



Programa de
Recursos
Humanos



anp
Agência
Nacional do
Petróleo



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do
Petróleo e Gás Natural**



ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS: PREVISÃO DE GRADIENTES DE PRESSÃO COM A CORRELAÇÃO DE LOCKHART & MARTINELLI E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Raquel Greice Silva de Souza

Projeto de Final de Curso

Orientador

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

Fevereiro de 2009

Escoamento Bifásico Líquido-Gás: Previsão de Gradientes de Pressão com a Correlação de Lockhart & Martinelli e Fluidodinâmica Computacional

Raquel Greice Silva de Souza

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheira Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Refino e Processamento de Petróleo.

Aprovado por:

Affonso Carlos S. da Silva Telles, Ph. D.

Caetano Moraes, Ph. D.

Eduardo Augusto Reif de Paula, Eng.

Orientado por:

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2009

Ficha Catalográfica

Souza, Raquel Greice Silva.

Escoamento Bifásico Líquido-Gás: Previsão de Gradientes de Pressão com a Correlação de Lockhart & Martinelli e Fluidodinâmica Computacional/Raquel Greice Silva de Souza. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

vi, p. 74; il. (Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientador: Ricardo Pires Peçanha.

1. Escoamento bifásico líquido-gás. 2. Lockhart & Martinelli. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

Dedicatória

Dedico a minha mãe, base fundamental para minha existência.
Ao meu irmão e amigos devido ao apoio nas rotinas e horas difíceis.
Por fim, a todos os doutores e mestres que contribuíram à minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Primeiro e em especial ao meu orientador que cumpriu de forma magistral o seu papel de professor.

A Escola de Química pela estrutura fornecida nesses cinco anos e aos professores que fizeram a diferença na minha formação acadêmica, inclusive pessoal.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH 13, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Amigos e familiares pelo apoio ao longo dessa jornada.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Refino e Processamento de Petróleo.

ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS: PREVISÃO DE GRADIENTES DE PRESSÃO COM A CORRELAÇÃO DE LOCKHART & MARTINELLI E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Raquel Greice Silva de Souza

Fevereiro, 2009

Orientador: Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

A correlação de Lockhart & Martinelli (1949) permite prever a queda de pressão por atrito viscoso por unidade de comprimento de tubo (ou gradiente de pressão), no escoamento isotérmico de misturas bifásicas líquido-gás em regime permanente em tubulações horizontais. Esses escoamentos são muito comuns em indústrias químicas de um modo geral bem como nas áreas de exploração de gás natural e petróleo e também em plantas de condicionamento de gás natural e refinarias de petróleo. A partir do gradiente de pressão dimensionam-se tubulações, válvulas, bombas e compressores necessários à operação e ao controle automático de tais sistemas de transporte.

A hipótese básica da correlação de Lockhart & Martinelli e outras semelhantes é a de existência de equilíbrio termodinâmico entre as fases em contato. Assim não ocorreria transferência de massa entre elas durante o escoamento. Isto equivale a dizer que as fases escoariam permanentemente saturadas uma na outra. Entretanto, o fato de que num escoamento a pressão varia ao longo da tubulação, aliado ao fato de que solubilidades dependem de pressão, implica no não-equilíbrio de tais sistemas. Além disso, o escoamento de fluidos reais é sempre acompanhado de aquecimento (dissipação viscosa), o que também afeta as solubilidades mútuas das fases produzindo também desvios da pretendida condição de equilíbrio. Todas essas limitações e o próprio princípio estrutural da correlação, baseada nos gradientes de pressão a que estariam sujeitas cada fase caso escoassem sozinhas com a mesma vazão no mesmo tubo, suas previsões levam a erros de até 50 %. Em que pesem todas essas limitações, a referida correlação continua sendo muito útil para estimativas rápidas de gradientes de pressão em tais escoamentos.

A existência de sofisticados códigos computacionais para a simulação de escoamento de fluidos, aliada à importância dos escoamentos bifásicos líquido-gás para indústria de petróleo e gás natural, nos motivou a estudar tais sistemas confrontando previsões de *softwares* comerciais de fluidodinâmica computacional e correlações empíricas de uso corrente nessa área. Mais especificamente o objetivo desse projeto final de curso foi o de comparar gradientes de pressão no escoamento bifásico líquido-gás em tubos horizontais previstos pela correlação de Lockhart e Martinelli e pelo código ANSYS CFX 11.0 disponível na UFRJ. Foram analisados os regimes borbulhado e estratificado para misturas água e ar a 25 °C, escoando em tubo com diâmetro nominal de 1 polegada.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Refining and Processing.

TWO-PHASE LIQUID-GAS FLOW: PRESSURE GRADIENT PREDICTION WITH LOCKHART & MARTINELLI CORRELATION AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Raquel Greice Silva de Souza

February, 2009

Supervisor: Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

The Lockhart & Martinelli correlation (1949) allows to predict the pressure drop due to friction per unit length of tube (or pressure gradient) for the steady state isothermal two-phase liquid-gas flow in horizontal pipes. This type of flow is frequent in chemical industries in general, as well as in natural gas and petroleum production and also in natural gas conditioning plants and petroleum refineries. Knowledge of the pressure gradient allows the sizing of pipes, valves, pumps and compressors necessary to the operation and automatic control of this type of transport system.

The basic assumption of Lockhart & Martinelli correlation and others is the existence of thermodynamic equilibrium between the contacting phases. Thus no mass transfer between phases would occur during flow. This is equivalent to say that phases would flow permanently saturated one in the other. However, the fact that flow pressure changes along the tube, together with the fact that phases' mutual solubility depends on pressure, implies the non-equilibrium of these systems. Besides that, the flow of real fluids is always associated with heating (viscous dissipation), which also affects the mutual solubility of phases, causing further deviations from the assumed equilibrium condition. All these limitations, together with the correlation structural principle, based on the pressure gradient that would result for each phase flowing alone with the same flow rate in the same tube, lead to predictions errors up to 50 %. In spite of all these limitations the referred correlation is still very useful for quick estimates of pressure gradients in such flows.

The existence of sophisticated computational codes for simulation of fluid flow, together with importance of two-phase liquid-gas flows particularly for the petroleum and natural gas industry, has motivated us to study such systems by confronting predictions of computational fluid dynamics commercial software and empirical correlations in current use in this area. More specifically, the objective of this final year project was to compare predictions of pressure gradients in two-phase liquid-gas flow in horizontal tubes with the Lockhart & Martinelli correlation and the code ANSYS CFX 11.0 available at UFRJ. The bubbly and stratified regimes were analyzed for mixtures of water and air at 25 °C, flowing in a 1 inch nominal diameter tube.

ÍNDICE

Capítulo I - Introdução.....	1
Capítulo II - Fundamentos.....	8
II.1 - Escoamento Bifásico Líquido-Gás	8
II.2 - Correlação de Lockhart & Martinelli.....	11
II.2.1 - Histórico da Correlação de Lockhart & Martinelli.....	12
II.2.2 - Princípios de Lockhart & Martinelli.....	13
II.3 - Correlação de Friedel.....	16
II.4 - Simulação de Escoamento de Fluidos.....	18
II.4.1 - Fluidodinâmica Computacional.....	18
II.4.2 - Evolução da Fluidodinâmica Computacional.....	19
II.4.3 - ANSYS CFX.....	20
II.5 - Fundamentos Físicos.....	21
II.5.1 - Sistema de Equações.....	21
II.5.2 - Forças Envolvidas no Escoamento Bifásico Borbulhado	24
Capítulo III - Metodologias e Procedimentos de Cálculos	27
III.1 - Dados Gerais.....	27
III.2 - Cálculo das Velocidades Superficiais.....	28
III.3 - Determinação do Regime de Escoamento.....	31
III.4 - Cálculo do Gradiente de Pressão para Cada Fase.....	33
III.5 - Cálculo do Gradiente de Pressão Bifásico	34
III.6 - Cálculo do Desvio Percentual do Gradiente de Pressão	36
III.7 - Cálculo da Espessura da Camada Limite	36
Capítulo IV - Resultados para Regime Borbulhado – Tubo Horizontal	38
IV.1 - Geração da Malha para as Simulações do Regime Borbulhado.....	38
IV.2 - Escoamento Monofásico	40
IV.2.1 - Na Região de Turbulência Incompleta.....	40
IV.2.2 - Região de Turbulência Completa.....	41
IV.3 - Simulações com CFD do Regime Borbulhado na Região de Turbulência Incompleta.....	43

IV.4 -	Simulações com CFD do Regime Borbulhado na Região de Turbulência Completa.....	49
IV.5 -	Comparação das Simulações por CFD do Regime Borbulhado com Correlações Empíricas	54
Capítulo V - Resultados para Regime Estratificado – Tubo Horizontal.....		57
V.1 -	Geração da Malha para as Simulações do Regime Estratificado	57
V.2 -	Escoamento Monofásico	57
V.3 -	Simulações por CFD do Regime Estratificado.....	59
V.4 -	Comparação das Simulações por CFD do Regime Estratificado com Correlações Empíricas	60
Capítulo VI - Conclusões e Recomendações		61
VI.1 -	Escoamento Monofásico	61
VI.2 -	Escoamento Bifásico.....	62
VI.3 -	Recomendações	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64
APÊNDICES		66
A -	Diagrama de Moody	66
B -	Modelos e Considerações Utilizados nas Simulações com CFD	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1	Escoamento borbulhado horizontal.....	3
Figura I-2	Escoamento tamponado horizontal.....	3
Figura I-3	Escoamento estratificado horizontal.....	4
Figura I-4	Escoamento ondulado horizontal.....	4
Figura I-5	Escoamento pistonado horizontal.....	5
Figura I-6	Escoamento anular horizontal.....	5
Figura I-7	Escoamento disperso horizontal.....	6
Figura I-8	Padrões de escoamento bifásico vertical.....	6
Figura II.1-1	Mapa de Baker.....	10
Figura II.2.2-1	Correlação de L&M.....	15
Figura II.5.2-1	Força de sustentação.....	25
Figura II.5.2-2	Força lubrificante de parede.....	26
Figura IV.1-1	Malha da tubulação visão lateral.....	38
Figura IV.1-2	Malha da tubulação visão lateral.....	39
Figura IV.1-3	Malha da tubulação visão frontal.....	39
Figura IV.2.1-1	Queda de pressão – escoamento monofásico.....	40
Figura IV.2.2-1	Queda de pressão – escoamento monofásico.....	42
Figura IV.3-1	Queda de pressão – modelo homogêneo.....	44
Figura IV.3-2	Queda de pressão – escoamento caso 1.....	46
Figura IV.3-3	Queda de pressão – escoamento caso 2.....	47
Figura IV.3-4	Queda de pressão – escoamento caso 3.....	48
Figura IV.4-1	Queda de pressão – modelo homogêneo.....	50
Figura IV.4-2	Queda de pressão – escoamento caso 4.....	51
Figura IV.4-3	Queda de pressão – escoamento caso 5.....	52
Figura IV.4-4	Queda de pressão – escoamento caso 6.....	53
Figura V.2-1	Queda de pressão – escoamento monofásico.....	58
Figura V.3-1	Queda de pressão – escoamento estratificado.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela III.1-1 Propriedades físico-químicas dos fluidos.	27
Tabela III.1-2 Descrição da tubulação.	28
Tabela III.2-1 Pontos do mapa de Baker.	29
Tabela III.2-2 Fluxo mássico dos padrões de escoamento.	29
Tabela III.2-3 Parâmetros das fases do escoamento.	31
Tabela III.3-1 Parâmetros do regime do escoamento.	33
Tabela III.4-1 Gradiente de pressão das fases.	34
Tabela III.5-1 Parâmetros de L&M.	34
Tabela III.5-2 Gradiente de pressão dos escoamentos bifásicos para cada fase.	35
Tabela III.5-3 Gradiente de pressão dos escoamentos bifásicos.	35
Tabela III.7-1 Espessura da sub-camada laminar.	37
Tabela IV.2.1-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.	41
Tabela IV.2.2-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.	42
Tabela IV.5-1 Gradiente de pressão– escoamento borbulhado.	54
Tabela IV.5-2 Gradiente de pressão – escoamento borbulhado.	54
Tabela IV.5-3 Gradiente de pressão– escoamento borbulhado.	55
Tabela IV.5-4 Gradiente de pressão – escoamento borbulhado.	55
Tabela V.2-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.	58
Tabela V.4-1 Gradiente de pressão – escoamento estratificado.	60

NOMENCLATURA

Letras Latinas

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área de seção reta do tubo	m
B	Soma das forças de campo por volume de fluido	Pa/m
C_f	Fator de atrito para equação de Friedel	-
C_μ	Constante turbulenta	-
d	Diâmetro da bolha de ar	-
DE	Diâmetro externo do tubo	m
DI	Diâmetro interno do tubo	m
DN	Diâmetro nominal do tubo	m
f	Fator de atrito de Darcy	-
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
G	Fluxo mássico	kg/m ² s
N_{RE}	Número de Reynolds	-
Q	Vazão volumétrica	m ³ /s
p	Pressão	Pa
p	Pressão modificada	Pa
t	Tempo	s
S_M	Força de campo por volume de fluido	Pa/m
V	Velocidade	m/s
V_∞	Velocidade de aproximação	m/s
x	Fração volumétrica de gás (qualidade)	-
W	Vazão mássica	kg/s

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
χ	Parâmetro adimensional de L&M	-
$\Delta P/\Delta L$	Gradiente de pressão	Pa.s
δ_L	Espessura da camada limite	m
ϵ	Rugosidade relativa	m
ϕ	Multiplicador de fase de Friedel	-
γ	Multiplicado de fase de L&M	-
λ	Parâmetro adimensional de L&M	-
μ	Viscosidade dinâmica	Pa. s
μ_{eff}	Viscosidade efetiva	Pa. s
μ_t	Viscosidade turbulenta	Pa. s
v	Velocidade superficial	m/s ²
ρ	Massa específica	kg/m ³
σ	Tensão superficial	Pa
τ	Tensão cisalhante	Pa
ψ	Parâmetro adimensional de L&M	-

Subscritos

Símbolo	Descrição	Unidade
BF	Escoamento Bifásico	-
F	Escoamento Monofásico	-
h	Média das fases	-
G	Fase gasosa	-
L	Fase líquida	-

Capítulo I - Introdução

O uso de tubulações como meio de transporte de fluidos, sobretudo de líquidos, é uma prática antiga e bem documentada ao longo da história do mundo. Os chineses utilizavam bambus, os egípcios e astecas materiais cerâmicos e os gregos e romanos empregavam tubos de chumbo.

O primeiro oleoduto para transporte de petróleo foi construído em 1865 e ligava um campo de produção a uma estação de carregamento de vagões a uma distância de cerca de 8 km na Pensilvânia. Possuía um diâmetro nominal de 2 in e usava tubos de ferro fundido. Foi projetado para substituir a mão-de-obra de carroceiros, que faziam este transporte com base em tração animal.

No Brasil, os primeiros oleodutos também estiveram ligados ao escoamento de petróleo a partir dos locais de produção. A primeira linha de que se tem registro foi construída na Bahia, com diâmetro de 2 in e 1 km de extensão. Ligava a "Refinaria Experimental de Aratu" ao Porto de Santa Luzia que recebia o petróleo dos "Saveiros-Tanques" vindos dos campos de Itaparica e Joanes, com início de operação em maio de 1942.

Escoamentos bifásicos líquido-gás em particular, objeto deste projeto final de curso, são muito comuns em processos industriais envolvendo ebulição de líquidos e condensação de vapores. Exemplos típicos são os chamados refeedores e condensadores, equipamentos essenciais à operação de unidades de destilação atmosférica e a vácuo, comumente encontrados em refinarias de petróleo.

Por outro lado, o fato de que petróleo e gás natural ocorrem quase sempre associados nos reservatórios, leva inevitavelmente ao aparecimento de escoamentos bifásicos líquido – gás tanto na fase de avaliação do poço quanto na de produção.

Além disso, sistemas de refrigeração - aí incluídos aparelhos de ar condicionado, geladeiras e freezers - operam com os chamados “fluidos térmicos”. Esses fluidos escoam em circuitos fechados mediante o emprego de um compressor. Nas regiões de altas e baixas pressões o escoamento é monofásico, respectivamente, de líquido e de vapor. Nas regiões de média pressão ocorre escoamento bifásico. Esses casos são particularmente complicados pois, também envolvem transferência de calor entre o fluido em escoamento e o meio externo.

Quando gás e líquido fluem simultaneamente em um tubo, vários tipos de fluxo podem ocorrer, diferindo um do outro pela distribuição espacial da interface. Estas configurações são designadas como regimes ou padrões de escoamento.

De acordo com Whalley (1996), o regime de escoamento depende:

- das vazões de líquido e de gás;
- das propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade e tensão superficial);
- das condições de operação (pressão, temperatura, gravidade, etc);
- das características geométricas do duto: forma, diâmetro e inclinação.

Há diversos padrões ou regimes de escoamento em tubulações. A classificação dos padrões de escoamento horizontal, objeto deste trabalho, é:

Borbulhado (*Bubble Flow*)

Nesse tipo de regime ocorre dispersão de bolhas de gás no seio do líquido, que é a fase contínua, sendo que as bolhas ficam concentradas na parte superior, conforme mostra a Figura I-1.

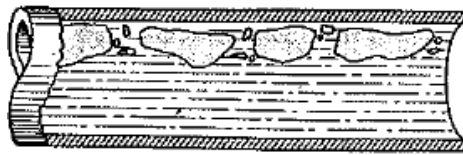


Figura I-1 Escoamento borbulhado horizontal (de Nevers, 1991).

Tamponado (*Plug Flow*)

Nesse tipo de regime formam-se bolsões alongados de gás que tendem a se mover na parte superior do tubo, podendo haver ou não a presença de pequenas bolhas na região imediatamente abaixo dos bolsões, conforme mostra a Figura I-2.

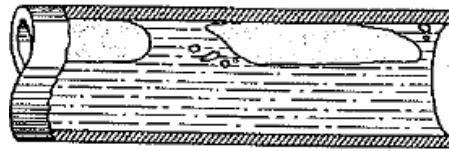


Figura I-2 Escoamento tamponado horizontal (de Nevers, 1991).

Estratificado (*Stratified Flow*)

Nesse tipo de regime as fases fluem separadas por uma interface horizontal relativamente lisa, o gás na parte de cima e o líquido na parte de baixo do tubo. Esse padrão de escoamento está associado a baixas velocidades para os dois fluidos e não é comum de ocorrer, conforme mostra a Figura I-3.

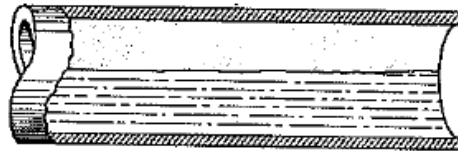


Figura I-3 Escoamento estratificado horizontal (de Nevers, 1991).

Ondulado (*Wavy Flow*)

Nesse tipo de regime as fases fluem separadas porém com uma interface irregular, apresentando ondulações. Essas ondas estão associadas a velocidades altas do gás, conforme mostra a Figura I-4.

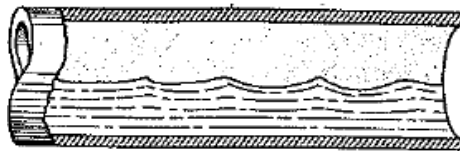


Figura I-4 Escoamento ondulado horizontal (de Nevers, 1991).

Pistonado (*Slug Flow*)

Nesse tipo de regime ocorre rompimento da interface líquido-gás em alguns pontos e gotículas do líquido são suspensas na fase gasosa; cristas do líquido podem atingir a superfície superior do tubo. Esse escoamento tende a ocorrer à medida que a velocidade do gás aumenta, e é mostrado na Figura I-5.

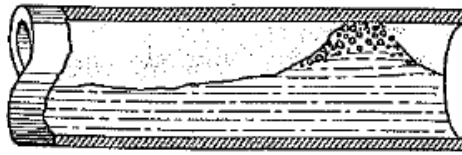


Figura I-5 Escoamento pistonado horizontal (de Nevers, 1991).

Anular (*Annular Flow*)

Nesse tipo de regime ocorre a formação de película de líquido na parede do tubo envolvendo a fase gasosa que escoar como um núcleo, sendo que a espessura do filme líquido na parte inferior do tubo é maior que na superior. A interface é instável e apresenta bolhas no filme líquido, assim como considerável quantidade de líquido é mantida suspensa na fase gasosa na forma de filamentos, conforme mostra a Figura I-6.

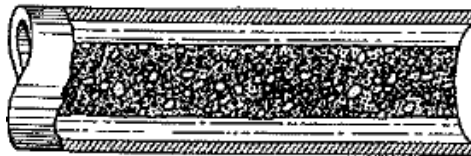


Figura I-6 Escoamento anular horizontal (de Nevers, 1991).

Disperso (*Spray Flow*)

Nesse tipo de regime o líquido disperso na fase gasosa sob a forma de gotículas, é arrastado pelo gás, conforme mostra a Figura I-7.

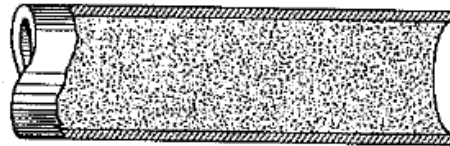


Figura I-7 Escoamento disperso horizontal (de Nevers, 1991).

A título de comparação, os padrões de escoamento bifásico líquido-gás em tubos verticais e suas respectivas denominações são mostrados na Figura I-8:

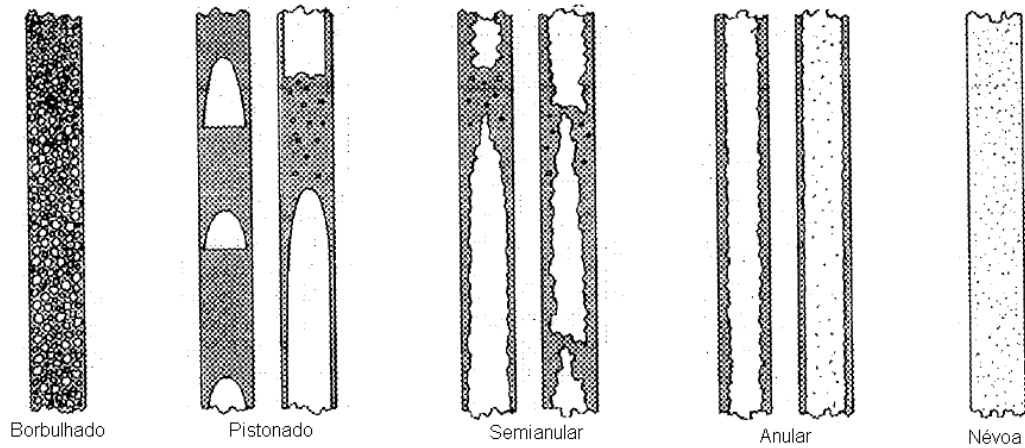


Figura I-8 Padrões de escoamento bifásico vertical (de Nevers, 1991)

A existência de sofisticados códigos computacionais para a simulação de escoamento de fluidos, aliada à importância dos escoamentos bifásicos líquido-gás, particularmente para a indústria de petróleo e gás natural, nos motivou a estudar tais

escoamentos, comparando previsões de “pacotes” de fluidodinâmica computacional e correlações empíricas de uso corrente nessa área.

Todavia, apesar do grande avanço da fluidodinâmica computacional, hoje apenas alguns padrões de escoamentos bifásicos líquido-gás podem ser simulados com bons resultados. Não existe ainda uma representação matemática suficientemente geral, que descreva a interface líquido-gás para todos os padrões de escoamento conhecidos. Essas interfaces são na verdade contornos físicos dinâmicos de topologia extremamente complexa, que se movem e deformam ao longo da tubulação.

O objetivo deste projeto final de curso foi então, comparar gradientes de pressão no escoamento bifásico líquido-gás em tubos horizontais conforme previstos pela correlação de Lockhart & Martinelli (1949) e pelo código ANSYS CFX 11.0.

Capítulo II - Fundamentos

II.1 - Escoamento Bifásico Líquido-Gás

Quando duas ou mais fases escoam simultaneamente na mesma direção através de uma tubulação, o padrão de escoamento e a relação entre a vazão e a queda de pressão são complexos. Em geral a presença de uma segunda fase, aumenta a perda de carga se comparada com aquela que resultaria caso apenas uma fase estivesse escoando com a mesma vazão mássica (Coates e Pressburg, 1959).

As misturas de líquido-gás não se movem como um conjunto, ao invés disso, uma fase escoar em relação a outra. A fase mais densa tende a escoar mais devagar e requer mais tempo para atravessar o mesmo comprimento de tubo.

As razões para uma maior perda de carga no escoamento bifásico podem ser entendidas através da mecânica dos fluidos. A presença de uma segunda fase reduz a área transversal de escoamento disponível para o primeiro fluido. Então, a velocidade e resistência do escoamento do primeiro fluido aumentam como se estivesse passando por um tubo com diâmetro interno menor. E o fato de ser uma área circular acentua ainda mais esse efeito.

Além disso, as interações entre as fases também devem ser consideradas. Por exemplo, a energia consumida para sobrepor a tensão superficial na criação de uma área superficial adicional, ou quantidade de movimento, ou a turbulência causada pelo contato entre as duas fases que se movem em taxas desiguais. Se o balanço de energia for aplicado para cada fluido, esses efeitos teriam que ser considerados por um termo de transferência de energia de uma fase para a outra, ou por uma resistência adicional ao escoamento, ou por ambos.

Numerosas pesquisas sobre o escoamento bifásico líquido-gás revelaram a existência de padrões ou regimes de escoamento bem diferenciados, cuja ocorrência depende, dentre outras variáveis, das vazões relativas e absolutas das duas fases.

Se para uma vazão constante de líquido, em uma dada tubulação, uma pequena vazão de gás é adicionada, o gás forma pequenas bolhas que não coalescem, enquanto escoam através do líquido (escoamento borbulhado). Conforme a proporção de gás é aumentada, o número e o tamanho das bolhas aumentam e elas tendem a se unir, formando bolsões alternados de líquido e de gás (escoamento tamponado). Em outras proporções, o gás pode escoar no centro do tubo enquanto o líquido escoar junto a parede como se fosse um anel (escoamento anular). Aumentando a vazão de gás chegará ao ponto em que o gás se tornará a fase contínua e o líquido estará disperso como uma névoa (escoamento disperso). Isso ocorre tanto no escoamento vertical quanto no horizontal. Contudo, no escoamento horizontal pode ocorrer também um escoamento estratificado, onde a fase mais leve ocupa a parte superior do tubo e a mais densa o fundo.

A transição de uma modalidade (padrão de escoamento) para outra decorre de mudanças nas vazões das fases. Não há, entretanto uma generalização universal para prever com certeza como seria o comportamento de um novo sistema.

Considerando que muitas informações são desconhecidas, tais como, o número e tamanho das bolhas e gotas, e o formato e tamanho da área de escoamento para cada fluido, pode-se entender a razão de não existir uma solução teórica para o escoamento bifásico como existe a lei a equação de Darcy e a de Fanning para escoamento monofásico.

A identificação dos padrões de escoamento e de suas transições a partir de parâmetros do escoamento é realizada através de mapas de padrões. Para escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais, a previsão do padrão de escoamento pode ser feita através do chamado “mapa de Baker”, ilustrado na Figura II.1-1.

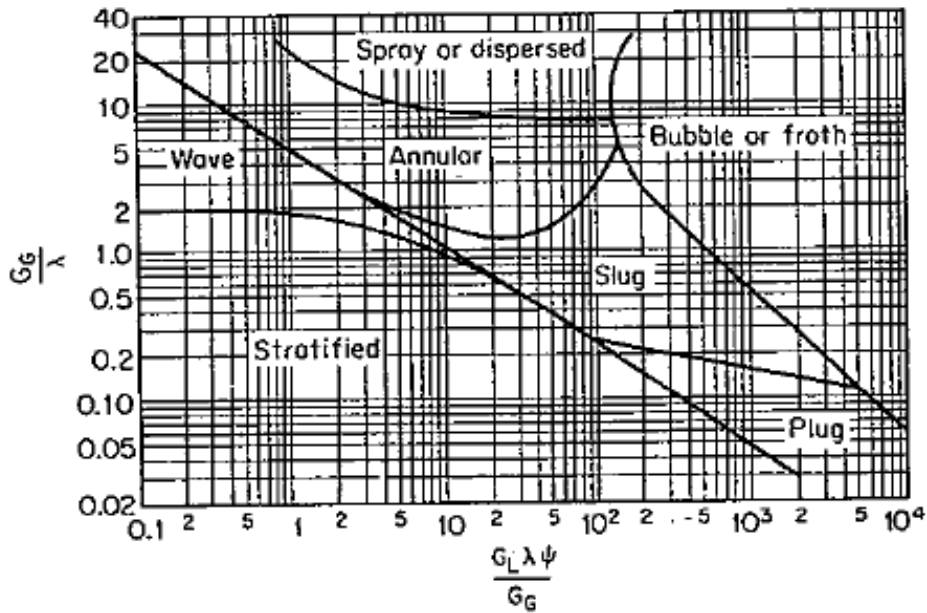


Figura II.1-1 Mapa de Baker (Perry, 1997).

O mapa proposto por Baker (1954) foi construído baseado nos fluxos mássicos das fases (G_G e G_L) e nos fatores λ e Ψ calculados conforme as correlações a seguir:

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_G}{0,075} \right) \left(\frac{\rho_L}{62,3} \right) \right]^{0,5} \quad (\text{II.1-1})$$

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[\mu_L \left(\frac{62,3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.1-2})$$

onde,

ρ_G – massa específica do gás (lbm/ft³);

ρ_L – massa específica do líquido (lbm/ft³);

μ_L – viscosidade dinâmica do líquido (cP);

σ – tensão superficial (dina/cm);

G_G – fluxo mássico da fase gasosa (lb/ft²s);

G_L – fluxo mássico da fase líquida (lb/ft²s).

Assim, conhecendo as propriedades físicas das fases, a velocidade superficial do líquido (v_L), a velocidade superficial do gás (v_G) e a área de seção reta do tubo, é possível prever em que região do mapa de Baker o escoamento bifásico líquido-gás se encontra e conseqüentemente, determinar o padrão de escoamento.

II.2 - Correlação de Lockhart & Martinelli

A correlação de Lockhart e Martinelli (1949) permite prever a queda de pressão por atrito viscoso por unidade de comprimento de tubo (gradiente de pressão), no escoamento isotérmico de misturas bifásicas líquido-gás, em regime permanente, em tubulações horizontais. A referida correlação é usada independentemente, do regime de escoamento que prevaleça na tubulação. A partir do gradiente de pressão dimensionam-se tubulações, válvulas, bombas e compressores, necessários à operação e ao controle automático de tais sistemas de transporte.

Um pressuposto da correlação de Lockhart & Martinelli (L&M) é a existência de equilíbrio termodinâmico entre as fases em contato. Assim, não ocorreria transferência de massa entre elas durante o escoamento. Isto equivale a dizer que as fases escoariam

permanentemente saturadas uma na outra. Entretanto, o fato de que num escoamento a pressão varia ao longo da tubulação, aliado ao fato de que solubilidades dependem de pressão, implica no não-equilíbrio de tais sistemas. Além disso, o escoamento de fluidos reais é sempre acompanhado de aquecimento (dissipação viscosa), o que também afeta as solubilidades mútuas das fases produzindo também desvios da pretendida condição de equilíbrio. Em função dessas limitações e do próprio princípio estrutural da correlação, baseada nos gradientes de pressão a que estariam sujeitas cada fase caso escoassem sozinhas na tubulação, suas previsões levam a erros na faixa de 50 %. Em que pese todas essas limitações, a referida correlação continua sendo muito útil para estimativas rápidas de gradientes de pressão em escoamentos bifásicos líquido-gás em tubos horizontais.

II.2.1 - **Histórico da Correlação de Lockhart & Martinelli**

Com o objetivo de propor uma correlação que previsse o gradiente de pressão em escoamentos bifásicos líquido-gás, em tubos horizontais, L&M realizaram experimentos com ar e líquidos como benzeno, querosene, água e vários óleos em tubos variando o diâmetro entre 0,0586 in até 1,017 in. Os sistemas eram isotérmicos e a velocidade máxima testada pelos autores foi 100 ft/s, de acordo com Lockhart e Martinelli (1949).

Lockhart & Martinelli correlacionaram os dados de escoamento bifásico com os de monofásico como se cada fase escoasse sem a presença da outra fase. Assim, foi considerada a influência do regime laminar ou turbulento de cada fase. Existem quatro tipos de mecanismo de escoamento bifásico líquido-gás:

- Escoamentos de ambos, líquido e gás, são turbulentos (*Turbulent - Turbulent Flow*);
- Escoamento da fase líquida é laminar, enquanto o escoamento da fase gasosa é turbulento (*Viscous – Turbulet Flow*);

- Escoamento do líquido é turbulento, ao passo que, o escoamento da fase gasosa é laminar. (*Turbulent – Viscous Flow*);
- Escoamentos das duas fases são laminares (*Viscous – Viscous Flow*).

Lockhart & Martinelli recomendam a utilização de sua correlação para:

- Prever a perda de carga em evaporadores e condensadores;
- Prever o comportamento de bombas ejetoras gas-lift;

L&M desenvolveram seus trabalhos, em 1949, na Universidade da Califórnia, Berkeley.

II.2.2 - Princípios de Lockhart & Martinelli

A correlação de Lockhart e Martinelli baseia-se na hipótese de que o gradiente de pressão do referido escoamento bifásico é o mesmo que ocorreria se apenas uma das fases escoasse no tubo com a mesma vazão e nas mesmas condições de temperatura e pressão que ocorrem no escoamento simultâneo das duas fases, multiplicadas por um fator empírico a determinar, conforme segue:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF} = \gamma_L \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L \quad (\text{II.2.2-1})$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF} = \gamma_G \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_G \quad (\text{II.2.2-2})$$

onde,

$(\Delta P/\Delta L)_{BF}$ – gradiente de pressão do escoamento bifásico (Pa/m);

$(\Delta P/\Delta L)_L$ – gradiente de pressão do escoamento monofásico líquido (Pa/m);

$(\Delta P/\Delta L)_G$ – gradiente de pressão do escoamento monofásico gasoso (Pa/m);

γ_L – fator empírico adimensional de L&M para o líquido;

γ_G – fator empírico adimensional de L&M para o gás.

Esses fatores empíricos são referidos na literatura como “multiplicadores” (Awad e Muzychka, 2004). Muitas correlações semelhantes à L&M foram desenvolvidas posteriormente, definindo-se “multiplicadores” mais abrangentes que representam melhor os dados experimentais. É o caso, por exemplo, da correlação de Friedel (1979).

Lockhart e Martinelli correlacionaram dados experimentais para o escoamento de misturas de água & ar e óleos & ar, em tubos, através dos grupos adimensionais X e γ :

$$X = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_G} \right]^{0,5} \quad (\text{II.2.2-3})$$

$$\gamma = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{BF}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_F} \right]^{0,5} \quad (\text{II.2.2-4})$$

onde,

$(\Delta P/\Delta L)_F$ – gradiente de pressão do escoamento monofásico gás ou líquido (Pa/m) ;

$(\Delta P/\Delta L)_L$ – gradiente de pressão do escoamento monofásico líquido (Pa/m);

$(\Delta P/\Delta L)_G$ – gradiente de pressão do escoamento monofásico gasoso (Pa/m).

A Figura II.2.2-1 mostra a correlação entre os grupos adimensionais X e γ obtida por L&M.

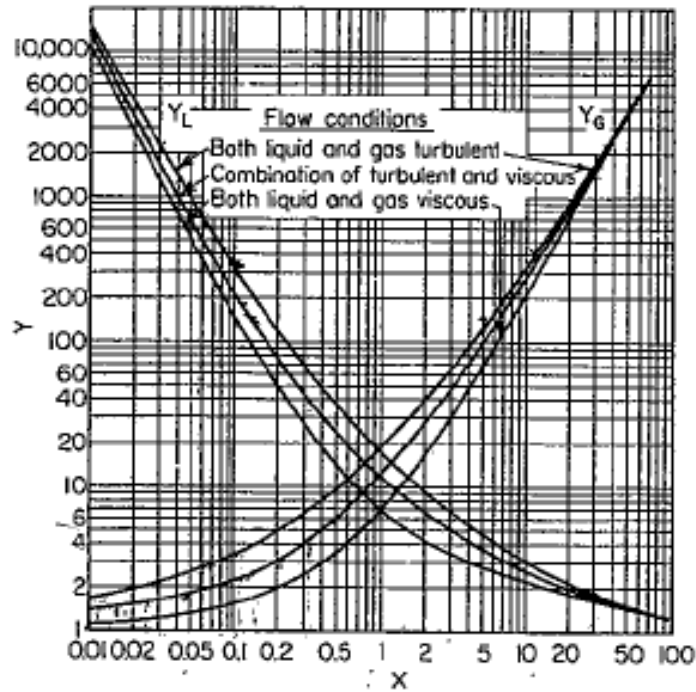


Figura II.2.2-1 Correlação de L&M (Perry, 1997).

Assim, para se prever $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF}$, primeiro calcula-se $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)$ para cada fase, como se o escoamento na tubulação ocorresse sem a presença de outra fase, através de correlações empíricas para escoamento monofásico, como a Equação de Darcy ou a de Fanning. Em seguida, determina-se o parâmetro X (equação II.2.2-3) e através do gráfico da correlação de L&M (figura II.2.2-1) determina-se os multiplicadores de fase de L&M, γ_G e γ_L . Por fim, com as equações II.2.2-1 e II.2.2-2 calcula-se $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF}$.

II.3 - Correlação de Friedel

Para prever a queda de pressão por comprimento de tubulação em escoamento bifásico líquido-gás, outra correlação que pode ser utilizada é a de Friedel (1979). Essa também está baseada no uso de multiplicadores (parâmetros empíricos) para transformar o gradiente de pressão calculado para escoamento monofásico em previsões para o escoamento bifásico (Wipplinger, Harms e Taylor, 2006). A seguir será ilustrada a correlação de Friedel:

$$\phi_F^2 = \frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{BF}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_F} \quad (\text{II.3-1})$$

$$\phi_F^2 = E + \frac{3,24 F H}{Fr^{0,045} We^{0,035}} \quad (\text{II.3-2})$$

sendo,

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L C_{fL}}{\rho_G C_{fG}} \quad (\text{II.3-3})$$

$$F = x^{0,78} (1-x)^{0,224} \quad (\text{II.3-4})$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0,91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,7} \quad (\text{II.3-5})$$

$$Fr = \frac{G^2}{g DI \rho_h^2} \quad (\text{II.3-6})$$

$$We = \frac{G^2 DI}{\sigma \rho_h} \quad (\text{II.3-7})$$

$$\rho_h = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)^{-1} \quad (\text{II.3-8})$$

onde,

ϕ_F - multiplicador da fase de Friedel (adim.);

$(\Delta P/\Delta L)_F$ – gradiente de pressão monofásico (Pa/m);

$(\Delta P/\Delta L)_{BF}$ – gradiente de pressão bifásico (Pa/m);

ρ_L - massa específica da fase líquida (kg/m^3);

ρ_G – massa específica da gasosa (kg/m^3);

ρ_h – massa específica média (kg/m^3);

C_{fL} – Fator de atrito da fase líquida;

C_{fG} – Fator de atrito da fase gasosa;

μ_L – Viscosidade dinâmica da fase líquida (Ns/m^2);

μ_G – Viscosidade dinâmica da fase gasosa (Ns/m^2);

G – fluxo total ($\text{kg/m}^2\text{s}$);

σ – tensão superficial (Pa);

DI – diâmetro interno do tubo (m);

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

x – fração volumétrica de gás – qualidade (adim.).

Inclusive, a literatura recomenda esta correlação para escoamentos onde a razão entre a viscosidade dinâmica do líquido e a do gás é menor que 1000 e quando o fluxo mássico total do escoamento bifásico for maior que $2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (Bharamara e outros, 2008). Desta forma, serão feitas comparações das simulações com fluidodinâmica computacional não só com a correlação de L&M, mas também com a correlação de Friedel (Chafin e Haraburda, 2005).

II.4 - Simulação de Escoamento de Fluidos

II.4.1 - Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) pode ser definida como um conjunto de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para o estudo preditivo (qualitativo e quantitativo) de fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Para que esse escoamento possa ser representado numericamente através de uma simulação computacional, o usuário deve fornecer informações do tipo:

- “Geometria”: forma e tamanho do domínio, entradas e saídas de fluido do sistema, presença de obstáculos;
- Propriedades dos fluidos: temperatura, densidade, viscosidade, condutividade térmica;
- Condições iniciais (muito importante para um fenômeno dependente do tempo como, por exemplo, o tempo de inertização de um processo industrial);
- Condições de contorno (essencial para a resolução das equações que regem a fluidodinâmica computacional – o usuário deve fornecer as especificações de entrada e saída de massa, momento e energia em uma simulação).

Simulação em CFD é utilizada por químicos, físicos, engenheiros ou arquitetos para prever o comportamento de um produto, processo, material em determinadas condições assumidas ou aferidas ou até mesmo avaliar o conforto ambiental de instalações. A importância das técnicas de simulação, em especial, as de fluidodinâmica se deve a diversas razões tais como, a possibilidade de fornecer informações muito mais detalhadas do que as obtidas através de medições; investigação de situações de risco que não podem ser reproduzidas ou geradas, como explosões, falhas em processos; evita-se o emprego de técnicas de *scale-up*; e os parâmetros fornecidos são mais facilmente variados em uma larga faixa, o que simplifica a otimização e o projeto de equipamentos e evita transtornos operacionais.

II.4.2 - Evolução da Fluidodinâmica Computacional

A evolução da Fluidodinâmica Computacional pode ser estabelecida em três fases. A Primeira Fase decorrente nas décadas de 50 a 70, a Segunda Fase nas décadas de 80 a 90 e a Terceira Fase a partir de 2000 (Fontes e outros, 2005).

Na Primeira Fase o objetivo principal era o desenvolvimento de metodologias para a resolução de problemas simples. As técnicas de CFD eram restritas e difundidas

somente nas universidades. Os *softwares* de CFD eram o que se chamava de “dedicados”, ou seja, para propósitos específicos (por exemplo: condução transiente unidimensional, expansão abrupta, etc.). Os cientistas da época que se destacam são Spalding e Patankar. O slogan da época era “*We think, we can*”.

Já na Segunda Fase, com o melhoramento constante da capacidade de processamento e memória dos computadores pessoais, a indústria enxerga o potencial nessa técnica e começa a investir. Nessa época surgiram os primeiros softwares comerciais de propósitos gerais (utilizados para diversas aplicações). O pioneiro deles é o PHOENICS (1980). O slogan da época era “*We can*”.

Na Terceira Fase, o objetivo principal é o aprimoramento de modelos (turbulência, radiação, escoamentos multifásicos...). Surge uma crescente demanda por projetos com soluções *just-in-time*. Há uma tendência em fazer com que esses softwares se comuniquem com softwares de simulação de processos de forma a otimizar um processo já existente. O slogan dessa época é “*You Can Too*”.

II.4.3 - ANSYS CFX

CFX é um programa de Fluidodinâmica Computacional (CFD), usado para simular o escoamento de fluidos em uma variedade de aplicações e situações. O *software* CFX foi desenvolvido pela ANSYS e o mesmo permite aos usuários testarem sistemas por meio de simulações.

O ANSYS CFX tem a vantagem de aproveitar dados e informações comuns a muitas simulações.

Para realizar a simulação no CFX é necessária antes a construção da “geometria” do sistema a ser analisado, bem como a geração da malha. A construção da “geometria” e da malha deve ser feita em um software que permita uma interface com CFX. Nesse projeto final, a Geração da “geometria” e da malha foi feita no ANSYS Workbench e no CFX-Mesh.

O CFX é dividido em três fases, o CFX-pre, CFX-solver e o CFX-post.

No CFX-pre os usuários podem inserir as informações necessárias, tais como, condições de contorno, condições iniciais, seleção de materiais, definições de modelos, bem como de parâmetros e propriedades dos fluidos.

Após os *inputs* inseridos no CFX-pre, o CFX-solver é responsável por realizar as soluções numéricas, por métodos computacionais, das equações de conservação do momento e da massa, eventualmente acopladas a qualquer outra equação de conservação, como a equação da energia.

No CFX-post realiza-se a análise dos resultados. Assim, o usuário pode extrair qualquer dado quantitativo desejado da solução, assim como, é possível obter um detalhado esquema de opções de visualização do fluxo e de suas propriedades. Podem ser construídas animações e imagens em três dimensões apresentando as informações da solução do sistema.

II.5 - Fundamentos Físicos

II.5.1 - Sistema de Equações

As equações que o CFX utiliza para chegar a um resultado numérico são as equações da conservação da massa (equação da continuidade) e do momento linear (equação do movimento).

Equação da continuidade (Conservação de massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (\text{II.5.1-1})$$

Equação do movimento (conservação de momento linear)

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (\text{II.5.1-2})$$

sendo,

$$\tau = \mu \left(\nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot V \right) \quad (\text{II.5.1-3})$$

onde,

ρ – massa específica (kg/m³);

t – tempo (s);

V – velocidade (m/s);

p – pressão (Pa);

τ - tensão cisalhante (Pa);

S_M – força de campo por volume de fluido (Pa/m).

Modelo κ - ϵ

O modelo κ - ϵ é utilizado para representar a turbulência em escoamentos, onde κ é a energia cinética turbulenta, sendo definida como a flutuação da velocidade e possui dimensões de comprimento ao quadrado por tempo ao quadrado (L^2/T^2). Quanto o ϵ é a dissipação turbulenta específica, ou seja, a taxa em que as flutuações da velocidade dissipam, possui dimensões de comprimento ao quadrado por tempo ao cubo (L^2/T^3).

O modelo κ - ϵ introduz duas novas variáveis dentro do sistema de equações, onde a equação da continuidade se mantém a mesma e do momento fica:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V)^T + B \quad (\text{II.5.1-4})$$

sendo,

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (\text{II.5.1-5})$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.5.1-6})$$

onde,

ρ – massa específica (kg/m³);

t – tempo (s);

V – velocidade (m/s);

p' – pressão modificada (Pa);

μ_{eff} – viscosidade efetiva (Pa.s);

μ – viscosidade dinâmica (Pa.s);

μ_t – viscosidade turbulenta (Pa.s);

C_μ – constante turbulenta (adim.);

B – soma das forças de campo por volume de fluido (Pa/m).

II.5.2 - Forças Envolvidas no escoamento Bifásico Borbulhado

No fenômeno de escoamento bifásico líquido-gás borbulhado estão envolvidas as forças de arrasto, de sustentação, a lubrificante de parede e a força de dispersão turbulenta.

Força de dispersão turbulenta

A turbulência afeta o escoamento borbulhado como um todo. A formação de bolhas de ar no líquido pode amortecer a energia turbulenta do escoamento. O formato da bolha, a velocidade relativa entre as fases gasosa e líquida, a intensidade da turbulência da fase contínua são algumas das características do escoamento bifásico, que podem afetar significativamente a força resultante na interface líquido-gás.

O movimento das bolhas de ar em relação ao líquido resulta em um trabalho de arraste na fase líquida, aumentando o cisalhamento (Maliska e outros, 2008).

O modelo Lopez Bertodano para força de dispersão turbulenta (*Turbulent dispersion force*) é recomendado no ANSYS CFX – Tutorial (2006) para simular o escoamento borbulhado líquido-gás.

Força de arraste

A força de arraste (*Drag force*), resultante do efeito da viscosidade e da diferença de pressão causada pela forma das bolhas, pode ser dividida em duas componentes: o arraste de atrito e de forma.

Arraste de atrito

Arraste de atrito é o que acontece junto à parede da bolha. O atrito resulta do deslizamento de uma camada de fluido sobre a outra. Assim, o arraste de atrito está

relacionado com as características da superfície. Se a superfície for lisa o escoamento será laminar, porém se a mesma for rugosa, ocorrerá um fluxo de ar turbilhonado aumentando o arraste na camada limite.

Arraste de forma

O arraste em questão está relacionado com a área, na qual o líquido colide com as bolhas de ar, e ocorre a chamada deflexão, ou seja, desvio da água pelos obstáculos. Este tipo de arraste produz turbilhões que subtraem energia do fluido e retardam o seu movimento. O arraste de forma depende de alguns fatores como a densidade do ar, velocidade e área frontal do corpo.

Força de sustentação

A força de sustentação (*Lift force*) é uma força perpendicular ao escoamento. Resulta da diferença de pressão formada na superfície inferior e superior do aerofólio, que ocorre devido à diferença das velocidades nas superfícies dos mesmos. Isto ocorre porque o aerofólio tem um comprimento diferente na parte superior (extradorso) e na parte inferior (intradorso) devido ao seu formato, conforme é ilustrado na figura II.5.2-1, o que acarreta em velocidades diferentes de escoamento do líquido na superfície inferior e superior. No caso do escoamento bifásico líquido-gás borbulhado, as bolhas de ar podem apresentar o formato semelhante a aerofólios (bolha-aerofólio) dependendo do tamanho das mesmas.

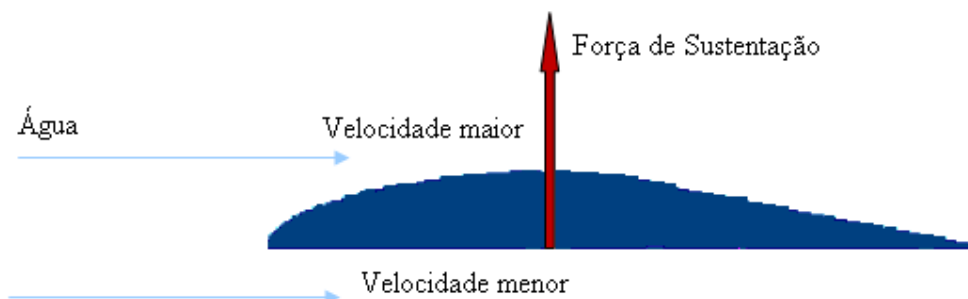


Figura II.5.2-1 Força de sustentação.

No escoamento de um fluido em um tubo a força de sustentação pode agir em qualquer direção perpendicular ao escoamento, para cima, para baixo, e muitas outras direções, dependendo da orientação da bolha-aerofólio.

Força lubrificante de parede

A força lubrificante de parede (*Wall lubrication*) ocorre nas regiões de escoamento do líquido onde existem gradientes transversais de velocidade, tais como no interior da camada limite. Uma bolha de gás em tal região apresentará então, interfaces líquidas longe da parede se movendo mais rapidamente que as próximas. Assim, a pressão sobre a bolha na região longe da parede é menor que na região próxima da parede, o que desloca a bolha para o centro do tubo.

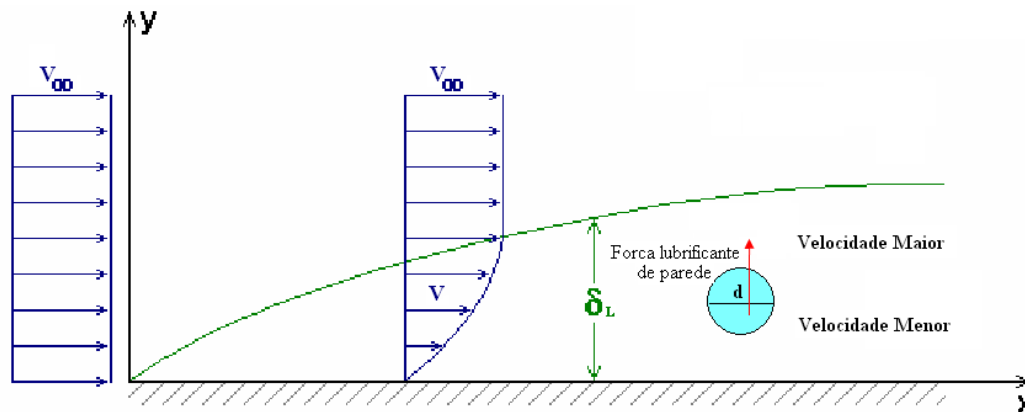


Figura II.5.2-2 Força lubrificante de parede.

Capítulo III - Metodologias e Procedimentos de Cálculos

A correlação de L&M será aplicada a fim de estimar a queda de pressão por unidade de comprimento de tubo em escoamento bifásico líquido-gás, analisando as fases separadamente.

III.1 - Dados Gerais

Para aplicação da metodologia de L&M devem ser definidos alguns dados. Os fluidos avaliados serão água e ar, a 25°C. As propriedades físico-químicas consideradas para os dois fluidos são apresentadas na Tabela III.1-1.

Tabela III.1-1 Propriedades físico-químicas dos fluidos.

PROPRIEDADE	Ar	Água
Massa Específica (kg/m ³)	1,185	997
Viscosidade Dinâmica (kg/ms)	1,83E-05	8,90E-04
Tensão superficial (N/m)	-	0,072

As seguintes considerações são relevantes:

- Escoamento isotérmico, cuja temperatura é 25°C;
- Escoamento no estado estacionário;
- Não há transferência de calor;
- Equilíbrio termodinâmico entre as fases;
- Escoamento em tubo cilíndrico horizontal, cujas características estão explicitadas na Tabela III.1-2 (Crane, 1988).

Tabela III.1-2 Descrição da tubulação.

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADE
Material	Aço-carbono (API 5L Gr B)	-
Diâmetro Nominal (DN)	1	in
Diâmetro Externo (DE)	0,0334	m
Diâmetro Interno (DI)	0,0207	m
SCH	160	-
Rugosidade Absoluta	4,56E-05	m
Comprimento	1	m

Uma vez definido o DI, a área da seção reta do tubo pode ser determinada através da fórmula da área do círculo.

$$A = \frac{\pi(DI)^2}{4} \quad (III.1-1)$$

Logo, a área de seção reta do tubo (A) é 0,00034 m².

III.2 - Cálculo das Velocidades Superficiais

Para determinar as velocidades superficiais das fases é preciso calcular antes os parâmetros adimensionais λ e ψ . O cálculo desses parâmetros foi feito através das equações II.1-1 e II.1-2, respectivamente, descritas no item II.1 e utilizando as informações das propriedades físico químicas do item III.1, descritas na tabela III.1-1.

Os valores de λ e ψ obtidos foram:

$$\lambda = 0,9924$$

$$\psi = 0,9761$$

A fim de garantir que recairia-se nos padrões de escoamento borbulhado e estratificado, foram escolhidos pontos aleatórios do mapa de Baker (ver figura II.1-1), correspondentes aos padrões de escoamento bifásico líquido-gás, em tubo horizontal, respectivamente. No caso do escoamento borbulhado foram escolhidos dois pontos de tal forma que o número de Reynolds estivesse à esquerda e à direita da linha de turbulência completa (ver diagrama de Moody, apêndice A). Esses pontos possuem as coordenadas definidas pelos grupos adimensionais descritos na Tabela II.2-1.

Tabela III.2-1 Pontos do mapa de Baker.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	$\frac{G_L \lambda \psi}{G_G}$	$\frac{G_G}{\lambda}$
Borbulhado na turbulência incompleta	2000	0,5
Borbulhado na turbulência completa	2000	5
Estratificado	1000	0,035

Uma vez definido os grupos adimensionais $\frac{G_L \lambda \psi}{G_G}$ e $\frac{G_G}{\lambda}$ bem como os parâmetros λ e ψ , os fluxos mássicos de ambas as fases podem ser calculados. Os mesmos são representados na Tabela III.2-2.

Tabela III.2-2 Fluxo mássico dos padrões de escoamento.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	G_G (kg/m ² s)	G_L (kg/m ² s)
Borbulhado na turbulência incompleta	2,423	5002
Borbulhado na turbulência completa	24,228	50020
Estratificado	0,17	175

$$W_F = G_F A \quad (\text{III.2-1})$$

$$Q_F = \frac{W_F}{\rho_F} \quad (\text{III.2-2})$$

$$v_F = \frac{Q_F}{A} \quad (\text{III.2-3})$$

onde,

W_F – vazão mássica da fase (kg/s);

G_F – fluxo mássico da fase (kg/m²s);

Q_F – vazão volumétrica da fase (m³/s);

A – área da seção reta do tubo (m²);

ρ_F – massa específica da fase (kg/m³);

v_F – velocidade superficial da fase (m/s).

A Tabela III.2-3 apresenta um resumo dos resultados dos parâmetros acima, para cada padrão de escoamento.

Tabela III.2-3 Parâmetros das fases do escoamento.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	FASE GASOSA				FASE LIQUIDA			
	G _G	W _G	Q _G	v _G	G _L	W _L	Q _L	v _L
	kg/m ² .s	kg/s	m ³ /s	m/s	kg/m ² .s	kg/s	m ³ /s	m/s
Borbulhado na turbulência incompleta	2,423	0,0008	0,0007	2,045	5002	1,684	0,00170	5,019
Borbulhado na turbulência completa	24,228	0,0082	0,0069	20,446	50020	16,835	0,01697	50,191
Estratificado	0,170	0,0001	0,0001	0,143	175	0,059	0,00006	0,176

III.3 - Determinação do Regime de Escoamento

O grau de mistura de um fluido escoando depende do regime de escoamento. Será considerado como escoamento laminar até o número de Reynolds (N_{RE}) de 2000. Acima desse valor será considerado escoamento turbulento.

$$N_{RE} = \frac{\rho v D I}{\mu} \quad (\text{III.3-1})$$

onde,

N_{RE} – número de Reynolds (adim.);

v - velocidade superficial da fase (m/s);

ρ - massa específica da fase (kg/m³);

μ - viscosidade dinâmica da fase (kg/m s);

DI – diâmetro interno (m).

O fator de atrito de Darcy (f) pode ser obtido através do Diagrama de Moody (ver apêndice A) ou determinado da seguinte forma:

Escoamento Laminar

$$f = \frac{64}{N_{RE}} \quad (\text{III.3-2})$$

onde,

N_{RE} – número de Reynolds (adim.);

f – fator de atrito de Darcy (adim.).

Escoamento Turbulento

$$f = \left\{ -2 \left[\log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7DI} \right) + \left(\frac{(1,66 \ln(N_{RE})) - 1,07}{N_{RE}} \right) \right) \right] \right\}^{-2} \quad (\text{III.3-3})$$

(Soave)

onde,

N_{RE} – número de Reynolds (adim.);

f – fator de atrito de Darcy (adim.);

ε – rugosidade absoluta (m);

DI – diâmetro interno (m).

A Tabela III.3-1 resume os resultados obtidos para cada padrão de escoamento.

Tabela III.3-1 Parâmetros do regime do escoamento.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	FASE GASOSA			FASE LÍQUIDA		
	N _{RE}	REGIME	f	N _{RE}	REGIME	f
Borbulhado antes da turbulência completa	2740	Turbulento	0,0472	116405	Turbulento	0,0256
Borbulhado depois da turbulência completa	27403	Turbulento	0,0291	1164047	Turbulento	0,0242
Estratificado	192	Laminar	0,3336	4070	Turbulento	0,0424

III.4 - Cálculo do Gradiente de Pressão para Cada Fase

Para o cálculo do gradiente de pressão para cada fase será utilizada a equação de Darcy, apresentada a abaixo, bem como os valores dos parâmetros calculados anteriormente.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\rho f v^2}{2DI} \quad (\text{III.4-1})$$

onde,

$\Delta P/\Delta L$ – gradiente de pressão monofásico (Pa/m);

ρ - massa específica da fase (kg/m³);

v - velocidade (m/s);

f – fator de atrito de Darcy (adim.);

DI – diâmetro interno do tubo (m).

A Tabela III.4-1 que demonstra a perda de carga por comprimento de tubulação de ambas as fases para cada padrão de escoamento.

Tabela III.4-1 Gradiente de pressão das fases.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_G$ Pa/m	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L$ Pa/m
Borbulhado na turbulência incompleta	6	15544
Borbulhado na turbulência completa	349	1470365
Estratificado	0,2	32

III.5 - Cálculo do Gradiente de Pressão Bifásico

Uma vez determinada a perda de carga por comprimento de tubulação, analisada como se cada fase escoasse sozinha, pode-se obter o gradiente de pressão do escoamento bifásico, através das correlações de L&M (ver equações II.2.2-1 e II.2.2-2). Para isso, é necessário calcular os grupos adimensionais χ , γ_G e γ_L .

O parâmetro χ será obtido pela equação II.2.2-3. Uma vez definido o mesmo, pode-se ter γ_G e γ_L graficamente (ver figura II.2.2-1).

A Tabela III.5-1 apresenta os parâmetros χ , γ_G e γ_L obtidos para cada padrão de escoamento.

Tabela III.5-1 Parâmetros de L&M.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	χ	γ_G	γ_L
Borbulhado na turbulência incompleta	52,4	4000	1,5
Borbulhado na turbulência completa	64,9	6000	1,4
Estratificado	12,7	380	2

Assim, o gradiente de pressão pode finalmente ser calculado, onde os resultados estão registrados na Tabela III.5-2.

Tabela III.5-2 Gradiente de pressão dos escoamentos bifásicos para cada fase.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF} = \gamma_G \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_G$	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF} = \gamma_L \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_L$
	Pa/m	Pa/m
Borbulhado na turbulência incompleta	22600	23309
Borbulhado na turbulência completa	2090969	2057808
Estratificado	74	76

A pequena discrepância encontrada entre o gradiente de pressão bifásico obtido através da análise de cada fase pode ser atribuída a leitura de parâmetros do gráfico de L&M (ver figura II.2.2-1), uma vez que, a escala não permite uma leitura exata. Assim, o gradiente de pressão do escoamento bifásico pode ser representado pela média aritmética dos valores obtidos na tabela III.5-2. A Tabela III.5-3 apresenta a média do gradiente de pressão bifásico previsto pela correlação de L&M.

Tabela III.5-3 Gradiente de pressão dos escoamentos bifásicos.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{BF}$
	Pa/m
Borbulhado antes da turbulência completa	22955
Borbulhado depois da turbulência completa	2074389
Estratificado	75

III.6 - Cálculo do Desvio Percentual do Gradiente de Pressão

A fim de comparar os gradientes de pressão obtidos teoricamente, através da correlação de L&M, com os resultados das simulações dos escoamentos estudados, será calculado um desvio percentual em relação ao valor previsto pela correlação empírica:

$$Desvio \% = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{L\&M} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{CFX}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{L\&M}} \right] 100 \quad (III.6-1)$$

III.7 - Cálculo da Espessura da Camada Limite

De acordo com Massey e Ward-Smith (1998), a espessura da “sub-camada laminar” nos escoamentos turbulentos monofásicos (camada limite) pode ser avaliada pela equação:

$$\delta_L = \frac{16\sqrt{2}DI}{N_{RE}\sqrt{f}} \quad (III.7-1)$$

onde,

δ_L – espessura da camada limite do escoamento turbulento (m);

DI – diâmetro interno do tubo (m);

N_{RE} – número de Reynolds (adim.);

f – fator de atrito de Darcy (adim).

Supondo que a referida equação possa ser estendida ao escoamento bifásico líquido-gás no regime borbulhado - caracterizado por baixas frações volumétricas de gás - obtemos os valores para a espessura da “sub-camada laminar” nos casos estudados, conforme é ilustrado na Tabela III.7-1:

Tabela III.7-1 Espessura da sub-camada laminar.

PADRÃO DE ESCOAMENTO	δ_L (mm)
Borbulhado na turbulência incompleta	0,0250
Borbulhado na turbulência completa	0,0026

Capítulo IV - Resultados para Regime Borbulhado – Tubo Horizontal

IV.1 - Geração da Malha para as Simulações do Regime Borbulhado

Utilizando o ANSYS Workbench 9.0 foi construída a “geometria” para simulação no *Desing Modeler*, consistindo em um tubo com diâmetro de 20,7 mm e 1 m de comprimento.

A geração da malha a partir da “geometria” do tubo construída foi feita no CFX-Mesh, conforme indicado no ANSYS CFX – Mesh Tutorial (2004). Foram definidas as seguintes regiões: entrada (*inlet*), saída (*outlet*) e paredes do tubo (*wall*). No total a malha apresentou 401.685 elementos.

As Figuras IV.1-1, IV.1-2 e IV.1-3 ilustram a malha construída.

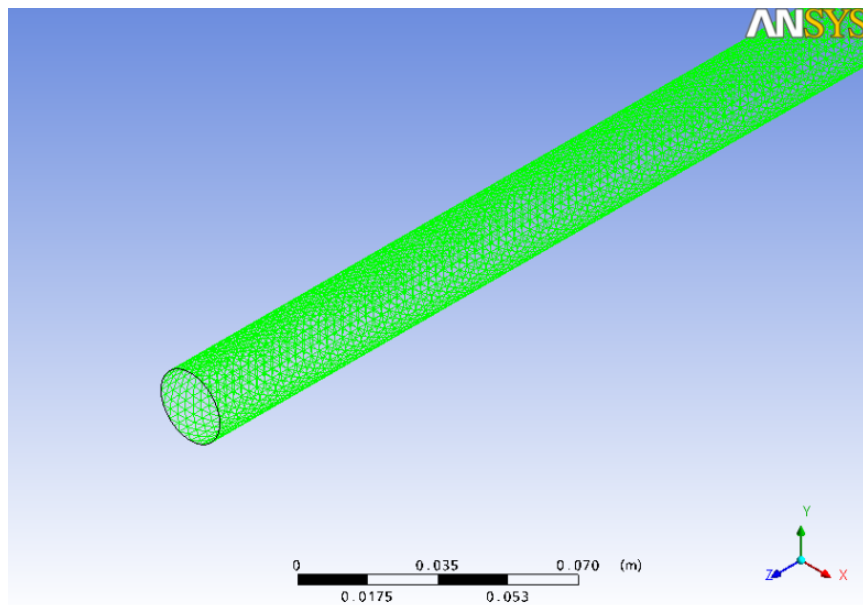


Figura IV.1-1 Malha da tubulação visão lateral (ANSYS Workbench).

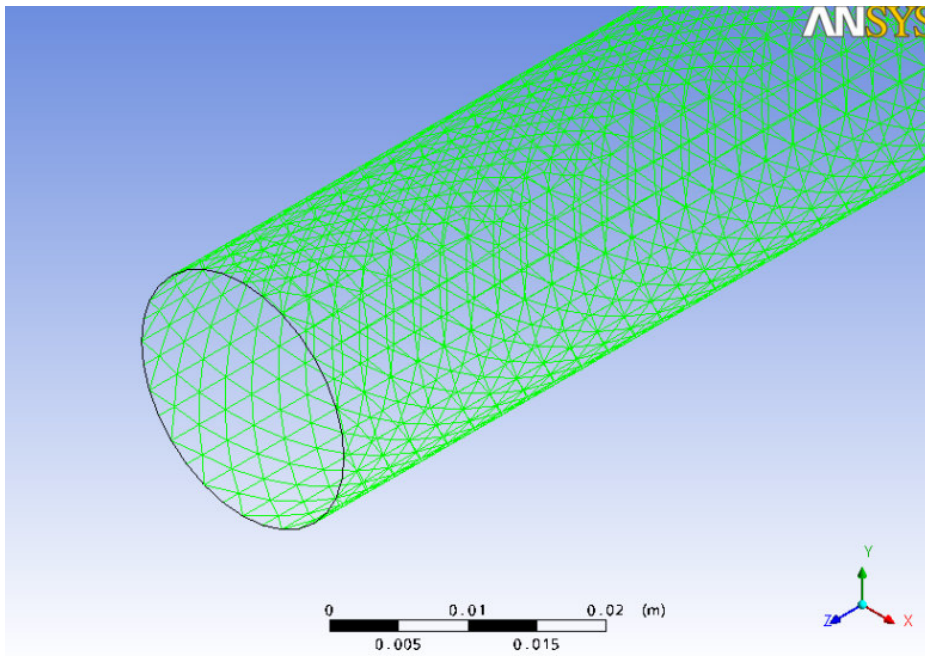


Figura IV.1-2: Malha da tubulação visão lateral (ANSYS Workbench).

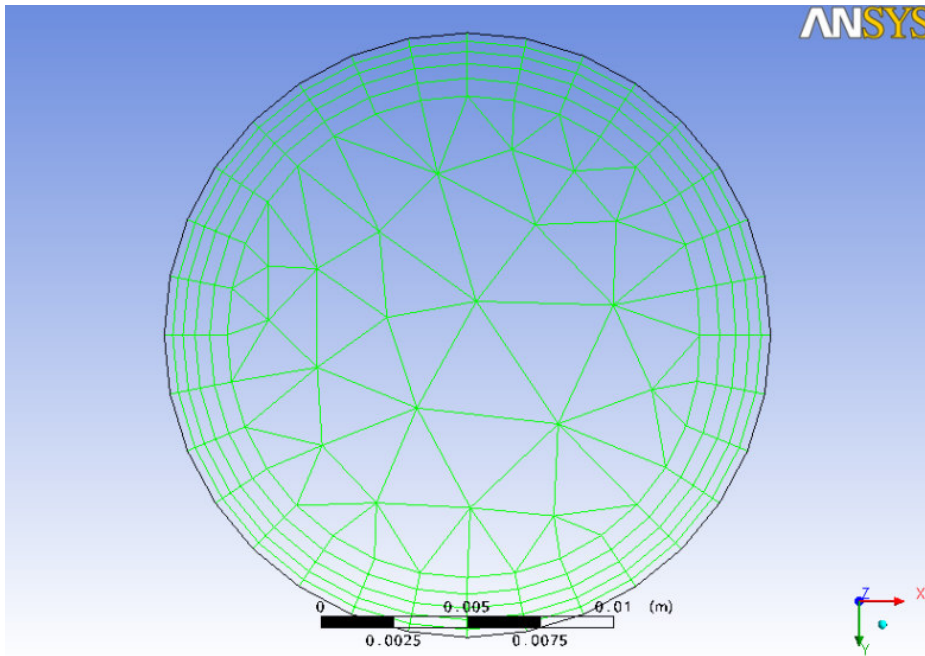


Figura IV.1-3 Malha da tubulação visão frontal (ANSYS Workbench).

IV.2 - Escoamento Monofásico

IV.2.1 - Na Região de Turbulência Incompleta

Utilizando a malha descrita, no item IV-1, e as mesmas condições de temperatura ($T=25^{\circ}\text{C}$) e valores das propriedades do líquido para o escoamento borbulhado antes da região de turbulência completa, descritos nas Tabelas III.1-1 e III.2-3, foi simulado o escoamento monofásico da água na região de turbulência incompleta, em um tubo horizontal. Para visualizar os modelos, considerações e condições de contorno utilizados no CFX-pre ver os apêndices B.1-1 e B.1-2. Foi utilizado o modelo κ - ϵ para a turbulência.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-4} para o resíduo máximo.

A Figura IV.2.1-1 apresenta a pressão ao longo do tubo durante o escoamento monofásico resultante da simulação.

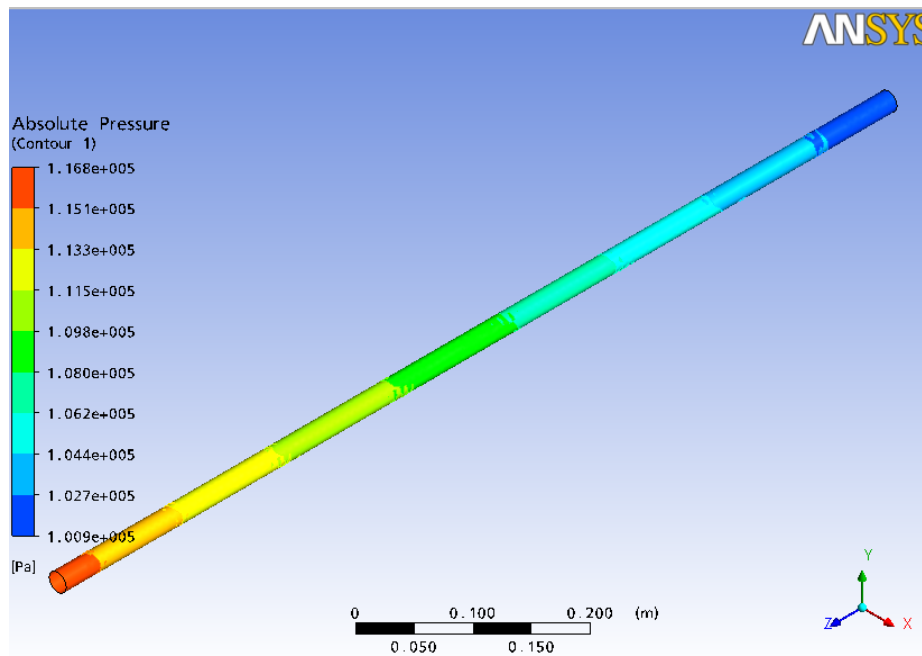


Figura IV.2.1-1 Queda de pressão – escoamento monofásico (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento monofásico simulado é 15.028 Pa/m.

Utilizando a equação de Darcy (equação III.4-1) é possível estimar o gradiente de pressão para comparar com o obtido por CFD. O cálculo do desvio foi feito conforme equação III.6-1.

Na Tabela IV.2.1-1 é apresentado o resultado do gradiente de pressão obtido pela equação de Darcy, para as mesmas condições de escoamento monofásico simulado com CFD.

Tabela IV.2.1-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.

MÉTODO	$\Delta P/\Delta L$ (Pa/m)
DARCY	15.544
CFX	15.028

O desvio do gradiente de pressão obtido por CFD comparado com a previsão da equação de Darcy é 3,2 %. Isso quer dizer que o escoamento monofásico simulado no CFX empregando o modelo de turbulência κ - ϵ dá erros pequenos comparado com a equação de Darcy.

IV.2.2 - Região de Turbulência Completa

Utilizando a malha descrita, no item IV-1, e as mesmas condições de temperatura ($T=25^{\circ}\text{C}$) e valores das propriedades do líquido para o escoamento borbulhado na região de turbulência completa, descritos nas Tabelas III.1-1 e III.2-3, foi simulado o escoamento monofásico da água em um tubo horizontal. Para visualizar os modelos, considerações e condições de contorno utilizados no CFX-pre ver os apêndices B.1-3 e B.1-4. Foi utilizado o modelo κ - ϵ para a turbulência.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-4} para o resíduo máximo.

A Figura IV.2.2-1 apresenta a pressão ao longo do tubo durante o escoamento monofásico resultante da simulação.

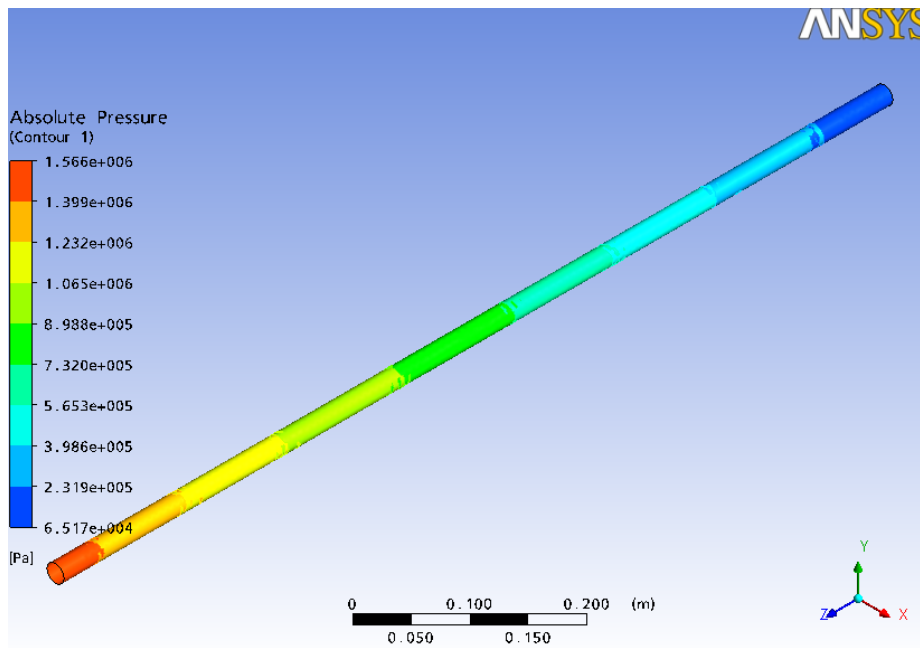


Figura IV.2.2-1 Queda de pressão – escoamento monofásico (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento monofásico simulado é 1.425.762 Pa/m.

Utilizando a equação de Darcy (equação III.4-1) é possível estimar o gradiente de pressão para comparar com o obtido por CFD. O cálculo do desvio foi feito conforme equação III.6-1.

Na Tabela IV.2.2-1 é apresentado o resultado do gradiente de pressão obtido pela equação de Darcy, para as mesmas condições de escoamento monofásico simulado com CFD.

Tabela IV.2.2-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.

MÉTODO	$\Delta P/\Delta L$ (Pa/m)
DARCY	1.470.365
CFX	1.425.762

O desvio do gradiente de pressão obtido por CFD comparado com a previsão da equação de Darcy é 3,03 %. Isso quer dizer que o escoamento monofásico simulado no CFX empregando o modelo de turbulência κ - ϵ dá erros pequenos comparado com a equação de Darcy.

IV.3 - Simulações com CFD do Regime Borbulhado na Região de Turbulência Incompleta

Para as simulações no CFX-Pre do escoamento borbulhado na zona de turbulência plena, em um tubo horizontal, foi utilizada a malha descrita no item IV.1.

Na modelagem para escoamento bifásico pode ser usado o Modelo de Equilíbrio Homogêneo, onde é assumido que a velocidade, temperatura e pressão, e até mesmo o potencial químico, caso haja reação química, entre as fases ou componentes são iguais. Esse modelo é indicado para casos onde uma das fases está bem dispersa na outra fase, gerando uma grande área interfacial, como escoamento borbulhado de ar em água.

Um resumo dos modelos e considerações utilizados pode ser visto nos apêndices B.2-1 e B.2-2.

As frações volumétricas de água e de ar foram calculadas a partir das vazões volumétricas indicadas na tabela III.2-3 do item III.2. E o diâmetro das bolhas de ar (d) utilizado na simulação foi 2 mm.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-4} para o resíduo máximo.

A Figura IV.3-1 demonstra a pressão ao longo do tubo durante o escoamento bifásico resultante da simulação considerando modelo homogêneo.

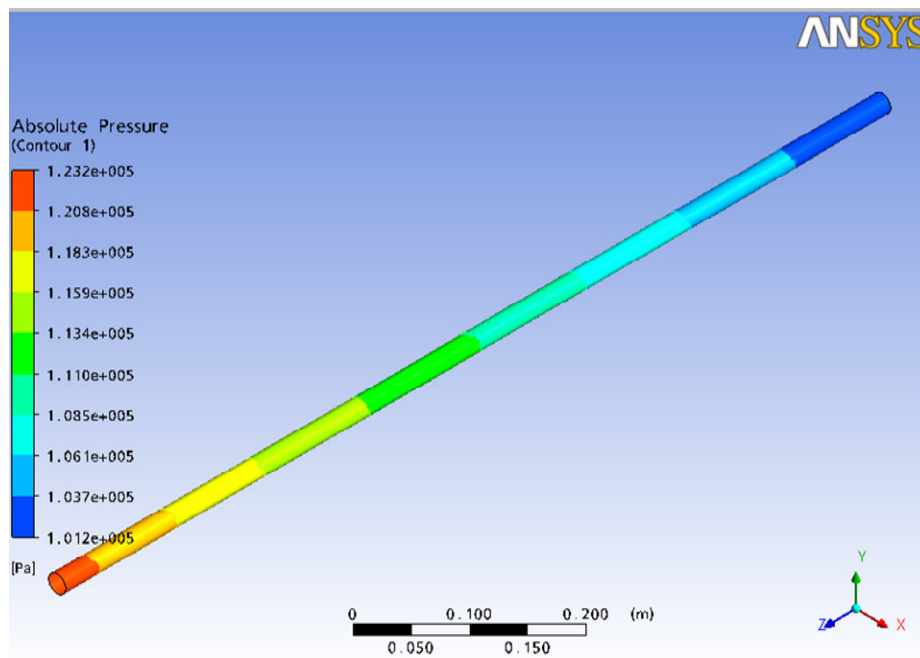


Figura IV.3-1 Queda de pressão – modelo homogêneo (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante da simulação do escoamento bifásico, regime borbulhado na zona de turbulência incompleta, considerando modelo homogêneo é 21.540 Pa/m.

De acordo com Corradini (1997), sempre que o Modelo de Equilíbrio Homogêneo (MEH) é utilizado é recomendado checar a validação do equilíbrio assumido comparando com modelos não baseados em simplificações, a fim de proporcionar uma maior confiabilidade nos resultados obtidos. Por isso, foi simulado no CFX o escoamento borbulhado na região de turbulência incompleta sem considerar o modelo de equilíbrio homogêneo.

Para que a simulação do escoamento bifásico líquido-gás borbulhado apresente uma maior acurácia faz-se necessário considerar as forças de arraste, sustentação, lubrificante de parede e de dispersão turbulenta, descritas no item II.5.2, envolvidas que agem sobre as bolhas.

A força lubrificante de parede, que é perpendicular a direção do escoamento, tende a empurrar, para a direção do centro do tubo, bolhas de ar que estejam dentro da

camada limite. A fim de determinar se a força lubrificante de parede para o escoamento borbulhado é relevante neste caso, foi simulado esse padrão de escoamento considerando a mesma, além das forças de arrasto e de dispersão turbulenta (Caso1).

Outra força transversal ao escoamento é a força de sustentação, que depende do formato da bolha de ar no escoamento bifásico. A fim de determinar se a contribuição da força de sustentação para o escoamento borbulhado é significativa mesmo para tamanho de bolhas pequenas, foi feita a simulação desse padrão de escoamento considerando a contribuição dessa força, além das forças de arrasto e de dispersão turbulenta (Caso 2).

Também foi simulado o escoamento borbulhado desconsiderando as forças de sustentação e lubrificante de parede, mas considerando as forças de arrasto e a de dispersão turbulenta (Caso 3).

Os modelos e considerações utilizados nas simulações (Casos 1, 2 e 3) podem ser vistos nos apêndices B.2-3 e B.2-4.

As frações volumétricas de água e de ar foram calculadas a partir das vazões volumétricas indicadas na tabela III.2-3 do item III.2. E o diâmetro das bolhas de ar (d) utilizado nas simulações dos casos 1, 2 e 3 foi 2 mm.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-3} para o resíduo médio.

Os resultados obtidos nos três casos serão comparados com a correlação empírica de L&M para determinar se a força de sustentação e a força lubrificante de parede são significativas para o escoamento borbulhado.

Caso 1) Simulação do escoamento borbulhado na zona de turbulência incompleta com contribuição da força lubrificante de parede. A figura IV.3-2 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 1.

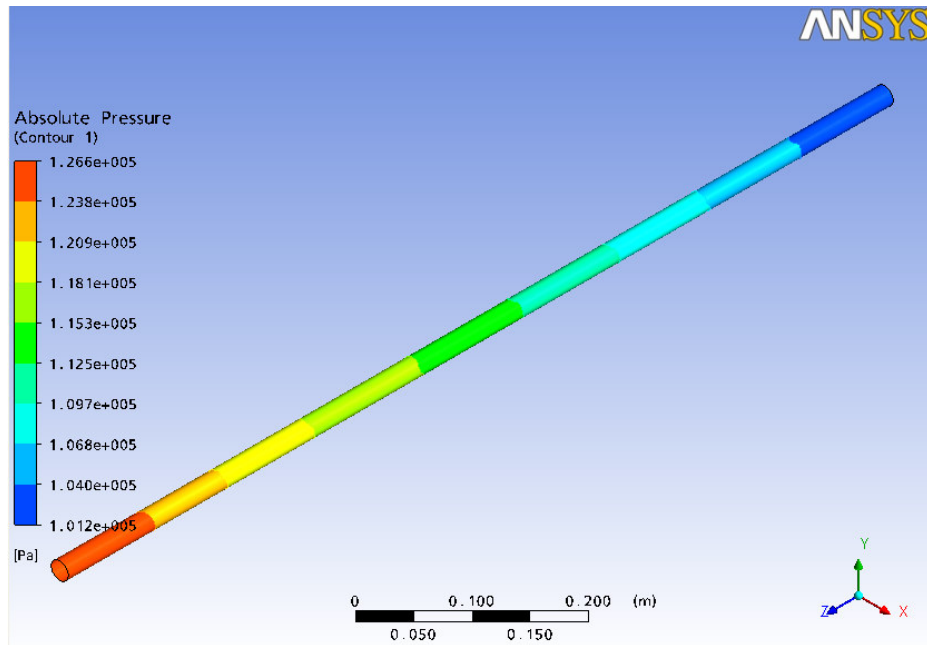


Figura IV.3-2 Queda de pressão – escoamento caso 1 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 1 é 25.205 Pa/m.

Caso 2) Simulação do escoamento borbulhado na zona de turbulência incompleta com contribuição da força de sustentação. A figura IV.3-3 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 2.

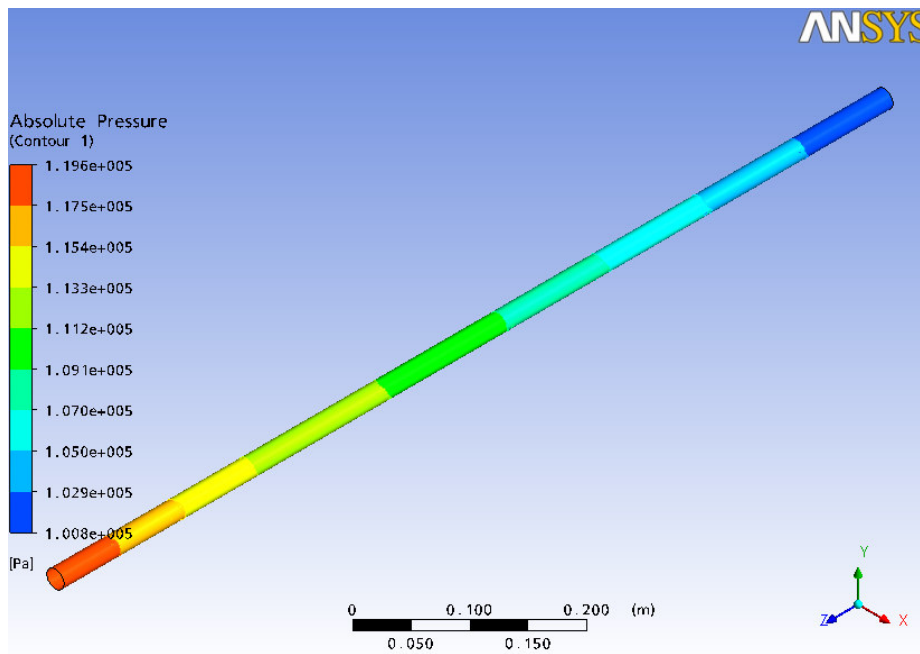


Figura IV.3-3 Queda de pressão – escoamento caso 2 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 2 é 18.155 Pa/m.

Caso 3) Simulação do escoamento borbulhado na de turbulência incompleta sem a contribuição das forças de sustentação e lubrificante de parede. A figura IV.3-4 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 3.

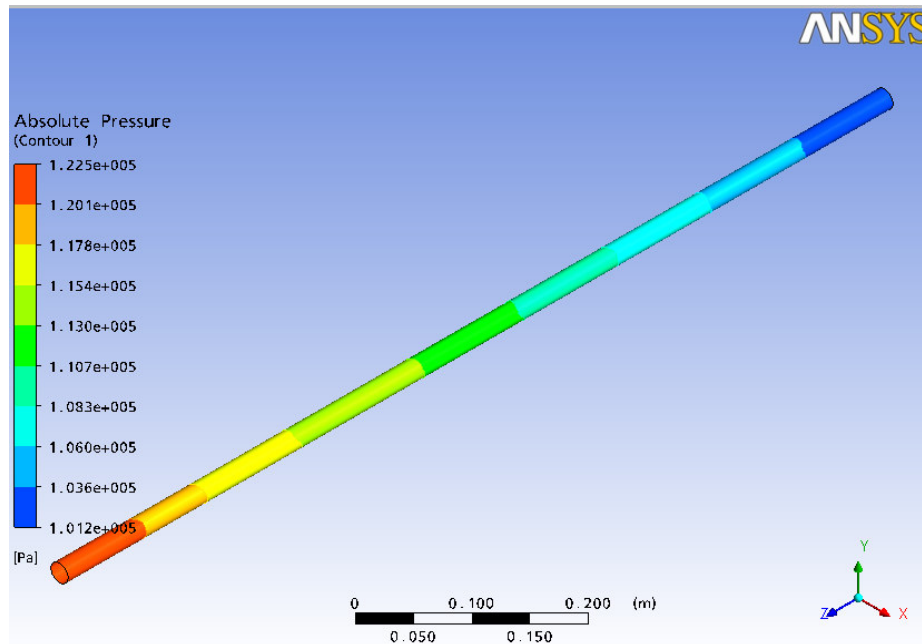


Figura IV.3-4 Queda de pressão – escoamento caso 3 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 3 é 21.108 Pa/m.

IV.4 - Simulações com CFD do Regime Borbulhado na Região de Turbulência Completa

Para as simulações no CFX-Pre do escoamento borbulhado na região de turbulência completa, em um tubo horizontal, foi utilizada a malha descrita no item IV.1.

Assim como foi feito para o escoamento borbulhado na região de turbulência incompleta, foi utilizado o modelo de equilíbrio homogêneo para a simulação do escoamento após a linha de transição de turbulência plena. Um resumo dos modelos e considerações utilizados pode ser visto nos apêndices B.3-1 e B.3-2.

As frações volumétricas de água e de ar foram calculadas a partir das vazões volumétricas indicadas na tabela III.2-3 do item III.2. E o diâmetro (d) das bolhas de ar utilizado na simulação foi 2 mm.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-4} para o resíduo máximo.

A Figura IV.4-1 apresenta a pressão ao longo do tubo durante o escoamento bifásico resultante da simulação considerando modelo homogêneo.

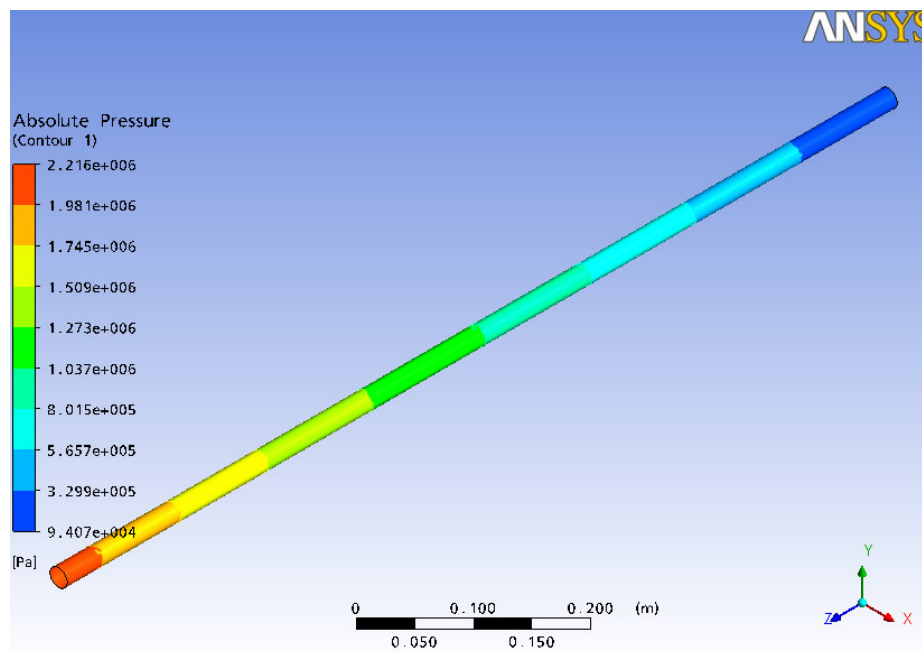


Figura IV.4-1 Queda de pressão – modelo homogêneo (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante da simulação do escoamento bifásico, regime borbulhado na zona de turbulência plena, considerando modelo homogêneo é 2.038.555 Pa/m.

Também com a finalidade de validar as simplificações assumidas com MEH foram realizadas simulações do escoamento borbulhado na região de turbulência completa sem considerar o modelo homogêneo. Foram feitas simulações considerando a força lubrificante de parede, força de dispersão turbulenta e de arrasto (Caso 4); outra considerando a força de sustentação, de dispersão turbulenta e de arrasto (Caso 5); e outra sem considerar a atuação das forças lubrificante de parede e de sustentação, mas considerando as outras duas forças principais (Caso 6).

Os modelos e considerações utilizados nas simulações dos casos 4, 5 e 6 podem ser vistos nos apêndices B.3-3 e B.3-4. O diâmetro das bolhas usado nas simulações foi 2 mm.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-3} para o resíduo médio.

Os resultados obtidos nos três casos serão comparados com a correlação empírica de L&M para determinar se a força de sustentação e a força lubrificante de parede são significativas para o escoamento borbulhado.

Caso 4) Simulação do escoamento borbulhado na zona de turbulência completa com contribuição da força lubrificante de parede. A figura IV.4-2 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 4.

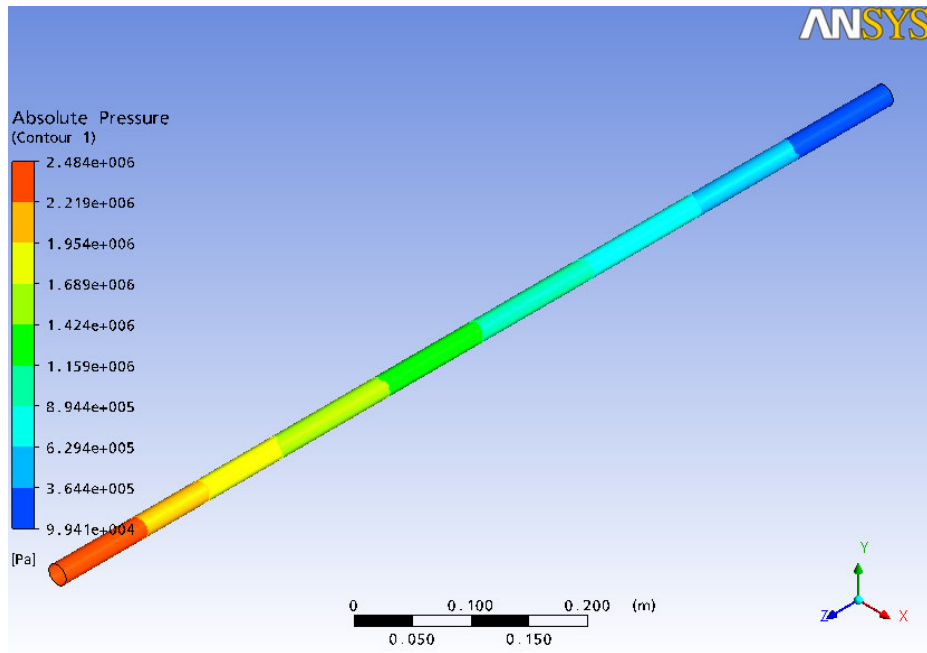


Figura IV.4-2 Queda de pressão – escoamento caso 4 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 4 é 2.377.681 Pa/m.

Caso 5) Simulação do escoamento borbulhado com contribuição da força de sustentação. A figura IV.4-3 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 5.

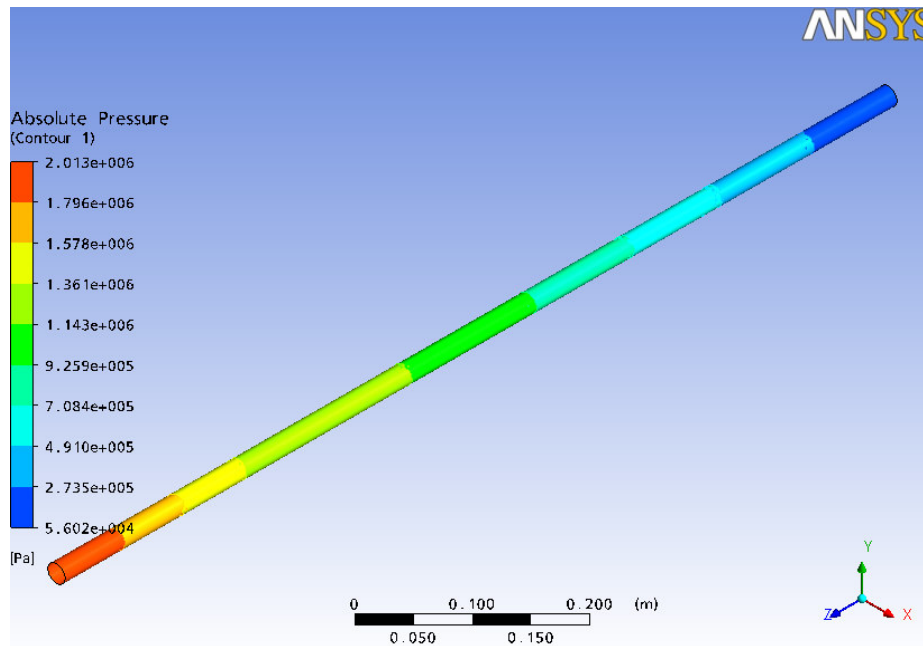


Figura IV.4-3 Queda de pressão – escoamento caso 5 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 5 é 1.898.821 Pa/m.

Caso 6) Simulação do escoamento borbulhado sem a contribuição da força de sustentação e da força lubrificante de parede. A figura IV.4-4 mostra a pressão ao longo do tubo para o caso 6.

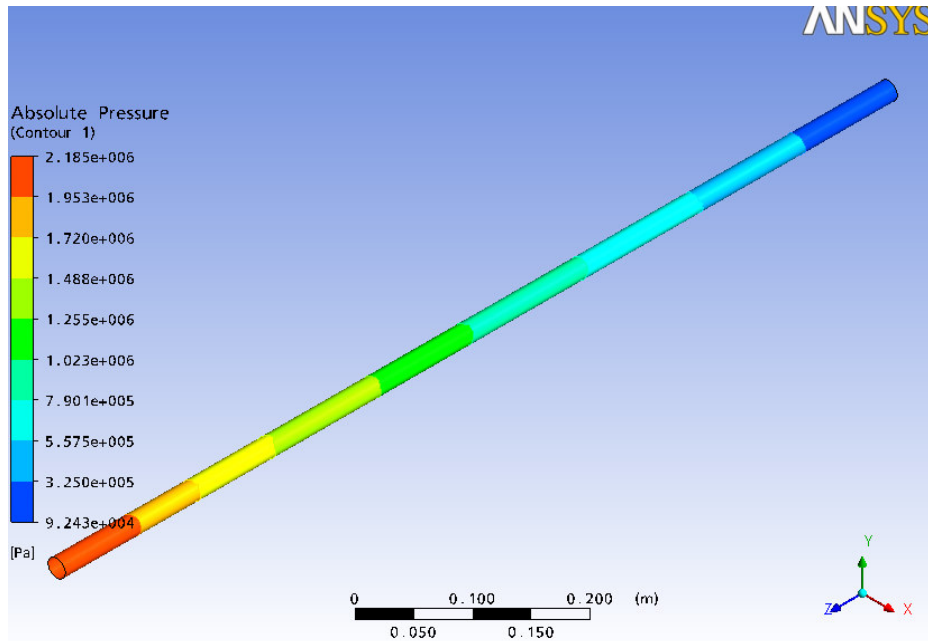


Figura IV.4-4 Queda de pressão – escoamento caso 6 (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico simulado caso 6 é 2.078.512 Pa/m.

IV.5 - Comparação das Simulações por CFD do Regime Borbulhado com Correlações Empíricas

A Tabela IV.5-1 apresenta os valores de gradientes de pressão para o escoamento borbulhado na região de turbulência incompleta obtidos pelos diferentes métodos citados anteriormente.

Tabela IV.5-1 Gradiente de pressão– escoamento borbulhado.

ESCOAMENTO BORBULHADO NA REGIÃO DE TURBULÊNCIA INCOMPLETA						
	SIMULAÇÃO*				L&M	FRIEDEL
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	MEH		
Gradiente de pressão - Pa/m	25.205	18.155	21.108	21.540	22954	21460

* $W_G = 0,0008$ kg/s; $W_L = 1,6835$ kg/s; $DI = 0,0207$ m; $d = 0,002$ m; $\epsilon = 4,56 \cdot 10^{-5}$ m.

Utilizando a previsão de L&M e de Friedel como referenciais, pode-se fazer uma comparação com os resultados das simulações no CFX do escoamento borbulhado na zona de turbulência incompleta, conforme é mostrado na Tabela IV.5-2. O cálculo do desvio foi feito conforme equação III.6-1.

Tabela IV.5-2 Gradiente de pressão – escoamento borbulhado.

SIMULAÇÃO	Desvio (%) (L&M)	Desvio (%) (Friedel)
Caso 1	-9,80	-17,45
Caso 2	20,90	15,40
Caso 3	8,04	1,64
MEH	6,16	-0,37

Como o valor do gradiente de pressão obtido, para o escoamento bifásico borbulhado simulado, considerando o modelo de equilíbrio homogêneo, apresenta desvios de 6,16 % e 0,37 % comparado com a previsão da correlação de L&M e de

Friedel respectivamente, pode - se afirmar que o modelo homogêneo representa bem o escoamento bifásico líquido-gás borbulhado na região de turbulência incompleta.

Conforme a tabela IV.5-2, a simulação onde a força de sustentação e a força lubrificante de parede são desconsideradas (caso 3) é a que apresenta um resultado mais próximo das correlações empíricas, dentre os três casos. Logo, a força de sustentação, assim como, a força lubrificante de parede tem atuação desprezível no escoamento líquido-gás borbulhado para tamanhos pequenos de bolhas e diâmetro de tubo.

A fim de ratificar que a força lubrificante de parede não é significativa para o escoamento borbulhado simulado foi calculado a espessura da camada limite no escoamento turbulento (“sub-camada laminar”) através da equação III.7-1, onde o δ_L encontrado foi 0,025 mm. A espessura da camada limite é menor que 2 mm (diâmetro da bolha), portanto a força lubrificante de parede não é importante nesse caso.

A Tabela IV.5-3 apresenta os valores de gradientes de pressão para o escoamento borbulhado na região de turbulência completa obtidos pelos diferentes métodos citados anteriormente.

Tabela IV.5-3 Gradiente de pressão– escoamento borbulhado.

ESCOAMENTO BORBULHADO NA REGIÃO DE TURBULÊNCIA COMPLETA						
	SIMULAÇÃO*				L&M	FRIEDEL
	Caso 4	Caso 5	Caso 6	MEH		
Gradiente de pressão - Pa/m	2.377.681	1.898.821	2.078.512	2.038.555	2.090.969	2.105.056

* $W_G = 0,0082$ kg/s; $W_L = 16,8347$ kg/s; $DI = 0,0207$ m; $d = 0,002$ m; $\epsilon = 4,56 \cdot 10^{-5}$ m.

Utilizando a previsão de L&M e de Friedel como referenciais, pode-se fazer uma comparação com os resultados das simulações no CFX do escoamento borbulhado na zona de turbulência plena, conforme é mostrado na Tabela IV.5-4. O cálculo do desvio foi feito conforme equação III.6-1.

Tabela IV.5-4 Gradiente de pressão – escoamento borbulhado.

SIMULAÇÃO	Desvio (%) (L&M)	Desvio (%) (Friedel)
Caso 4	-13,71	-12,95
Caso 5	9,18	9,80
Caso 6	0,59	1,26
MEH	2,51	3,16

Como o valor do gradiente de pressão obtido, para o escoamento bifásico borbulhado simulado, considerando modelo de equilíbrio homogêneo apresenta desvios de 2,51 % e 3,16 % comparado com a previsão da correlação de L&M, pode - se afirmar que o modelo homogêneo representa bem o escoamento bifásico líquido-gás borbulhado na região de turbulência completa.

Conforme a tabela IV.5-4, a simulação onde a força de sustentação e a força lubrificante de parede são desconsideradas (caso 6) é a que apresenta um resultado mais próximo das correlações empíricas, dentre os três casos. Logo, a força de sustentação, assim como, a força lubrificante de parede tem uma atuação desprezível no escoamento líquido-gás borbulhado para tamanhos pequenos de bolhas e diâmetro de tubo.

A fim de ratificar que a força lubrificante de parede não é significativa para o escoamento borbulhado simulado foi calculado a espessura da camada limite no escoamento turbulento (“sub-camada laminar”) através da equação III.7-1, onde o δ_L encontrado foi 0,0026 mm. A espessura da camada limite é muito menor que 2 mm (diâmetro da bolha), portanto a força lubrificante de parede não é importante nesse caso.

Capítulo V - Resultados para Regime Estratificado – Tubo Horizontal

V.1 - Geração da Malha para as Simulações do Regime Estratificado

Para simular o escoamento bifásico líquido-gás regime estratificado foi utilizado a mesma malha descrita no item IV.1 acima.

V.2 - Escoamento Monofásico

Utilizando a malha descrita acima, no item IV-1, e as mesmas condições de temperatura ($T=25^{\circ}\text{C}$) e valores das propriedades do líquido para o escoamento estratificado, descritos nas tabelas III.1-1 e III.2-3, foi simulado o escoamento monofásico da água em um tubo horizontal. Nos apêndices B.1-5 e B.1-6 se encontram os modelos, considerações e condições de contorno utilizados no CFX-pre.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-4} para o resíduo máximo.

A Figura V.2-1 apresenta a pressão ao longo do tubo durante o escoamento monofásico resultante da simulação.

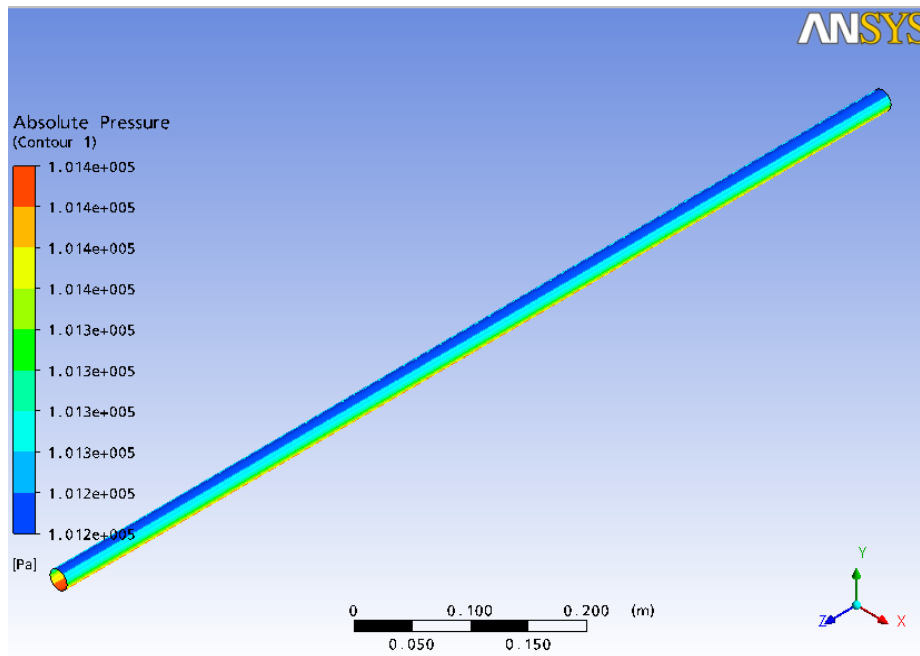


Figura V.2-1 Queda de pressão – escoamento monofásico (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento monofásico simulado é 26 Pa/m.

Utilizando a equação de Darcy (equação III.4-1) é possível estimar o gradiente de pressão para comparar com o obtido por CFD. O cálculo do desvio foi feito conforme equação III.6-1.

Na Tabela V.2-1 é apresentado o resultado do gradiente de pressão obtido pela equação de Darcy, para as mesmas condições de escoamento monofásico simulado com CFD.

Tabela V.2-1 Gradiente de pressão: equação de Darcy versus CFX.

MÉTODO	$\Delta P/\Delta L$ (Pa/m)
DARCY	32
CFX	26

O desvio do gradiente de pressão obtido por CFD comparado com a previsão da equação de Darcy é 18,75 %. O desvio elevado pode ser devido ao fator de atrito, do escoamento estratificado analisado, estar na região de transição ($N_{RE} = 4070$).

V.3 - Simulações por CFD do Regime Estratificado

No CFX-Pre foi simulado o escoamento estratificado em um tubo horizontal.

Um resumo dos modelos e considerações utilizados nas simulações está apresentado nos apêndices B.4-1 e B.4-2.

As frações volumétricas de água e de ar foram calculadas a partir das vazões volumétricas indicadas na Tabela III.2-3 do item III.2.

A tolerância para convergência utilizada foi 10^{-3} para o resíduo médio.

A Figura V.3-1 apresenta a pressão ao longo do tubo durante o escoamento bifásico estratificado resultante da simulação.

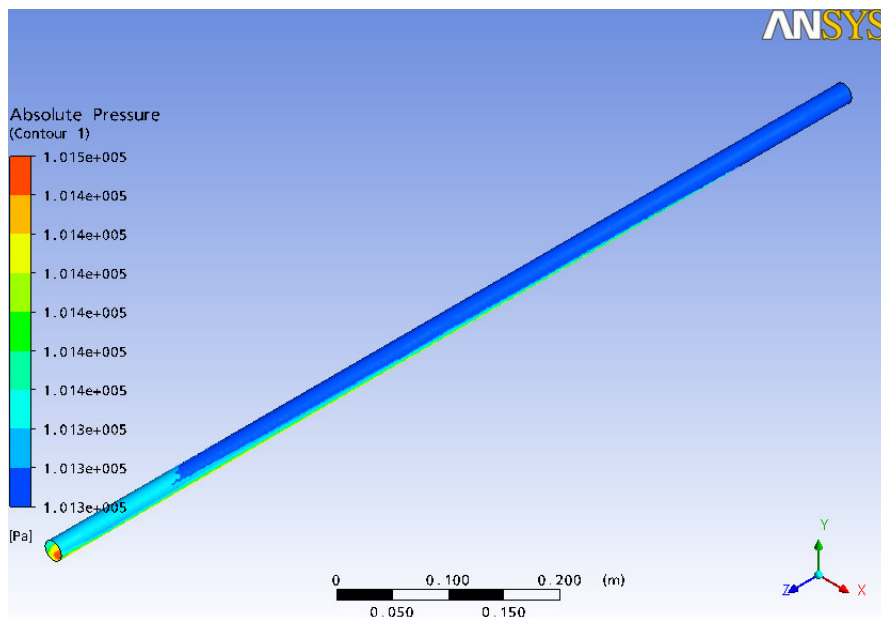


Figura V.3-1 Queda de pressão – escoamento estratificado (ANSYS CFX-solve).

O gradiente de pressão resultante para o escoamento bifásico estratificado simulado é 48 Pa/m.

V.4 - Comparação das Simulações por CFD do Regime Estratificado com Correlações Empíricas

Assim como foi feito para o escoamento borbulhado, o resultado obtido através da simulação com CFD para o escoamento estratificado será comparado com correlações empíricas. A Tabela V.4-1 mostra a comparação das simulações com fluidodinâmica computacional com a correlação de L&M e de Friedel.

Tabela V.4-1 Gradiente de pressão – escoamento estratificado.

ESCOAMENTO ESTRATIFICADO			
	SIMULAÇÃO	L&M	FRIEDEL
Gradiente de pressão (Pa/m)	48	75	115

Utilizando as previsões de L&M e Friedel como referencial, pode-se fazer uma comparação com o resultado da simulação do escoamento estratificado no CFX. Os cálculos dos desvios foram feitos conforme a equação III.6-1, onde os valores determinados foram 36 % e 58,3 %, respectivamente.

Capítulo VI - Conclusões e Recomendações

As conclusões que se seguem baseiam-se inteiramente em cálculos e simulações efetuadas neste projeto final de curso.

Nos cálculos foram usados as correlações de Lockhart & Martinelli e Friedel para o gradiente de pressão, e Soave para determinação do fator de atrito.

As simulações de CFD foram feitas com o código ANSYS CFX 11.0 empregando o modelo κ - ϵ para a representação das tensões turbulentas.

VI.1 - Escoamento Monofásico

As simulações por CFD do escoamento monofásico líquido, com número de Reynolds na região de turbulência incompleta e na zona de turbulência plena, apresentaram resultados semelhantes as previsões baseadas na equação de Darcy com fator de atrito calculado através da correlação de Soave, desvios de 3,2 % e 3,03 % , respectivamente. Nessas simulações do escoamento monofásico foi utilizado o modelo de turbulência κ - ϵ , o que indica que esse modelo é adequado para representar a turbulência no escoamento monofásico, uma vez que, os gradientes de pressão obtidos foram similares aos previsto via equação de Darcy.

Já a simulação do escoamento monofásico com as condições de escoamento que resultam em regime estratificado quando uma vazão específica de ar é adicionada, apresentou um desvio do gradiente de pressão previsto pela correlação de L&M igual a 18,75 %. Essa diferença pode ser atribuída ao fato desse escoamento se encontrar na região de transição, onde o N_{RE} está entre 2000 e 4000. No regime de transição o fator de atrito sofre variações abruptas com N_{RE} , por isso as previsões não são precisas.

VI.2 - escoamento Bifásico

Conforme esperado e indicado na literatura, a perda de carga por comprimento de tubulação para o escoamento bifásico é maior que aquela que resultaria se apenas uma fase escoasse com a mesma vazão mássica.

O modelo de equilíbrio homogêneo utilizado em algumas das simulações, apesar de suas simplificações em considerar velocidades, temperatura e pressão das fases iguais, representa bem o escoamento borbulhado tanto na região de turbulência incompleta quanto na completa, visto que, os desvios calculados através da comparação dos gradientes de pressão, obtidos através de CFD, com as previsões da correlação de L&M, foram 6,16 % e 2,51 % e com a correlação de Friedel foram -0,37 % e 3,16 %, respectivamente.

As bolhas de ar formadas durante o escoamento bifásico líquido-gás podem apresentar formato semelhante ao de aerofólios. Estes são responsáveis por determinar a direção da força transversal de sustentação. Quando as bolhas geradas são suficientemente pequenas, é provável que as mesmas não apresentem a forma de aerofólio. Assim, a força de sustentação não atua nesse escoamento. Por isso, as simulações dos escoamentos borbulhados, tanto para turbulência completa quanto incompleta, considerando a força de sustentação como atuante, apresentaram desvios positivos do gradiente de pressão iguais a 20,90 % e 9,18 % respectivamente, comparadas com as previsões da correlação de L&M. Já a comparação com a correlação de Friedel apresentou desvios iguais a 15,40 % e 9,80 %, respectivamente.

Enquanto a força de sustentação depende do formato da bolha de ar, a força lubrificante de parede, que também é transversal ao escoamento, depende do tamanho da bolha. O fato de que as simulações com o CFX do escoamento borbulhado na região de turbulência incompleta e completa incluindo a força de lubrificação de parede sobre as bolhas levaram a desvios maiores em relação as previsões de L&M, provavelmente deve-se ao diâmetro de bolha usado (2 mm) ser muito maior que a própria espessura da camada limite (0,025 mm e 0,0026 mm respectivamente) que é o local onde a força de lubrificação é relevante. As simulações dos escoamentos borbulhado, nas regiões de turbulência incompleta e completa, considerando a força lubrificante de parede como

atuante, apresentaram desvios negativos dos gradientes de pressão iguais a 9,80 % e 13,71 %, respectivamente, comparadas com as previsões da correlação de L&M. E comparadas com Friedel os desvios foram negativos e iguais a 17,45 % e 12,95 %.

As simulações sem considerar as forças de sustentação e lubrificante de parede nos escoamentos borbulhado na zona de turbulência incompleta e completa apresentaram desvios iguais a 8,04 % e 0,59 %, respectivamente, quando comparadas com a correlação de L&M. Comparadas com Friedel os desvios foram 1,64 % e 1,26 %, respectivamente, o que ratifica a conclusão de que essas duas forças não são significativas para o escoamento borbulhado onde os diâmetros das bolhas são pequenos.

VI.3 - Recomendações

São sugeridos os seguintes tópicos para futuros trabalhos sobre escoamentos bifásicos líquido-gás em tubulações, todos de grande relevância para a indústria de petróleo e gás natural:

- Simulação de escoamentos horizontais onde as forças de sustentação (lift) e lubrificante de parede (wall lubrication) têm contribuição apreciável. No caso da força de sustentação isso corresponde a sistemas com altas vazões relativas gás-líquido e no caso da força de lubrificação a escoamentos com baixos valores de N_{RE} ;
- Simulação de escoamentos horizontais usando fluidos com propriedades físicas semelhantes as do petróleo e gás natural;
- Comparação de resultados de simulação com a correlação de Friedel (1979);
- Simulação de escoamentos verticais e inclinados, por sua importância para a exploração e produção de petróleo e gás natural.

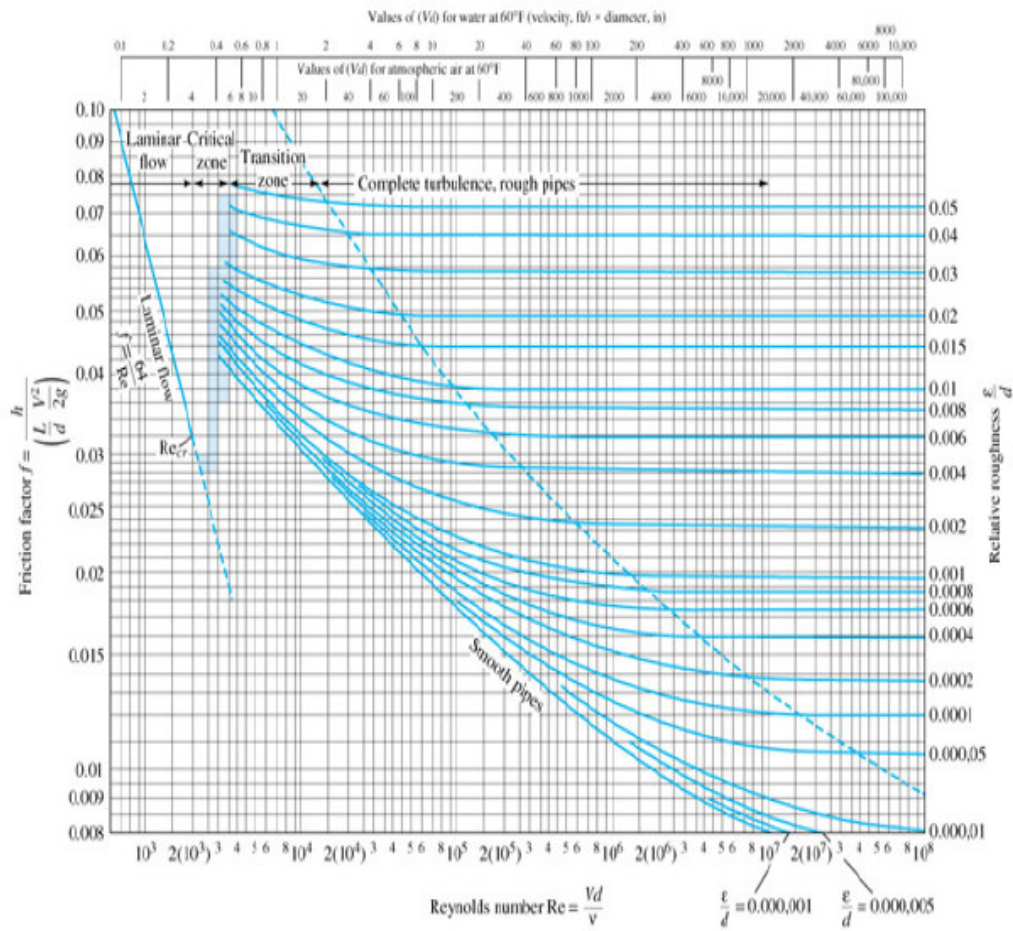
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **ANSYS CFX-Mesh Tutorials**, ANSYS Workbench Release 9.0, 2004.
- **ANSYS CFX- Tutorials**, ANSYS CFX Release 11.0, Gás-Liquid Flow in a Airlift Reactor – tutorial 16, 2006.
- Awad, M.M., Muzychka, Y. S., **A Simple Two-Phase Frictional Multiplier Calculation Method**, International pipeline conference, Alberta, Canada, 2004.
- Bhramara, P., Rao V. D., Sharma, K. V. e Reddy, T. K. K, **CFD Analysis of Two Phase Flow in a Horizontal Pipe – Prediction of Pressure Drop**, International Journal of Fluid Thermal Engineering, vol. 30, pp. 315-321, 2008.
- Chafin, S.; Haraburda, S., **Two-Phase Flow Calculation Spreadsheet**, Version 1.07, 2005. (disponível em: <http://www.chemicalprocessing.com>).
- Coates, J. e Pressburg, B. S., **How to Analyse Two-Phase Flow**, Chemical Engineering – September 7, 1959.
- Corradini, M. L., **Fundamentals of Multiphase Flow**, last modified 1997. (disponível em: <http://wins.engr.wisc.edu/teaching/mpfBook/node3.html>).
- Crane, Co., **Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe – Technical paper N° 410**, 1988.
- Fontes, C. E. et al, **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**, Escola Piloto Virtual, COPPE/UFRJ. 2005.

- Lockhart, R. W e Martinelli, R.C, **Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two Component Flow in Pipes**, Chemical Engineering Progress – Vol. 45, 1949.
- Maliska, C. R, Silva, A. F. C. da, Rezende, R. V. P e Georg, I. C., **Interface Forces Calculation for Multiphase Flow Simulation**, Dissertação – 1º encontro brasileiro sobre ebulição, condensação e escoamento multifásico líquido-gás, Florianópolis, Santa Catarina, 2008. (disponível em: <http://www.ebecem.com.br>).
- Massey, B. e Ward-Smith, J., "**Mechanics of Fluids**", 7th printing, Stanley Thornes (Publishers), 1998.
- Nevers, Noel de, **Fluid Mechanics for Chemical Engineers**, Hill International Editions, 2º edição, 1991.
- Perry, R. H. (Late Editor), Green, D. W. (Editor), **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, McGraw – Hill International Editions, 7th printing, 1997.
- Whalley, P.B, **Two-Phase Flow and Heat Transfer**, Oxford University Press, 1996.
- Wipplinger, KPM, Harms, T. M e Taylor, A.B, **Stainless Steel Finned Tube Heat Exchanger Design for Waste Heat Recovery**, Journal of Energy in South África, vol 17, nº2, 2006. (disponível em: <http://www.erc.uct.za>).

APÊNDICES

A - Diagrama de Moody



(Gouvêa, 2004).

B - Modelos e Considerações Utilizados nas Simulações com CFD

B.1 - Escoamento Monofásico

B.1-1 - Resumo do Domínio Físico

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = k epsilon Turbulent Wall Functions = Scalable Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.1-2 - Condições de Contorno

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Normal Speed = 5.018 [m s ⁻¹] Mass And Momentum = Normal Speed Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
Default Domain	outlet	Outlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Average Static Pressure Relative Pressure = 0 [Pa] Pressure Averaging = Average Over Whole Outlet
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.1-3 - Resumo do Domínio Físico

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = k epsilon Turbulent Wall Functions = Scalable Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

B.1-4 - Condições de Contorno

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Normal Speed = 50.1909 [m s ⁻¹] Mass And Momentum = Normal Speed Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
Default Domain	outlet	Outlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Average Static Pressure Relative Pressure = 0 [Pa] Pressure Averaging = Average Over Whole Outlet
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

B.1-5 - Resumo do Domínio Físico

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = k epsilon Turbulent Wall Functions = Scalable Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: CFX-solve.

B.1-6 - Condições de Contorno

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Normal Speed = 0.1757 [m s ⁻¹] Mass And Momentum = Normal Speed Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
Default Domain	outlet	Outlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Average Static Pressure Relative Pressure = 0 [Pa] Pressure Averaging = Average Over Whole Outlet
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: CFX-solve.

B.2 - Escoamento Bifásico Líquido-Gás – Regime Borbulhado na Região de Turbulência Incompleta

B.2-1 - Resumo do Domínio Físico Considerando Modelo Homogêneo

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Air at 25 C, Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = k epsilon Turbulent Wall Functions = Scalable Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.2-2 - Condições de Contorno – Modelo Homogêneo

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Normal Speed = 7.0975 [m s ⁻¹] Mass And Momentum = Normal Speed Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0.289 Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 0.711
Default Domain	outlet	Opening	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Static Pressure for Entrainment Relative Pressure = 0 [atm] Turbulence = Zero Gradient Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0 Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 1
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.2-3 - Resumo do Domínio Físico - sem Considerar o Modelo Homogêneo

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Air at 25 C, Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = Fluid Dependent Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.2-4 - Condições de Contorno - sem Considerar o Modelo Homogêneo

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Fluid Velocity Flow Direction = Normal to Boundary Condition Air at 25 C Mass Flow Rate = 0.0008 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0.289 Flow Direction = Normal to Boundary Condition Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio Water Mass Flow Rate = 1.6835 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 0.711
Default Domain	outlet	Opening	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Static Pressure for Entrainment Relative Pressure = 0 [atm] Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0 Turbulence = Zero Gradient Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 1
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.3 - Escoamento Bifásico Líquido-Gás – Regime Borbulhado na Região de Turbulência Completa

B.3-1 - Resumo do Domínio Físico Considerando Modelo Homogêneo

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Air at 25 C, Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = k epsilon Turbulent Wall Functions = Scalable Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.3-2 - Condições de contorno – Modelo homogêneo

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Normal Speed = 70.9751 [m s ⁻¹] Mass And Momentum = Normal Speed Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0.289 Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 0.711
Default Domain	outlet	Opening	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Static Pressure for Entrainment Relative Pressure = 0 [atm] Turbulence = Zero Gradient Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0 Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 1
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.3-3 - Resumo do Domínio Físico - sem Considerar o Modelo Homogêneo

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Air at 25 C, Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = Fluid Dependent Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.3-4 - Condições de Contorno - sem Considerar o Modelo Homogêneo

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Fluid Velocity Flow Direction = Normal to Boundary Condition Air at 25 C Mass Flow Rate = 0.0082 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0.289 Flow Direction = Normal to Boundary Condition Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio Water Mass Flow Rate = 16.8347 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 0.711
Default Domain	outlet	Opening	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Static Pressure for Entrainment Relative Pressure = 0 [atm] Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0 Turbulence = Zero Gradient Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 1
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.4 - Escoamento Bifásico Líquido-Gás – Regime Estratificado

B.4.1 - Resumo do Domínio Físico

Name	Type	Materials	Models
Default Domain	Fluid	Air at 25 C, Water	Heat Transfer Model = Isothermal Turbulence Model = Fluid Dependent Buoyancy Model = Buoyant Domain Motion = Stationary

Fonte: ANSYS CFX-pre.

B.4.2 - Condições de Contorno

Domain	Name	Type	Settings
Default Domain	inlet	Inlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Fluid Velocity Turbulence = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio Flow Direction = Normal to Boundary Condition Air at 25 C Mass Flow Rate = 0.0001 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Air at 25 C Volume Fraction = 0.449 Flow Direction = Normal to Boundary Condition Water Mass Flow Rate = 0.0589 [kg s ⁻¹] Velocity = Mass Flow Rate Volume Fraction = Value Water Volume Fraction = 0.551
Default Domain	outlet	Outlet	Flow Regime = Subsonic Mass And Momentum = Average Static Pressure Relative Pressure = 0 [Pa] Pressure Averaging = Average Over Whole Outlet
Default Domain	Default Domain Default	Wall	Wall Influence On Flow = No Slip Wall Roughness = Rough Wall Roughness Height = 0.0456 [mm]

Fonte: ANSYS CFX-pre.