (massa, quantidade de movimento linear e energia) no volume de controle.

- **Visualização de resultados e pós processamento**

4.2 Verificação Numérica

Verificação e validação, apesar de palavras sinônimas, assumem sentidos diferentes em linguagem computacional. Verificação é um processo relacionado à obtenção de equações numéricas corretas para um dado modelo. Já validação relaciona-se ao problema físico em estudo, e objetiva determinar quanto os resultados se aproximam de dados experimentais conhecidos. Em resumo, segundo Menter (1994), verificação visa assegurar que as equações diferenciais parciais sejam resolvidas corretamente, e validação confere se o modelo representa a realidade.

A verificação é dividida em dois tipos. O primeiro é relativo aos códigos CFD, a fim de detectar erros de programação ou inconsistências nos algoritmos. É realizada pelos desenvolvedores dos códigos. O segundo tipo de verificação estima erros numéricos e incertezas de resultado para aplicações específicas. Sendo assim, é feita por usuários do código, principalmente no âmbito de pesquisa.

Roy (2005) revisa os procedimentos de verificação para simulações computacionais, e explicita os principais tipos de erros encontrados. As três maiores fontes de erro computacional em uma simulação numérica são:

- **Erros de arredondamento (*round-off*)**: ocorrem devido ao armazenamento finito no computador das casas decimais de uma variável. Esse tipo de erro é particularmente crítico para sistemas mal condicionados, e em análises transientes, porém afeta toda simulação numérica em menor grau. Pode ser mitigado apenas com o uso de mais algoritmos significativos na definição de variáveis; sendo assim, para este trabalho, todas as simulações foram realizadas com precisão dupla de armazenamento.
- **Erros de iteração**: em uma simulação por volumes finitos, métodos iterativos são utilizados para resolver o sistema linear que representa as equações diferenciais. Consequentemente, é impossível encontrar a solução exata do sis-

tema, e a simulação é considerada completa quando a diferença relativa entre os resultados de uma iteração (resíduos) e outra alcançam um determinado parâmetro de convergência.

O monitoramento de convergência pode ser feita através da média dos resíduos em todos os elementos do volume de controle (mais comum), ou do resíduo máximo em todo o volume de controle (critério mais restrito). Neste trabalho, foi utilizado o resíduo máximo em todas as simulações, para minimizar o erro iterativo.

Outra abordagem é monitorar quão próxima a solução está da conservação completa de massa, quantidade de movimento, e energia. Esta abordagem foi também aplicada neste trabalho, e as simulações foram consideradas convergidas apenas quando os critérios de ambos os métodos foram atingidos.

- **Erros de discretização:** uma simulação computacional bem sucedida depende de uma discretização adequada do domínio de fluido. É necessário que a malha utilizada no modelo seja de boa qualidade, e seus elementos refinados o suficiente para não interferir diretamente nos resultados. Baker (2005) resume os algoritmos utilizados para diversos métodos de geração de malha, bem como as principais vantagens de cada método. Este tópico é discutido mais detalhadamente na Seção 4.3.

4.3 Definição da Malha Computacional

Uma malha adequada é fundamental para uma simulação numérica, sendo o controle mais efetivo para erros de discretização. É importante também para evitar erros de *round-off* durante a solução dos sistemas lineares que caracterizam o modelo. A geração de uma malha de qualidade depende da escolha do tipo de elemento utilizado (tetraédrico ou hexaédrico), e da verificação de métricas que estimam a deformação desses elementos.

Deve-se também verificar se a malha gerada é refinada o suficiente para que a solução independa da disposição de seus elementos. Isso é realizado individualmente para cada modelo, através de testes de convergência e sensibilidade de malha.

4.3.1 Tipos de Elemento

Malhas computacionais são compostas, predominantemente, de elementos tetraédricos e hexaédricos, exemplificados na Figura 4.2. Em geral, o tipo de elemento de uma malha é escolhido com base em seu tempo de pré-processamento, custo computacional durante a solução, e acurácia numérica.

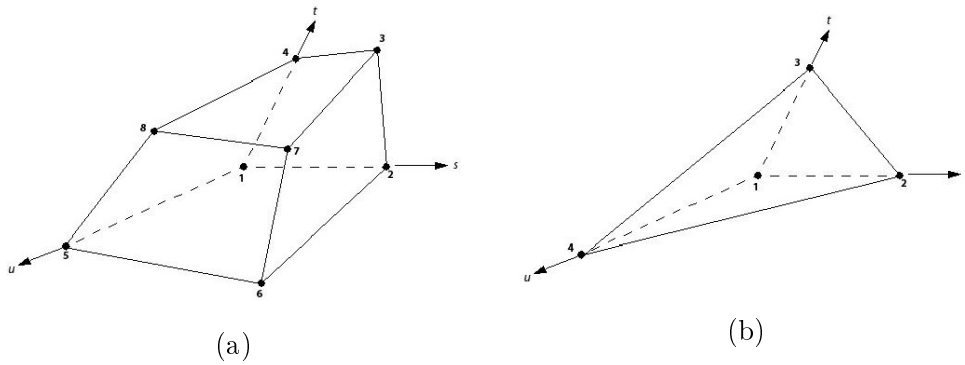


Figura 4.2: Principais tipos de elementos: (a) hexaédrico e (b) tetraédrico (ANSYS®, 2015).

Elementos tetraédricos se adequam facilmente a geometrias complexas e, em códigos comerciais, podem ser gerados com algoritmos automáticos. Já malhas com elementos hexaédricos frequentemente necessitam de decomposições geométricas ou construção manual da malha, o que pode aumentar consideravelmente o tempo de pré-processamento de uma análise. Por esse motivo, malhas tetraédricas são predominantes em aplicações industriais. Entretanto, malhas hexaédricas necessitam de menor poder computacional durante a solução que uma malha tetraédrica equivalente (ANSYS®, 2015). Sendo assim, é frequentemente mais rápido completar uma simulação com malha hexaédrica.

A diferença de acurácia entre os dois tipos de malha foi, no passado, um argumento proibitivo ao uso de malhas tetraédricas. Porém atualmente, os solvers comerciais têm algoritmos robustos o suficiente para resolver malhas não estruturadas com precisão, tornando a escolha do tipo de elemento dependente do tipo de fenômeno modelado.

Com frequência, escoamentos têm comportamento direcional, como por exemplo o perfil de escoamento em torno de um aerofólio, ou interno a um duto. Em casos de escoamento direcional, é indicado que a orientação da malha siga a direção do

escoamento, o que pode ser atingido através das faces de elementos hexaédricos. Já em uma malha tetraédrica haverá, necessariamente, elementos com faces que cruzam a direção do escoamento. Por esse motivo, neste trabalho foram utilizadas malhas hexaédricas, conformes, em todos os modelos estudados.

4.3.2 Qualidade dos Elementos

A qualidade de malha influencia diretamente, tanto na convergência de uma simulação, quanto em seus resultados. A Figura 4.3 exemplifica esta influência, comparando os resultados encontrados em uma simulação estrutural com malha de baixa qualidade (a) e boa qualidade (b). É notável como elementos muito deformados acarretam em concentração de gradientes na região afetada do domínio.

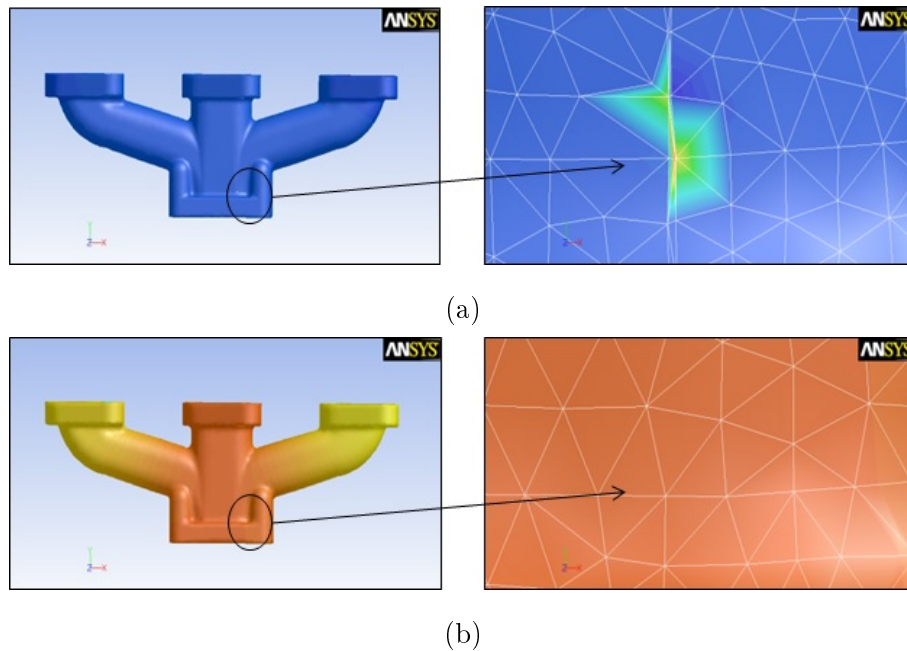


Figura 4.3: Impacto na solução, considerando uma malha de (a) baixa qualidade e (b) boa qualidade.

Há diversos critérios disponíveis para avaliar a qualidade de malha, e medir a deformação de seus elementos. A principal métrica está relacionada com a ortogonalidade dos elementos, ou seja, quão próximos os ângulos entre faces adjacentes dos elementos se aproximam do ângulo ótimo (90° para hexaedros). A Equação 4.1 apresenta o cálculo utilizado na determinação do parâmetro de qualidade ortogonal,

para cada face do elemento.

$$\theta = \min \left(\frac{\vec{A}_i \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}, \frac{\vec{A}_i \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \right) \quad (4.1)$$

onde A_i é a normal da face do elemento, f_i é um vetor do centróide do elemento ao centróide da face, e c_i é um vetor do centróide do elemento ao centróide do elemento vizinho que compartilha a face em questão. A qualidade ortogonal do elemento é dada pelo menor valor calculado em todas as suas faces. A Figura 4.4 ilustra os vetores dos elementos empregados no cálculo.

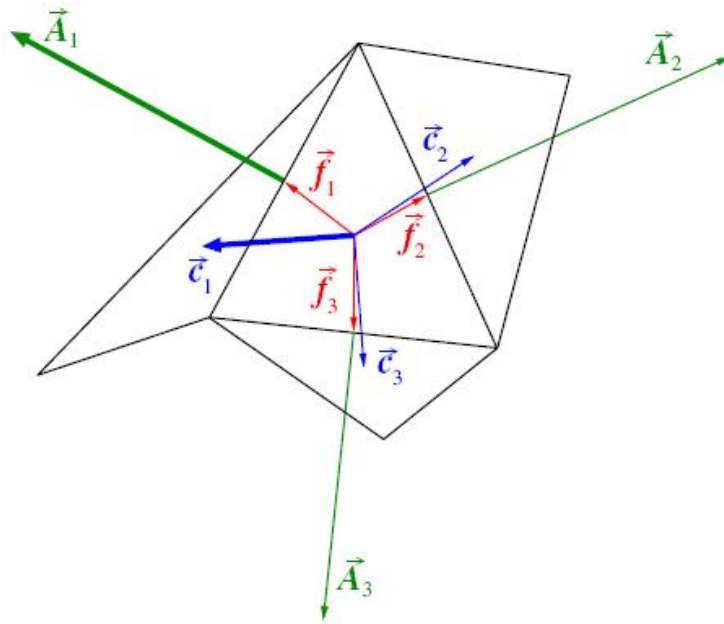


Figura 4.4: Vetores empregados no cálculo de qualidade ortogonal.

Valores de qualidade ortogonal acima de 0,1 (10% de deformação) são considerados aceitáveis, e indicam malhas de qualidade razoável, segundo a Figura 4.5 (ANSYS®, 2015). O valor máximo de θ é 1, que representa o elemento ideal.

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 4.5: Medida de qualidade ortogonal.

Neste trabalho, o critério mínimo de qualidade ortogonal foi fixado em 0,2, e assegurou-se de que ao menos 90% dos elementos tenham qualidade ortogonal acima de 0,8, em todas as malhas estudadas.

4.3.3 Convergência e Sensibilidade de Malha

Finalmente, é aconselhável realizar um estudo de convergência e/ou sensibilidade de malha, de modo a demonstrar que os resultados obtidos independem da resolução da malha.

Em um estudo de convergência de malha, resultados são avaliados em regiões de interesse do estudo. Podem ser comparados valores em um ponto, ou resultados médios em um plano de corte, por exemplo. Conforme a malha é refinada e aprimorada, a variação de resultados nestas regiões diminui, e assume comportamento assintótico, independente da malha. Se a simulação foi bem definida, a assíntota corresponde ao resultado real da aplicação estudada.

A Figura 4.6 exemplifica um gráfico clássico de convergência de malha. A malha é considerada convergida quando a diferença de propriedades entre malhas é menor que um parâmetro predefinido, em geral entre 1 e 5%, dependendo da precisão necessária para o modelo.

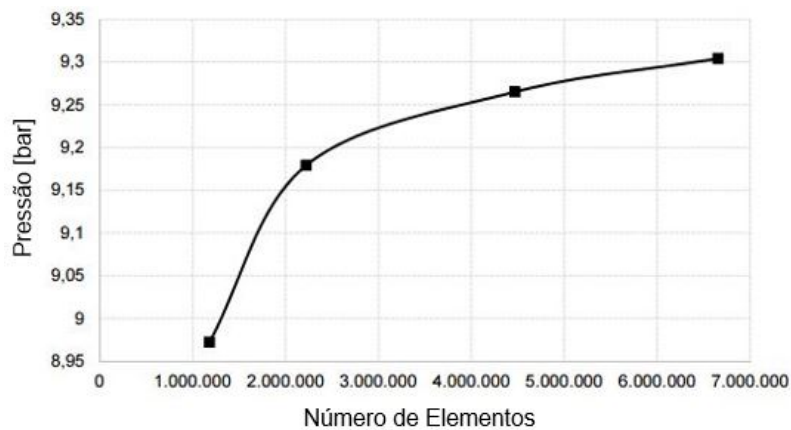


Figura 4.6: Exemplo de um estudo de convergência de malha.

Já em um estudo de sensibilidade de malha, propriedades consideradas importantes no estudo (velocidade, pressão, etc) são comparadas ao longo de uma linha do domínio. O propósito é garantir, não que a solução é independente da malha, mas que a influência da malha nas propriedades estudadas é baixa. Essa avaliação é realizada graficamente, e a malha é considerada suficiente refinada quando o comportamento da propriedade estudada tem variação pequena em relação a outras malhas.

Testes de sensibilidade de malha, apesar de geralmente avaliar uma maior ex-

tensão do domínio, são limitados, pois dependem diretamente do usuário para a avaliação da malha. Como não há parâmetros numéricos de avaliação, o conceito de "variação pequena" entre malhas torna-se subjetivo. Nesse caso, várias propriedades e regiões do domínio devem ser estudadas para obter uma interpretação ampla dos resultados.

Neste trabalho, ambos os cenários foram estudados, de modo a garantir a melhor malha possível para as análises.

4.4 Análise de Convergência

A convergência em simulações CFD é, em geral, monitorada a partir de resíduos numéricos. Para cada iteração, um resíduo, definido como a diferença normalizada entre a iteração vigente e a anterior, é calculado. Há dois tipos de resíduos:

- Resíduo Médio (RMS): é obtido através da Equação 4.2, onde R_i é o resíduo calculado em cada elemento da malha. ANSYS® (2015) recomenda um alvo RMS de 10^{-5} para problemas de engenharia nos quais seja necessária alta precisão, ou estudos acadêmicos.

$$RMS = \sqrt{\sum R_i^2} \quad (4.2)$$

Como o RMS depende de todos os elementos da malha, este tipo de resíduo não é indicado para modelos nos quais a região principal de interesse seja relativamente pequena (vazamentos, dispersão de gases, etc), já que o erro nesta região será mitigado pelo restante do domínio.

- Resíduo Máximo (MAX): representa o resíduo máximo (em módulo) encontrado no domínio. É um critério de convergência mais apertado que o RMS. De fato, ANSYS® (2015) estima que o resíduo máximo costuma ser, pelo menos, 10 vezes maior que o RMS em aplicações regulares, e consideravelmente maior em escoamentos externos ou quando a região de interesse é uma área pequena do domínio.

Outro critério comum de convergência é monitorar o erro real de cada equação de continuidade (massa, quantidade de movimento nas 3 direções, energia). Este cri-

tério, denominado *Imbalance*, é considerado irrelevante em casos não compressíveis (ANSYS®, 2015), porém pode ser predominante em escoamentos compressíveis, e deve ser avaliado nestes casos.

Neste trabalho, foi empregado um resíduo máximo de 10^{-5} como critério de convergência, para todos os modelos. Para os modelos com fluido gasoso, compressíveis, foi definido também um *Imbalance* máximo de 10^{-5} para todas as equações de continuidade. A solução é considerada convergida quando todos os critérios de convergência são atingidos.

Capítulo 5

Resultados: Escoamento Líquido

Foram estudados perfis de vazamento, para escoamentos de líquidos e de gases. As simulações foram realizadas através do software comercial ANSYS CFX 16.1. Considerou-se escoamento tridimensional e turbulento em todos os casos. O modelo SST, cuja formulação é apresentada na Seção 3.3.1, foi utilizado em todos os casos simulados.

Foram avaliadas a influência do vazamento nas propriedades do escoamento, variando-se diâmetro e posição do furo. Analisou-se também o quanto a hipótese de escoamento unidimensional, muito utilizada no estudo de vazamentos, se aproxima do escoamento tridimensional encontrado.

As propriedades de *hardware* do computador em que os modelos foram simulados são: 12 processadores, cada um com 2,4 GHz, 128GB de memória RAM, Windows 7 como sistema operacional.

5.1 Avaliação de Malha

Os testes de qualidade de malha para a tubulação de fluido líquido foram realizados com base na geometria empregada por Molina-Espinosa et al. (2013). A validação do modelo para esta fase também é baseada nos experimentos de Molina-Espinosa et al. (2013), e apresentada na Seção 5.2.

Os experimentos foram realizados com um tubo de PVC, considerado idealmente liso, e utilizando água como fluido de operação. Foram considerados 3 tamanhos de furo, todos circulares; na etapa de avaliação de malha, apenas o furo intermediário

foi estudado. Não foram consideradas variações de temperatura.

As propriedades geométricas utilizadas no modelo de qualidade de malha são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades geométricas do modelo empregado nos testes de malha.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro do Duto	D	12,7	mm
Comprimento do Duto	L	2,23	m
Diâmetro do Furo	d_L	7,2	mm
Posição do Furo	l_L	0,73	m

De mesma forma, as condições de contorno e propriedades do fluido utilizadas no modelo são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.2: Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo empregado nos testes de malha.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Massa Específica do Fluido	ρ	997	kg/m^3
Viscosidade do Fluido	μ	$8,90 \cdot 10^{-4}$	Pa.s
Vazão de Entrada	Q_e	$3,2 \cdot 10^{-4}$	m^3/s
Velocidade de Entrada	V_e	2,53	m/s
Pressão de Referência (absoluta)	P_{ref}	1	atm
Pressão Estática da Saída (manométrica)	P_s	81	kPa
Vazão Perdida pelo Vazamento	$\dot{m}_L$	0,0991 (31%)	kg/s

Foram avaliadas 4 malhas, conforme apresentadas na Tabela 5.3. Todas as malhas foram definidas como hexaédricas, perfeitamente estruturadas, e com elementos de qualidade ortogonal acima de 0,2 (como explicitado na Seção 4.3.2). A Figura 5.1 apresenta graficamente a disposição dos elementos da Malha 3.

Tabela 5.3: Malhas avaliadas para escoamento líquido.

	Número de Elementos	Número de Nós	Definição de y^+
Malha 1	145 mil	153 mil	20
Malha 2	242 mil	252 mil	10
Malha 3	343 mil	355 mil	7
Malha 4	442 mil	456 mil	3

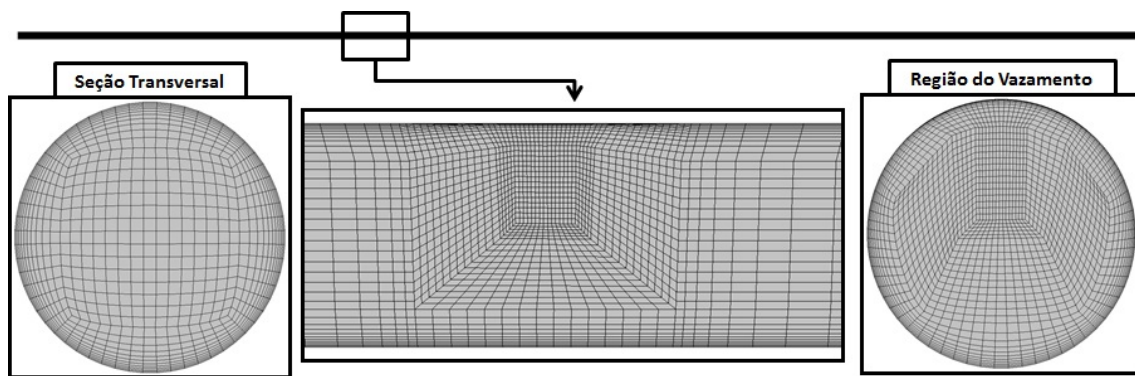


Figura 5.1: Disposição de elementos para a Malha 3.

A Figura 5.2 apresenta as regiões utilizadas nas análises de convergência e sensibilidade de malhas. Os resultados para fins de convergência de malha foram avaliados em dois pontos do domínio: ponto central e ponto a 1mm de distância do vazamento (Ponto do Vazamento), na seção transversal do vazamento. Analisou-se também dois planos, plano axial ao modelo e plano transversal na seção do vazamento, sendo comparados os resultados médios dos planos para cada malha. Já a análise de sensibilidade de malha foi feita através de duas linhas que cruzam o domínio: eixo central, e linha axial a 1mm do vazamento (Eixo do Vazamento).

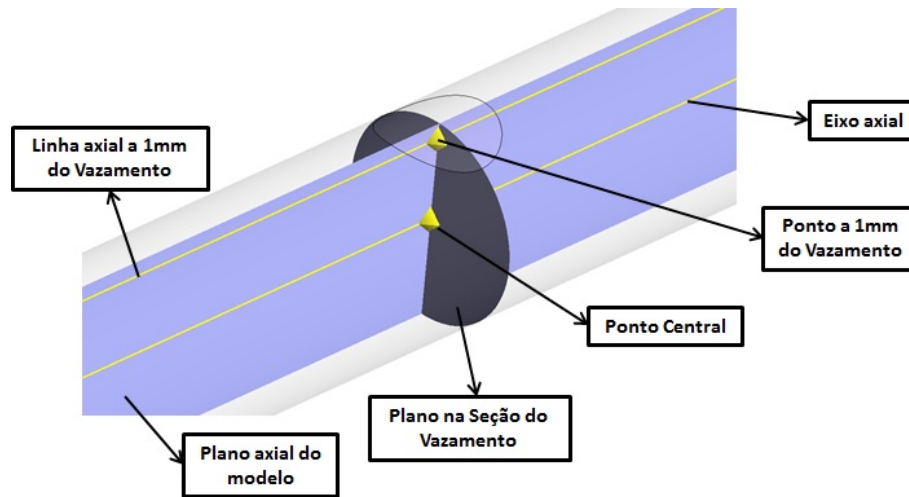


Figura 5.2: Regiões estudadas para convergência e sensibilidade de malha.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os resultados encontrados para os pontos definidos (central e a 1mm do vazamento, respectivamente), para cada malha. A malha é considerada convergida quando a diferença máxima entre malhas, em todos os parâmetros avaliados, for menor que 1%.

Destaca-se que, para fins de convergência, a velocidade (em módulo) é o parâmetro mais crítico de comparação, especialmente ao analisar o ponto próximo do vazamento.

Tabela 5.4: Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto Central.

Resultados para o Ponto Central				
Malha	Pressão [kPa]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	84,61	-	2,63	-
Malha 2	84,63	0,00	2,67	1,15
Malha 3	84,75	0,09	2,69	0,81
Malha 4	84,75	0,00	2,69	0,06

Da mesma forma, as Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados encontrados para os planos avaliados, Plano Axial e Plano Transversal, respectivamente. Novamente, a velocidade é o parâmetro mais crítico de comparação, especialmente para o Plano Transversal.

Tabela 5.5: Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto do Vazamento.

Resultados para o Ponto do Vazamento				
Malha	Pressão [kPa]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	78,53	-	4,29	-
Malha 2	80,93	3,06	3,78	11,98
Malha 3	81,43	0,61	3,63	3,76
Malha 4	81,79	0,45	3,61	0,76

Tabela 5.6: Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Axial.

Resultados para o Plano Axial				
Malha	Pressão [kPa]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	84,12	-	2,13	-
Malha 2	84,28	0,19	2,14	0,61
Malha 3	84,23	0,06	2,14	0,14
Malha 4	84,17	0,07	2,15	0,09

Na análise por planos, os resultados médios de pressão para cada malha são muito próximos, com diferença sempre abaixo de 1%. Entretanto, há um valor de máximo, relativo neste caso à Malha 2, que não corresponde ao comportamento típico de um gráfico de convergência. Isso pode ser explicado pelas diferenças qualitativas entre malhas, ou seja, devido à diferente disposição dos nós de malha ao longo do domínio de fluido a medida que é feito um refino.

Pode-se destacar que a diferença entre as Malhas 3 e 4 foi menor que 1% para todos os pontos e planos analisados, indicando que a Malha 3 é suficiente para uma boa discretização do modelo.

Adicionalmente, as Figuras 5.3 e 5.4 apresentam uma análise de sensibilidade de malhas focada através do Eixo do Vazamento, que engloba a região mais crítica da

Tabela 5.7: Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Transversal.

Resultados para o Plano Transversal do Vazamento				
Malha	Pressão [kPa]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	84,14	-	2,36	-
Malha 2	84,50	0,43	2,31	2,08
Malha 3	84,47	0,03	2,29	1,00
Malha 4	84,43	0,04	2,27	0,66

análise de malhas.

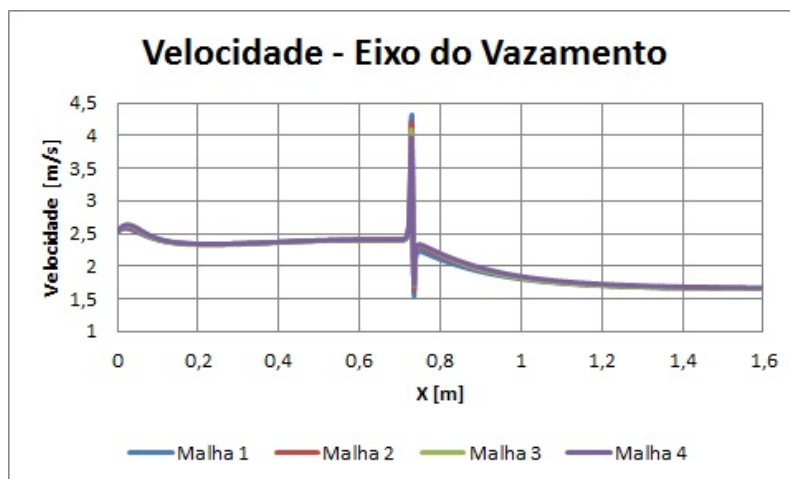


Figura 5.3: Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo do Vazamento para velocidade.

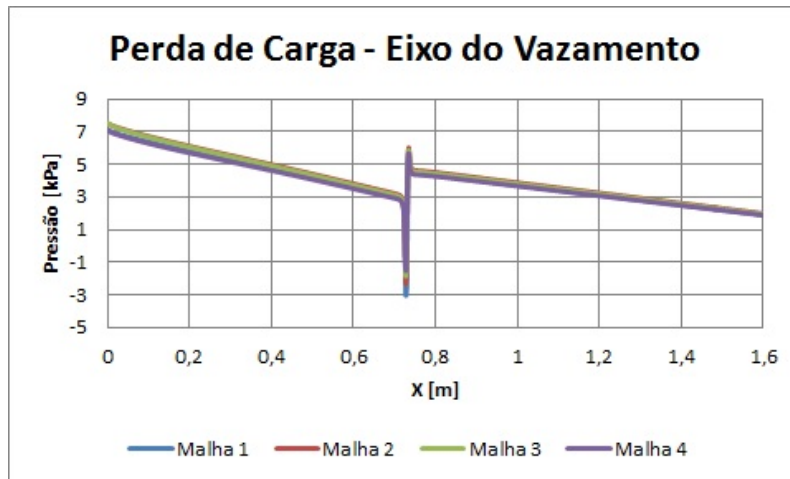


Figura 5.4: Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo do Vazamento para perda de carga.

Não foi encontrada diferença gráfica perceptível entre as 4 malhas, neste eixo, a montante ou a jusante do vazamento. Sendo assim, a Malha 3 é considerada convergida, e suas propriedades (tamanho de elemento, y^+) serão utilizadas em todas as análises posteriores com fluido líquido.

A Figura 5.5 apresenta os contornos de velocidade e pressão resultantes da simulação para esta malha.

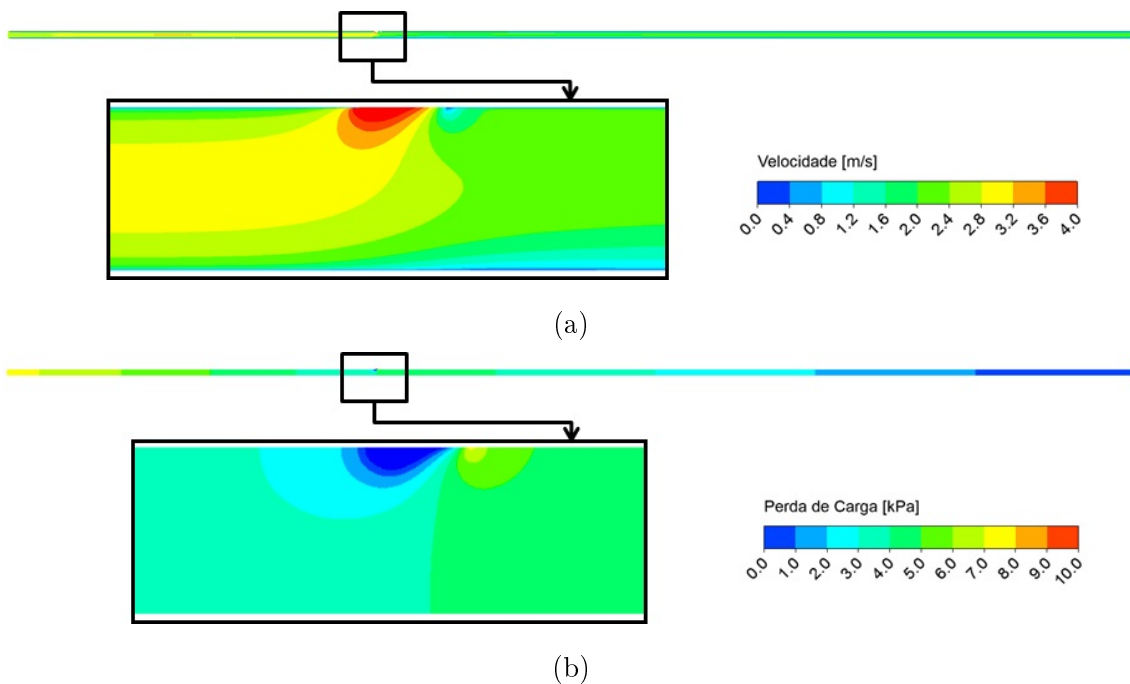


Figura 5.5: Contornos de (a) velocidade e (b) pressão para a Malha 3.

5.2 Validação

O experimento de Molina-Espinosa et al. (2013) foi também utilizado para validar a modelagem de vazamentos com fase líquida através da metodologia CFD. Neste caso, foram simulados os três casos estudados por Molina-Espinosa et al. (2013), ou seja, três tamanhos de furo acoplados a três vazões de vazamento. Foram eles:

- **Experimento 1:** Diâmetro de furo de 5,2mm, com uma vazão de vazamento de 17% ($5,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$).
- **Experimento 2:** Diâmetro de furo de 7,2mm, com uma vazão de vazamento de 31% ($9,92 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$).
- **Experimento 3:** Diâmetro de furo de 10,0mm, com uma vazão de vazamento de 49% ($1,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$).

Em todos os casos, foi utilizada a mesma pressão manométrica de saída, de 81kPa, e uma vazão de entrada de $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. As Tabelas 5.1 e 5.9 expõem mais detalhes da geometria e condições de contorno globais utilizadas nas simulações de validação.

A Figura 5.6 apresenta os resultados das simulações em comparação aos pontos experimentais encontrados por Molina-Espinosa et al. (2013). Foi encontrada boa concordância entre os pontos experimentais e as simulações. Os resultados numéricos sobrestimaram ligeiramente os pontos experimentais, especialmente para o menor diâmetro de furo, entretanto a discrepância entre soluções (em torno de 5%) permaneceu dentro da faixa aceitável de erro numérico e experimental.

Adicionalmente, a variação de pressão na região do vazamento se mostrou mais suave no experimento que no modelo. Essa característica é coerente, já que o modelo numérico não é capaz de reproduzir todas as condições do experimento, como por exemplo a influência da válvula que ajusta o vazamento.

O modelo numérico foi capaz de reproduzir adequadamente os resultados experimentais, e é considerado validado.

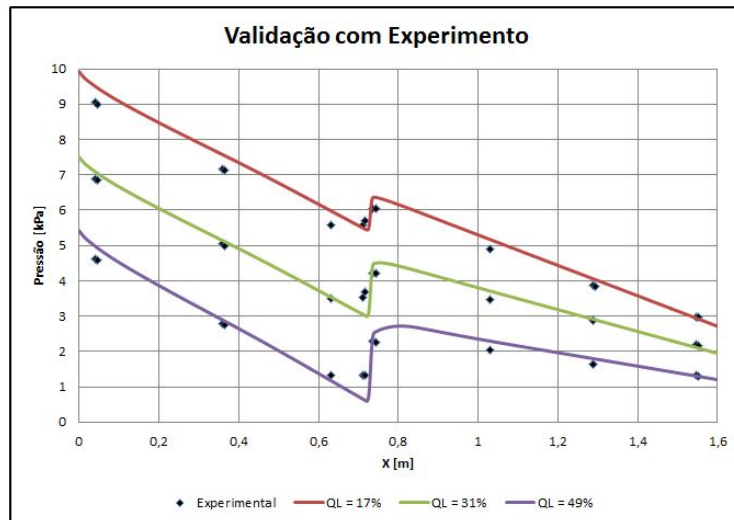


Figura 5.6: Validação do modelo com o experimento de Molina-Espinosa et al. (2013).

5.3 Linhas com Dimensões Reais

Uma vez validado o modelo, as demais análises considerando escoamento de líquido serão feitas a partir de um oleoduto real em operação. Foi utilizada um pequeno trecho de uma linha de 182km, onde as propriedades do óleo e condições de contorno são conhecidas.

No Brasil, dutos utilizados em operações terrestres são geralmente enterrados. O trecho considerado encontra-se a 1m da superfície, sob solo argiloso. As propriedades geométricas do trecho utilizado nas simulações são apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Propriedades geométricas do duto modelado.

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro (D)	32	In
Comprimento (L)	3,57	km
Espessura	0,406	In
Rugosidade	0,0018	In
Profundidade (H)	1,0	m

Serão estudados diversos diâmetros e posições de vazamento, a saber:

- Diâmetros de vazamento: $d_L = D/5$; $d_L = D/10$; $d_L = D/15$; e $d_L = D/20$.

- Posições de vazamento: $l_L = 15\% L$; $l_L = 50\% L$; e $l_L = 85\% L$.

Como o duto é enterrado, a condição de contorno para o vazamento dependerá do solo sobre o duto. A mecânica dos solos é uma área complexa, e está fora do escopo desta dissertação; detalhes sobre o comportamento do solo podem ser encontrados em livros como Craig (2005) ou Verruijt (2001).

Para a definição do presente estudo, somente a pressão externa ao duto, devida ao solo, é necessária para definir a pressão externa ao vazamento. Será utilizado o conceito de pressão de projeto devida ao solo, utilizado por Moser (2001), que considera cada camada horizontal do solo como uniforme, o que torna a pressão dependente apenas da profundidade do duto e do tipo de solo, conforme a Equação 5.1.

$$P = \gamma H \quad (5.1)$$

sendo γ o peso específico do solo, e H a profundidade onde a pressão é desejada.

As condições de contorno e propriedades do fluido são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Propriedades do fluido e condições de contorno do oleoduto.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa Específica do Óleo	926,5	kg/m^3
Viscosidade do Óleo	370,1	cP
Peso Específico do Solo	100	lb/ft^3
Vazão de Entrada	0,606	m^3/s
Velocidade de Entrada	1,23	m/s
Pressão de Referência	1	atm
Pressão Estática da Saída	5,5	MPa
Pressão Externa ao Vazamento	1,6	kPa

O número de Reynolds de entrada para esta análise é de cerca de 2500, na faixa de transição entre regime laminar e turbulento. As condições de contorno definidas

no *software* foram: *Velocity Inlet* na entrada, *Pressure Outlet* na saída, e *Pressure Opening* no vazamento.

Como a condição de contorno para o vazamento é de pressão, a espessura do duto nesta região foi acrescentada à geometria do modelo, e a pressão definida na face externa, em contato com o solo.

A malha empregada no estudo foi gerada com as mesmas propriedades de elementos (tamanho de elemento, Y^+) que a malha convergida apresentada na Seção 5.1 (Malha 3). As propriedades de malha são descritas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Propriedades de malha definidas para o oleoduto.

Número de Elementos	750 mil
Número de Nós	780 mil
y^+	7

Como as dimensões do oleoduto são consideravelmente diferentes do caso de Molina-Espinosa et al. (2013), foi gerada uma malha adicional consideravelmente mais refinada ($\approx 1,5$ milhão de elementos) para confirmar a validade de malha. A diferença entre os resultados de pressão e velocidade entre as duas malhas, no Ponto do Vazamento (Figura 5.2), foi inferior a 1%, portanto a malha descrita na Tabela 5.10 está realmente convergida.

A Figura 5.7 apresenta a discretização na região do vazamento para o estudo com o oleoduto.

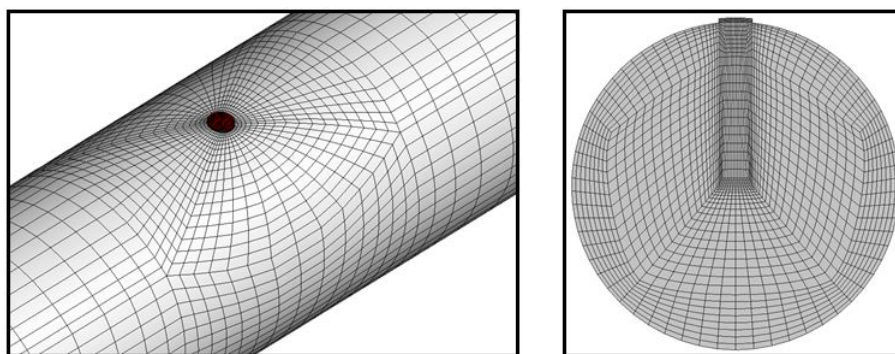


Figura 5.7: Malha para o oleoduto na região do vazamento.

O pós processamento dos modelos do oleoduto foi realizado a partir de uma Linha Central, coincidente com o eixo do duto, uma linha axial a 5 mm de distância

do vazamento, denominada Linha do Vazamento. Para ambas as linhas, foi definida uma resolução de 200 pontos.

Adicionalmente, foram definidos 200 planos transversais, igualmente espaçados, ao longo de toda a extensão do duto. Esses planos serão empregados na comparação entre as metodologias uni- e tridimensional.

As estruturas de pós processamento são apresentadas graficamente na Figura 5.8.

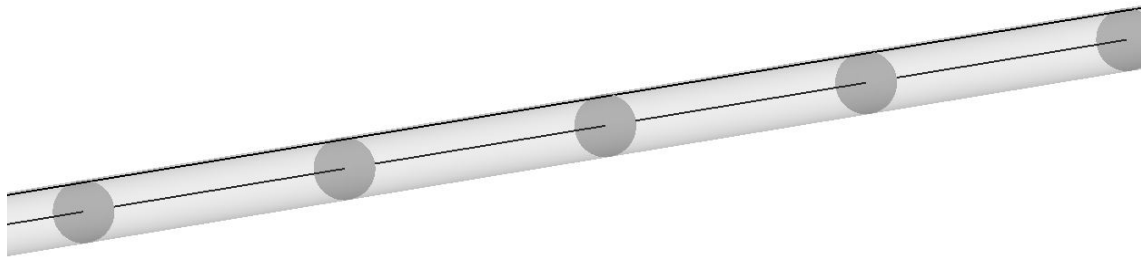


Figura 5.8: Estruturas de pós processamento para o modelo do oleoduto.

A Figura 5.9 apresenta a comparação entre as três abordagens de pós processamento quanto à perda de carga, para um diâmetro de vazamento de $d_L = D/10$, a 50% do comprimento do duto. Pode-se perceber que as três metodologias de pós processamento apresentam resultados muito próximos. De fato, só é possível perceber diferenças na região imediatamente a jusante e a montante do vazamento.

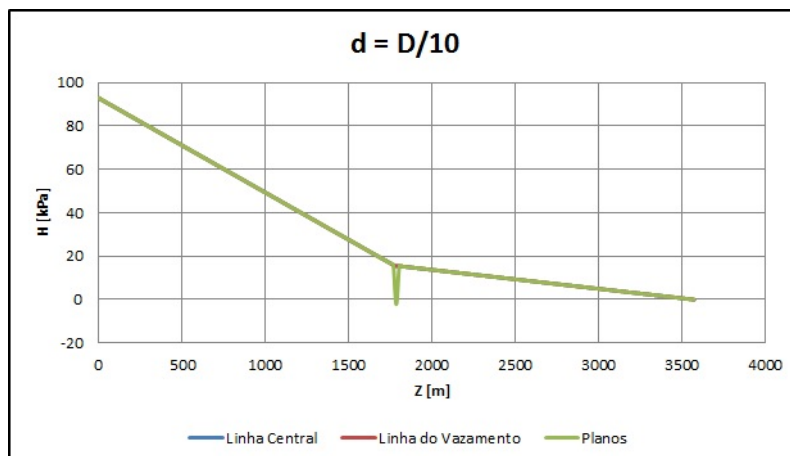


Figura 5.9: Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando toda a extensão do duto.

Visando quantificar a região discrepante, foi aumentada a resolução de resultados nos 30m centrais do duto (50 pontos e planos nesta região). A Figura 5.10 apresenta

a comparação entre os três tipos de pós processamento nesta região.

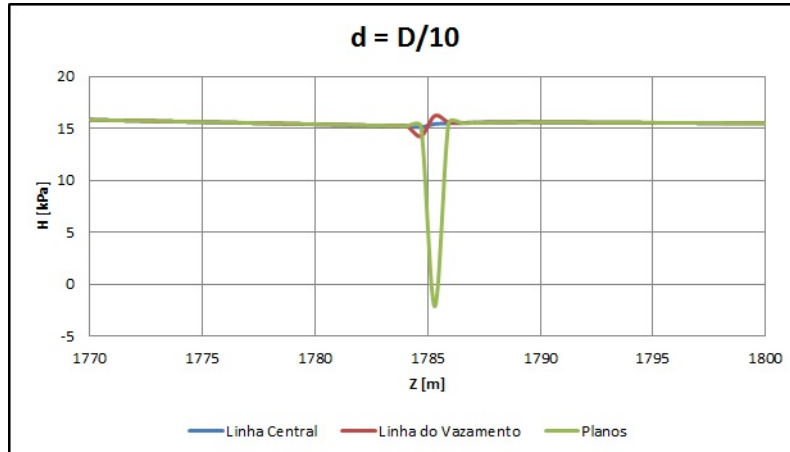


Figura 5.10: Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando a região próxima ao vazamento.

É notável que, mesmo aumentando a resolução na região do vazamento, diferenças somente são perceptíveis a cerca de 2 m (aproximadamente 2,5 diâmetros) do vazamento, em ambos os lados do furo.

A diferença entre a metodologia uni-e tridimensional foi quantificada, e teve máximo de 18,3kPa na região do vazamento, como pode ser observado na Figura 5.11.

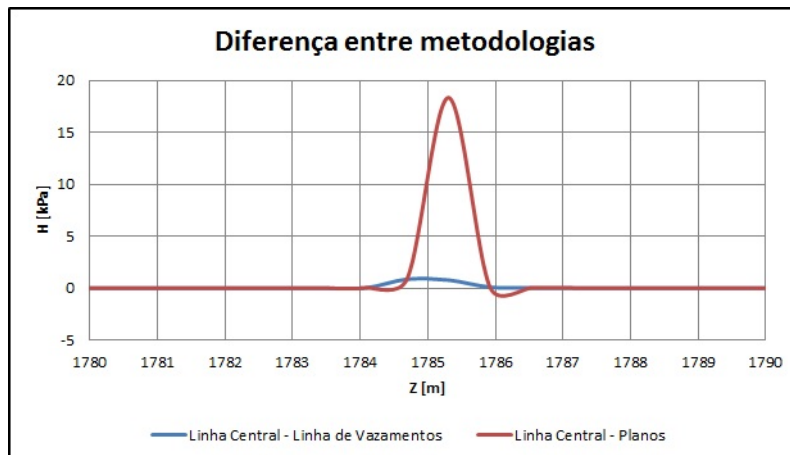


Figura 5.11: Diferença entre as metodologias 1D e 3D na região do vazamento.

As Figuras 5.12 e 5.13 comparam o escoamento no oleoduto, considerando um vazamento de $d_L = D/10$, em diferentes posições do duto.

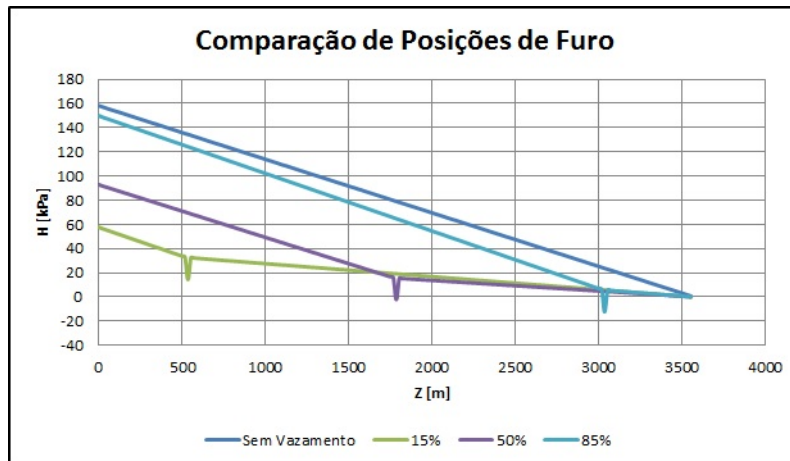


Figura 5.12: Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.

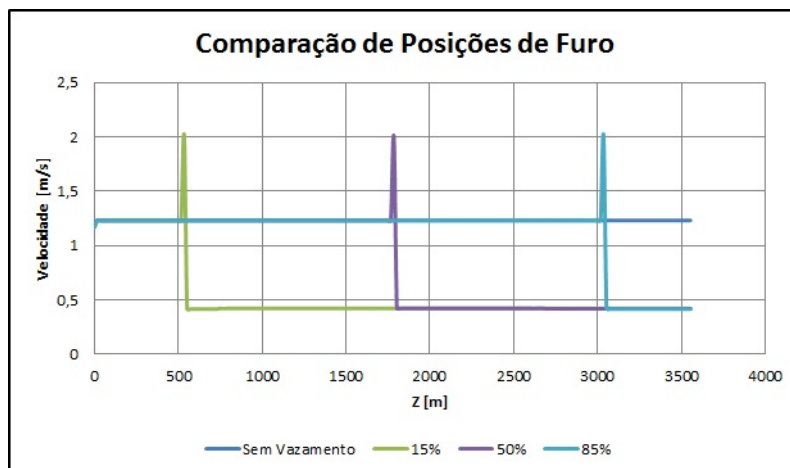


Figura 5.13: Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento.

Pode-se perceber que, quanto mais afastado o vazamento está da condição de entrada, maior é a perda de carga, e menor é sua variação em relação ao caso sem vazamentos. Isso se dá porque, como a perda de carga depende fortemente da velocidade no duto, a perda de velocidade a partir do vazamento causa um decréscimo considerável na perda de carga.

Já a redução de velocidade do escoamento após o vazamento se dá devido à vazão de fluido perdida pelo furo, considerando-se que a área do duto é constante.

A Tabela 5.11 quantifica essa comparação em relação ao percentual de vazão perdida pelo vazamento ($\dot{m}_L/\dot{m}_e$) e à perda de carga no duto.

Tabela 5.11: Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.

Posição do Vazamento	Vazão Perdida [%]	Perda de Carga [kPa]
15%	65,2	57,82
50%	65,2	92,97
85%	65,0	150,0

Analogamente, as Figuras 5.14 e 5.15 comparam características do escoamento, considerando um vazamento a 50% do duto, de diversos diâmetros. Novamente, quanto maior o furo, e maior a perda de fluido pelo vazamento, menor será a velocidade do líquido a jusante do vazamento, e menor a perda de carga total no duto.

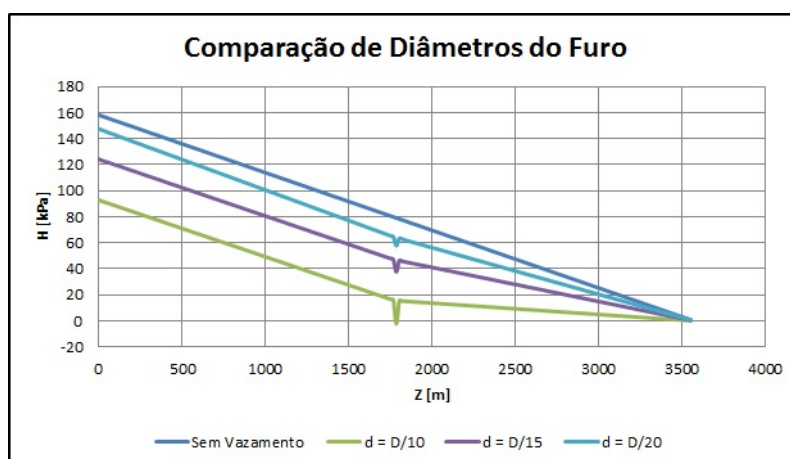


Figura 5.14: Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.

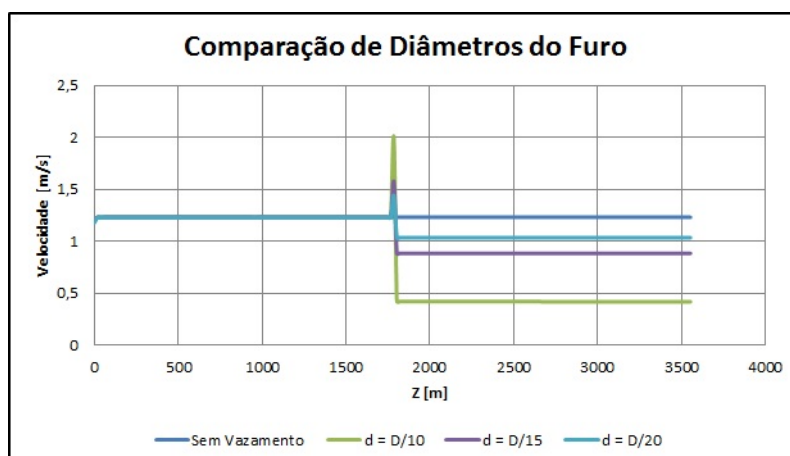
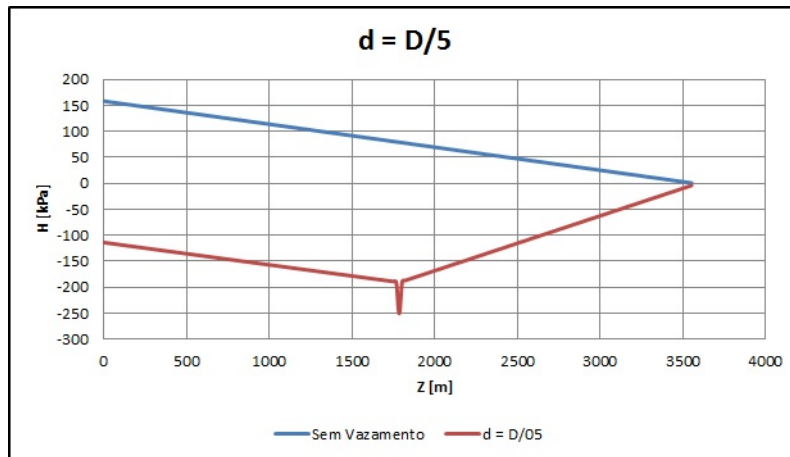


Figura 5.15: Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento.

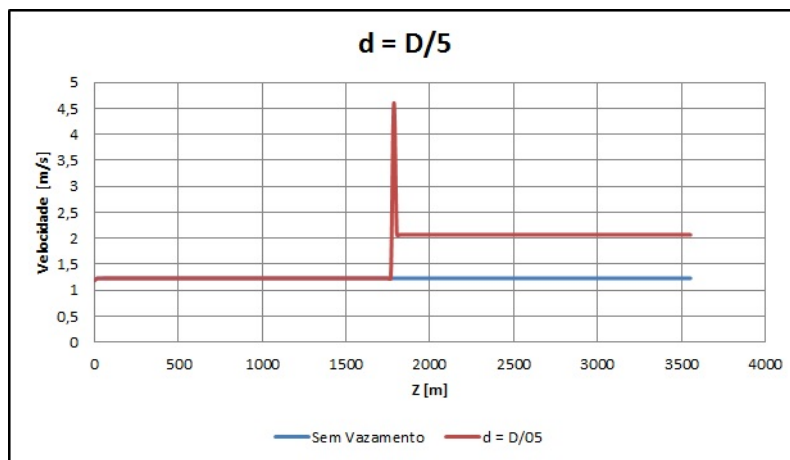
O diâmetro de furo $d_L = D/5$ também foi estudado, e encontrou-se que ele é demasiado grande em relação à vazão de entrada definida. Neste caso, a saída preferencial do óleo passa a ser o furo, caracterizando um regime de ruptura.

Foi impossível convergir a simulação numérica para este caso já que, fisicamente, a jusante da ruptura, muito pouco (ou nenhum) fluido permaneceria no domínio, tendo escapado pelo vazamento. Com o modelo utilizado neste trabalho, não é possível simular essa condição, já que o domínio computacional precisa estar completamente preenchido por fluido. Devido a essa característica do software, o que ocorreria numericamente é a inversão da velocidade no duto após a ruptura, representando a saída de todo o fluido pelo furo, e o preenchimento do duto a jusante do furo a partir da condição de contorno de pressão. Como a condição de *pressure-outlet* não permite retorno de fluido, a pressão no domínio cai até que o caso diverge.

A fim de assegurar que este diâmetro de furo está, de fato, em regime de ruptura, a reentrada de fluido na condição de saída foi liberada, através de uma condição de contorno de *opening*. A Figura 5.16 apresenta os resultados para $d_L = D/5$ nesta condição.



(a)



(b)

Figura 5.16: Resultados de (a) perda de carga e (b) velocidade para $d_L = D/5$.

Pode-se perceber que a velocidade média (em módulo) após o vazamento passa a ser maior que a velocidade de entrada prescrita, já que os dois lados do duto passam a se comportar como entradas. A perda de carga ao longo do domínio passa a ser negativa, indicando um aumento considerável de pressão.

Esses resultados claramente não são reais, já que fisicamente o duto a jusante do furo ficaria vazio, e representam a impossibilidade do modelo CFD em simular furos em regime de ruptura.

A Tabela 5.12 quantifica a comparação entre os diversos diâmetros de vazamento estudados.

Tabela 5.12: Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.

Tamanho do Vazamento	Vazão Mássica Perdida [%]	Perda de Carga [kPa]
$d_L = D/5$	267,8	-250,4
$d_L = D/10$	65,2	92,8
$d_L = D/15$	28,0	124,3
$d_L = D/20$	15,6	147,6

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam, respectivamente, os perfis de pressão e velocidade para os 4 diâmetros de furo estudados.

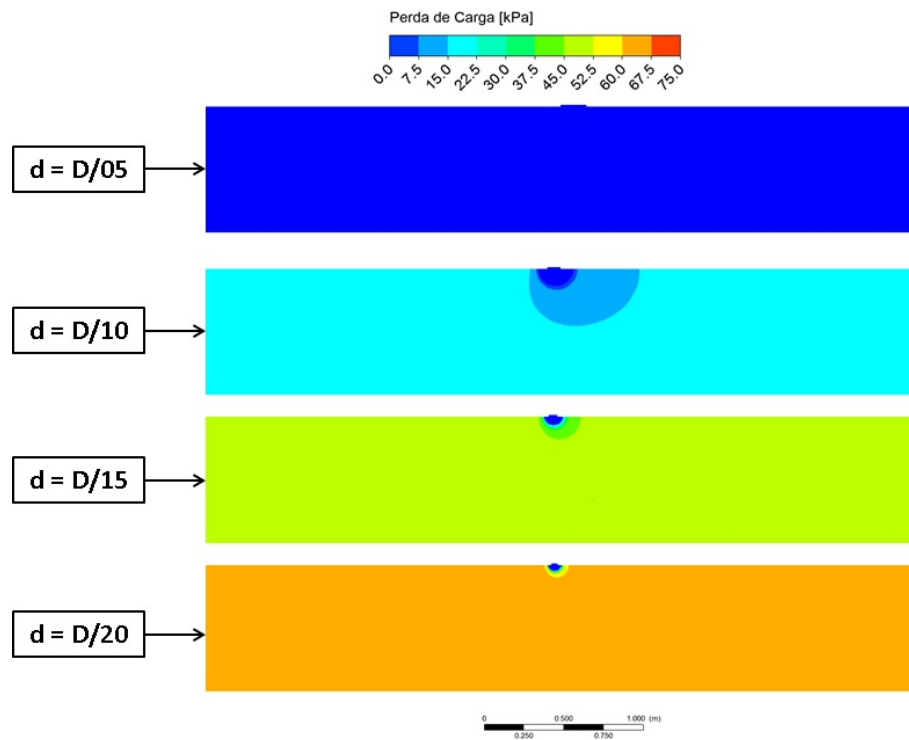


Figura 5.17: Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.

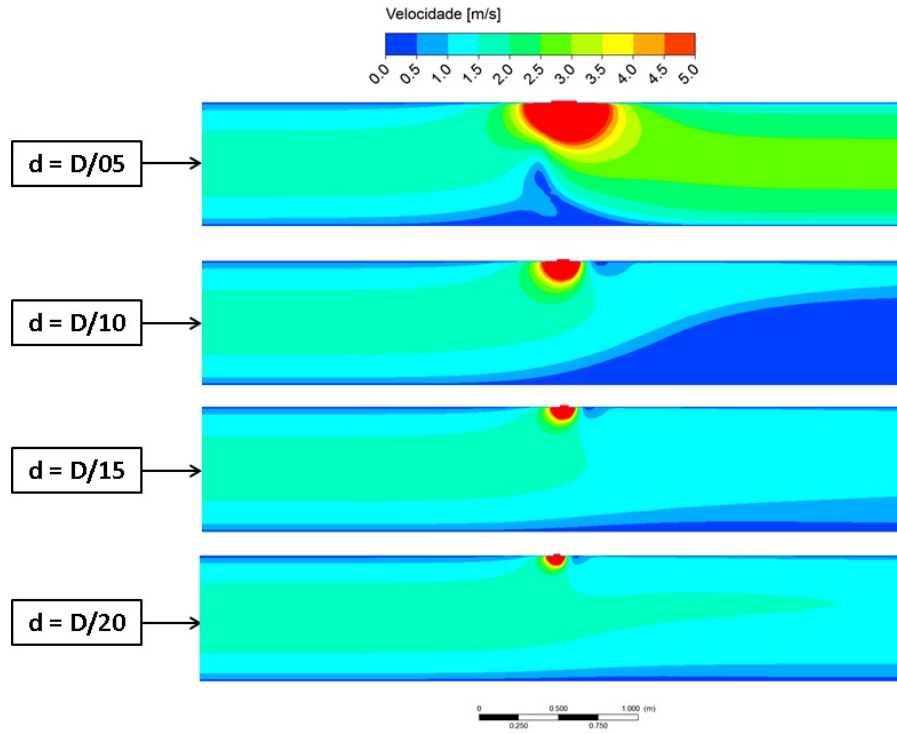


Figura 5.18: Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.

Pode-se notar que a influência tridimensional do vazamento sobre a perda de carga desaparece rapidamente após o furo, não sendo mais percebidas variações radiais de pressão a partir de cerca de 1,5m de distância do furo (para $d = D/10$).

Já em termos de velocidade, a influência do vazamento é visível por uma extensão maior do duto (cerca de 20m para $d = D/10$), enquanto o escoamento se desenvolve novamente. Ainda assim, a aproximação de escoamento unidimensional é consistente para ambos os parâmetros avaliados.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os perfis de pressão e velocidade nas seções transversais do vazamento, para os 4 diâmetros de furo estudados.

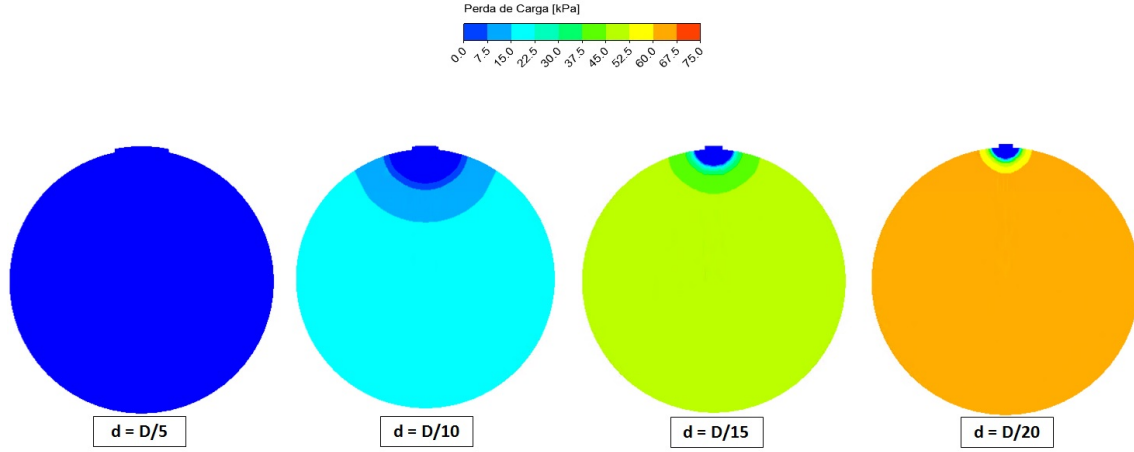


Figura 5.19: Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.

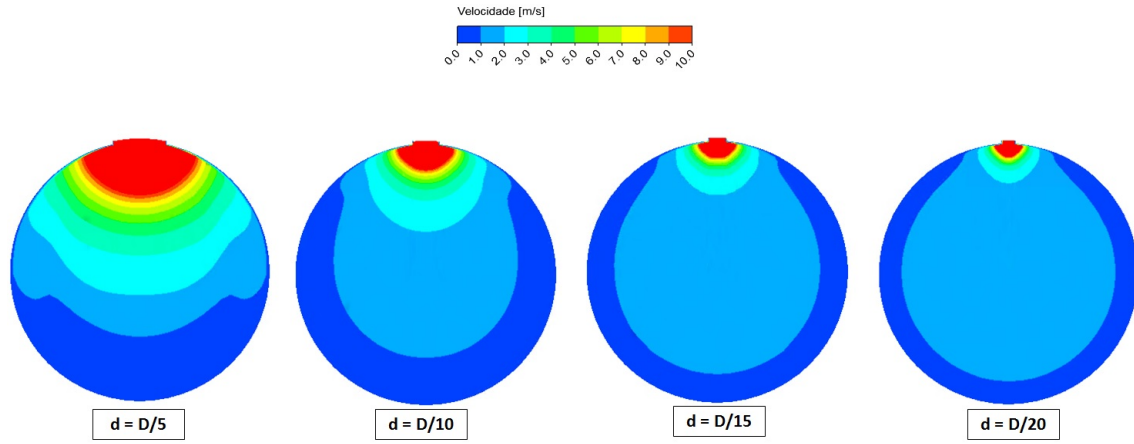


Figura 5.20: Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.

A fim de levantar mais informações sobre o caso com $d_L = D/5$, em regime de ruptura, foram simulados mais 3 modelos com este diâmetro de vazamento, e aumentando a velocidade de entrada.

- Vazão 1: $V_e = 1,23\text{m/s}$ ($\dot{m}_e = 560,3\text{kg/s}$). Esta é a velocidade regular do oleoduto, utilizada em todas as outras análises.
- Vazão 2: $V_e = 2,50\text{m/s}$ ($\dot{m}_e = 1120,6\text{kg/s}$).
- Vazão 3: $V_e = 3,25\text{m/s}$ ($\dot{m}_e = 1500\text{kg/s}$).
- Vazão 4: $V_e = 5,00\text{m/s}$ ($\dot{m}_e = 2277,5\text{kg/s}$).
- Vazão 5: $V_e = 10,00\text{m/s}$ ($\dot{m}_e = 4555,1\text{kg/s}$).

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os resultados de perda de carga para estes casos. Na Figura 5.21, a perda de carga para a Vazão 5 é suprimida do gráfico para melhor visualização.

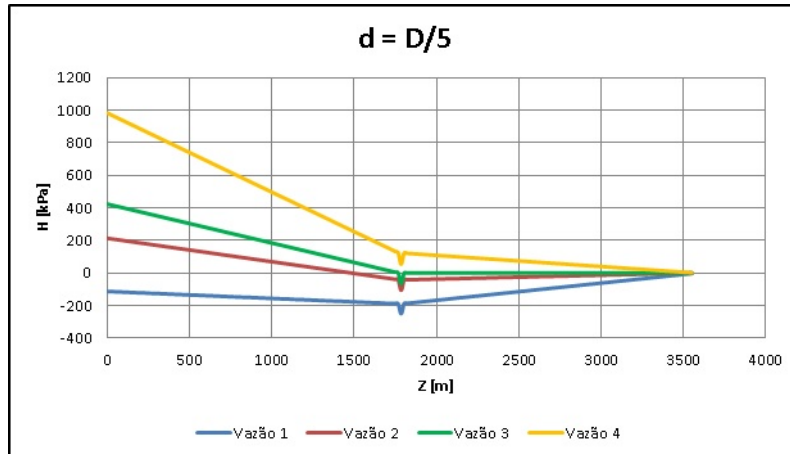


Figura 5.21: Comparação de perda de carga ao longo do duto para $d_L = D/5$.

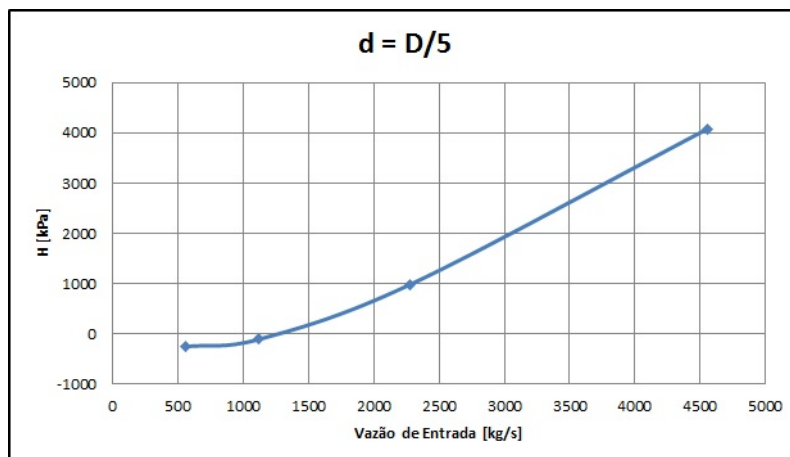


Figura 5.22: Comparação de perda de carga para $d_L = D/5$.

Pode-se perceber que as duas vazões de entrada menores resultam em regime de ruptura, tendo perda de carga negativa e escoamento invertido após o vazamento. Já para as maiores vazões, o comportamento de perda de carga e velocidade são consistentes com o regime de vazamento. A Tabela 5.13 apresenta os resultados para os 5 casos avaliados. A transição entre os dois regimes ocorre a uma vazão pouco superior a 1500kg/s.

Tabela 5.13: Propriedades do escoamento para um vazamento de $d_L = D/5$, variando-se a vazão de entrada.

Vazão de Entrada [kg/s]	Vazão Mássica Perdida [%]	Perda de Carga [kPa]
560,3	267,8	-250,4
1120,6	135,7	-106,5
1500,0	101,8	423,2
2277,5	67,8	982,8
4555,1	37,1	4079,0

Analogamente, as Figuras 5.23 e 5.24 apresentam os resultados de velocidade para estes casos.

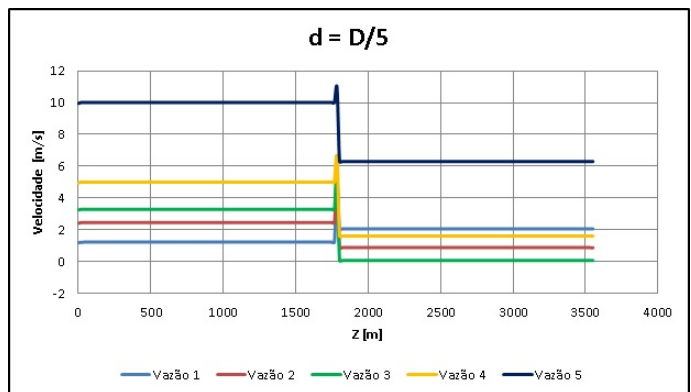


Figura 5.23: Comparação de velocidade ao longo do duto para $d_L = D/5$.

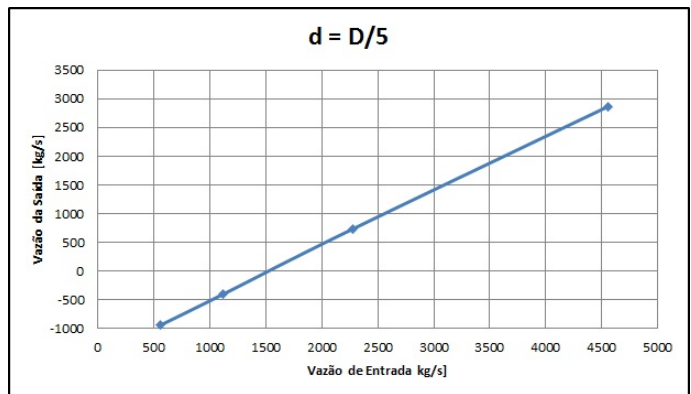


Figura 5.24: Comparação de velocidade na saída para $d_L = D/5$.

Capítulo 6

Resultados: Escoamento Gasoso

6.1 Avaliação de Malha

Os testes de qualidade de malha para a tubulação de fluido gasoso foram realizados com base na geometria unidimensional empregada por Elaoud et al. (2010), considerando gás natural. A validação do modelo para esta fase também é baseada nos resultados de Elaoud et al. (2010), e apresentada na Seção 6.2.

O vazamento foi modelado considerando-se uma linha idealmente lisa, com um único vazamento em posições variadas. Para a avaliação de malha, foi utilizada a posição de furo intermediária, a 50% do duto. A temperatura foi fixada em 15°C, em regime isotérmico.

As propriedades geométricas utilizadas no modelo de qualidade de malha são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Propriedades geométricas do modelo empregado nos testes de malha.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro do Duto	D	400	mm
Comprimento do Duto	L	600	m
Diâmetro do Furo	d_L	60	mm
Posição do Furo	l_L	300	m

De mesma forma, as condições de contorno e propriedades do fluido utilizadas no modelo são apresentadas na Tabela 6.2.

Elaoud et al. (2010) definiu a massa específica de seu gás de trabalho, porém não a viscosidade utilizada. Como neste trabalho será utilizada viscosidade prescrita constante, é importante que os testes de qualidade de malha tenham viscosidade da mesma ordem de grandeza que a do modelo de interesse. Por esse motivo, foi definida uma viscosidade típica de gases naturais.

Tabela 6.2: Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo empregado nos testes de malha.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Massa Específica do Fluido	ρ	Gás Ideal	
Viscosidade do Fluido	μ	0,01	cP
Pressão de Entrada	P_e	35	bar
Pressão de Referência	P_{ref}	0	atm
Vazão da Saída	$\dot{m}_s$	37	kg/s
Vazão Perdida pelo Vazamento	$\dot{m}_L$	18	kg/s

Como o modelo é isotérmico, a massa específica depende somente da variação de pressão no domínio, como pode ser visto na Figura 6.1. A variação de massa específica foi limitada a um intervalo de $[25, 45] \text{ kg/m}^3$ já que, se deixada livre, flutuações de convergência nos estágios iniciais da solução poderiam causar divergência devido a massas específicas muito altas.

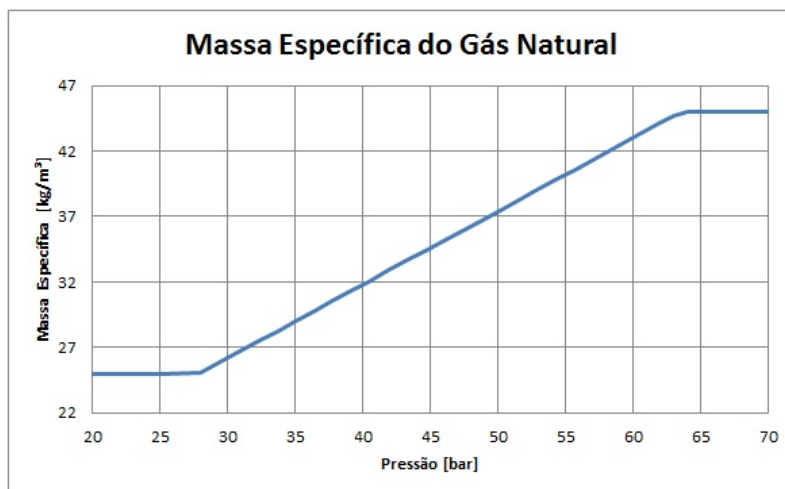


Figura 6.1: Massa específica do gás natural.

Foram avaliadas 3 malhas, conforme apresentadas na Tabela 6.3. Todas as malhas foram definidas como hexaédricas, perfeitamente estruturadas, e com elementos de qualidade ortogonal acima de 0,2 (como explicitado na Seção 4.3.2). A Figura 4.6 apresenta graficamente a disposição dos elementos da Malha 2.

Tabela 6.3: Malhas avaliadas para escoamento gasoso.

	Número de Elementos	Número de Nós	Definição de y^+
Malha 1	407 mil	395 mil	10
Malha 2	687 mil	669 mil	7
Malha 3	1,0 milhão	998 mil	3

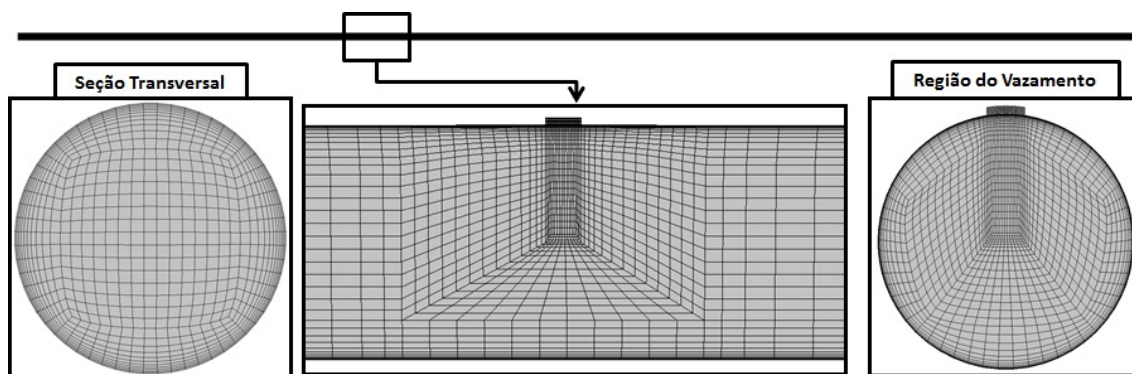


Figura 6.2: Disposição de elementos para a Malha 2.

Como encontrou-se na Seção 5.1 que o Ponto do Vazamento (a 5mm de distância do vazamento) e o plano transversal ao vazamento (vide Figura 5.2) são os mais críticos em termos de convergência de malha, apenas estes parâmetros serão estudados para o escoamento com gás. As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados encontrados para essas regiões críticas.

Note que, como ocorreu com o estudo de líquido, há um ponto de inflexão na curva de convergência de pressão, nesse caso um ponto de mínimo. Como a diferença nos valores de pressão são pequenos, sempre inferiores a 1%, esse comportamento pode ser explicado pelas diferenças qualitativas entre malhas, ou seja, a diferente disposição dos nós de malha ao longo do domínio de fluido a medida que é feito um refino.

Tabela 6.4: Resultados da análise de convergência de malha para o Ponto do Vazamento.

Resultados para o Ponto do Vazamento				
Malha	Pressão [bar]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	29,69	-	192,19	-
Malha 2	29,68	0,01	191,86	0,18
Malha 3	29,71	0,08	191,51	0,18

Tabela 6.5: Resultados da análise de convergência de malha para o Plano Transversal.

Resultados para o Plano Transversal do Vazamento				
Malha	Pressão [kPa]	Variação de Pressão [%]	Velocidade [m/s]	Variação de Velocidade [%]
Malha 1	34,66	-	17,91	-
Malha 2	34,66	0,004	17,89	0,089
Malha 3	34,66	0,004	17,88	0,067

Deve-se destacar os altos valores de velocidade encontrados na região do vazamento; esse comportamento será discutido posteriormente, na Seção 6.3. Entretanto, é notável como a diferença quantitativa entre as três malhas é pequena nas regiões estudadas.

Entretanto, ao avaliar os gráficos de sensibilidade de malha nos 100m em torno do vazamento, conforme apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4, pode-se perceber que a Malha 1 resulta em um comportamento destoante de pressão e velocidade, logo após o vazamento (e portanto fora do ponto crítico avaliado para convergência).

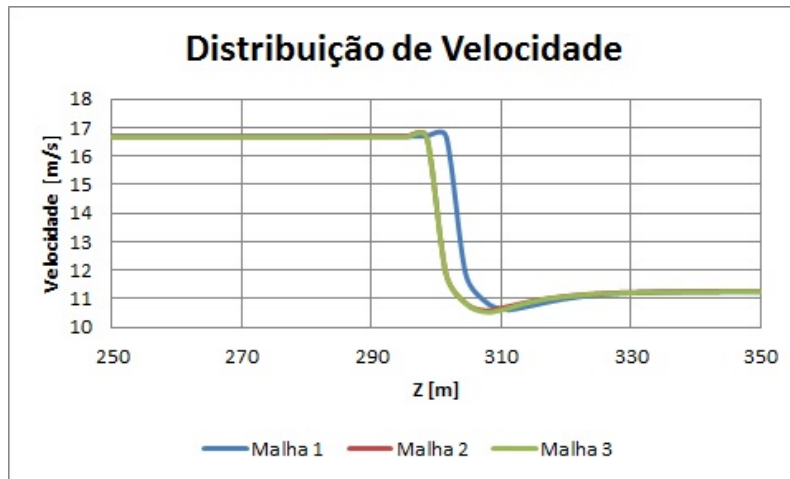


Figura 6.3: Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo Central para velocidade.

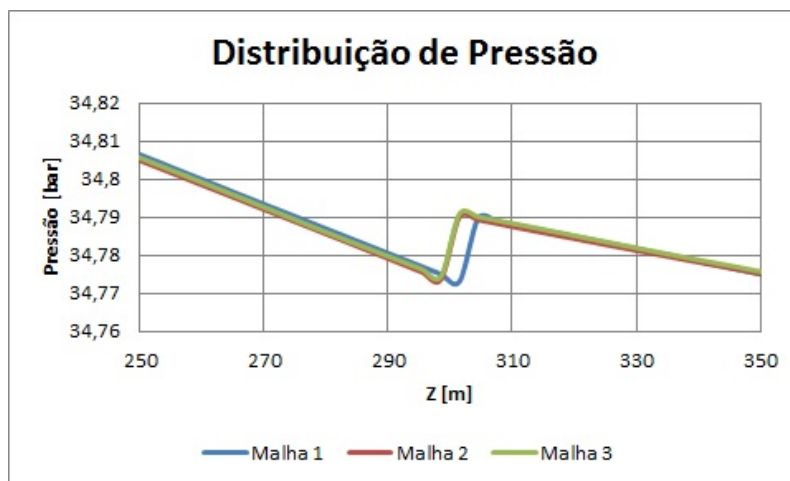


Figura 6.4: Gráficos de sensibilidade de malha no Eixo Central para pressão.

Sendo assim, a Malha 2 é considerada a mais correta, e suas propriedades (tamanho de elemento, y^+) serão utilizadas em todas as análises posteriores com fluido gasoso. A Figura 6.5 apresenta os contornos de velocidade e pressão resultantes da simulação para esta malha.

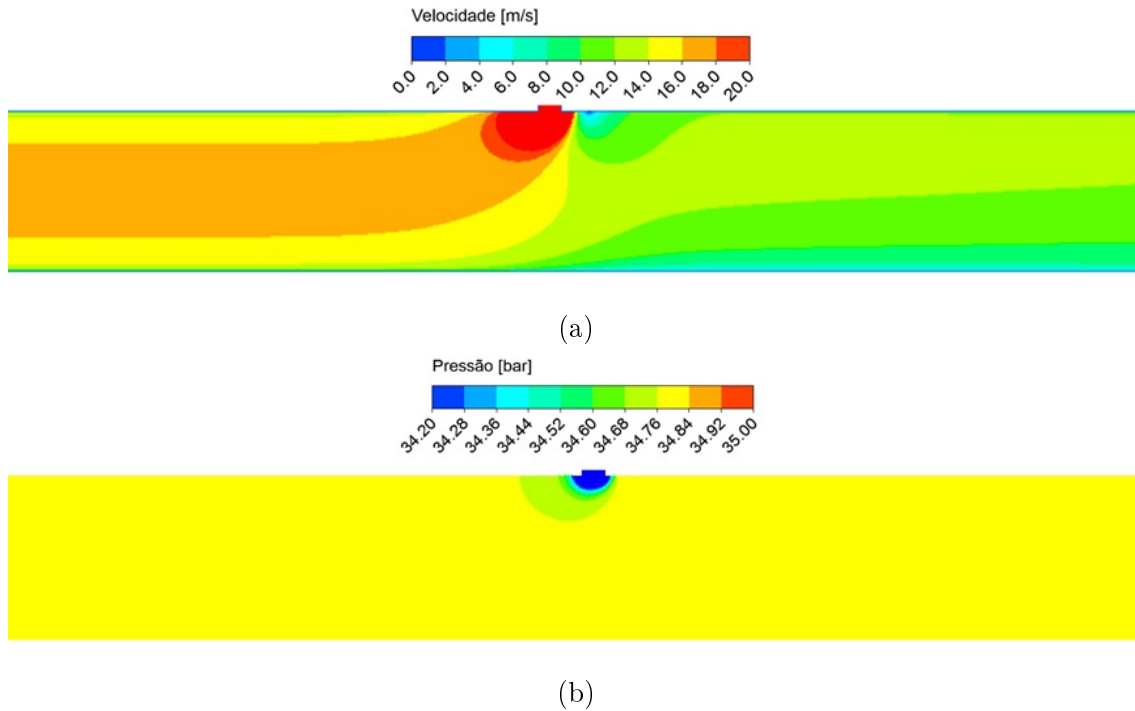


Figura 6.5: Contornos de (a) velocidade e (b) pressão para a Malha 2.

6.2 Validação

Os resultados de Elaoud et al. (2010) foram utilizados para validar a modelagem de vazamentos de gás em dutos através de CFD.

Elaoud et al. (2010) não definiu a viscosidade utilizada em seu trabalho, apenas indicou que os “*efeitos viscosos são modelados considerando a tensão cisalhante da parede*”. Sendo assim, foi utilizado neste trabalho uma viscosidade típica de gases naturais.

As propriedades do fluido e condições de contorno são definidas em 6.2.

- **Modelo 1:** Posição de furo a 33% do comprimento do duto (a 200m da entrada).
- **Modelo 2:** Posição de furo a 50% do comprimento do duto (a 300m da entrada).
- **Modelo 3:** Posição de furo a 66% do comprimento do duto (a 400m da entrada).

Em todos os casos, foi utilizada a mesma pressão absoluta de entrada, de 35bar, e uma vazão de saída de 37kg/s. As Tabelas 6.1 e 6.2, na Seção 6.1, expõem mais detalhes da geometria e condições de contorno globais utilizadas nas simulações de validação.

A Figura 6.6 apresenta os resultados de pressão total (*Total Pressure*) das simulações em comparação às curvas de pressão encontradas por Elaoud e Hadj-Taïeb (2008). A pressão total é definida como a pressão absoluta de um ponto, somada à pressão equivalente que seria encontrada se todo o fluido naquele ponto tivesse sua energia cinética convertida em pressão (ANSYS®, 2015). É portanto ligeiramente mais alta que a pressão estática, e é utilizada como uma maneira de incluir tanto a pressão quanto a velocidade a comparações. Esse foi o resultado apresentado por Elaoud e Hadj-Taïeb (2008).

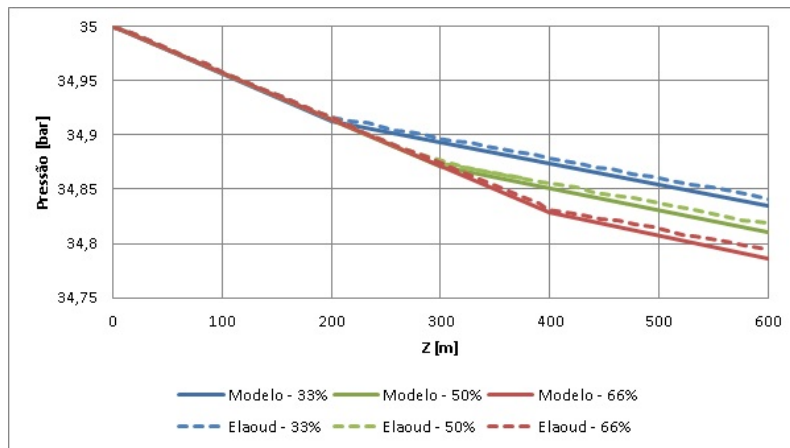


Figura 6.6: Validação do modelo com os resultados de Elaoud e Hadj-Taïeb (2008).

Foi encontrada boa concordância entre as simulações e os resultados de Elaoud et al. (2010). Os resultados numéricos subestimaram ligeiramente as curvas de referência, porém essa pequena discrepância pode ser explicada por potenciais diferenças de viscosidade, já que foi assumida uma viscosidade típica de gases naturais.

O modelo numérico foi capaz de reproduzir adequadamente os resultados de Elaoud e Hadj-Taïeb (2008), e é considerado validado.

6.3 Linhas com Dimensões Reais

Com o modelo validado, as demais análises considerando escoamento de gás são realizadas a partir de um trecho de gasoduto real em operação, apresentado por Madeira (2011). Foi utilizada um trecho de 3 km (de uma linha de 90 km), onde as propriedades do gás e condições de contorno são conhecidas.

O trecho encontra-se enterrado, porém não é informado a que profundidade. Sendo assim, considerou-se uma profundidade de 1 m da superfície, sob solo argiloso, conforme modelado na Seção 5.3. As propriedades geométricas do trecho utilizado nas simulações são apresentadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Propriedades geométricas do duto modelado.

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro (D)	16	In
Comprimento (L)	3,0	km
Espessura	0,281	In
Rugosidade	0,016	In
Profundidade (H)	1,0	m

Serão variados os diâmetros e posições de vazamento, semelhante ao procedimento feito para o estudo com líquidos:

- Diâmetros de vazamento: $d_L = D/5$; $d_L = D/10$; $d_L = D/15$; e $d_L = D/20$.
- Posições de vazamento: $l_L = 15\% L$; $l_L = 50\% L$; e $l_L = 85\% L$.

As condições de contorno e propriedades do gás são apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Propriedades do fluido e condições de contorno do gasoduto.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa Específica do Gás	Gás Ideal	
Viscosidade do Gás	0,01	cP
Peso Específico do Solo	100	lb/ft^3
Vazão de Entrada	151,9	kg/s
Pressão de Referência	0	atm
Pressão Estática da Saída	4,2	MPa
Pressão Externa ao Vazamento	1,6	kPa

O número de Reynolds de entrada para esta análise é de cerca de $4,9 \cdot 10^7$, indicando escoamento plenamente turbulento.

A malha empregada no estudo foi gerada com as mesmas propriedades de elementos (tamanho de elemento, Y^+) que a malha convergida apresentada na Seção 6.1 (Malha 2). As propriedades de malha são descritas na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Propriedades de malha definidas para o gasoduto.

Número de Elementos	687 mil
Número de Nós	669 mil
y^+	7

Novamente, foi gerada uma malha adicional mais refinada ($\approx 1,5$ milhão de elementos) para confirmar a validade de malha. A diferença entre os resultados de pressão e velocidade entre as duas malhas, no Ponto do Vazamento (Figura 5.2), foi de cerca de 0,8%, portanto a malha descrita na Tabela 6.8 está realmente convergida.

Entretanto, deve-se observar que, em todos os casos simulados para gás (inclusive os de validação), houve dificuldade de convergência. Isso ocorre porque fisicamente, para gases, um vazamento frequentemente resulta em um jato sônico ou mesmo supersônico. Como este trabalho visa observar o comportamento do escoamento interno ao duto, o jato externo não foi avaliado. Entretanto, para uma modelagem correta, os efeitos sônicos da saída devem ser considerados na simulação, nos

elementos mais próximos ao vazamento.

Para este fim, a condição de contorno do vazamento foi definida como uma saída supersônica. Em uma condição de contorno supersônica, o perfil de saída não é influenciado pelo escoamento interno, e a restrição de gradiente constante não é imposta. Porém como a maior parte do domínio se encontra em regime subsônico, não é aconselhável utilizar uma metodologia sônica de solução (ANSYS®, 2015), que é mais instável e inadequada em regiões subsônicas, o que resulta em um domínio misto de solução (subsônico com saída supersônica).

Sendo assim, a escala de tempo (*timescale*), utilizada na solução pseudotransiente, foi limitada a valores muito baixos devido às velocidades altas no domínio. Isso implicou em uma convergência extremamente lenta.

Buscando mitigar os efeitos das altas velocidades no *timescale*, utilizou-se inicialmente um fator local de escala, que segmenta internamente o domínio em um número finito de regiões, e resolve cada região de modo semi-independente, com escalas de tempo distintas. Os resultados convergidos deste modelo local foram então definidos como condição inicial de um modelo com *timescale* constante ao longo do domínio, de forma a corrigir resultados potencialmente instáveis nas fronteiras das regiões segmentadas.

Essa abordagem agilizou significativamente o processo, mesmo levando em conta a necessidade de duas simulações distintas para cada cenário. Cada cenário levou aproximadamente 6 dias para ser concluído. As propriedades de *hardware* do computador em que os modelos foram simulados são: 12 processadores, cada um com 2,4 GHz, 128GB de memória RAM, Windows 7 como sistema operacional.

O perfil do Número de Mach na região do vazamento é apresentado na Figura 6.7. Pode-se perceber que o escoamento só se torna sônico nos elementos mais próximos da condição de contorno.

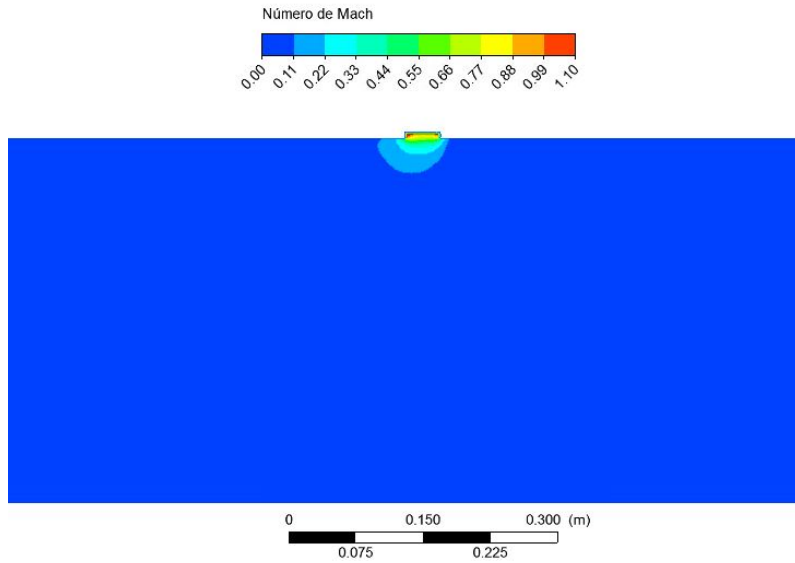


Figura 6.7: Número de Mach observado na região do vazamento.

O pós processamento dos modelos segue a mesma metodologia utilizada para fluidos líquidos, ou seja, utiliza uma Linha Central, coincidente com o eixo do duto, uma linha axial a 5mm de distância do vazamento, denominada Linha do Vazamento. Para ambas as linhas, foi definida uma resolução de 200 pontos, conforme a Figura 5.8. Foram definidos também 200 planos transversais, igualmente espaçados, ao longo de toda a extensão do duto.

A Figura 6.8 apresenta a comparação entre as três abordagens de pós processamento na região do vazamento (ampliada), para um diâmetro de vazamento de $d_L = D/10$, a 50% do comprimento do duto.

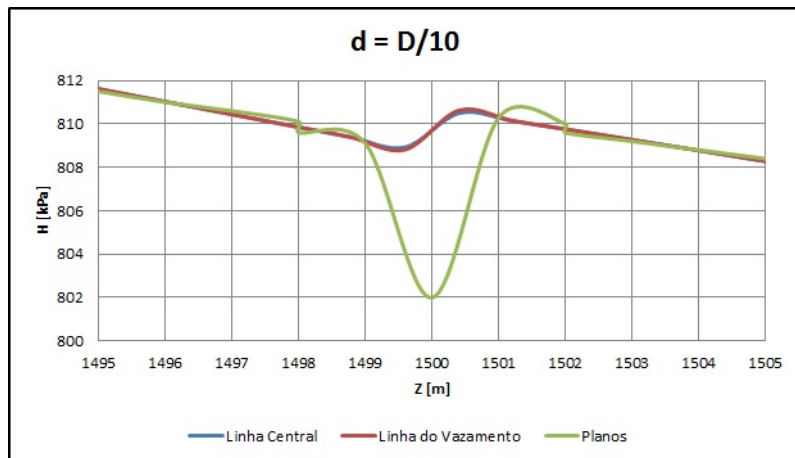


Figura 6.8: Comparação de perda de carga entre a abordagem 1D e 3D, considerando toda a extensão do duto.

Novamente, mesmo aumentando a resolução na região do vazamento, diferenças somente são perceptíveis em torno do vazamento, cerca de 5,0 m (12 diâmetros), em ambos os lados do furo. A diferença entre a metodologia uni-e tridimensional foi quantificada, e teve máximo de 8,6 kPa na região do vazamento, como pode ser observado na Figura 6.9.

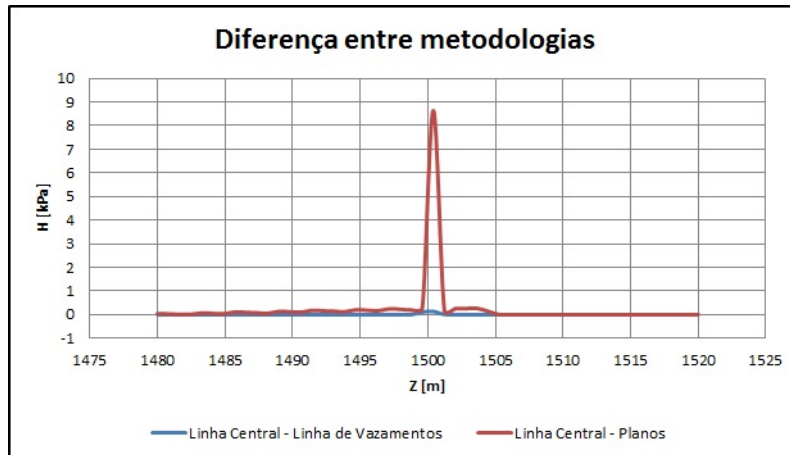


Figura 6.9: Diferença entre as metodologias 1D e 3D na região do vazamento.

As Figuras 6.10 e 6.11 comparam o escoamento no gasoduto, considerando um vazamento de $d_L = D/10$, em diferentes posições do duto.

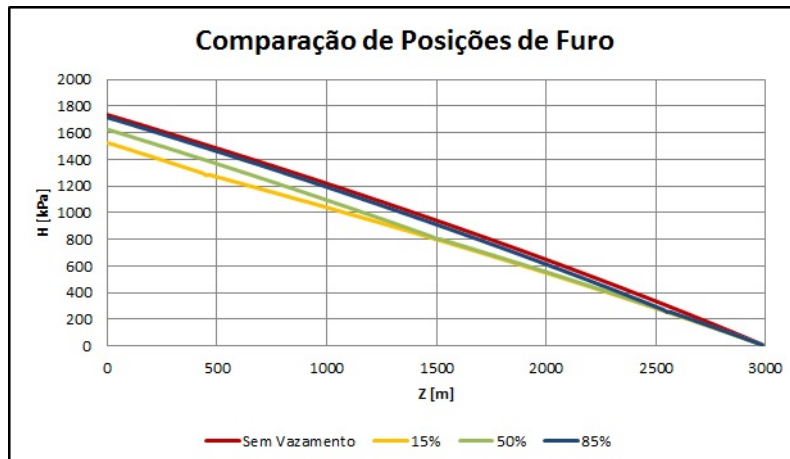


Figura 6.10: Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.

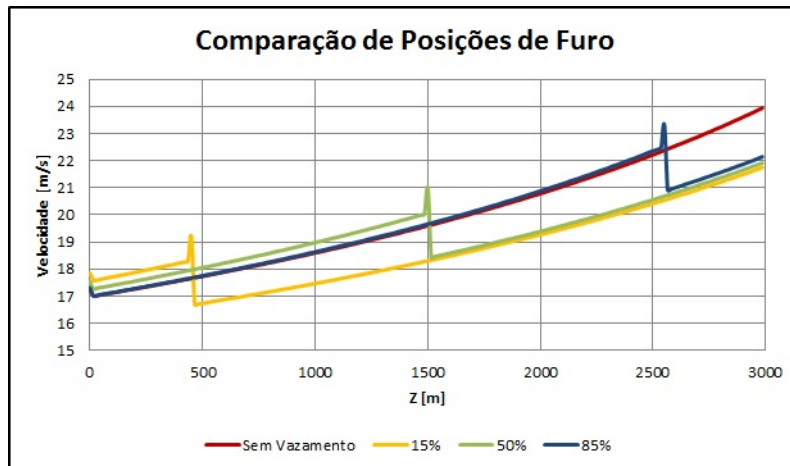


Figura 6.11: Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento.

Novamente, quanto mais afastado o vazamento está da condição de entrada, maior é a perda de carga, e menor é sua variação em relação ao caso sem vazamentos. Entretanto, como o escoamento é compressível, não é possível traçar um paralelo direto entre a velocidade e a perda de carga. De fato, a velocidade sobe ligeiramente a medida que a pressão decresce, devido à continuidade de massa.

A Tabela 6.9 quantifica essa comparação em relação à vazão perdida pelo vazamento e à perda de carga no duto.

Tabela 6.9: Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.

Posição do Vazamento	Vazão Perdida [%]	Perda de Carga [MPa]
15%	8,9	1,53
50%	8,2	1,63
85%	7,3	1,72

Destaca-se que a vazão perdida pelo vazamento é maior quanto mais a montante o vazamento se encontra. Esse comportamento é esperado, e frequentemente explorado em SDVs com base em variação de vazão. O fenômeno se dá devido à pressão ligeiramente mais alta próximo à entrada, causando uma maior diferença de pressão interna e externa na região do vazamento, e levando a uma maior vazão no vazamento.

Analogamente, as Figuras 6.12 e 6.13 comparam características do escoamento, considerando um vazamento a 50% do duto, de diversos diâmetros.

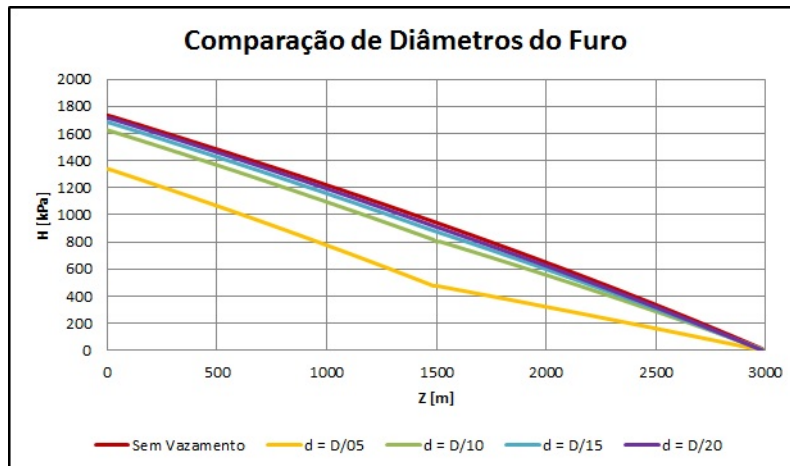


Figura 6.12: Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.

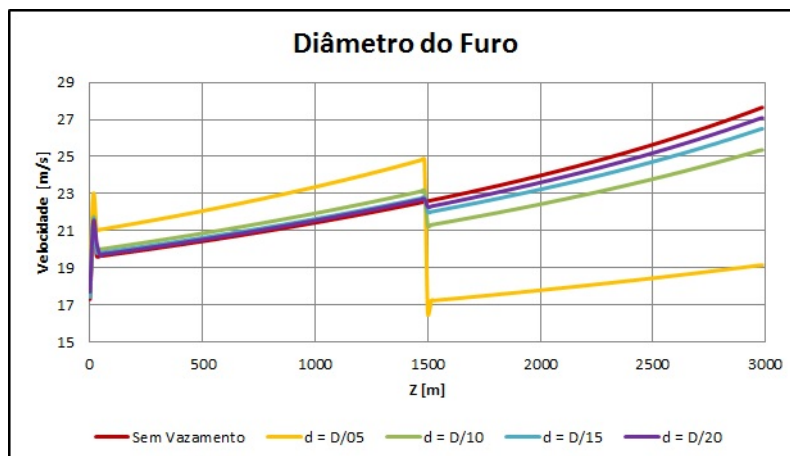


Figura 6.13: Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento.

Assim como ocorre com líquidos, o vazamento tem uma influência considerável no perfil de pressão do escoamento, sendo identificável no gráfico de perda de carga através da descontinuidade na derivada das curvas. Destaca-se que a curva de perda de carga, em ambos os lados do vazamento, tem um perfil abaulado, apesar da difícil visualização no gráfico. Isso se dá por causa das características de compressibilidade do gás.

De mesma forma, nas curvas de velocidade, os perfis não são lineares, mesmo antes do vazamento, devido à variação de massa específica causada pela perda de carga. Note que, como a pressão de saída é fixa no modelo numérico, a influência do vazamento se reflete em uma pressão menor na entrada do duto, o que causa ligeiro aumento de velocidade a montante do vazamento.

A Tabela 6.10 quantifica a comparação entre os diversos diâmetros de vazamento estudados.

Tabela 6.10: Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.

Tamanho do Vazamento	Vazão Mássica Perdida [%]	Perda de Carga [MPa]
$d_L = D/5$	30,8	1,34
$d_L = D/10$	8,2	1,63
$d_L = D/15$	3,6	1,68
$d_L = D/20$	2,1	1,71

A Figura 6.14 ilustra a comparação de perda de vazão por tamanho de furo, em relação ao diâmetro do duto. Nota-se que a relação de perda de vazão é aproximadamente quadrática, como indicado pela linha de tendência acrescentada ao gráfico.

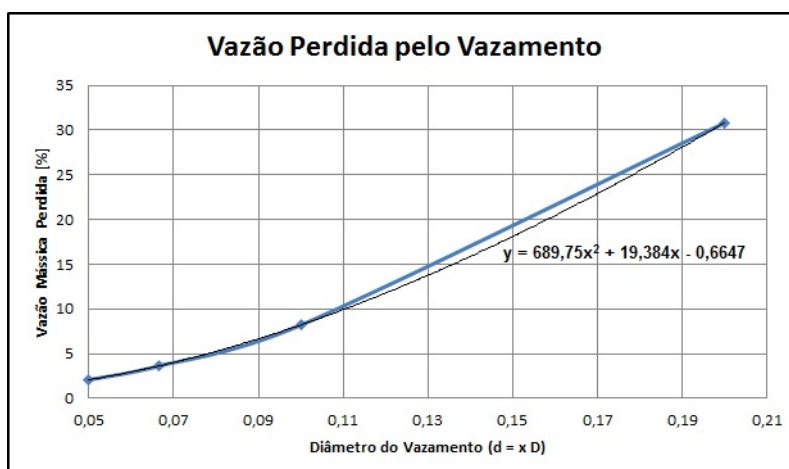


Figura 6.14: Percentual de vazão mássica perdida pelo vazamento.

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam, respectivamente, os perfis de pressão e velocidade para os 4 diâmetros de furo estudados.

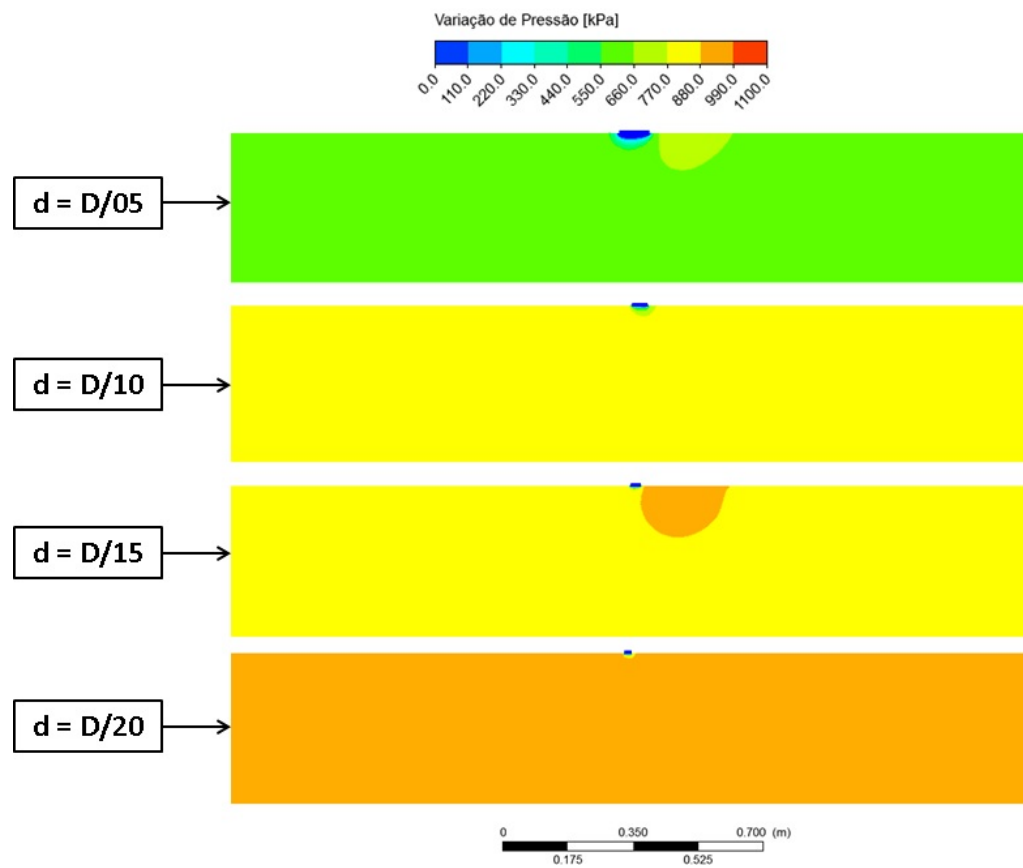


Figura 6.15: Perfis de pressão para os diâmetros estudados na região do vazamento.

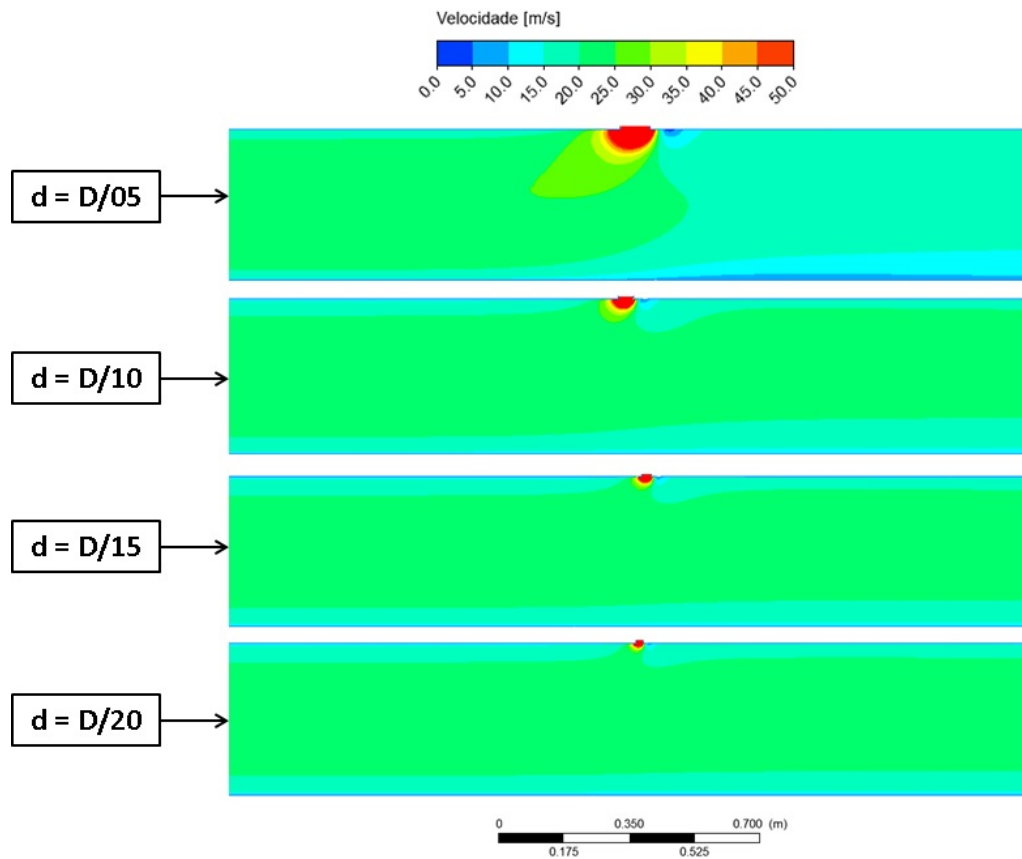


Figura 6.16: Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na região do vazamento.

Semelhantemente, as Figuras 6.17 e 6.18 apresentam os perfis de pressão e velocidade na seção transversal do vazamento, para os 4 diâmetros avaliados.

É notável que a região do furo tem um aumento considerável de pressão e velocidade. De fato, na Figura 6.17, a escala de perda de carga foi limitada a 0, para evitar poluir a visualização, mas o acréscimo de pressão pode chegar a 1,3MPa na região em azul.

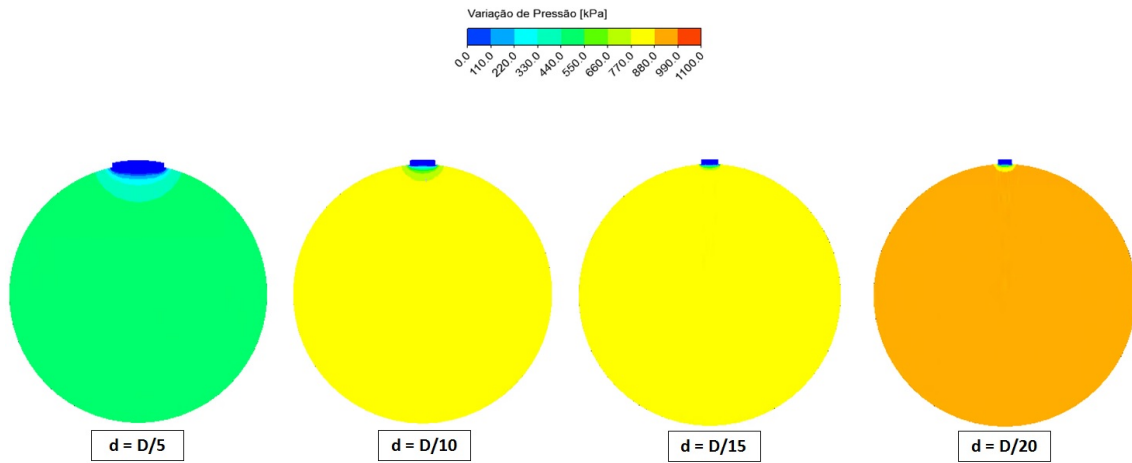


Figura 6.17: Perfis de pressão para os diâmetros estudados na seção transversal do vazamento.

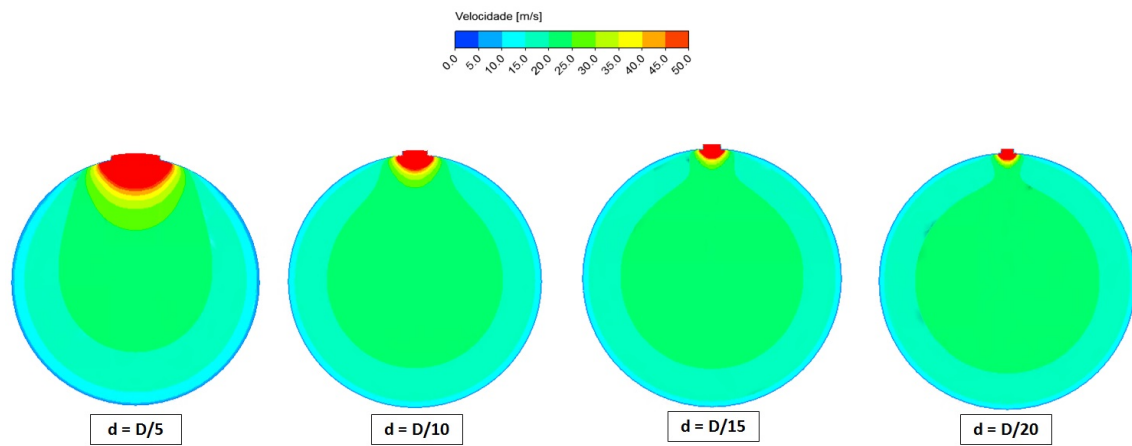


Figura 6.18: Perfis de velocidade para os diâmetros estudados na seção transversal do vazamento.

Capítulo 7

Resultados: Escoamento Bifásico

7.1 Validação

Foram realizadas algumas análises preliminares acerca do comportamento de escoamentos bifásicos, horizontais, com escoamento estratificado.

Para essas análises, foi utilizado como referência o trabalho de Kam (2010), que modela escoamentos bifásicos em uma dimensão. A posição de furo intermediária, a 50% do duto, foi utilizada inicialmente para validação do modelo. A temperatura foi fixada em 15,6°C, em regime isotérmico.

As propriedades geométricas utilizadas no modelo de qualidade de malha são apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Propriedades geométricas do modelo empregado na validação do modelo bifásico.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro do Duto	D	3	In
Comprimento do Duto	L	2000	ft
Diâmetro do Furo	d_L	0,3	In
Posição do Furo	l_L	1000	ft

As condições de contorno e propriedades do fluido utilizadas no modelo também são retirados de Kam (2010), e apresentadas na Tabela 7.2. Deve-se destacar que Kam (2010) empregou a hipótese de fluido incompressível para ambos os fluidos,

sob a suposição de que a pressão de saída seja alta o suficiente para que o gás seja tratado como incompressível. Essa hipótese é adotada também neste trabalho.

Tabela 7.2: Propriedades do fluido e condições de contorno do modelo bifásico.

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidade
Massa Específica do líquido	ρ_l	848,5	kg/m ³
Viscosidade do líquido	μ_l	0,02	cP
Massa Específica do gás	ρ_G	698,7	kg/m ³
Viscosidade do gás	μ_G	3,0	cP
Pressão de Saída	P_s	1000	psi
Pressão externa ao vazamento	P_L	1	atm
Pressão de Referência	P_{ref}	0	atm
Vazão de entrada do líquido	q_L	0,011	m ³ /s
Vazão de entrada do gás	q_G	0,442	m ³ /s
Fração volumétrica de gás na entrada	α_G	0,334	

O número de Reynolds de entrada para esta análise é de cerca de $1,2 \cdot 10^7$ para a fase líquida, e de $6,6 \cdot 10^4$ para a fase gasosa.

Para as análises bifásicas, foram utilizadas as propriedades da malha convergida dos modelos com gás, Malha 2 segundo a Tabela 6.3. As propriedades da malha adotada nos testes bifásicos são descritas na Tabela 7.3.

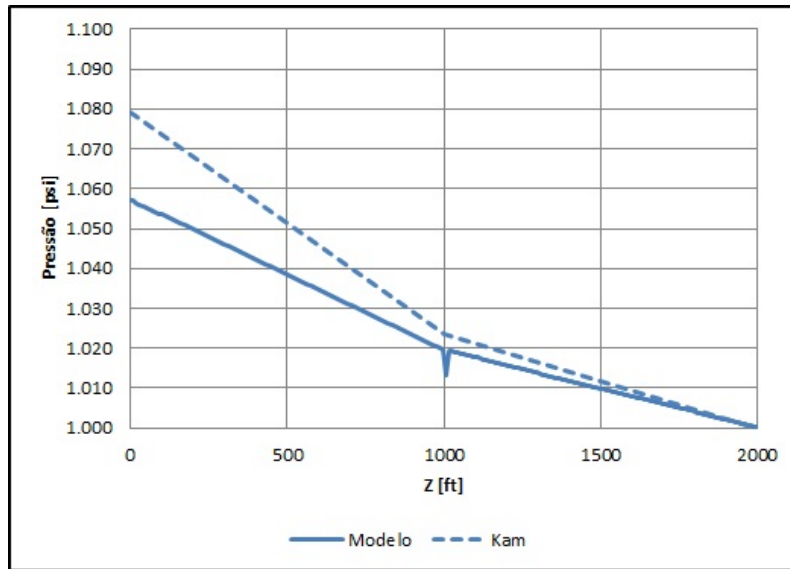
Tabela 7.3: Propriedades de malha definidas para a análise bifásica.

Número de Elementos	961 mil
Número de Nós	857 mil
y^+	7

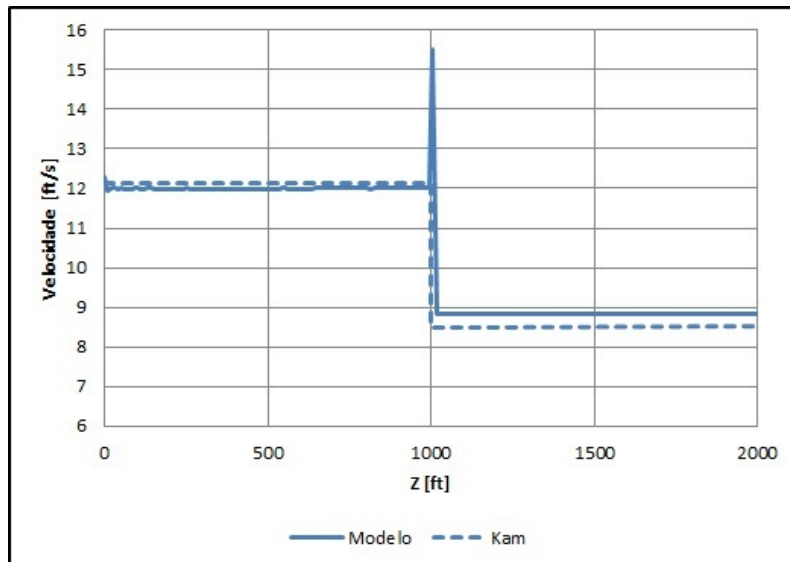
Para assegurar a validade desta malha, foi gerada uma malha adicional mais refinada ($\approx 1,5$ milhão de elementos) para confirmar a validade de malha. As diferenças entre os resultados de pressão e velocidade entre as duas malhas, no Ponto

do Vazamento (Figura 5.2), foi de 0,55% e 0,74%, respectivamente. Sendo assim, a malha descrita na Tabela 7.3 é considerada convergida, e suas propriedades são utilizadas em todas as avaliações bifásicas deste trabalho.

Os resultados de pressão e velocidade total (ponderação de velocidades a partir da fração volumétrica de cada fluido) encontrados por Kam (2010) foram utilizados para validar a modelagem através de CFD. A Figura 7.1 apresenta a comparação entre os dois modelos. Para o resultado tridimensional (CFD), são utilizados os resultados integrados das seções transversais.



(a)



(b)

Figura 7.1: Validação do modelo com os resultados de Kam (2010).

Foi encontrada concordância razoável entre os resultados de Kam (2010) e as simulações. Nos resultados de velocidade especialmente, as variações entre os modelos são ínfimas fora da região do vazamento. Na seção do vazamento em si, há um pico de velocidade na simulação que não está presente na modelagem de Kam (2010), já que a modelagem 1D não é capaz de capturar desvios locais.

Quanto à pressão, os resultados de CFD subestimaram os resultados de Kam (2010), especialmente a montante do vazamento, com uma diferença máxima de 22,1 psi na entrada do duto (20% em relação a Kam (2010)). Essa discrepância pode ser consequência da comparação entre abordagens unidimensional de Kam (2010) e tridimensional (da simulação CFD). As variações entre tais abordagens tendem a ser intensificadas no caso bifásico. Por exemplo, o atrito interfacial entre fases é um termo de dissipação significativo na modelagem bifásica, que é considerado na modelagem CFD mas não na modelagem de Kam (2010).

É sugerido um estudo mais minucioso dessa disparidade, em trabalhos futuros, entretanto para fins de sequência desta análise, o modelo foi considerado validado.

7.2 Análise de Parâmetros

Assim como para as análises monofásicas, foram avaliadas para o caso bifásico variações no diâmetro e posição do vazamento. Nesse caso, foi avaliada também a posição tangencial do vazamento, utilizando os ângulos de 0° (*top*) e 180° (*bottom*), ou seja, a normal do furo está, respectivamente, na direção contrária e na mesma direção da gravidade. Foi utilizado como referência o caso de validação apresentado na Seção 7.1, cujos parâmetros são $d_L = D/10$, $l_L = 50\% L$ e posição tangencial de 0° . Os casos estudados são:

- Diâmetros de vazamento: $d_L = D/10$; $d_L = D/15$; e $d_L = D/20$.
- Posições de vazamento: $l_L = 15\% L$; $l_L = 50\% L$; e $l_L = 85\% L$.
- Posição tangencial do vazamento: 0° e 180° .

As condições de contorno e propriedades do modelo são mantidas idênticas às de validação do modelo, conforme apresentadas na Tabela 7.2.

Destaca-se que, assim como ocorreu no caso monofásico para gás, houve dificuldade de convergência devido ao jato de gás supersônico causado pelo vazamento. Apesar do jato externo não ser avaliado, os efeitos sônicos da saída devem ser considerados na simulação, nos elementos mais próximos ao vazamento.

A mesma abordagem utilizada na simulação de gás foi empregada no caso bifásico, mantendo-se um domínio subsônico de solução e definindo-se apenas a condição de contorno do vazamento como subsônica/sônica, de modo a permitir ambos os regimes de escoamento conforme seja necessário.

Novamente, foi definido um fator de escala local de tempo (*timescale*), para a solução pseudotransiente, e os resultados convergidos deste modelo local foram então definidos como condição inicial de um modelo com *timescale* constante ao longo do domínio. Mais detalhes sobre essa metodologia foram discutidos na Seção 6.3. Cada modelo levou aproximadamente 8 dias para ser concluído. As propriedades de *hardware* do computador em que os modelos foram simulados são: 12 processadores, cada um com 2,4 GHz, 128GB de memória RAM, Windows 7 como sistema operacional.

As Figuras 7.2 e 7.3 comparam o escoamento, considerando um vazamento de $d_L = D/10$, nas duas posições tangenciais de vazamento estudadas.

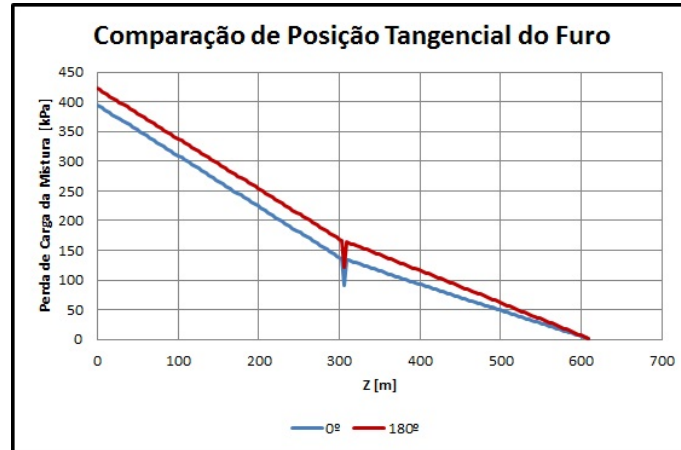


Figura 7.2: Comparação de perda de carga para diferentes posições tangenciais de vazamento.

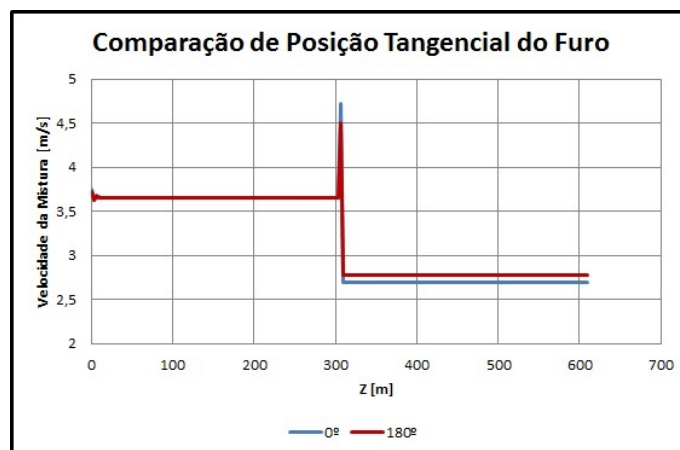


Figura 7.3: Comparação de velocidade para diferentes posições tangenciais de vazamento.

A Tabela 7.4 quantifica essa comparação em relação à velocidade, perda de carga e fração volumétrica no duto.

Tabela 7.4: Propriedades do escoamento, variando-se a posição tangencial do furo.

Propriedade	Vazamento a 0°	Vazamento a 180°	Diferença [%]
Velocidade na Saída [m/s]	2,67	2,77	2,9
Perda de Carga [kPa]	394,7	422,4	7,0
Fração Volumétrica de Líquido [-]	0,85	0,46	45,5

Pode-se notar que a posição do furo em relação à interface gás-líquido tem uma influência considerável nas propriedades do escoamento, especialmente na perda de carga. De fato, a variação de perda de carga devida à posição tangencial do furo é da mesma ordem de grandeza que a devida a sua posição axial.

A diferença de fração volumétrica é natural, considerando-se o posicionamento de cada fluido em relação ao vazamento. É também a responsável pela considerável diferença de perda de carga, já que o gás estudado tem massa específica comparável à do óleo e viscosidade muito maior, tornando a região com maior fração de gás mais propensa a variação de pressão.

Sugere-se que este comportamento seja estudado mais a fundo em trabalhos futuros já que, por ser um parâmetro geométrico e tridimensional, não foram encontrados dados em literatura sobre este fenômeno.

As Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam, respectivamente, os perfis de pressão, velocidade e fração volumétrica de líquido para as duas posições tangenciais de vazamento estudados.

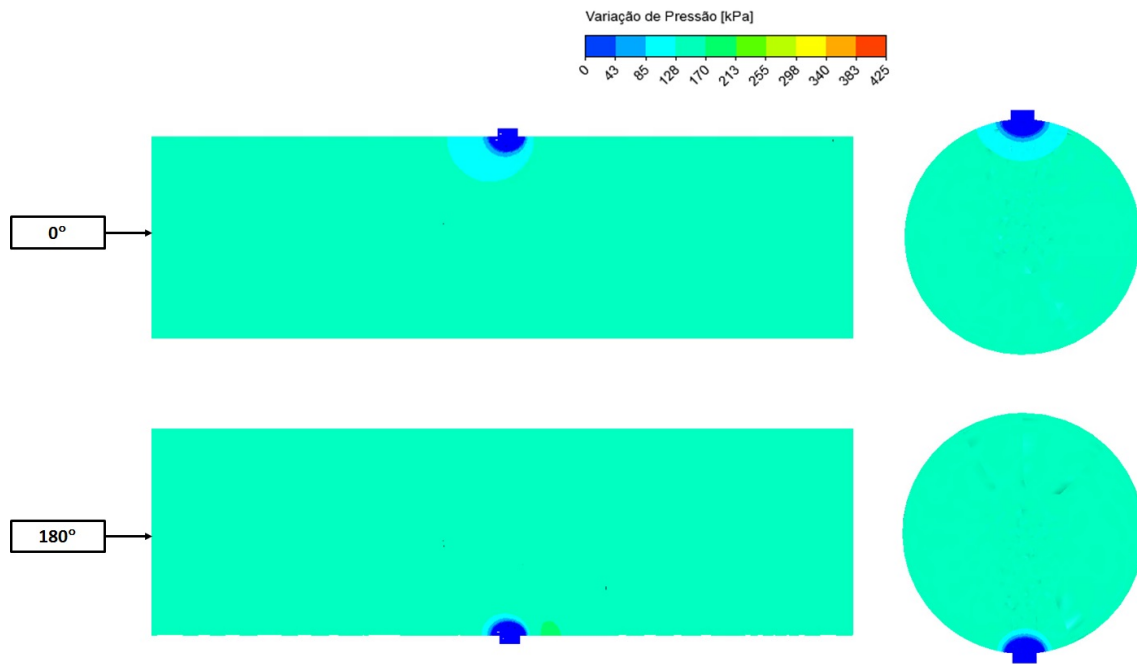


Figura 7.4: Perfis de pressão para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.

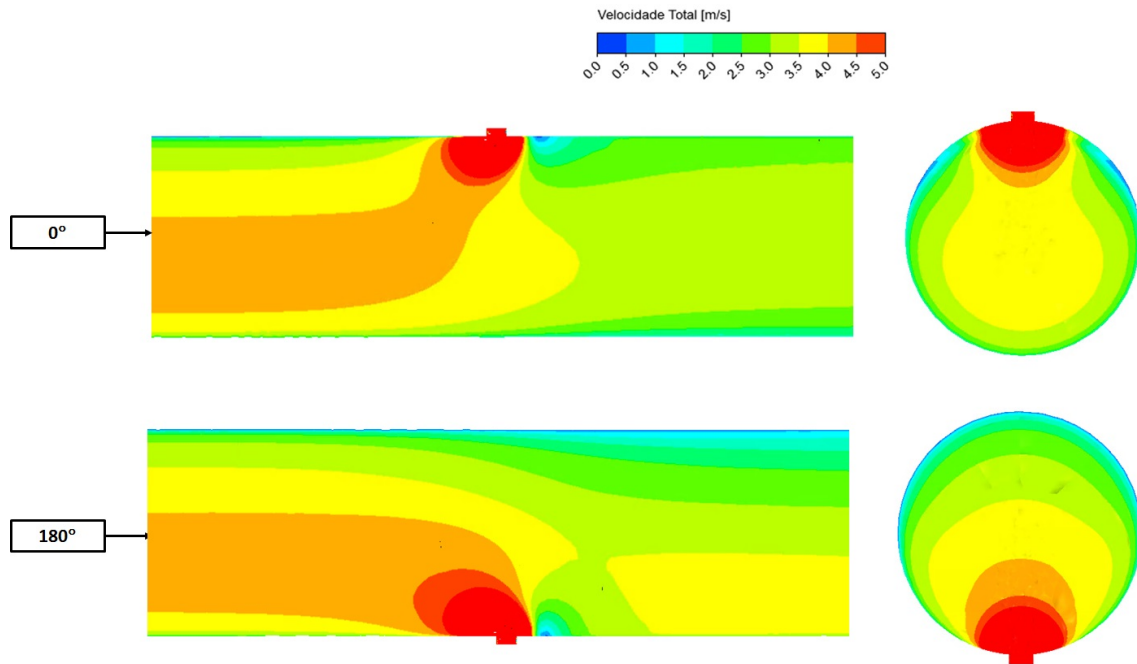


Figura 7.5: Perfis de velocidade para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.

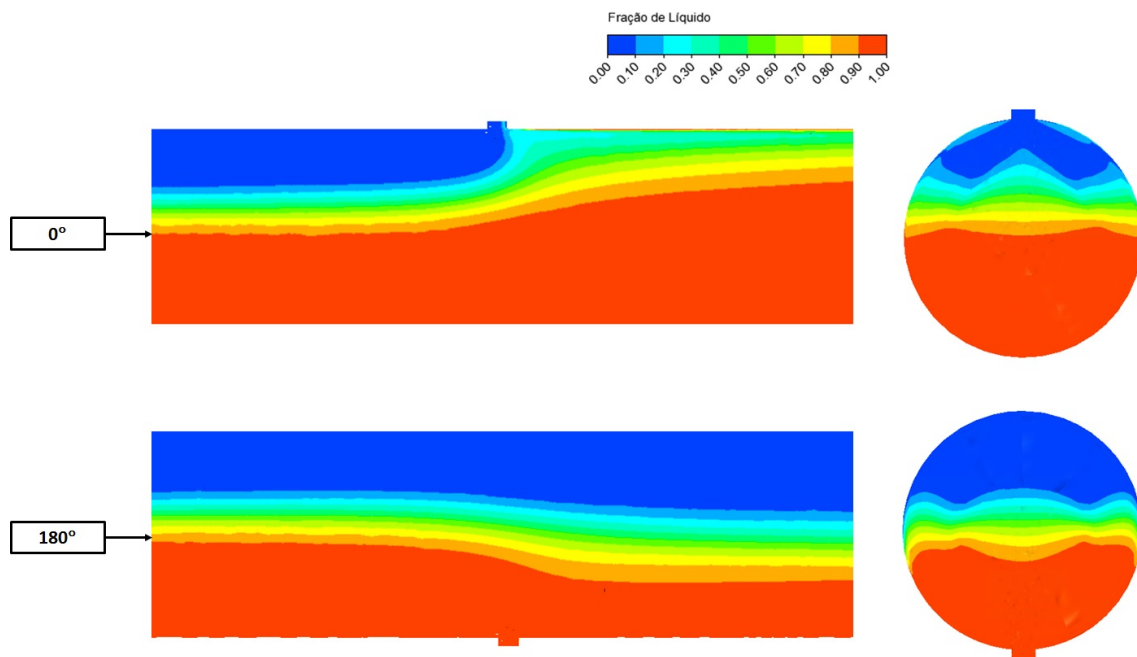


Figura 7.6: Perfis de fração volumétrica de líquido para as posições tangenciais estudadas na região do vazamento.

Quanto à variação de posição axial do vazamento, os resultados seguiram o comportamento já encontrado nas outras análises: quanto mais afastado o vazamento

está da condição de entrada, maior é a perda de carga, e menor é sua variação em relação ao caso sem vazamentos.

Isso se dá porque a perda de velocidade a partir do vazamento causa um decréscimo considerável na perda de carga. Logo, quanto maior o trecho a montante do vazamento, antes de perdas de vazão e velocidade, maior será a perda de carga no sistema.

As Figuras 7.7 e 7.8 comparam o escoamento, considerando um vazamento de $d_L = D/10$, em diferentes posições do duto.

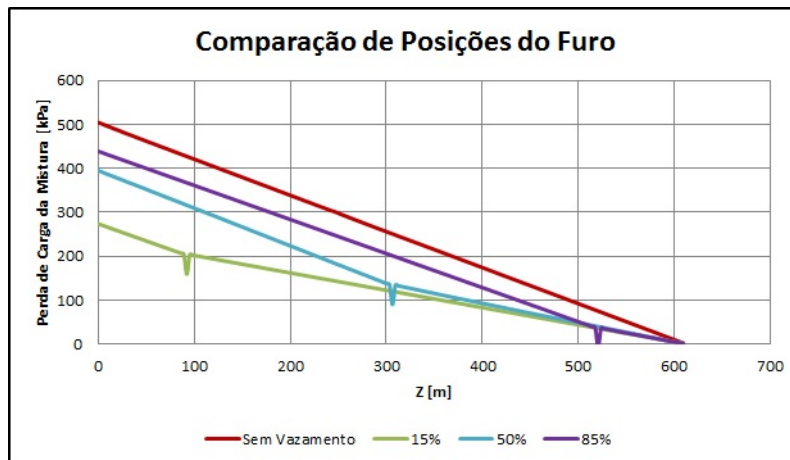


Figura 7.7: Comparação de perda de carga para diferentes posições de vazamento.

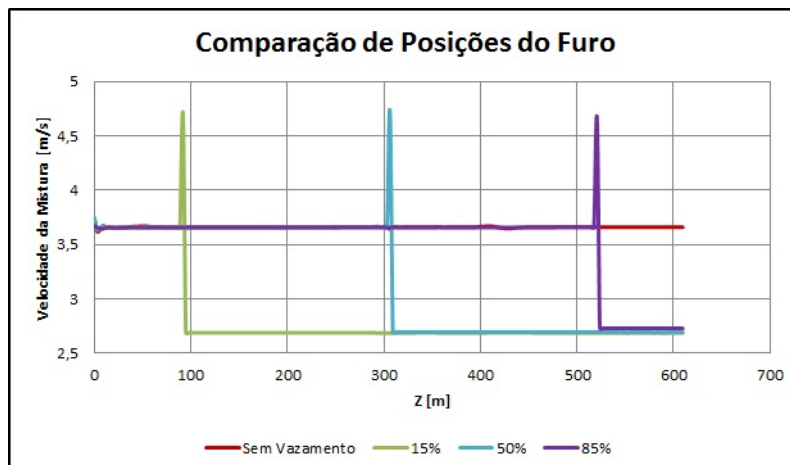


Figura 7.8: Comparação de velocidade para diferentes posições de vazamento.

A Tabela 7.5 quantifica essa comparação em relação à vazão perdida pelo vazamento e à perda de carga no duto.

Tabela 7.5: Propriedades do escoamento, variando-se a posição do furo.

Posição	Velocidade na Saída [m/s]	Perda de Carga [kPa]	Fração Volumétrica de Líquido na Saída [-]
15%	2,69	273,5	0,861
50%	2,69	394,7	0,845
85%	2,73	438,5	0,836

Finalmente, foi comparado o comportamento do escoamento em relação aos diâmetros de furo. Análogo ao que ocorre com a comparação de posição, quanto maior o furo, e maior a perda de fluido pelo vazamento, menor será a velocidade do líquido a jusante do vazamento, e menor a perda de carga total no duto. As Figuras 7.9 e 7.10 comparam características do escoamento, considerando um vazamento a 50% do duto, de diversos diâmetros.

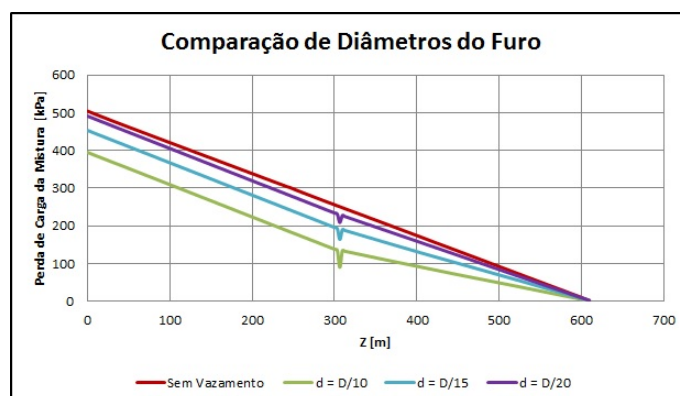


Figura 7.9: Comparação de perda de carga para diferentes diâmetros de vazamento.

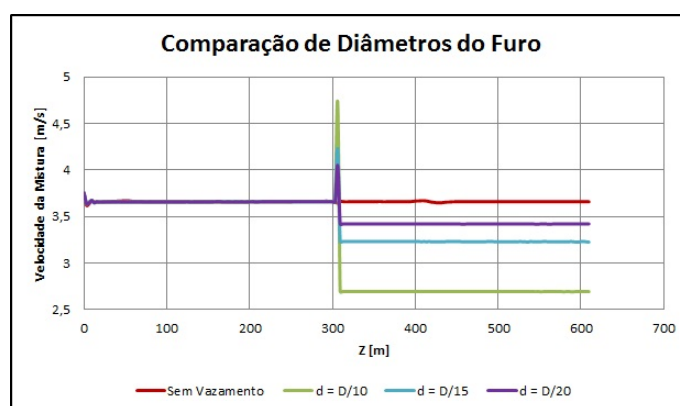


Figura 7.10: Comparação de velocidade para diferentes diâmetros de vazamento.

A Tabela 7.6 quantifica essa comparação em relação à vazão perdida pelo vazamento e à perda de carga no duto.

Tabela 7.6: Propriedades do escoamento, variando-se o diâmetro do furo.

Posição	Velocidade na Saída [m/s]	Perda de Carga [kPa]	Fração Volumétrica de Líquido na Saída [-]	Vazão do Vazamento [%]
$d_L = D/10$	2,69	394,7	0,845	66,0
$d_L = D/15$	3,22	452,9	0,687	37,2
$d_L = D/20$	3,42	490,9	0,671	23,2

As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam, respectivamente, os perfis de pressão, velocidade e fração volumétrica de líquido para os diferentes diâmetros de furo estudados.

Novamente, como ocorreu com os casos monofásicos, a região do furo tem um aumento considerável de pressão e velocidade. Na Figura 7.11, a escala de perda de carga foi limitada a 0, para evitar poluir a visualização, mas o acréscimo de pressão pode chegar a 2,4MPa na região em azul.

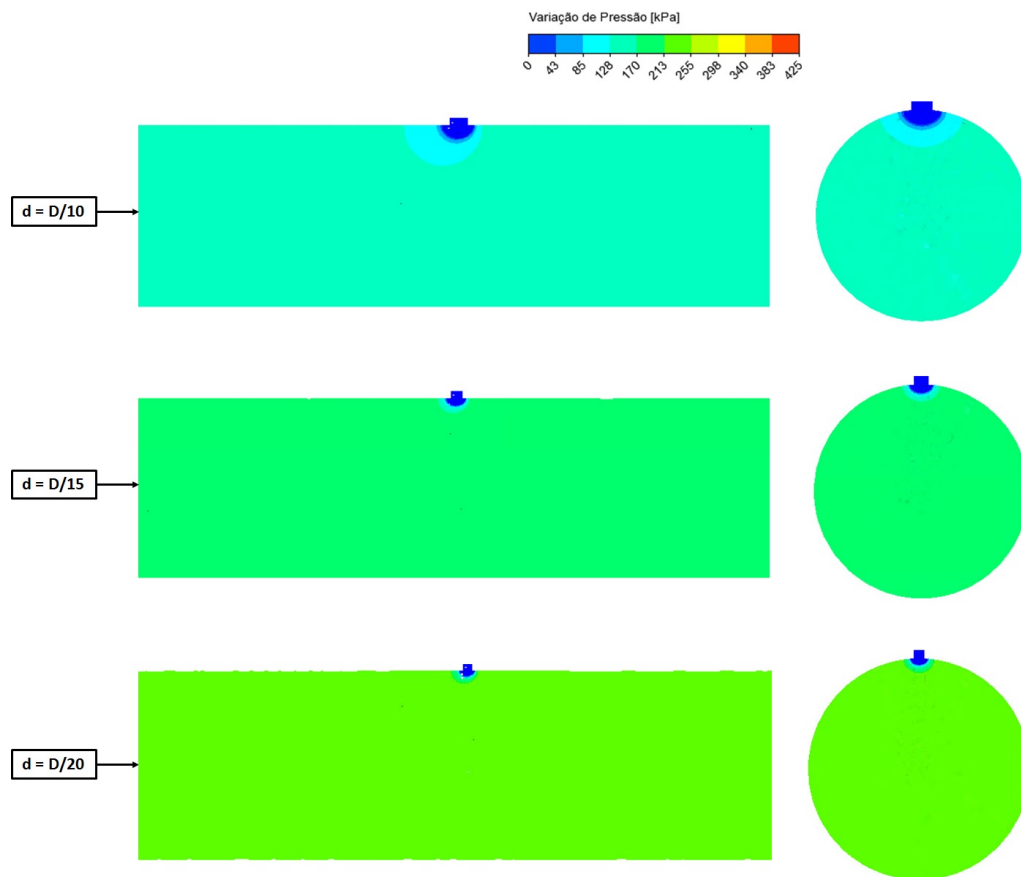


Figura 7.11: Perfis de pressão para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.

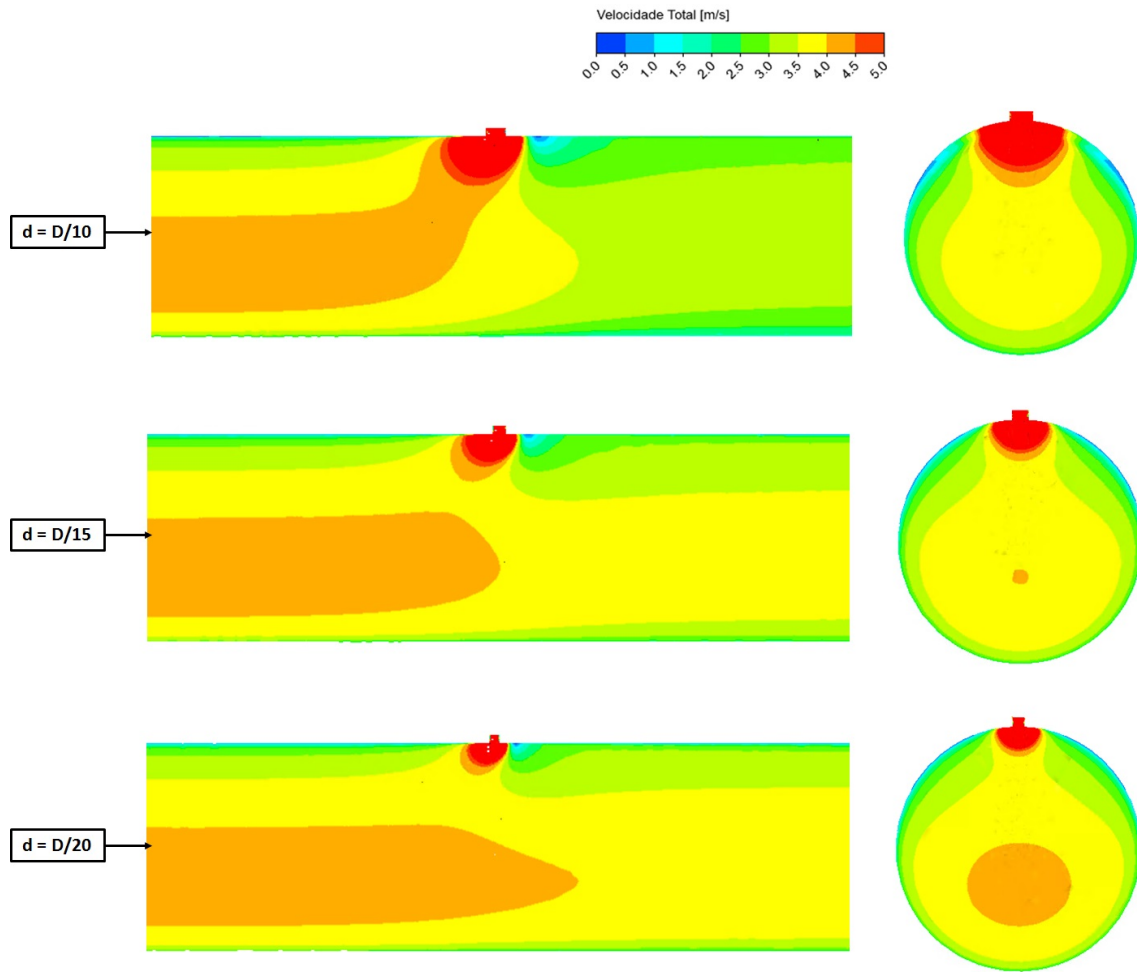


Figura 7.12: Perfis de velocidade para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.

Nota-se também, através da Figura 7.13, que quanto menor o furo, menor é a perturbação causada por ele fora do entorno imediato do vazamento, especialmente na fase líquida.

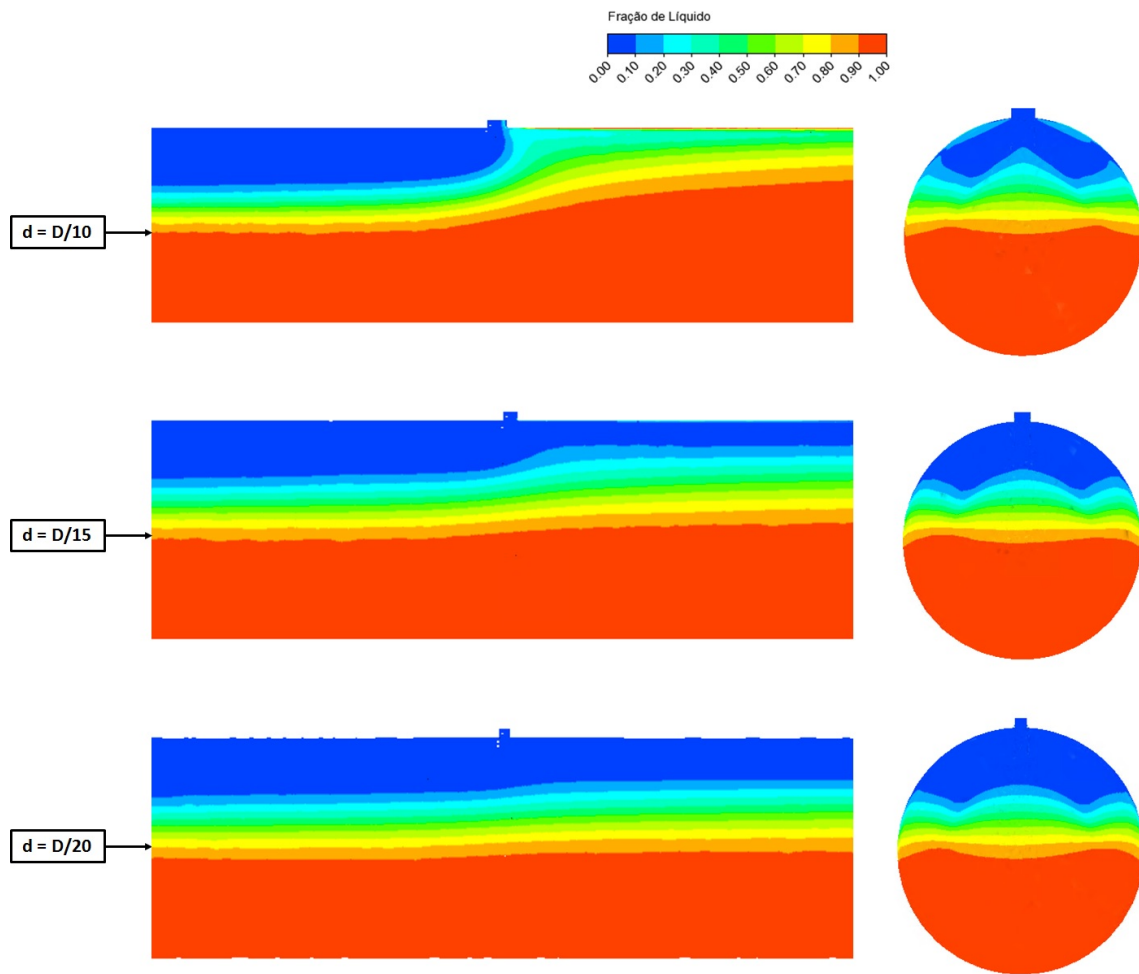


Figura 7.13: Perfis de fração volumétrica de líquido para os diâmetros de furo estudados na região do vazamento.

Capítulo 8

Conclusões

Vazamentos em tubulações podem ser extremamente prejudiciais em termos econômicos, ambientais e de segurança. É portanto necessário localizá-los o mais rapidamente possível. Como a maior parte dos SDV's utiliza dados obtidos de medidores instalados ao longo das tubulações, a compreensão do escoamento interno ao duto em uma situação de vazamento é fundamental.

Este trabalho apresenta uma modelagem de simulação de vazamentos em dutos, através de fluidodinâmica computacional (CFD), para líquidos e gases, bem como uma avaliação preliminar de escoamentos bifásicos. Foi considerado escoamento tridimensional e turbulento, de padrão estratificado, e modelados trechos de linhas reais em operação. Os modelos CFD foram validados a partir de dados disponíveis em literatura, e foram realizados testes de convergência de malha para cada etapa do projeto, garantindo a validade dos dados gerados.

Os resultados indicam que, para escoamentos monofásicos (líquido ou gasoso), a simplificação do escoamento através de modelos unidimensionais é adequada, e representa bem o fenômeno tridimensional. De fato, os efeitos tridimensionais do vazamento somente são sentidos por um pequeno trecho em sem entorno, de não mais que 12 diâmetros do duto (12D), a montante e jusante do furo.

Para escoamentos bifásicos, os efeitos tridimensionais são mais notáveis, especialmente em relação à perda de carga, e houve diferenças apreciáveis entre o modelo tridimensional e o modelo de validação, sugerindo que a abordagem unidimensional não representa fielmente o escoamento. É sugerido um estudo mais aprofundado da modelagem bifásica, visando quantificar o efeito tridimensional para uma gama

maior de parâmetros, e estimar quando a abordagem unidimensional deixa de ser válida.

Foi avaliada a influência da variação de tamanho e posição do vazamento, para todos os regimes de escoamento estudados. Encontrou-se que, quanto mais afastado o vazamento está da condição de entrada, ou maior o tamanho do furo, maior é a perda de carga no duto e menor é sua variação em relação ao caso sem vazamentos. Isso ocorre porque a perda de vazão, e consequentemente de velocidade, a partir do vazamento causa um decréscimo considerável na perda de carga.

Para o modelo bifásico, foi ainda estudada a variação de posição tangencial do vazamento, considerando um furo na região superior do duto (vazamento de gás) e um furo na região inferior do duto (escape de líquido). Esse parâmetro tem influência considerável nas propriedades do escoamento. Efetivamente, a variação de perda de carga devida à posição tangencial do furo é da mesma ordem de grandeza que a devida a sua posição axial. Reitera-se portanto a necessidade de um estudo mais abrangente dos efeitos tridimensionais em escoamento bifásicos em vazamento.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Em continuidade ao presente trabalho, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Realização de experimentos em escala reduzida de vazamentos, tanto monofásicos quanto bifásicos, para validação mais efetiva de potenciais modelos estudados.
- Avaliação da modelagem de vazamentos bifásicos considerando gás compressível. Estudo focado na modelagem bifásica (ou multifásica) de vazamentos em dutos, considerando-se os diferentes padrões de escoamento e uma gama maior de parâmetros variados. As análises poderiam avaliar a influência do efeito tridimensional no escoamento, e estimar quando a abordagem unidimensional deixa de ser válida.
- Desenvolvimento de modelagem unidimensional, válida para avaliações monofásicas e multifásicas, considerando a faixa válida da abordagem unidimensional.

Capítulo 9

Referências Bibliográficas

- ANSYS® (2015). *Theory Guide, Release 16.0*. ANSYS Inc., Cannonsbourg, EUA.
- API 1155 (1995). *Evaluation methodology for software based leak detection systems*. American Petroleum Institute, primeira edição.
- Ariff, M., Salim, S. M., e Cheah, S. C. (2009). Wall y^+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 1 - low reynolds number. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*.
- Baghdadi, A. H. A. e Mansy, H. A. (1988). A mathematical model for leak location in pipelines. *Applied Mathematical Modeling*, 12.
- Baker, T. J. (2005). Mesh generation: Art or science? *Progress in Aerospace Sciences*, 41:29–63.
- Baptista, R. M., Campos, W., Rachid, F. B. F., e Araujo, J. H. C. (2001). Uma nota sobre a incerteza associada à localização de vazamentos. *Brazilian Petroleum and Gas Institute*.
- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Khalifa, A., Youcef-Toumi, K., e Chatzigeorgiou, D. (2012). Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. *Computers & Fluids*, 57:110–123.
- Billmann, L. e Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, 25:381–385.

- Bueno, D. E. G. P., Figueiredo, A. B., Baptista, R. M., Rachid, F. B. F., e Bodstein, G. C. R. (2014). Numerical simulation of stratified two-phase flow in a nearly horizontal gas-liquid pipeline with a leak. *Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference*.
- Chuanhu, G., Guizeng, W., e Hao, Y. (2008). Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 32:1669–1680.
- Courant, R., Friedrichs, K., e Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal of Research and Development*, 11(2):215–234.
- Craig, R. F. (2005). *Soil Mechanics*. Spon Press, Dundee, UK, sétima edição.
- Elaoud, S. e Hadj-Taïeb, E. (2008). Transient flow in pipelines of high-pressure of hydrogen-natural gas mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:4824–4832.
- Elaoud, S., Hadj-Taïeb, L., e Hadj-Taïeb, E. (2010). Leak detection of hydrogen-natural gas mixtures in pipes using the characteristics method of specified time intervals. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23:637–645.
- EPA (1990). Standard test procedures for evaluating leak detection methods: Pipeline leak detection systems. Technical report, United States Environmental Protection Agency.
- Geiger, G. (2006). State-of-the-art in leak detection and localisation. *Pipeline Technology 2006 Conference*.
- Geiger, G., Gregoritz, W., e Matko, D. (2000). Leak detection and localisation in pipes and pipelines. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*.
- Hou, Q., Jiao, W., Ren, L., Cao, H., e Song, G. (2014). Experimental study of leakage detection of natural gas pipeline using fbg based strain sensor and least square support vector machine. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32:144–151.

- Ishii, M. (1990). Two-fluid model for two-phase flow. *Multiphase Science and Technology*, 5:1–63.
- Kam, S. I. (2010). Mechanistic modeling of pipeline leak detection at fixed inlet rate. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70:145–156.
- Kundu, P. K. e Cohen, I. M. (2002). *Fluid mechanics*. Elsevier Science, London, UK, segunda edição.
- Larock, B. E., Jeppson, R. W., e Watters, G. Z. (2000). *Hydraulics of pipeline systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, primeira edição.
- Liu, H. (2003). *Pipeline engineering*. CRC Press, Boca Raton, Florida, primeira edição.
- Madeira, I. M. (2011). *Detecção do fechamento de válvula em gasodutos pela utilização de filtros de partículas*. PhD thesis, COPPE/UFRJ.
- Malalasekera, W. e Versteeg, H. K. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*. Prentice Hall ISBN, Essex, UK, primeira edição.
- McAllister, E. W. (2002). *Pipeline rules of thumb handbook*. Gulf Professional Publishing, Woburn, EUA, quinta edição.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32:38–44.
- Molina-Espinosa, L., Cazarez-Candia, O., e Verde-Rodarte, C. (2013). Modeling of incompressible flow in short pipes with leaks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109:38–44.
- Montiel, H., Vélchez, J. A., Casal, J., e Arnaldos, J. (1998). Mathematical modelling of accidental gas releases. *Journal of Hazardous Materials*, 59:211–233.
- Moser, A. P. (2001). *Buried Pipe Design*. McGraw-Hill, segunda edição.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC Press, primeira edição.
- Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, primeira edição.

- Roy, C. J. (2005). Review of code and solution verification procedures for computational simulation. *Journal of Computational Physics*.
- Shehadeh, M. e Shahata, A. I. (2013). Modelling the effect of incompressible leakage patterns on rupture area in pipeline. *CFD Letters*, 5.
- Sun, L. (2012). Mathematical modeling of the flow in a pipeline with a leak. *Mathematics and Computers in Simulation*, 82:2253–2267.
- Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, 9:673–682.
- Verde, C. (2005). Accommodation of multi-leak location in a pipeline. *Control Engineering Practice*, 13:1071–1078.
- Verruijt, A. (2001). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Wei, L., Laibin, Z., Qingqing, X., e Chunying, Y. (2013). Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology. *Engineering Failure Analysis*, 31:1–7.
- Wilcox, D. C. (1988). Multiscale model for turbulent flows. *AIAA Journal*, 26:1311–1320.
- Yuhu, D., Huilin, G., Jing'en, Z., e Yaorong, F. (2003). Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines. *Chemical Engineering Journal*, 92:237–241.
- Zhang, J. (1996). Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system. *Pipeline Reliability Conference*.