



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências

ARIEL JORDAN VILLARROEL

**Modelagem Fenomenológica do Escoamento
Bifásico Gás-Líquido em Dutos Curvos de
180° com Seção Transversal Retangular**

Campinas

2022

Ariel Jordan Villarroel

**Modelagem Fenomenológica do
Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Dutos
Curvos de 180° com Seção Transversal
Retangular**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo, na área de Exploração.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro

Co-Orientador: Prof. Dr. Valdir Estevam

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ARIEL JORDAN VILLARROEL, E ORIENTADO PELO PROF. DR. MARCELO SOUZA DE CASTRO.

Assinatura do Orientado

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V713m Villarroel, Ariel Jordan, 1991-
Modelagem fenomenológica do escoamento bifásico gás-líquido em dutos curvos de 180° com seção transversal retangular / Ariel Jordan Villarroel. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Marcelo Souza de Castro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Escoamento bifásico. 2. Tubos. 3. Bolhas (Física). I. Castro, Marcelo Souza de, 1986-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Phenomenological modeling of gas-liquid flow in vertical 180° non-circular return bends

Palavras-chave em inglês:

Biphasic flow

Duct

Bubble

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Marcelo Souza de Castro [Orientador]

Francisco Júlio de Nascimento

Charlie Van Der Geest

Data de defesa: 27-04-2022

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8176-8115>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0973215249850553>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Modelagem Fenomenológica do Escoamento
Bifásico Gás-Líquido em Dutos Curvos de 180°
com Seção Transversal Retangular**

Autor: Ariel Jordan Villarroel

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro

Co-orientador: Prof. Dr. Valdir Estevam

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro, Presidente

Departamento de Energia/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Francisco Júlio do Nascimento

Departamento de Ciências do Mar/UNIFESP – Campus Baixada Santista

Dr. Charlie Van der Geest

CEPETRO/UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 27 de abril de 2022.

Dedicatória

Gostaria de dedicar este projeto de pesquisa para meus pais como agradecimento pelo amor, carinho, confiança, ensinamentos e pelas palavras de apoio.

Também para meus irmãos, a Deus, a Virgem Maria, a meu colega Renan Marçal, a meu irmão de vida Edwin Calla que foi um guia muito importante, quem me deu a luz e a motivação para começar este caminho, a meu amigo Cristhian Porcel que foi um apoio e conselheiro importante durante o mestrado e amigos que sonharam e estiveram junto comigo neste desafio.

Da mesma forma a meu orientador, Dr. Marcelo Souza de Castro, por ter me dado a oportunidade de trabalhar juntos e acolhido no grupo ALFA.

Do mesmo modo a meu co-orientador, Dr. Valdir Estevam, por ter sido um pilar fundamental para cumprir um de meus grandes sonhos, finalizar o mestrado na Unicamp focado na área da produção e ter sido uma luz, um apoio e uma ajuda no despertar da espiritualidade.

Agradecimentos

O sucesso e a realização deste trabalho começaram com um sonho. Depois se tornou um desafio pessoal. E graças a Deus, ao apoio de minha família e de amigos finalizou com a conquista do título de Mestre. No entanto, essa vitória foi alcançada também graças ao apoio de muitas pessoas, que gostaria de agradecer a seguir.

Nesta oportunidade, gostaria de expressar minha gratidão a Deus e a nossa Virgem Maria pela oportunidade de permitir transformar mais um sonho em sucesso real. Eles sempre estão presentes na minha vida e uma comunicação de maneira mais fácil e simples com eles o tempo todo me ajudaram na conclusão deste trabalho. Ao mesmo tempo, fico muito agradecido com a vida, por brindar-me com uma família maravilhosa e amigos que nunca deixaram de me apoiar, confiar, crer e impulsionar para conseguir minhas metas propostas na vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro pela confiança depositada na minha pessoa, pela oportunidade de ingressar no programa de Mestrado, pelos conhecimentos compartilhados e principalmente pela sua orientação, paciência e apoio.

Agradeço também ao Prof. Dr. Valdir Estevam, pela confiança, compreensão, compromisso, ajuda e apoio incondicional durante o trabalho, por compartilhar seus conhecimentos e experiências, pelos conselhos profissionais e pessoais, e principalmente pela amizade sincera.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço ao Brasil, à Petrobras e à Agência Nacional do Petróleo ANP (Compromisso de Investimentos com Pesquisa e Desenvolvimento) pelo apoio financeiro ao longo do período do Mestrado. Também, agradeço ao CEPETRO (Centro de Estudos de Petróleo) pela disponibilização das instalações que permitiram obter dados através do aparato experimental instalado. Ao mesmo tempo, sou muito grato ao pessoal do grupo ALFA (Artificial Lift and Flow Assurance) e ao pessoal de laboratório (pesquisadores, técnicos e colegas) pelo apoio e ajuda durante todo o processo.

Finalmente, agradeço a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) e ao Instituto de Geociências (IG) pelo programa de mestrado oferecido, o qual nos permite continuar aprendendo e crescendo tanto academicamente como também profissionalmente. Além disso, permitiu conhecer pessoas de diferentes partes do mundo, com diferentes costumes e a mais importante pessoa muito boas.

Resumo

A produção de petróleo e de gás impõe, a cada dia, novos desafios tecnológicos e científicos, mais ainda durante e depois das crises econômicas mundiais. Dentro desse escopo e considerando a contínua evolução e inventividade de novas técnicas, são desenvolvidas correlações e novos conhecimentos multidisciplinares para o aumento e otimização da produção de petróleo e de gás em ambientes *offshore* e *onshore*. Verifica-se que, a cada dia, mais estudos e pesquisas precisam ser realizados.

O presente trabalho apresenta um estudo sistemático para a modelagem associada à um escoamento bifásico em um duto curvo de seção retangular. Foram obtidos dados experimentais. Foi realizado um estudo analítico a partir da aquisição de dados e visualização dos diferentes fenômenos que ocorrem em um escoamento bifásico em duto curvo considerando as diferentes condições operacionais, tais como: mistura de dois fluidos *Óleo-Ar* e *Água-Ar*, padrão de escoamento em bolhas, vazão mássica de água entre 500 kg/h a 2000 kg/h com vazão mássica de ar de 0.09 kg/h a 1 kg/h, vazão mássica de óleo entre 200 kg/h a 2600 kg/h com vazão mássica de ar entre 0.07 kg/h a 5 kg/h, pressão de operação manométrica entre de 0 até 2.5 bar.

Os fenômenos físicos investigados observados foram: coalescência de bolhas, formação de bolha alongada estacionária e formação de filme de líquido, presença de região de remistura com escoamento em bolhas de diversos diâmetros e existência de diâmetro crítico para bolhas saírem do canal do duto curvo.

Foi feita uma comparação do escoamento com o que ocorre em escoamentos bifásicos no canal do rotor de bombas centrífugas, confirmando as semelhanças entre eles.

Foi desenvolvida uma correlação para a determinação da espessura de filme de líquido com base nos resultados experimentais obtidos. Os resultados experimentais da espessura de filme de líquido foram comparados com as correlações existentes na literatura e com a correlação proposta.

Os resultados permitiram apontar correções nos modelos testados para representarem mais acuradamente os dados experimentais obtidos.

Palavras-Chave: Escoamento bifásico, Duto Curvo, Bolha Alongada, Filme de Líquido, Padrões de escoamento, Modelagem

Abstract

The production of oil and gas imposes, every day, new technological and scientific challenges, even more during and after the world economic crisis. Within this scope and considering the continuous evolution and inventiveness of new techniques, new correlations, and new multidisciplinary knowledge are developed for the increase and optimization of oil and gas production in offshore and onshore environments are necessary. It appears that, every day, more studies and research need to be carried out.

The present work presents a systematic study for the modeling associated with a two-phase flow in a curved pipeline of rectangular section. Experimental data were obtained. An analytical study was carried out from the acquisition data and visualization of the different phenomena that occur in a two-phase flow in a curved pipeline considering the different operating conditions, such as: mixture of two fluids *Oil-Air* and *Water-Air*, flow pattern in bubbles, the flows were made in strips, where the mass flow of water varied from 500 kg/h to 2000 kg/h with the mass flow of air from 0.09 kg/h to 1 kg/h ; the mass flow of oil varied between 200 kg/h to 2600 kg/h with the mass flow of gas varied between 0.07 kg/h to 5 kg/h , the gauge operating pressure of operation varied from 0 to 2.5 bar and flow correlation's existing in the literature and an experimental correlation were evaluated to allow a better understanding of this type of flow.

The physical phenomena investigated observed were: bubble coalescence, stationary elongated bubble formation and a liquid film formation, presence of a remix region with flow in bubbles of different diameters and existence of a critical diameter for bubbles to exit the curved duct channel.

A flow comparison was made with what occurs in biphasic flows in the rotor channel of centrifugal pumps, confirming the similarities between them. Therefore, a correlation for the determination of the liquid film height was developed based on the obtained experimental results.

The experimental results of liquid film height were compared with existing models in the literature and with the proposed model.

The results allowed to point out corrections in the tested models to more accurately represent the obtained experimental data.

Keywords: biphasic flow, curved duct, elongated bubble, liquid film, flow patterns, modeling.

Lista de Figuras

FIGURA 1-1: COMPARAÇÃO DOS FENÔMENOS DENTRO DOS ESCOAMENTOS: A) ESCOAMENTO EM DUTO CURVO E B) ESCOAMENTO NO INTERIOR DE UM IMPELIDOR DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA	21
FIGURA 2-1: PROPRIEDADES DESCRITAS NO DUTO DE SEÇÃO QUADRADA	23
FIGURA 2-2: DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DE MODELOS DE ESCOAMENTO	31
FIGURA 2-3: PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÃO VERTICAL	33
FIGURA 2-4: PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM ESCOAMENTO INCLINADO ASCENDENTE	33
FIGURA 2-5: PADRÕES E SUBPADRÕES PARA O ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE	34
FIGURA 2-6: BOLHAS DE TAYLOR EM UMA GOLFADA	35
FIGURA 2-7: MAPA DE TAITEL E DUKLER PARA O ESCOAMENTO VERTICAL.....	36
FIGURA 2-8: MAPA DE PADRÃO DE ESCOAMENTO (ÓLEO-AR)	37
FIGURA 2-9: MAPA DE PADRÃO DE ESCOAMENTO (ÁGUA-AR)	38
FIGURA 2-10 ESCOAMENTO SECUNDÁRIO OCORRIDO DEVIDO A CURVA.	38
FIGURA 2-11: DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES EM UM ESCOAMENTO EM CURVA.....	40
FIGURA 2-12: ESTUDO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE BOLHA ALONGADA E REGIÃO DE REMISTURA.	46
FIGURA 2-13: CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO E/OU DOIS-FLUIDOS.....	48
FIGURA 2-14: MECANISMO PROPOSTO DE ENTRANHAMENTO DE AR EM BAIXAS VELOCIDADES DE IMPACTO DE JATO FONTE: SENE (1988).	49
FIGURA 2-15: JATO SUBMERSO TURBULENTO.....	51
FIGURA 2-16. TIPOS DE VARIAÇÃO ESPACIAL EM ESCOAMENTO DE SUPERFÍCIE LIVRE	53
FIGURA 2-17. MECANISMO DE AERAÇÃO EM RESSALTO HIDRÁULICO	54
FIGURA 2-18. AERAÇÃO POR IMPACTO.....	55
FIGURA 2-19: REGIÃO DE ESCOAMENTO ÁGUA-AR DE UM RESSALTO HIDRÁULICO.....	56
FIGURA 2-20: EFEITO DO NÚMERO DE WEBER LÍQUIDO NA ESPESSURA DO FILME PARA DIFERENTES NÚMEROS E PRESSÃO DE GÁS MODIFICADO	62
FIGURA 2-21: RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA MÉDIA FILME LÍQUIDO E O NÚMERO WEBER DO LÍQUIDO MODIFICADO	63
FIGURA 2-22: RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA MÉDIA FILME LÍQUIDO E O NÚMERO WEBER DO GÁS MODIFICADO	64
FIGURA 2-23: RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA MÉDIA FILME LÍQUIDO E O NÚMERO FROUDE DO GÁS	64
FIGURA 2-24: ESTÁGIOS DA BCS.....	66
FIGURA 2-25 OPERAÇÃO INSTÁVEL DE BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO COM MISTURA BIFÁSICA GÁS-LÍQUIDO.	67
FIGURA 2-26: VISUALIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA FORMAÇÃO DAS BOLHAS EM ROTOR DE BOMBA CENTRÍFUGA	70
FIGURA 2-27: MAPEAMENTO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA-AR) NO CANAL DO IMPELIDOR DE UMA BOMBA, INDICANDO AS FRONTEIRAS PARA A OCORRÊNCIA DE SURGING E BLOQUEIO DE GÁS NO CANAL DO IMPELIDOR.....	71
FIGURA 2-28: COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO NO CANAL DO ROTOR DA BOMBA (VISTA SUPERIOR).....	72
FIGURA 2-29: COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO NO CANAL DO ROTOR DA BOMBA. (VISTA NAS PÁS).....	72
FIGURA 2-30: PADRÕES DE ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO IMPELIDOR BCS. (A) BOLHAS, (B) BOLHAS AGLOMERADAS, (C) BOLSÃO DE GÁS, (D) SEGREGADO	73

FIGURA 2-31: IMAGENS COMPORTAMENTO DAS FASES NOS CANAIS DO ROTOR ($\eta=300$ RPM E $mAr=0.63$ KG/H).	75
FIGURA 2-32: PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO IDENTIFICADOS NO ROTOR E DIFUSOR DO PRIMEIRO ESTÁGIO DA BOMBA: A) ESCOAMENTO EM BOLHAS, B) BOLHAS AGLOMERADAS, C) BOLSÃO DE GÁS, D) ESCOAMENTO SEGREGADO.....	75
FIGURA 3-1. DESENHO ESQUEMÁTICO DA LINHA DE TESTE.....	79
FIGURA 3-2. LAYOUT LABVIEW.	81
FIGURA 3-3. VISTA FRONTAL DE DESENHO EM 2D E 3D DO DUTO CURVO.....	82
FIGURA 3-4: CRONOGRAMA OPERACIONAL	83
FIGURA 3-5: FLUXOGRAMA PARA TRATAMENTO DOS DADOS.....	86
FIGURA 4-1: WEBER DO LÍQUIDO MODIFICADO VS A ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO (ABDULKADIR ET AL. 2018) , TESTE 10 (ÓLEO-AR)	95
FIGURA 4-2: WEBER DO LÍQUIDO MODIFICADO VS A ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO (ABDULKADIR ET AL. 2018), TESTE 18 (ÁGUA-AR).....	96
FIGURA 4-3: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	100
FIGURA 4-4: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	101
FIGURA 4-5: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	101
FIGURA 4-6: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	103
FIGURA 4-7: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	104
FIGURA 4-8: FROUDE DO LÍQUIDO MODIFICADO VS ESPESSURA FILME DO LÍQUIDO MEDIDO E CALCULADO,	104
FIGURA 4-9: ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO CALCULADO (MODELO PROPOSTO) VS ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO MEDIDO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS, (TESTES ÓLEO-AR).....	105
FIGURA 4-10: ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO CALCULADO (MODELO PROPOSTO) VS ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO MEDIDO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS, (TESTES ÁGUA-AR).....	106
FIGURA 4-11: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME MEDIDOS E ERRO MEDIÇÃO TESTE 9 (ÓLEO-AR)	109
FIGURA 4-12: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 10 (ÓLEO-AR).....	110
FIGURA 4-13: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 40 (ÓLEO-AR).....	110
FIGURA 4-14: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 50 (ÓLEO-AR).....	111
FIGURA 4-15: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 62 (ÓLEO-AR).....	111
FIGURA 4-16: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME MEDIDOS, ERRO MEDIÇÃO TESTE 18 (ÁGUA-AR)	114
FIGURA 4-17: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 19 (ÁGUA-AR)	115
FIGURA 4-18: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 20 (ÁGUA-AR)	115
FIGURA 4-19: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 42 (ÁGUA-AR)	116
FIGURA 4-20: COMPRIMENTO DA BOLHA VS ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO, TESTE 43 (ÁGUA-AR)	116
FIGURA 4-21: ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO CALCULADO (ESTEVAM, 2002) VS ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO MEDIDO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS, (TESTES ÓLEO-AR).....	117
FIGURA 4-22: ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO CALCULADO (ESTEVAM, 2002) VS ESPESSURA DO FILME LÍQUIDO MEDIDO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS, (TESTES ÁGUA-AR).....	118

Lista de Figuras Anexo

FIGURA I-1: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 10 (ÓLEO-AR)	130
FIGURA I-2: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 10 (ÓLEO-AR)	130
FIGURA I-3: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 40 (ÓLEO-AR)	130
FIGURA I-4: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 50 (ÓLEO-AR)	130
FIGURA I-5: COMPRIMENTO DA BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 62 (ÓLEO-AR)	131
.....	131
FIGURA I-6: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 18 (ÁGUA-AR)	131
FIGURA I-7: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 19 (ÁGUA-AR)	131
FIGURA I-8: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 20 (ÁGUA-AR)	131
FIGURA I-9: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 42 (ÁGUA-AR)	132
FIGURA I-10: COMPRIMENTO BOLHA LONGADA ESTACIONÁRIA VS ALTURA FILME, TESTE 43 (ÁGUA-AR)	132
.....	132

Lista de Tabelas

TABELA 2-1: JATO SUBMERSO TURBULENTO	52
TABELA 2-2: RESUMO DOS TRABALHOS REVISADOS EM ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO	76
TABELA 3-1. DESCRIÇÃO DE DISPOSITIVOS UTILIZADOS.....	81
TABELA 3-2. DESCRIÇÃO DA PRECISÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DO TESTE.	85
TABELA 4-1: CONDIÇÕES OPERACIONAIS MEDIDAS – ESCOAMENTO ÓLEO-AR (A).....	89
TABELA 4-2: CONDIÇÕES OPERACIONAIS CALCULADAS – ESCOAMENTO ÓLEO-AR (B)	89
TABELA 4-3: CONDIÇÕES OPERACIONAIS CALCULADAS – ESCOAMENTO ÓLEO-AR (C)	90
TABELA 4-4: CONDIÇÕES OPERACIONAIS MEDIDAS – ESCOAMENTO ÁGUA-AR (A).....	90
TABELA 4-5: CONDIÇÕES OPERACIONAIS CALCULADAS – ESCOAMENTO ÁGUA-AR (B)	90
TABELA 4-6: CONDIÇÕES OPERACIONAIS CALCULADAS – ESCOAMENTO ÁGUA-AR (C)	91
TABELA 4-7. CONFIGURAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DE ENTRADA ÓLEO-AR.....	91
TABELA 4-8. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 9 (ÓLEO-AR).....	91
TABELA 4-9. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 10 (ÓLEO-AR).....	92
TABELA 4-10. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 40 (ÓLEO-AR).....	92
TABELA 4-11. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 50 (ÓLEO-AR).....	92
TABELA 4-12. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 62 (ÓLEO-AR).....	92
TABELA 4-13. CONFIGURAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DE ENTRADA ÁGUA-AR.....	93
TABELA 4-14. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 18 (ÁGUA-AR).....	93
TABELA 4-15. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 19 (ÁGUA-AR).....	94
TABELA 4-16. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 20 (ÁGUA-AR).....	94
TABELA 4-17. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 42 (ÁGUA-AR).....	94
TABELA 4-18. DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS, TESTE 43 (ÁGUA-AR).....	94
TABELA 4-19: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 10 (ÓLEO-AR) ..	99
TABELA 4-20: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 40 (ÓLEO-AR) ..	99
TABELA 4-21: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 50 (ÓLEO-AR) ..	99
TABELA 4-22: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 18 (ÁGUA-AR) ..	102
TABELA 4-23: RESULTADO DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 19 (ÁGUA-AR) ..	102
TABELA 4-24: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (MODELO PROPOSTO), TESTE 42 (ÁGUA-AR) ..	103
TABELA 4-25: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 9 (ÓLEO-AR)	107
TABELA 4-26: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 10 (ÓLEO-AR)	108
TABELA 4-27: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 40 (ÓLEO-AR)	108
TABELA 4-28: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 50 (ÓLEO-AR)	108
TABELA 4-29: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 62 (ÓLEO-AR)	109
TABELA 4-30: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 18 (ÁGUA-AR)	112
TABELA 4-31: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 19 (ÁGUA-AR)	112
TABELA 4-32: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 20 (ÁGUA-AR)	113
TABELA 4-33: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 42 (ÁGUA-AR)	113
TABELA 4-34: RESULTADOS DA ESPESSURA DO FILME DO LÍQUIDO (ESTEVAM, 2002), TESTE 43 (ÁGUA-AR)	113

Lista de Abreviaturas e Siglas

ALFA	<i>Artificial Lift and Flow Assurance Research Group</i>
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BCS	<i>Bombeio Centrífugo Submerso ou Bomba Centrífuga Submersa</i>
BCSS	<i>Bomba Centrífuga Submersa Submarina</i>
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
BHP	<i>Brake Horse Power</i>
ESP	<i>Electric Submersible Pump</i>
EB	<i>Elongated Bubbles flow pattern</i>
S	<i>Slug flow pattern</i>
HSBC	<i>Hong Kong and Shanghai Banking Corporation</i>
HI	<i>Hydraulic Institute</i>
NI	<i>National Instruments</i>
TUALP	<i>Tulsa University Artificial Lift Projects</i>
LABVIEW	<i>Linguagem de Programação Gráfica da National Instruments</i>
CEPETRO	<i>Centro de Estudos de Petróleo</i>
CAPES	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
UNICAMP	<i>Universidade Estadual de Campinas</i>

Nomenclatura

A	Área	[m ²]
as	Largura do canal considerando a direção do escoamento	[m]
$^{\circ}API$	Grau API	[graus]
b	Altura do canal	[m]
C_D	Coefficiente de Arrasto	[-]
D	Diâmetro	[m]
Fr	Número de Froude da mistura	[-]
F_d	Força de arrasto	[kgf, m ²]
R	Raio médio da Curvatura	[m]
R_g	Constante Universal dos Gases	[J/kg °K]
q	Vazão Volumétrica	[m ³ /h, m ³ /s]
\dot{m}	Vazão Mássica	[kg/h, kg/s]
\dot{m}_m	Vazão Mássica da mistura	[kg/h, kg/s]
I_s	Indicador de Surging	[-]
J	Velocidade Superficial	[m/s]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H_L	Holdup do Líquido	[-]
h_f	Altura do Filme do Líquido	[mm]
N_M	Número de Morton	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Slip Ratio	[-]
T	Temperatura	[°C]
V_f	Velocidade “in situ” do fluido	[m/s]
We	Número de Weber	[-]
x	Título mássico	[-]

Letras Gregas

ρ	Massa Específica do Fluido	[kg/m ³]
α	Fração de Vazio	[-]
$\bar{\epsilon}$	Holdup da Espessura do Filme valor médio	[-]
ϵ	Rugosidade Relativa	[-]
ξ_{∞}	Fator de Modificação de Tomiyama et al.	[-]
f_B	Fator de atrito de Blasius	[-]
ΔP	Diferencial de Pressão	[Pa]
λ_L	Non-Slip Holdup	[-]
Θ	Angulação da Curvatura	[°]
δ	Espessura ou Altura Filme de Líquido	[mm]
γ	Gravidade Específica de Gás	[-]
σ	Tensão Superficial	[N/m]
τ	Torque	[Nm]
μ	Viscosidade	[cP, Pa. s]
ϕ	Corte de Água	[%]
ω	Velocidade Rotacional ESP	[rpm]

Subscrição

a	Atrito
c	Centrífuga
DL	Deslizamento do Líquido
DG	Deslizamento do Gás
H	Hidráulico
i	Valor individual
f	Fluido
L	Líquido
G	Gás
O	Óleo
W	Água
T	Total
S	Superfície
p	Pressão
P	Perímetro Molhado
m	Mistura
max	Máximo
min	Mínimo
e	Entrada
s	Saida
slip	Deslizamento ou Escorregamento

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação.....	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos.....	22
1.2	Organização da Dissertação	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DE CONCEITOS	23
2.1	Conceitos Básicos	23
2.1.1	Vazão Mássica	24
2.1.2	Vazão Volumétrica	24
2.1.3	Velocidade Superficial.....	24
2.1.4	Fração de Vazio	25
2.1.5	Fração Volumétrica de Líquido ou no-slip holdup	25
2.1.6	Diâmetro Hidráulico	25
2.1.7	Número de Froude Modificado.....	26
2.1.8	Número de Reynolds.....	27
2.1.9	Tensão Interfacial.....	27
2.1.10	Número de Weber Modificado.....	27
2.1.11	Fator de Atrito	28
2.1.12	Erro Relativo	28
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.2.1	Escoamento Multifásico.....	29
2.2.2	Padrões de Escoamento.....	32
2.2.3	Mapa de Padrões de Escoamento.....	34
2.2.4	Escoamento Bifásico em Dutos Curvos.....	36
2.2.5	Modelos Fenomenológicos para Escoamento Bifásico para Duto Curvo	46

2.2.6	Escoamento de Jatos em Superfícies Livres	49
2.2.7	Escoamento em Superfície Livre	52
2.2.8	Aeração em Canal Livre	53
2.2.9	Ressalto Hidráulico.....	56
2.2.10	Remistura e Coalescência de Bolhas.....	56
2.2.11	Espessura de Filme do Líquido	58
2.2.12	Bombas Centrífugas	66
2.2.13	Problemas Operacionais nas Bombas Centrífugas.....	67
2.2.14	Visualização de Escoamento Bifásico em BCS	68
2.3	Resumo da Revisão Bibliográfica	77
3.	APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	79
3.1	Aparato Experimental e Sistema de Aquisição de Dados	79
3.1	Sistema de Visualização.....	82
3.2	Procedimentos Experimental.....	83
3.3	Descrição de Materiais	84
3.3.1	Fluidos utilizados	84
3.4	Condições Experimentais.....	84
3.5	Calibração dos Equipamentos de Medição	85
3.6	Metodologia	85
3.6.1	Tratamento dos Dados Experimentais	85
3.7	Resumo do Aparato Experimental	86
4.	RESULTADOS.....	88
4.1	Agrupamento de Dados por Condição Operacional.....	88
4.2	Correlação Abdulkadir <i>et al.</i> (2018) para Cálculo da Espessura do Filme	95
4.3	Correlação Proposta para Cálculo da Espessura do Filme de Líquido	96
4.3.1	Resultados para o caso Óleo-Ar.....	98
4.3.2	Resultados para o caso Água-Ar.....	102

4.4	Modelagem Estevam (2002) para Cálculo da Espessura do Filme.....	106
4.4.1	Resultado para o caso Óleo-Ar	107
4.4.2	Resultado para o caso Água-Ar	112
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
	REFERENCIAS.....	126
	ANEXO I – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	130
	ANEXO II – CÓDIGO DO PROGRAMA DE MODELAGEM NO MATHEMATICA MODELO ESTEVAM (2002).....	133

1. INTRODUÇÃO

O crescente déficit mundial entre a descoberta e o consumo de petróleo torna a otimização da produção dos campos existentes cada vez mais importante. Estão sempre surgindo novos desafios na otimização e garantia de escoamento de petróleo e gás, tanto nos poços *Offshore* como *Onshore*. Na extração de petróleo, deve-se considerar a utilização de técnicas que permitam o escoamento de óleo para a superfície de forma econômica. Por outro lado, os poços, no começo da produção, têm uma energia suficiente para produzir de forma natural e econômica até um separador a jusante. Porém, quando essa energia não é suficiente, é comum implementar métodos de elevação artificial. Há diversos métodos que são amplamente empregados na indústria. O maior desafio é a tomada de decisão das empresas para garantir esses tipos de investimentos e foco em pesquisas para identificar as melhores alternativas.

Um método muito utilizado e de grande interesse é o Bombeio Centrifugo Submerso (*BCS*). O sistema *BCS* trabalha com um escoamento bifásico (gás-líquido), mas tem um limite máximo de fração de gás livre de admissão, entre 30 e 40%. Acima desse limite começam as instabilidades e comprometimento do desempenho do funcionamento da bomba, podendo determinar perdas ou paradas de produção.

O sistema de elevação artificial por *BCS* apresenta vantagens operacionais em relação aos demais métodos de elevação artificial por possibilitar a produção de óleo em altas vazões e por ter flexibilidade operacional através da utilização de um variador de frequência. O sistema pode operar em poços verticais, desviados ou horizontais (no leito marinho), em aplicações terrestres ou marítimas. O sistema *BCS* na extração de petróleo pode operar com misturas caracterizadas por escoamentos multifásicos de gás-líquido, líquido-líquido e gás-líquido-líquido. Essas misturas são observadas em muitos processos industriais e naturais, com padrões de escoamento diferentes.

Em relação a operação do sistema *BCS* na presença de elevadas razões gás-óleo (acima de $100 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ std}$), diversos estudos vêm sendo realizados para investigar o comportamento do escoamento bifásico gás-líquido sujeito a campos centrífugos. No entanto, são verificados diversos aspectos que ainda precisam ser mais explorados. Como as modelagens do escoamento bifásico em sistema *BCS*, consideram, na maioria dos casos, a abordagem por meio de correlações empíricas ou semi-empíricas, torna-se importante uma aquisição de dados experimentais confiáveis e com visualização.

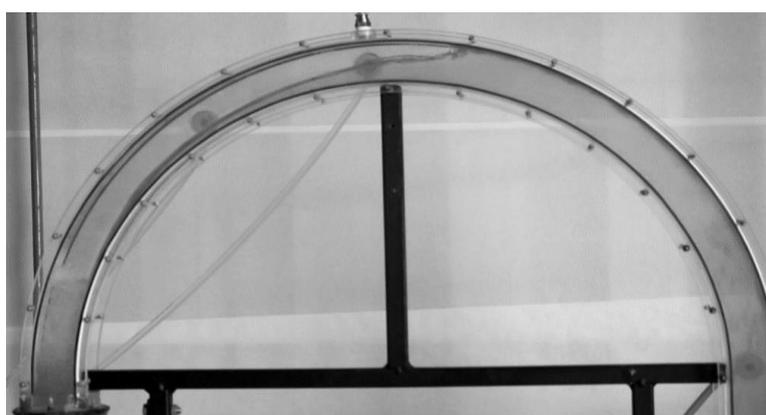
Com base em dados experimentais e visualização, há trabalhos recentes, a partir do ano 2000, que fornecem contribuições para compreender o desempenho das bombas centrífugas em

escoamento bifásico. Porém, a tentativa do detalhamento dos fenômenos físicos envolvidos através das técnicas de visualização devido à complexidade do escoamento e a própria estrutura do equipamento com canais rotativos e envolvidos por uma carcaça metálica.

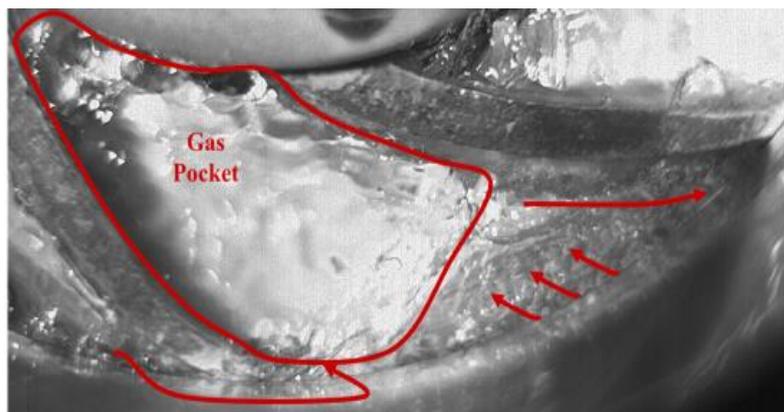
Uma boa alternativa para facilitar essa visualização é a realização de montagens experimentais com escoamento bifásico em duto curvo. As observações em experimentos mostram que há uma semelhança dos fenômenos físicos que ocorrem no canal do rotor de uma bomba centrífuga e em dutos curvos.

Como os escoamentos bifásicos são comumente encontrados em diversas atividades na indústria de óleo e gás, há o interesse em estudar o escoamento bifásico em trechos curvos das linhas de produção para obter um melhor entendimento sobre como essa geometria afeta as mudanças dos padrões de escoamento e os fenômenos físicos associados.

Um dos maiores problemas observados nas curvas é a presença de ação combinada das forças centrífuga e de empuxo. O equilíbrio de forças tende a produzir, por exemplo, a formação de bolhas alongadas estacionárias na curva, coalescência de bolhas, presença de filme de líquido e região de remistura. Esses fenômenos de bolhas alongadas são observados também no rotor de bombas centrífugas quando se trata de escoamento gás-líquido com altas frações de volume de gás livre (acima de 10%), conforme indicado nas Figuras 1.1 (a) e (b). É importante destacar que correlacionar os fenômenos físicos que ocorrem no escoamento bifásico em duto curvo com o que ocorre em um rotor de bomba centrífuga irá permitir melhorar os modelos desenvolvidos para o sistema *BCS*.



(a)



(b)

Figura 1-1: Comparação dos fenômenos dentro dos escoamentos: a) Escoamento em duto curvo e b) escoamento no interior de um impelidor de uma Bomba Centrífuga

Fonte: Marçal (2021); Barrios (2007)

Em resumo o presente trabalho se atém ao escoamento bifásico gás-líquido em dutos curvos retangulares. Os padrões de escoamento alteram a transferência de energia em uma mistura bifásica. Marçal (2021) observou experimentalmente, a depender das condições operacionais do escoamento, a formação de bolhas alongadas estacionárias no duto curvo e presença de um filme de líquido. Todo esse processo, descrito brevemente no texto, vai ser verificado e validado por modelos já existentes na literatura, considerando os dados experimentais obtidos em conjunto e já publicados por Marçal (2021).

1.1 Motivação

Uma grande motivação para o desenvolvimento desta pesquisa foi verificar, após consulta a papers e teses publicados e disponibilizados em revistas científicas e sites especializados, que ainda há poucos trabalhos de escoamento bifásico em dutos curvos de seção não circular.

Considerando a escassez de publicações referentes ao tema e pretendendo preencher as lacunas de conhecimento existentes, o presente trabalho visa fornecer dados experimentais, quantitativos e qualitativos, da influência de uma curva de 180° para um escoamento bifásico gás-líquido com dois tipos de fluidos (Água-Ar e Óleo-Ar) a diversas condições operacionais no regime de bolhas dispersas.

Para atender a uma outra das lacunas verificadas, será necessário adaptar ou apresentar correlações de cálculo de espessura de filme de líquido para esse tipo de escoamento.

1.1.1 **Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente estudo é realizar o tratamento de dados experimentais, verificar a aplicabilidade e propor melhorias aos modelos existentes para escoamento bifásico (gás-líquido) em dutos curvos, com seção transversal retangular, aplicados para determinar a formação da espessura do filme de líquido associado à presença de uma bolha alongada estacionária. Após a aquisição de dados experimentais e visualização, desenvolvidas em conjunto com Marçal (2021), será realizada uma análise do escoamento bifásico gás-líquido em diferentes condições operacionais.

1.1.2 **Objetivos Específicos**

Para conseguir atingir o Objetivo Geral proposto, identifica-se os seguintes Objetivos Específicos:

1. Visualizar e identificar padrões de escoamento em dutos curvos;
2. Detalhar a formação da bolha alongada e do filme de líquido através de medições de espessuras, comprimentos, vazões de líquido e de gás, pressões e padrões de escoamento;
3. Aplicar modelos de escoamento e correlações já existentes na literatura considerando os dados experimentais obtidos e sugerir fatores de correção para que esses modelos possam representar as características do escoamento visualizado;

1.2 **Organização da Dissertação**

A dissertação é composta por cinco capítulos, incluindo a introdução, com a justificativa e os objetivos.

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos e a revisão da bibliografia, os quais vão permitir o desenvolvimento da análise dos padrões de escoamento e modelagem de escoamento de filme de líquido em dutos curvos, apresentação das variáveis envolvidas na modelagem multifásica incluindo padrões de escoamento, filme de líquido e bolha alongada.

No Capítulo 3, é evidenciada a descrição e configuração do aparato experimental juntamente com as propriedades dos fluidos, a descrição da Matriz de Testes e dados experimentais.

No Capítulo 4, são exibidos os dados medidos e calculados, a aplicação das modelagens existentes e uma proposta de correlação empírica, juntamente com à análise de resultados comparativos entre os valores calculados e os dados experimentais obtidos.

Finalmente, o Capítulo 5, mostra as conclusões do estudo e recomendações para pesquisas futuras, seguido pelas referências bibliográficas, apêndices e anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DE CONCEITOS

Este capítulo, será exibido em duas seções. Na primeira seção serão abordados os conceitos básicos que são fundamentais no escoamento bifásico, para o cálculo e a análise dos resultados. Na segunda seção, será apresentada uma ampla revisão bibliográfica sobre escoamento bifásico gás-líquido e serão abordados os modelos existentes na literatura para o cálculo da espessura de filme de líquido formado no escoamento bifásico em dutos curvos.

2.1 Conceitos Básicos

Nesta divisão é apresentada um resumo das propriedades e das variáveis de interesse do escoamento bifásico gás-líquido estabelecidas por parâmetros dimensionais e adimensionais. Todas as variáveis são apresentadas no Sistema Internacional de unidades. A terminologia utilizada é baseada nos trabalhos dos autores Shoham (2006), Rosa (2012) e Marçal (2021).

Finalmente, o equacionamento descrito nesta seção foi utilizado para o cálculo das propriedades referentes ao escoamento bifásico segundo as condições experimentais indicadas na Figura 2-1.

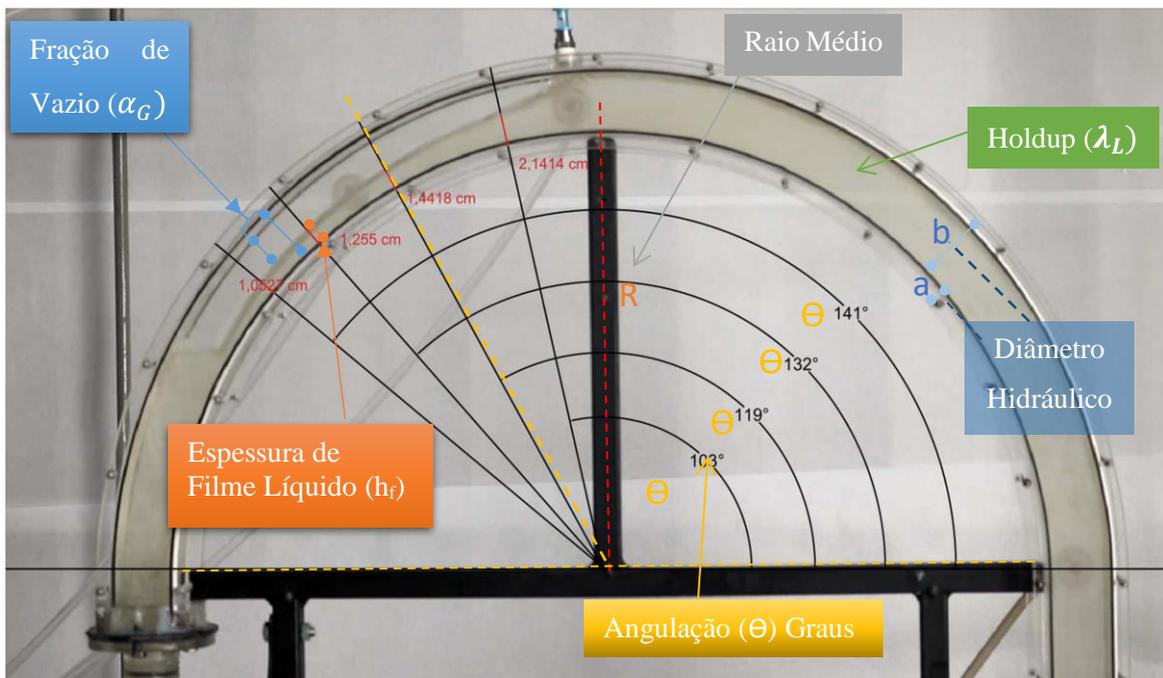


Figura 2-1: Propriedades descritas no duto de seção quadrada

Fonte: Adaptado de Marçal (2021)

2.1.1 Vazão Mássica

A vazão mássica da mistura gás-líquido \dot{m}_M é determinada como a soma da vazão mássica das fases, conforme indicado a seguir:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_L + \dot{m}_G \quad \text{Eq. (2-1)}$$

Onde \dot{m}_L e \dot{m}_G as vazões mássicas do líquido e do gás, respectivamente.

2.1.2 Vazão Volumétrica

A vazão volumétrica da mistura q_M é determinada como a soma da vazão volumétrica das fases:

$$q_M = q_L + q_G \quad \text{Eq. (2-2)}$$

sendo que:

$$q_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} ; \quad q_G = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G} \quad \text{Eq. (2-3)}$$

Onde q_L e q_G são as vazões volumétricas do líquido e do gás, respectivamente e ρ_L e ρ_G são as massas específicas do líquido e do gás.

2.1.3 Velocidade Superficial

A velocidade superficial é definida como a vazão volumétrica da fase dividida pela área da seção transversal do tubo. Assim, J_L e J_G denotam a velocidade média que cada fase teria se escoasse sozinha na tubulação.

$$J_L = \frac{q_L}{A_T} ; \quad J_G = \frac{q_G}{A_T} \quad \text{Eq. (2-4)}$$

A velocidade da mistura J_M é dada pela soma das velocidades superficiais de cada fase:

$$J_M = J_L + J_G \quad \text{Eq. (2-5)}$$

Destacando a diferença com a velocidade “*in situ*” que é a velocidade real da fase, ou seja, é a velocidade com a qual a fase está escoando naquele instante. A diferença da velocidade

superficial de cada fase obedece à velocidade que a fase teria se estivesse escoando sozinha pelo duto.

2.1.4 Fração de Vazio

A fração de vazio α_G é determinada como a razão entre a área de seção transversal tomada pelo gás e a área da seção transversal ao escoamento. Logo:

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A_T} = 1 - \frac{A_L}{A_T} \quad \text{Eq. (2-6)}$$

Onde A_G é a área ocupada pelo gás e A_L é a área remanescente ocupada pelo líquido. De forma análoga para o líquido, obtêm-se:

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A_T} \quad \text{Eq. (2-7)}$$

Sendo que a soma das frações de cada fase deve ser unitária, então:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad \text{Eq. (2-8)}$$

2.1.5 Fração Volumétrica de Líquido ou no-slip holdup

A fração volumétrica de líquido λ_L , obtida através da razão entre a taxa de fluxo volumétrico de líquido e a taxa de fluxo volumétrico total, é dada por:

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} = \frac{J_L}{J_L + J_G} \quad \text{Eq. (2-9)}$$

2.1.6 Diâmetro Hidráulico

O diâmetro hidráulico, D_H , é um termo comumente utilizados ao manipular o escoamento em tubos e canais não circulares. O diâmetro hidráulico transforma dutos não circulares em tubos de diâmetro equivalente, facilitando assim, diversos cálculos. Ele é definido por:

$$D_H = \frac{4 A_{Liq}}{P_{molhado}} [m] \quad \text{Eq. (2-10)}$$

Onde A é a área da seção transversal ($A_{Liq} = 4ab$ no caso de um duto de seção retangular de lados a e b) e P é o perímetro molhado da seção ($P_{molhado} = 2(a+b)$). Então substituindo na Eq. (2-10) obtém-se:

$$D_H = \frac{4(ab)}{2(a+b)} = \frac{2(ab)}{(a+b)} [m] \quad Eq. (2-11)$$

2.1.7 Número de Froude Modificado

Os autores Usui, Aoki e Inoue (1980) por meio do trabalho experimental de escoamento Água-Ar ascendente em uma curva no formato de C em um plano vertical, definiram o número de Froude modificado a partir da definição de William Froude e Robert Edmund Froude e do trabalho de Gardner e Neller (1969). Obtêm-se o Froude do líquido modificado ($Fr_{\theta L}$) definido por:

$$Fr_{\theta L} = \frac{J_L^2}{\left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}\right) R g \sin \Theta} \left[1 - \frac{\rho_G J_G^2}{\rho_L J_L^2} \right] \quad Eq. (2-12)$$

Onde J_L é a velocidade de superficial do líquido, R é o raio médio da curvatura do tubo, g é a gravidade, Θ é o ângulo da posição angular ao longo da curva a partir da horizontal e ρ_f é massa específica do líquido e do gás, respectivamente.

O número de Froude do Gás modificado é definido por:

$$Fr_G = \frac{J_G^2}{R g \sin \Theta} \quad Eq. (2-13)$$

Onde J_G é a velocidade de superficial de gás, R é o raio médio da curvatura do tubo, g é a gravidade, e Θ é o ângulo da posição angular ao longo da curva a partir da horizontal.

As velocidades superficiais do líquido e do gás, J_L e J_G , são determinadas de acordo com a Eq. (2-4).

2.1.8 Número de Reynolds

O número de Reynolds é utilizado para indicar o regime de escoamento em dutos (laminar, transição ou turbulento). Este número adimensional relaciona as forças inerciais e viscosas. O número de Reynolds do líquido, calculado para a classificação do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície é obtido através de:

$$Re_L = \frac{\rho_L J_L \varepsilon_L}{\mu_L} \quad Eq. (2-14)$$

Onde: $\varepsilon_L = \frac{h_L}{h_T}$; h_L é a espessura do filme do líquido e h_T é a espessura total, ρ_L é a massa específica de líquido, J_L é a velocidade de líquido e μ_L é a viscosidade de líquido.

2.1.9 Tensão Interfacial

A tensão interfacial é a propriedade que define a afinidade entre moléculas de substâncias diferentes e a capacidade de mistura entre elas. Quanto maior a tensão interfacial, menor a afinidade, mais definida é a divisão entre as camadas, e menor é a capacidade de mistura. Portanto, defina-se como a propriedade que existe na fronteira entre duas substâncias que interagem em estado líquido e líquido ou em estado líquido e sólido.

2.1.10 Número de Weber Modificado

O número de Weber é a força de inércia sobre a força de tensão interfacial. O número Weber do líquido modificado (We_L) adotado por Zahedi *et al.* (2016) para quantificar a espessura do filme líquido é definido por:

$$We_L = \frac{\rho_L J_L^2 D_h}{\sigma} \quad Eq. (2-15)$$

O número Weber do gás modificado (We_G) de Sawant (2008) que contabiliza o efeito de pressão é dado por:

$$We_G = \frac{\rho_G J_G^2 D_h}{\sigma} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_G} \right)^{1/4} \quad Eq. (2-16)$$

Onde σ é a tensão superficial, V_{L-G} velocidade “in situ” do fluido, D_h diâmetro hidráulico, ρ_{L-G} é a massa específica do fluido e $\Delta\rho$ a diferença da massa específica do fluido.

2.1.11 Fator de Atrito

Sabe-se que o fator de atrito, algumas vezes mencionado como fator de fricção ou coeficiente de resistência, é um parâmetro adimensional que é empregado para calcular a perda de carga em uma tubulação devida ao atrito. O fator de atrito pode ser estimado pela equação proposta por *Blasius* com a correção de Ito (apud Estevam, 2002):

$$f_B = 0.076 \left(\frac{\rho V_S D_H}{\mu_L} \right)^{-0.25} \quad \text{Eq. (2-17)}$$

Sendo μ_L a viscosidade do líquido e D_H é o diâmetro hidráulico.

2.1.12 Erro Relativo

O erro relativo percentual é a diferença entre os valores medidos e calculados (erro absoluto) dividida entre os valores medidos vezes 100. Trata-se de uma medida da imprecisão de uma medida, padronizada para o tamanho da medida. Fica definido por:

$$\bar{e} = \left(\frac{|V_{Medido} - V_{Calculado}|}{V_{Medido}} \right) 100 \quad \text{Eq. (2-18)}$$

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta divisão será apresentada uma extensa revisão bibliográfica considerando teses de mestrado e doutorado sobre escoamento multifásico e escoamento bifásico gás-líquido nas bibliotecas digitais de diversas Universidades e sites acadêmicos, tais como: Universidade Federal de Rio de Janeiro (*UFRJ*), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (*PUC-RIO*), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (*UTFPR*), Universidade Estadual de Campinas (*UNICAMP*), Universidade de São Paulo (*USP*, Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (*UFRGS*), Universidade Federal Fluminense (*UFF*), Universidade Federal da Paraíba (*UFPB*), Instituto Politécnico de Toulouse, Universidade de Queensland, Universidade de Tulsa, Imperial College London South, papers publicados em revistas e sites científicos destacando *OnePetro*, *SPE*, *ATCE*, *ABCM*, *Scielo*, *Elsevier*, *ScienceDirect* entre outros.

A visualização do escoamento bifásico *gás-líquido* em duto curvo, permite identificar fenômenos como a aeração em canal livre, ressalto hidráulico, coalescência de bolhas e a descrição da formação de região de remistura com entranhamento de gás.

Determinados trabalhos, tais como Estevam (2002), Gamboa (2009) e Biazussi (2014) adotam modelos mais consistentes com base fenomenológica. O trabalho de Biazussi (2014), baseado no modelo de deslizamento, revelou bons resultados para fluidos de baixas viscosidades. Uma extensão do modelo levando em consideração os efeitos viscosos seria um considerável avanço no esforço de obter um modelo que represente a operação da bomba em condições mais realísticas. O trabalho do Monte Verde (2016) fez o estudo de bomba centrífuga submersa operando com escoamento bifásico gás-líquido, ou seja, uma extensão do trabalho de Biazussi (2014) com a diferença que Monte Verde (2016) trabalhou com viscosidades maiores de fluido, aproximando-se ainda mais do problema real da viscosidade nos escoamentos com petróleo.

O projeto de sistemas de produção envolvendo diferentes fluidos requer uma previsão precisa da perda de pressão. Os métodos existentes dependem da previsão de padrões de escoamento e mapa de padrões de escoamento em tubo vertical com base em dados experimentais reais e obtidos em laboratório.

Foram pesquisados também publicações referentes a modelagem teórica e correlações experimentais para o cálculo da espessura do filme do líquido em escoamentos bifásicos em dutos curvos.

Finalmente, apresenta-se o conceito, a função básica das bombas centrífugas e os problemas mais comuns envolvendo a operação de bombas centrífugas na presença de frações de gás livre elevadas (acima de 10%). Dessa forma, poderemos correlacionar e entender com maior facilidade o comportamento de um fluido bifásico sob a atuação de um campo gravitacional e centrífugo quando escoando em um duto curvo retangular.

2.2.1 Escoamento Multifásico

O escoamento multifásico é muito mais complexo de analisar, mas o fenômeno pode-se aplicar ao escoamento monofásico, quando processos correlativos são analisados. Os motivos são variados, como apresentados por França (2008):

- ✓ Inicialmente, os modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico consideram há a presença de mais de uma fase no escoamento, exigindo um número adicional de equações para o fechamento ("*closure*").
- ✓ Geralmente no escoamento multifásico existe uma distribuição espacial das fases, a qual não é conhecida "*a-priori*". Além disso, a distribuição espacial das fases continua sendo

um fenômeno de complexa quantificação. Sendo que a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada em muitos casos, além de apresentar movimento aleatório.

- ✓ As características físicas e operacionais do sistema dependem das mudanças de padrões de escoamento (a distribuição espacial das fases determina padrões de escoamento). Estes padrões (algumas vezes também denominados de "regimes do escoamento bifásico") originam os fenômenos de transferência interfacial, devido há, os processos de transferência de massa, de quantidade de movimento e energia entre as fases.
- ✓ A realidade mostra que as variáveis locais (referentes a uma posição espacial) de cada fase, como a velocidade, a pressão etc., podem flutuar no tempo com amplitude considerável na medida em que há grande influência do escoamento de cada uma das fases no escoamento da outra. Portanto, definir, ou medir ou mesmo calcular o valor médio de uma variável em escoamento bifásico, exige procedimentos mais complicados.
- ✓ Para o escoamento ascendente, a fase gasosa menos densa, mais compressível e menos viscosa tende a fluir a uma velocidade mais alta que a fase líquida, causando um fenômeno conhecido como derrapagem ou deslizamento (*Slippage*). No entanto, para escoamento descendente, o líquido geralmente flui mais rápido que o gás.

A natureza complexa dos problemas de escoamento multifásico resultou no desenvolvimento de métodos empíricos baseados em observações experimentais como os modelos apresentados de forma mais visual e resumida na Figura 2-2, indicando a tendência geral de como os modelos adotaram uma física mais fundamental e influenciaram os trabalhos futuros. O desejo de modelos generalizados em condições mais amplas se reflete no número de fases consideradas e na faixa de ângulos de inclinação que são válidos. Outros aspectos de generalização não capturados nesta figura incluem a evolução de modelos para aumentar a escala para diâmetros de tubo maiores e lidar com faixas mais amplas de propriedades de fluido, como viscosidade. Geralmente, esses efeitos são incorporados a várias condições de fechamento que compõem o modelo geral.

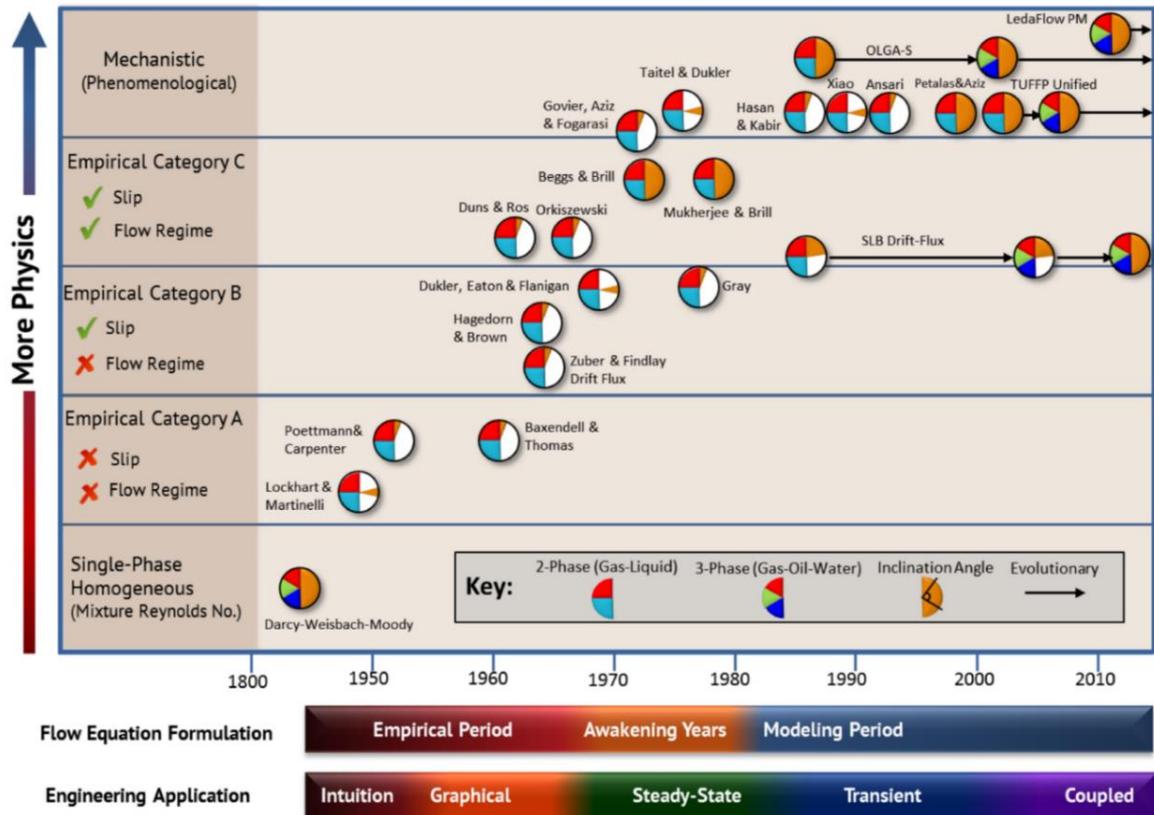


Figura 2-2: Desenvolvimento histórico de modelos de escoamento

Fonte: Shippen e Bailey (2012)

Na Figura 2-2 identificam-se três estágios gerais na evolução da pesquisa de escoamento multifásico, que são mostrados na escala de tempo horizontal, denominada “Formulação da Equação de Escoamento (*Flow Equation Formulation*)”, a saber: “O Período Empírico (*Empirical Period*)” (1950-1975); “Os anos do despertar (*The Awakening Years*)” (1975–1985) e “Os anos da modelagem (*The Modeling Years*)” (1980 – presente).

Neste último estágio descreve-se o surgimento de modelos multifluido mais generalizados com base em equações de momentum combinadas e transições de regime de escoamento incorporando física fundamental, como equilíbrio de forças e análise de estabilidade. Embora de modo geral mais precisos, muitas relações de fechamento ainda permanecem de natureza empírica.

Uma segunda escala baseada no tempo foi adicionada à Figura 2-2, denominada “Aplicação de Engenharia (*Engineering Application*)”, que narra os avanços nos métodos aplicados às soluções de engenharia de escoamento multifásico, a saber: Intuição; Gráfico, estado estacionário, transiente e par.

Alguns modelos de escoamento multifásico consideram que a mistura é homogênea, e desprezam o escorregamento entre o gás e o líquido. Porém, esse é um critério que na maioria

das vezes não é realista e pode conduzir a perdas de cargas subestimadas. Modelos com grau de complexidade maior consideram o escorregamento entre as fases procurando uma abordagem mais realista do escoamento multifásico. Aumentando o grau de complexidade, alguns modelos consideram os padrões de escoamento para o equacionamento do escoamento multifásico. Por fim, existem os modelos com forte base física designados por modelos mecanicistas. Esses modelos procuram reduzir o uso de correlações empíricas buscando equacionar o escoamento através de equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia de cada fase resultando para o caso bifásico *6 equações* diferenciais de momento e massa além de outras *3 equações* de interface de transferência de massa. Esses modelos são designados na literatura como Modelos de Dois Fluidos. Entre os modelos mecanicistas inserido em um dos simuladores transientes multifásicos mais utilizados no mundo, o *Olga*, está o modelo de Bendiksen (1984).

2.2.2 Padrões de Escoamento

Os escoamentos, denominados bifásicos, podem ser: gás-sólido, gás-líquido, líquido-sólido e líquido-líquido. Tratando-se exclusivamente do escoamento gás-líquido, o qual é o foco da pesquisa, há arranjos geométricos distintos das fases dependendo das vazões e propriedades dos fluidos, da inclinação e do diâmetro da tubulação. Cada arranjo de fases é denominado padrão de fases e apresenta um comportamento distinto.

No intuito de se ter o funcionamento correto dos dutos de transporte, é importante o estudo dos padrões de escoamento que se pode ter em um escoamento multifásico. Quando o líquido e o gás escoam ao mesmo tempo em uma tubulação, várias configurações de escoamento podem surgir. Estes padrões dependem de variáveis operacionais como as velocidades de cada fluido em questão, das propriedades dos mesmos e dos diferentes aspectos geométricos que envolvem a tubulação, como comprimento, diâmetro e ângulo de inclinação.

Um dos aspectos mais desafiadores de lidar com o escoamento multifásico é o fato de que ele pode assumir muitas formas diferentes. Por exemplo: no caso do escoamento gás-líquido, o gás pode aparecer como pequenas bolhas no líquido. Esse tipo de escoamento ocorre quando a vazão de gás é relativamente menor em comparação com a vazão de líquido. Nessa condição o líquido flui rápido o suficiente para criar turbulência e misturar o gás no líquido antes que o gás possa elevar-se até o topo do tubo.

Outro extremo ocorre se pequenas quantidades de gotículas de líquido são transportadas pelo gás. Como as pressões podem ser elevadas em dutos, a densidade do gás é mais alta do que o que estamos acostumados a obter para o ar, e mesmo com velocidades moderadas de gás,

poderemos ter impactos sobre o escoamento. O escoamento anular com gotículas pode ser relativamente complicado de modelar com precisão, pois o modelo precisa incorporar efeitos como a velocidade com que as gotículas são arrancadas do filme líquido, a velocidade com que as gotículas se assentam no filme líquido e como o filme líquido afeta a rugosidade da superfície entre o gás e líquido (Bratland, 2010).

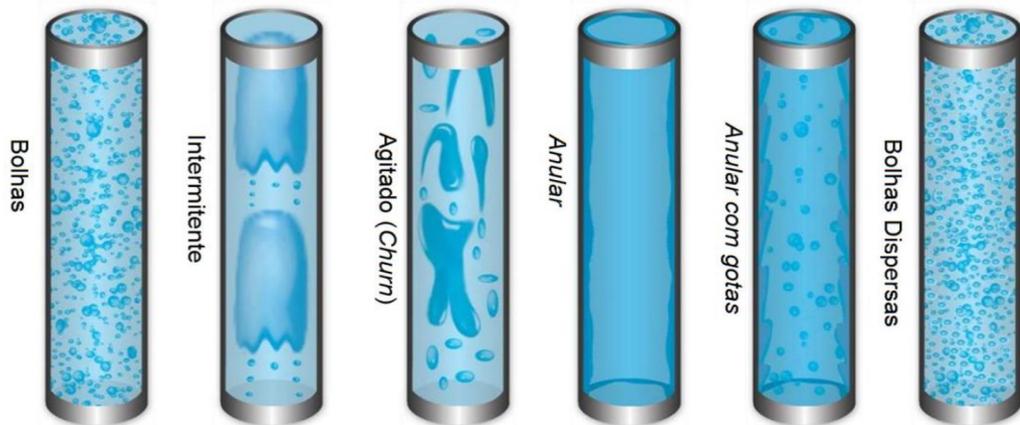


Figura 2-3: Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em tubulação vertical

Fonte: Adaptado de Bratland (2010).

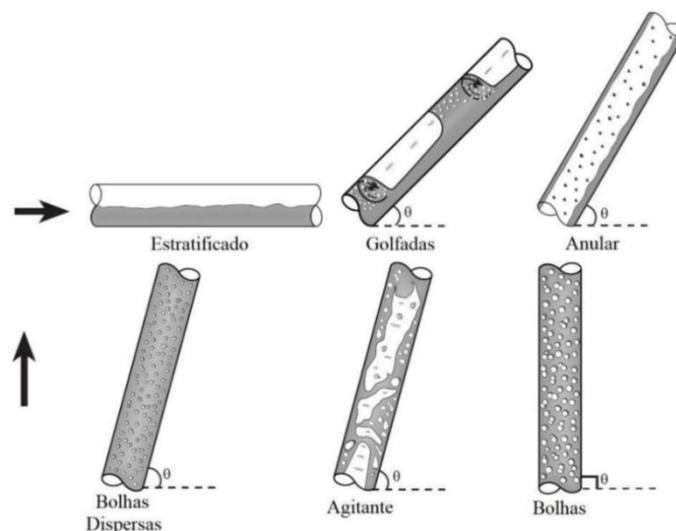


Figura 2-4: Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em Escoamento Inclinado Ascendente

Fonte: Shoham (2006).

A maioria das medições publicadas foram realizadas em tubos horizontais e verticais. Os dutos geralmente seguem o terreno e, na maioria das vezes, têm outras inclinações, portanto, a complexidade costuma ser maior do que a ilustrada na Figura 2-3 apresentada. Os mesmos padrões destacados podem ser encontrados em escoamentos bifásicos inclinados na Figura 2-4.

Os diferentes padrões de escoamento tomam forma dependendo de vários fatores: condições de escoamento, tais como: pressão, temperatura, fração volumétrica, velocidade superficial das fases; propriedades dos fluidos envolvidos, tais como: densidade, viscosidade e tensão superficial das interações com a parede da tubulação e entre os dois fluidos; geometria da tubulação, como seção transversal e diâmetro hidráulico e inclinação. (Azevedo, 2014)

O autor Corrêa (2009) classifica as divisões dos padrões e subpadrões como é exibido na Figura 2-5. O quadro é feito para compreender de forma mais clara e simples as transições entre os padrões e subpadrões. O quadro também foi publicado no trabalho de Marçal (2021).

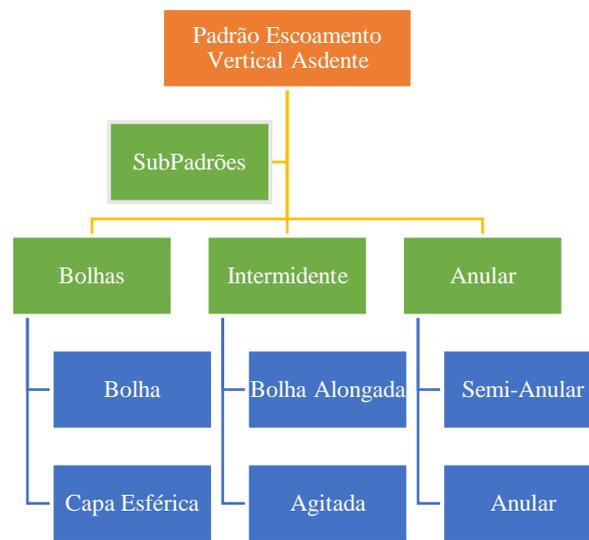


Figura 2-5: Padrões e Subpadrões para o escoamento vertical ascendente

Fonte: Adaptado de Corrêa (2009).

2.2.3 Mapa de Padrões de Escoamento

Ao se tratar de padrões de escoamento em dutos, estes podem conter duas ou mais fases. Estes tipos de escoamentos são comumente encontrados dentro da indústria de petróleo e gás durante a produção, transporte e refino de petróleo e gás.

Simular tubos de qualquer elevação envolve determinar que tipos de padrões de escoamento estamos enfrentando, bem como fazer os cálculos e a análise para esse regime específico. Os mapas de padrões de escoamento para tubo horizontal, vertical e inclinado, são úteis quando queremos obter uma visão dos mecanismos que criam os padrões de escoamento. É importante destacar que existe uma infinidade de possíveis padrões de escoamento quando duas fases escoam ao longo de uma tubulação.

A depender do valor da vazão de líquido, a turbulência poderá ser forte e a fase gás tende a se misturar ao líquido como bolhas finas. Para escoamentos onde as velocidades superficiais de

líquido são menores que as da fase gás, as bolhas flutuam em direção à parte superior do tubo e se aglomeram. A mistura apropriada de gás e líquido pode então formar bolhas de Taylor, que é o nome que utilizamos para as grandes bolhas de gás que se formam nesse escoamento. Na vertical o padrão pistonado (*slug*) de líquido é caracterizado por apresentar um pistão de líquido contendo uma grande quantidade de pequenas bolhas de gás dispersas. A grande bolha alongada se encontra na região central do duto e é circundada por um filme de líquido, resultando em uma interface anular entre a grande bolha e o filme de líquido (ver Figura 2-6).

Se a vazão de gás for mantida muito superior ao valor da vazão de líquido, as bolhas não se formarão porque o gás transporta o líquido para fora tão rapidamente que a fração de líquido permanece baixa em todo o tubo. Às vezes, é possível tirar vantagem disso e criar envelopes operacionais que definem como um gasoduto deve ser operado, controlando a vazão mínima de gás para evitar o escoamento com *slug*.



Figura 2-6: Bolhas de Taylor em uma golfada

Fonte: Barbosa Filho (2010).

O escoamento vertical bifásico é um pouco mais complexo do que o escoamento horizontal, e é mais difícil determinar, visualmente, em laboratório, qual o padrão de escoamento está ocorrendo. Não há sequer uma lista universalmente aceita de quais regimes de escoamentos realmente existem. Mas, ainda se têm maiores modelos de regime de escoamento para escoamento vertical em comparação com escoamento horizontal.

Dos diversos modelos propostos por vários autores, o de Taitel *et al.* (1980) é um dos mais utilizados. Os padrões de escoamento considerados em seu modelo são escoamento de bolhas, escoamento pistonado (*slug*), escoamento golfada ou agitante (*churn*), escoamento anular e

escoamento de bolhas dispersas. Para maiores detalhes dos padrões de escoamento pode-se consultar o livro de *Garantia de Escoamento Multifásico, Pipe Flow 1 e 2* de Bratland (2010).

Taitel, Bornea e Dukler (1980) desenvolveram um mapa de padrões de escoamento vertical com suas transições dadas por modelos mecanicistas apresentado na Figura 2-7. Os eixos representam as velocidades superficiais das fases. A Figura 2-7 mostra a relação existente entre os padrões de escoamento e as velocidades superficiais dos fluidos.

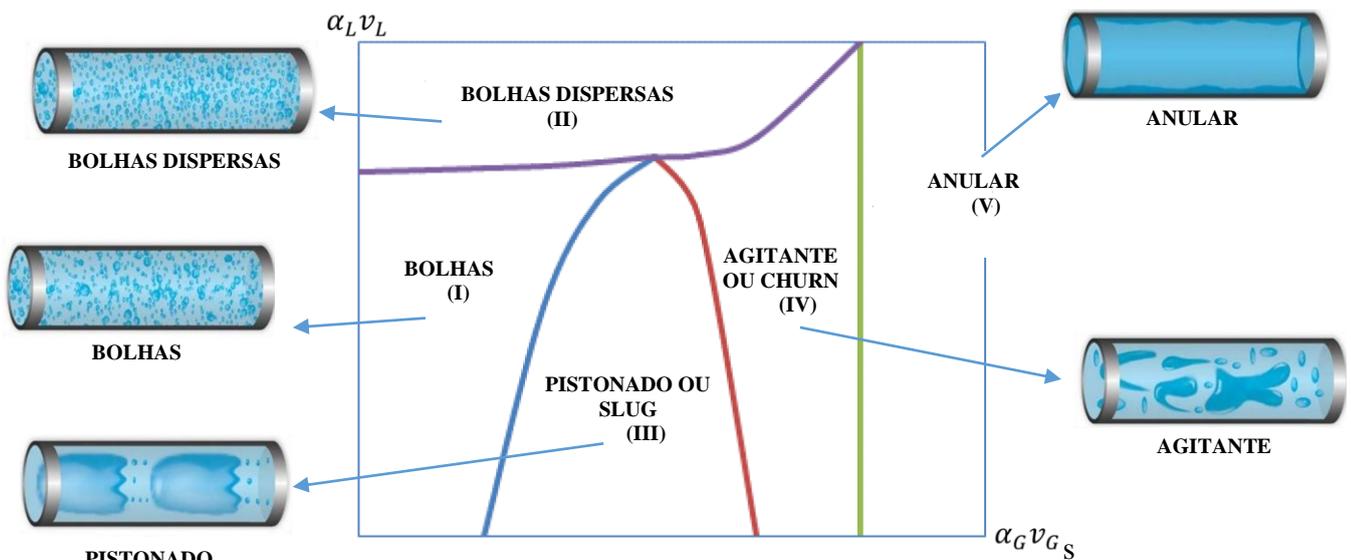


Figura 2-7: Mapa de Taitel e Dukler para o escoamento vertical.

Fonte: Adaptado de Taitel, Bornea and Dukler (1980).

2.2.4 Escoamento Bifásico em Dutos Curvos

Na indústria do petróleo, é comum encontrar uma mistura complexa de compostos ou componentes de hidrocarbonetos podendo existir como líquido monofásico, um gás monofásico ou como uma mistura de duas ou mais fases, dependendo da pressão, temperatura e composição da mistura.

O número do Reynolds pode-se definir como a agrupação das propriedades dos fluidos que influenciam em seu comportamento durante o escoamento. Desta forma, o número de Reynolds, a angulação e o raio de curvatura são os parâmetros principais que influenciam um escoamento monofásico e bifásico em dutos curvos. Em tubulações que apresentam um número de Reynolds menor que 1200, o escoamento é majoritariamente conduzido por forças viscosas, enquanto para geometrias com número de Reynolds elevado, maiores que 2000, o escoamento sofrerá mais influência das forças inerciais.

Marçal (2021), observou os padrões de escoamento em bolhas ou pistonado para ambos os escoamentos Óleo-Ar e Água-Ar em duto curvo. No entanto, destaque-se que estes padrões não estão completamente desenvolvidos devido ao pequeno comprimento do duto curvo do experimento. Porém, foram observadas diferenças entre os padrões seguindo o mesmo resultado do modelo de Taitel, Bornea e Dukler (1980).

Afirma-se que, os padrões de escoamento nos distintos parâmetros analisados foram classificados de acordo com o mapa de escoamento em bolhas ou pistonado. Sendo que, sob certas condições operacionais, foi observada a formação de uma bolha alongada estacionária no duto curvo, como pode-se notar nos pontos destacados na Figura 2-8 e Figura 2-9 que denotam os mapas de Padrão de Escoamento Vertical para ambos dos casos.

Para o caso do escoamento Óleo-Ar houve a formação da bolha alongada majoritariamente no padrão de bolhas e dois testes ocorreram no padrão pistonado (*slug*). Ao contrário, para o escoamento Água-Ar só houve a formação da bolha alongada no padrão de bolhas.

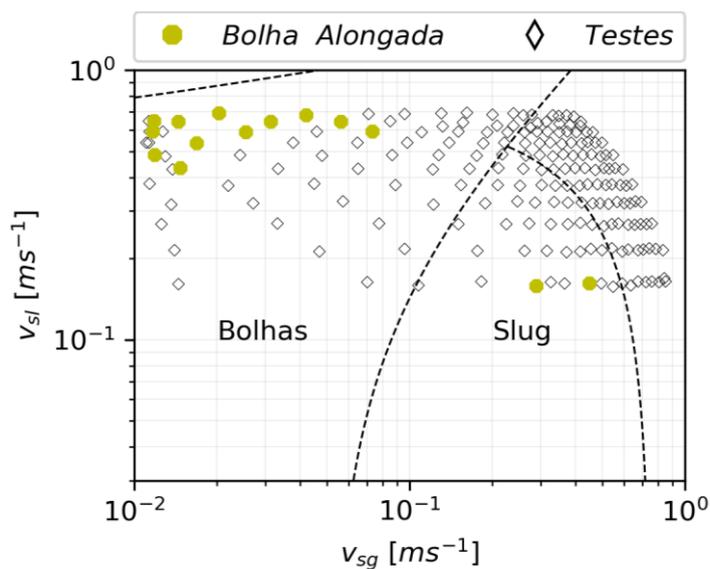


Figura 2-8: Mapa de padrão de escoamento (Óleo-Ar).

Fonte: Marçal (2021).

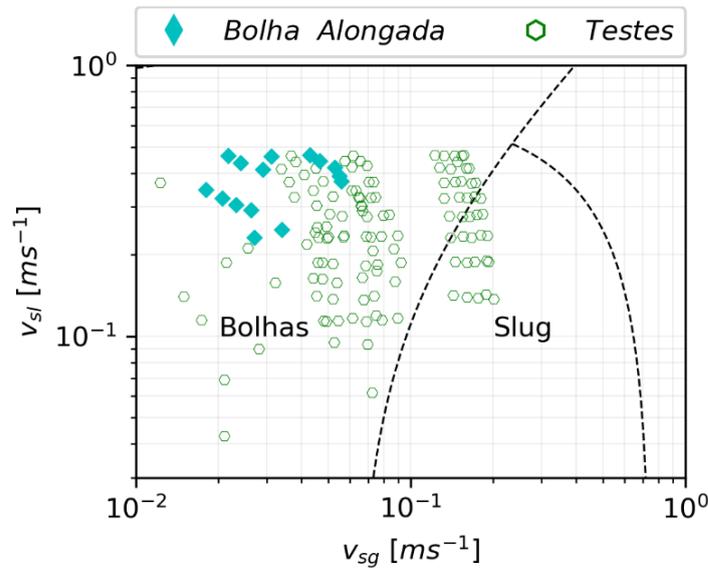


Figura 2-9: Mapa de padrão de escoamento (Água-Ar).

Fonte: Marçal (2021).

A vazão de gás tem influência, principalmente, na quantidade de bolhas no interior do duto, enquanto o tamanho e o formato da bolha são determinados pela vazão de líquido. O tamanho das bolhas de gás vai diminuindo nos diferentes testes com o aumento da vazão de líquido. Este fato, decorre do aumento da vazão do líquido, que por consequência gera um aumento da velocidade do líquido, influenciando assim, o parâmetro de angulação de formação da bolha segundo Marçal (2021).

2.2.4.1 Escoamento Secundário

O escoamento caracterizado como secundário está presente nos escoamentos em dutos curvos. Apresenta-se de forma perpendicular ao escoamento principal e é relativamente menor. Tal fenômeno, é causado pelo efeito de arrasto na camada limite. A presença de conexões, gera a mudança da direção do escoamento resultando em um escoamento secundário como denota a Figura 2-10.

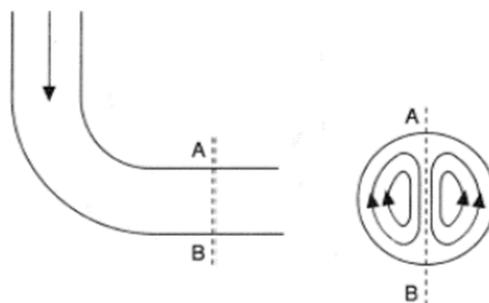


Figura 2-10 Escoamento secundário ocorrido devido a curva.

Fonte: Oliveira e Loures (2016) apud Marçal (2021).

O poder de mudança de direção gerada pela força centrípeta ao fluido é devido a um gradiente de pressão transversal que atua no fluido ao longo da curva. Entretanto, o fluido alojado próximo ao centro do tubo, em maior velocidade, requer mais força para seguir a curva, do que a quantidade próxima às paredes do tubo. De tal forma que, o fluido que se encontra no centro tem a tendência de migrar em direção da parede externa do tubo, durante o tempo em que a parte próxima à parede se move em direção ao centro. Igualmente, resultam correntes secundárias no eixo de curvatura para dentro, nas proximidades da parede, e dirigidas para fora do centro de curvatura.

O escoamento em condutos circulares de eixo longitudinal reto, abstraindo-se as pequenas flutuações do escoamento turbulento, pode ser considerado como perfeitamente simétrico. De outro ponto de vista, o escoamento em condutos retos de seção não circular, ou em condutos curvos, mesmo de seção circular, é assimétrico, sobrepondo-se ao escoamento axial principal e com correntes secundárias que podem se distribuir não uniformemente ao longo da seção. Nesses casos o movimento axial resultante é do tipo helicoidal.

Nos dutos curvos ocorre o escoamento secundário porque as partículas fluidas nas proximidades do eixo, que têm velocidades mais elevadas, estão sujeitas a pressões centrífugas mais elevadas do que as partículas mais lentas, que escoam nas proximidades da parede. Resultam correntes secundárias dirigidas para fora do centro de curvatura e no eixo de curvatura para dentro nas proximidades da parede comparecida na Figura 2-11 (a).

A distribuição seccional da velocidade do escoamento é apresentada na Figura 2-11 (b); onde as curvas de maiores velocidades se aproximam do contorno mais afastado do centro de curvatura. A Figura 2-11 (c) mostra a distribuição longitudinal das pressões com as zonas de separação da camada-limite onde o gradiente de pressão é adverso, i.e., onde a pressão aumenta na direção do escoamento.

Constata-se que a curvatura do conduto afeta o número de Reynolds crítico de transição do regime laminar para o turbulento, aumentando esse valor.

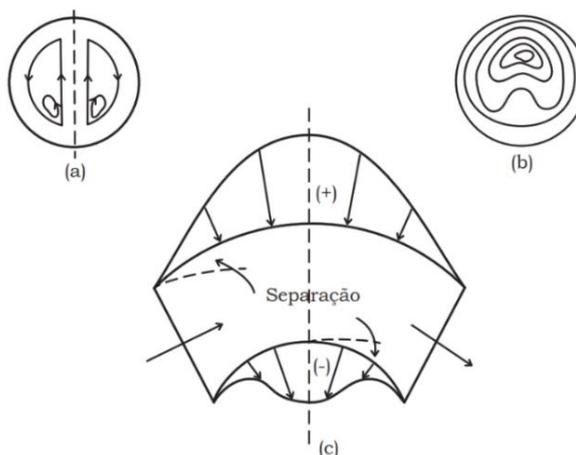


Figura 2-11: Distribuição longitudinal das pressões em um escoamento em curva.

Fonte: Lage e Coimbra (2015) apud Marçal (2021).

Existem diversos trabalhos sobre escoamentos ascendentes no padrão "em bolhas" em tubos circulares na literatura. Entretanto, especificamente sobre o tema aqui abordado, a distribuição de fases e de bolhas no início, no final e após a saída do escoamento sob ação de campo centrífugo e gravitacional, tem poucas publicações na literatura especializada.

Até o momento atual, existem poucos trabalhos dedicados aos fenômenos observados de escoamento gás-líquido em tal configuração. Citando de maneira breve alguns trabalhos, lembrando que, para maiores detalhes, pode-se consultar a tese do Marçal (2021).

Usui, Aoki e Inoue (1980) realizaram experimentos sobre o comportamento do escoamento, a fração de vazios média e a queda de pressão do escoamento bifásico Água-Ar que corre para cima através de uma curva em C no plano vertical. O número de Froude modificado representa o equilíbrio das forças radiais (combinação da ação da gravidade e da força centrífuga) entre as que atuam sobre as fases líquida e gasosa do escoamento que passa pela vertical curva U *reclinada*. Assim, usando uma série de números adimensionais foi possível determinar a fração de vazio média na seção de teste curva.

Sadatom, Sato e Saruwatari (1982) elaboraram experimentos de escoamentos bifásicos Água-Ar verticais com dutos de várias geometrias não-circulares. Os autores discutiram a queda de pressão por atrito em termos de regime turbulento para o escoamento monofásico desenvolvido. Os resultados para o aumento da velocidade de grandes bolhas de gás e fração de vazio médio também são discutidos, já que é de esperar que a velocidade da bolha de gás em um escoamento bifásico seja influenciada pelo comportamento do escoamento da fase líquida. Investigaram também a queda de pressão, fração de vazio, aumento da velocidade de ascensão da bolha de gás em meio estagnado e as fronteiras de transição gás-líquido. Foram utilizados quatro tipos de dutos: retangulares, um triangular isósceles, um circular e por fim, um anular

concêntrico. Os canais foram feitos em acrílicos de rugosidade desprezível. Através dos experimentos, os autores reportaram que a geometria do duto não influencia na transição de padrão de escoamento do padrão bolhas para golfada e de golfada para o padrão de escoamento anular desde que o diâmetro hidráulico equivalente seja maior que 10 mm.

Usui, Aoki e Inoue (1983) apresentam o comportamento do escoamento e distribuição de fases no escoamento bifásico Água-Ar em torno da curvatura em *U invertido*. Neste trabalho, os resultados experimentais são apresentados sobre o comportamento do escoamento, distribuição de fases, fração de vazios média e razão de escorregamento no escoamento bifásico Água-Ar. As distribuições da fração de vazio local foram medidas ao longo de um diâmetro localizado no plano central da curva e em toda a seção transversal do tubo. Tais mecanismos de distribuição foram denotados por causa das forças centrífugas e gravitacionais. A fração de vazio média ao redor da curva foi obtida por integração numérica para calcular a razão de escorregamento. Um fenômeno importante observado neste estudo foi a separação de fases, sempre começou a cerca de 90-100° da entrada de curva. Se o escoamento se separou, então não foi misturado novamente e desceu no tubo na forma de escoamento anular.

Hoang e Davis (1984) desempenharam um trabalho experimental da estrutura do escoamento bifásico Água-Ar e a análise da perda de pressão em curvas de tubo circular de 180 graus. Dentro da curva, as distribuições de pressão denotam o início dos efeitos de rotação e separação de fase, enquanto os efeitos do escoamento secundário foram aparentes nas distribuições de fração de vazio na saída. Conferindo-se o aumento dos coeficientes de perda perto de 10%.

Moujaes e Dougall (1985) fizeram uma comparação entre dados experimentais e numéricos de um escoamento co-corrente em bolhas em um canal vertical e retangular. Demonstraram a importância de considerar o termo de sustentação lateral na distribuição das fases na seção transversal. Moujaes e Dougall (1987) determinaram a fração de vazio e a velocidade do gás para escoamentos tipo "em bolhas" e "*slug flow*" em canal vertical retangular, utilizando para isto uma sonda de fibra ótica e anemômetros de fio quente. Hibiki *et al.* (1994) fizeram um trabalho de visualização do escoamento em uma seção retangular utilizando raios de nêutrons, enfatizando a identificação dos padrões de escoamento. No trabalho acima citado, os autores mencionaram que os padrões de escoamento foram facilmente observados.

Takemura *et al.* (1986) fizeram um estudo experimental de escoamento bifásico água-gás onde os objetivos foram o estudo a queda de pressão entre a entrada e a saída do tubo de ensaio para o escoamento bifásico água-gás avaliada em comparação com a do escoamento monofásico por meio da análise do comportamento do escoamento, das características da queda de pressão e das características de secagem por aquecimento joule através de tubos em forma

de U e U invertido no plano vertical. Os resultados foram obtidos em condição de pressão atmosférica devido à abertura da válvula na parte superior. No entanto, durante os experimentos com hélio em escoamento bifásico, a pressão no separador foi mantida em 16 bar através de uma válvula reguladora de pressão.

Keska e Fernando (1994) obtiveram um levantamento dos padrões de escoamento em um canal horizontal de seção quadrada. Xu, Cheng e Zhao (1999) estudaram o escoamento vertical Água-Ar em canais de seção retangular de 12 mm por 0.3 mm, 0,6 mm e 1.0 mm. Os autores fizeram um mapeamento dos padrões de escoamento analisando as imagens obtidas com uma câmera digital. Para as duas seções maiores, os padrões de escoamento observados foram similares aos que ocorrem em canais com profundidades maiores. No menor, entretanto, as bolhas eram achatadas e de forma bidimensional.

Tomiyama, A., *et al.* (1995) adotaram um sistema de coordenadas curvilíneas para calcular um escoamento gás-líquido em geometrias complexas. O escoamento em bolhas em um tubo U vertical foi analisado para demonstrar que os efeitos das forças centrífugas e gravitacionais na distribuição das fases são previstos razoavelmente.

Matos *et al.* (1999) realizaram uma análise experimental e numérica de um escoamento vertical ascendente em bolhas em um canal de seção quadrada. Foram medidas experimentalmente os valores de fração de vazio através de uma sonda elétrica condutiva. Além disso, foram calculadas as distribuições de fração de vazio experimentais e comparadas com os resultados numéricos obtidos por meio da simulação do Modelo de Dois Fluidos. Também, foi utilizado o modelo de turbulência k - ϵ com correções para a turbulência induzida por bolhas. O Modelo de Dois Fluidos ajuda a compreender a distribuição da fração de vazio na seção do tubo quadrado e a discussão sobre a formulação das equações constitutivas do modelo, as quais expressam a ação das forças interfaciais. Enquanto o resultado central, próximo as paredes, tem um valor calculado inferior, os o resultado para a região do duto foi ainda ligeiramente superior aos valores medidos.

Matos, A., Rosa, E. S. e Franca (2000) estudaram experimentalmente a distribuição da fração de vazio em uma curva plana de 180 graus. Através de uma sonda elétrica condutiva fizeram a mensuração da distribuição da fração de vazio “*in situ*” nas quatro seções transversais do duto curvo onde ocorreu a segregação das fases. A estrutura de migração das bolhas dá-se predominante próximo as paredes. Na análise da distribuição de fração de vazio para regimes com número de Froude menor do que 1 (um), acontece, de forma assimétrica, a segregação da maior parte do gás na parte interna da curva. Destaca-se aqui uma condição operacional favorável para a curva de 180 graus, atuando, nesse caso, como um separador.

Matos, Rosa e Franca (2004) , estudaram o escoamento de Água-Ar no padrão de bolhas dispersas em uma curva em U de seção quadrada. Foram realizadas análises numérica e experimental comparando os resultados calculados e medidos da fração de vazio local em um escoamento bifásico (Ar-Água). As simulações, utilizando o Modelo de Dois Fluidos para uma geometria complexa foram realizadas com sucesso. Os autores concluíram que, um modelo de turbulência algébrico e relativamente simples, onde a viscosidade turbulenta é calculada em função da distância da parede e da velocidade, é suficiente para simular, com uma precisão razoável, a distribuição da fração de vazio.

Matos (2004) trabalhou com abordagens experimental e numérica, na distribuição de fases de escoamento bifásico Água-Ar no padrão em bolhas em duto de seção quadrada através de curva de 180° no plano vertical. O autor fez a mensuração sobre cada um dos quatro planos transversais da fração de vazio local por meio de sondas elétricas condutivas de fio único ao longo da curva do escoamento. Os cálculos numéricos realizados pelo CFD Phoenics foram comparados com os resultados experimentais de distribuição de fração de vazio. Foi representado, matematicamente, o escoamento por meio de uma implementação Euleriana-Euleriana do Modelo de Dois Fluidos. Foram comparados graficamente os resultados experimentais e numéricos da distribuição de fração de vazio nos quatro diferentes planos ao longo da curva, da seção de entrada até sua seção de saída, para as várias condições operacionais, destacando-se detalhes do processo de migração das fases.

Sakamoto, G., Doi, T., Murakami, Y., e Usui (2004) realizaram um trabalho experimental em uma curva horizontal de 180° usando ar-água como fluido de trabalho. O diâmetro e o raio de curvatura da dobra foram 24 e 135 mm, respectivamente. Eles empregaram medição da fração de vazio da sonda de condutância para analisar a espessura do filme líquido e um tubo de amostragem de aço inoxidável em forma de L para medir a vazão de escoamento de gotículas local. Os autores relataram as distribuições da espessura do filme líquido anular e a taxa de queda local no núcleo de gás em um tubo reto e no final de três curvas em U da horizontal para a horizontal (para cima), vertical para cima e 45° para cima nas posições horizontais. Eles concluíram que a vazão de escoamento local de gotículas no núcleo do gás no escoamento do tubo horizontal atinge um mínimo próximo à parede inferior do tubo e um máximo próximo à parede superior. Os autores observaram, com respeito a espessura do filme líquido em curvas, que o estado de compreensão da distribuição da espessura do filme líquido, em curvas de retorno, é limitado ao escoamento de gás-líquido de duas fases em tubos de pequeno diâmetro com Água-Ar.

No caso de tubos de grande diâmetro, o único dado foi relatado no trabalho de Abdulkadir *et al.* (2012). Neste estudo, foi efetivada uma investigação experimental sobre o comportamento da fração do filme em uma curva de retorno vertical de 180° usando ar-água como fluidos de trabalho. O diâmetro e o raio de curvatura da dobra são 127 e 381 mm, respectivamente. Eles realizaram medições da fração do filme em seção transversal usando sondas de anel de condutância colocadas em 17 diâmetros de tubo a montante da curva, 45°, 90° e 135° nas curvas e 21 diâmetros de tubo a jusante da curva. No entanto, concluíram que obter uma estimativa da espessura do filme líquido, a partir dos dados da fração do filme obtidos da sonda do anel de condutância, levava a uma simplificação excessiva dos resultados. Os autores concluíram que a fração média do filme é maior em tubos retos do que em curvas. E que a condição pela qual o líquido vai para fora ou para dentro da curva pode ser identificada com base do número de Froude modificado (Eq. (2-12)).

Abdulkadir *et al.* (2014) propuseram um estudo experimental do comportamento do escoamento anular bifásico Água-Ar através de uma curva de retorno vertical de 180° utilizando uma técnica de condutância elétrica para medir a espessura do filme. As medições foram feitas com sondas posicionadas antes, dentro da curva (45°, 90°, 135°) e após a curva. A velocidade superficial do ar e do líquido variou de 3.5 a 16.1 m/s e 0.02 a 0.2 m/s, respectivamente. Os padrões de escoamento foram identificados usando as assinaturas características dos gráficos da função de densidade de probabilidade (*PDF*) da série temporal da fração média do filme. O estudo também descobriu que, em velocidades de ar superficiais baixas, a fração de filme para o riser era geralmente maior do que para o escoamento descendente. Para baixas taxas de escoamento de líquido e gás, o filme quebra na curva de 45° devido à drenagem por gravidade.

Bressani (2016) executou um estudo experimental, onde foram estudados os diversos parâmetros do escoamento intermitente como o comprimento da bolha alongada e a velocidade, comprimento do pistão de líquido, frequência e queda de pressão para o efeito da transição de um escoamento bifásico (Água-Ar) através de uma linha vertical conectada a uma linha horizontal por meio de uma curva ascendente vertical de 90° de raio longo ($R/D \approx 5.5$). Além de que, foi construída uma estação de medição, instalada na linha vertical, e outra na linha horizontal, ambas instrumentadas com sensores de condutância. Constituíram oito diferentes combinações de vazões com velocidade superficial do gás e do líquido variando de 0.3 a 1.2 m/s e diferentes valores de número de Froude (valores acima e abaixo do valor crítico de 3.5). Com uma câmera de alta velocidade foi investigado qualitativamente o comportamento do escoamento por meio de ensaios fotográficos e filmagens. As imagens obtidas do escoamento foram na linha vertical, horizontal e ao longo da curva em três posições diferentes da curva:

trecho inicial, trecho central e trecho final. Os valores teóricos e experimentais foram comparados com os resultados analisados por meio dos sensores de condutância obtidos em linhas retilíneas inclinadas em diferentes ângulos. O autor observou que, na região da curva, há uma concorrência entre as forças gravitacional e centrífuga. A gravidade atua no sentido de fazer o líquido escoar pela parte interna da curva enquanto que a força centrífuga age em sentido contrário, movendo o líquido para região externa.

Abdulkadir *et al.* (2018) observaram o entranhamento de gotículas de líquido no escoamento anular em curvas, com a qual conseguiram desenvolver uma nova correlação para estimar a espessura do filme do líquido em uma curva de 180° em escoamento bifásico gás-líquido usando o mesmo aparato experimental de (Abdulkadir, Zhao, Azzi, I.S. Lowndes, *et al.* 2012). A correlação foi baseada nos números adimensionais de Weber e Froude modificados. O número de Weber expressa a relação entre as forças inerciais e de tensão superficial que conduzem a formação da espessura do filme líquido no sistema, enquanto o número de Froude modificado quantifica a ação das forças centrífugas e gravitacionais que determinam a distribuição das fases na curva.

Recentemente, Marçal (2021) desenvolveu um estudo experimental de escoamento bifásico gás-líquido em duto curvo de 180° de seção retangular em um circuito fechado. O autor fez a classificação dos padrões de escoamento a partir da formação e as características da bolha alongada estacionária formada. Além disso, o autor realizou a medição da espessura do filme de líquido e calculou os diferentes parâmetros para o entendimento do comportamento da bolha alongada estacionária em diferentes circunstâncias. Na matriz de teste, o autor utilizou dois diferentes fluidos: Água-Ar e Óleo-Ar para várias pressões e vazões de líquido e de gás na entrada. Os resultados obtidos mostraram grandes diferenças na formação da bolha alongada estacionária em ambos fluidos. Esses resultados e dados mensurados serviram como base fundamental para desenvolver o presente trabalho proposto. Portanto, é importante ressaltar que este trabalho foi desenvolvido em conjunto ao trabalho do Marçal (2021) e o complementa. Na Figura 2-12 visualize-se a imagem de um teste experimental, onde é indicado a região de remistura e coalescência de bolhas, o filme de líquido, a bolha alongada estacionária.

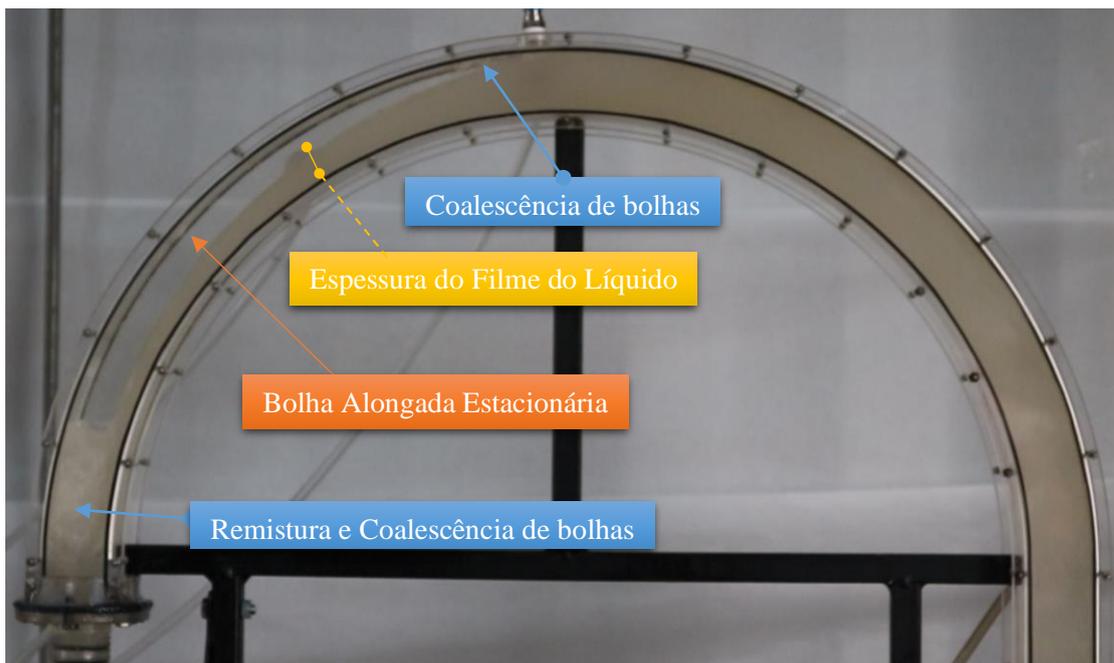


Figura 2-12: Estudo de escoamento bifásico de bolha alongada e região de remistura.

Fonte: Adaptado de Marçal (2021).

2.2.5 Modelos Fenomenológicos para Escoamento Bifásico para Duto Curvo

Os modelos fenomenológicos existentes na literatura permitem reproduzir e entender alguns comportamentos e efeitos que acontecem em um escoamento bifásico.

Apesar do aumento das publicações na última década de estudos relacionados ao escoamento bifásico em curvas, muitos deles se atêm à análise da queda de pressão ou caracterização do escoamento. Observa-se uma escassez de informação a respeito da influência que estas variáveis provocam nos parâmetros do escoamento, principalmente durante a transição. Estas informações são importantes para uma melhor compreensão dos fenômenos que decorrem na transição e ajudariam na elaboração de um modelo matemático capaz de prever estes efeitos.

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura realizam somente as medidas dos parâmetros do escoamento antes e após a curva. Dentre os poucos trabalhos encontrados que realizavam medidas ao longo de uma curva cabe destacar os realizados por Abdulkadir, Zhao, Azzi, I.S. Lowndes, *et al.* (2012); Abdulkadir *et al.* (2014). Neles, os autores procuram mensurar o filme de líquido em várias posições ao longo de uma curva de 180° com 127 mm de diâmetro e 381 mm de raio de curvatura.

Os mapas de padrão de escoamento podem ser fenomenológicos, adquiridos a partir de bases teóricas dos fenômenos físicos que acontecem nas transições entre os padrões de escoamento, alcançados a partir de dados experimentais em conjunto com Marçal (2021) e generalizados no

trabalho do autor. É comum observar inconformidades quando se tem publicado uma grande variedade de mapas de padrão de escoamento. Entre os motivos para tais discrepâncias estão os desacordos quanto a nomeação dos padrões e a própria classificação. Dentre os distintos trabalhos da literatura comumente pode-se encontrar diferentes termos próprios para descrever um mesmo padrão de escoamento ou ainda discrepâncias quanto às suas transições.

Ishii e Hibiki (2011) apresentaram um possível agrupamento, na qual, o escoamento bifásico e/ou dois-fluidos foi classificado em três grandes classes segundo a geometria da interface: escoamento separado, escoamento misto (transitório ou intermitente) e escoamento disperso. Em seguida, a fim de se obter uma caracterização mais detalhada, tais classes foram subdivididas uma vez mais com propriedades específicas das interfaces, como é apresentada na Figura 2-13.

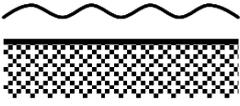
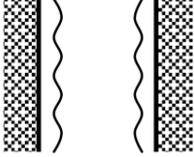
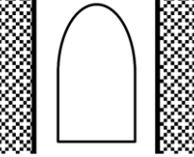
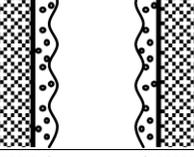
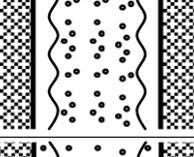
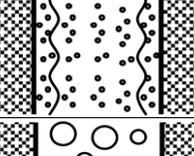
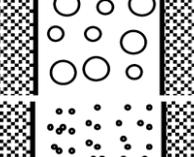
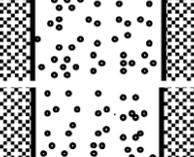
Classe ou Padrão	Regimes	Geometria	Configuração
Escoamento Separado	Escoamento em camada		Película de líquido em gás. Película de gás em líquido.
	Escoamento anular		Líquido no centro e uma película de gás. Gás no centro e uma película de líquido.
	Escoamento de jato		Jato líquido em gás ou um jato gasoso em líquido.
Escoamento Transitório ou Misto	Escoamento pistonado		Gás embolsado no líquido.
	Escoamento anular com bolhas		Bolhas de gás escoando dentro de uma camada de líquido com uma corrente de gás no centro.
	Escoamento anular com gotas		Uma corrente de gás transportando gotas, adicionalmente uma camada de líquido escoando na parede do tubo.
	Escoamento anular com gotas e bolhas		Uma corrente de gás envolvida com gotas e uma película de líquido com bolhas de gás.
Escoamento Disperso	Escoamento de bolhas		Bolhas de gás transportadas por uma corrente de líquido.
	Escoamento de gotas		Gotas de líquido em uma corrente de gás.
	Escoamento particulado		Partículas sólidas carregadas por uma corrente de líquido ou gás.

Figura 2-13: Classificação do escoamento bifásico e/ou dois-fluidos

Fonte: Adaptado de ISHII (1975 apud ISHII; HIBIKI 2011)

2.2.6 Escoamento de Jatos em Superfícies Livres

Sene (1988) realizou um estudo teórico e experimental dos mecanismos pelos quais jatos de golfada arrastam o ar, conhecido como entranhamento de ar por jatos de golfadas. A partir de outros pesquisadores, é proposto que o mecanismo de entrada de ar sofre uma mudança qualitativa na medida em que a velocidade de impacto do jato (U_i) é aumentada. O autor, descreve o fenômeno de um jato de líquido caindo em uma superfície livre que poderá arrastar o ar se sua velocidade de impacto for alta o suficiente. Em estruturas hidráulicas, jatos de golfadas são frequentemente a principal causa de entrada de ar. O autor observou que a incorporação de ar por jatos de golfadas planos e circulares ocorrem em velocidades menores do que 4 m/s e maiores que 10 m/s. Somente os jatos que impulsionam os escoamentos penetrantes são considerados. São apresentados argumentos de escalonamento que destacam os principais parâmetros que afetam a entrada de ar. O autor teve como objetivo verificar se a teoria baseada somente neste mecanismo poderia explicar os fenômenos que são observados em jatos de mergulho de velocidade maiores que 10 m/s. Os resultados teóricos foram comparados com as medições de Van de Sande e Smith (1976) das vazões de entranhamento de ar, e algumas novas medições em jatos de obstrução planar são relatadas. Além disso, várias causas possíveis de efeitos de escala (ou seja, reduções nas vazões de entranhamento de ar) em escoamentos de pequena escala foram propostas.

As observações no entranhamento de ar em velocidades de jato menores que 10 m/s, mostraram que o ar entra no escoamento receptor na forma de bolhas individuais seguindo a passagem das perturbações através da interface entre o jato e o escoamento receptor, como pode ser visto na Figura 2-14.

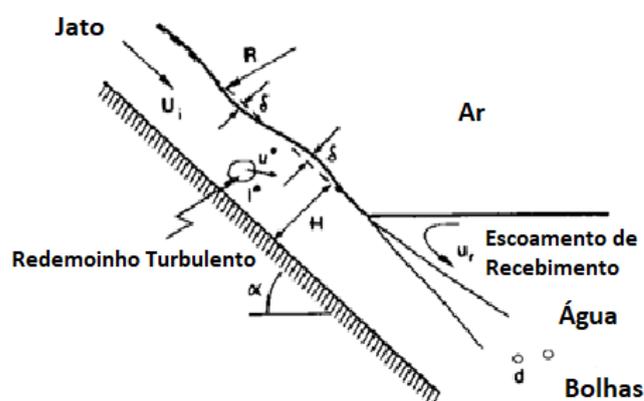


Figura 2-14: Mecanismo proposto de entranhamento de Ar em baixas velocidades de impacto de jato

Fonte: Sene (1988).

Para o caso de velocidades de jato maiores que 10 m/s o mecanismo de entrada de ar para entranhamento de bolhas de ar é ligeiramente diferente. Há uma divisão na camada devido a uma sucessão de bolhas por ondas de instabilidade em sua superfície. É provável que a camada de ar primeiro se estabeleça em regiões localizadas junto com a interface entre o jato e os escoamentos de recepção. Essas regiões se unem para formar uma camada contínua junto com a interface.

Além disso, as medições mostram que os vales das perturbações em jatos finos são achatados pela proximidade da placa de apoio, novamente causando reduções em q_a (vazões de entranhamento de ar). Em jatos circulares de velocidade menores que 10 m/s, as amplitudes das perturbações podem ser ainda mais reduzidas pelos efeitos da tensão superficial decorrentes da alta curvatura do jato, causando reduções adicionais em q_a . As forças de tensão superficial também podem limitar as vazões de entranhamento de ar em jatos circulares de velocidade maior que 10 m/s, reduzindo a espessura da camada de ar.

Várias razões têm sido propostas para as reduções nas vazões de entranhamento de ar que são observadas em jatos finos. Em jatos de velocidade menor que 10 m/s, as maiores escalas de turbulência são limitadas pela espessura do jato, reduzindo assim as amplitudes das perturbações da superfície e, portanto, a vazão de entrada de ar.

O autor conseguiu obter os modelos separados que preveem vazões de entranhamento de ar (q_a) nos regimes de baixa (menor que 10 m/s) e alta velocidade (maior que 10 m/s). As estimativas quantitativas de q_a em jatos de alta velocidade apresentaram um bom acordo com os resultados experimentais. Várias razões são propostas, com base na teoria e no experimento, para os efeitos de escala que são observados em escoamentos de ar de pequena escala.

Tanto a teoria quanto os resultados experimentais sugerem que para velocidades menores que 10 m/s, vale a relação: $q_a = U_i^3$. Para velocidades maiores que 10 m/s, o valor pode ser obtidos através da relação $q_a = U_i^{3/2}$.

O autor Gülich (2020) descreve o jato submerso em bombas centrífugas, onde, um líquido ou gás gera um “jato” quando entra com velocidade finita em um *plenum* cheio de fluido. A interação entre o jato e o meio estático é relevante em muitas aplicações. Nós distinguimos as seguintes:

- a) Jatos de fluido com um líquido/gás de limite de fase (por exemplo, uma fonte)
- b) Jatos sem limite de fase, ou seja, gás/gás ou líquido/líquido, chamados de "jatos submersos". Exemplos são a injeção de ar em uma sala ou o influxo de água através de

um bico ou tubo em um tanque, desde que o jato esteja suficientemente submerso abaixo do nível da superfície do líquido.

A mistura de jatos submersos com o fluido em um *plenum* é significativa para a avaliação de condições de entrada, poços de bancada de teste, vasos de sucção ou vazamentos de vedação anular a montante de uma entrada de impulsor.

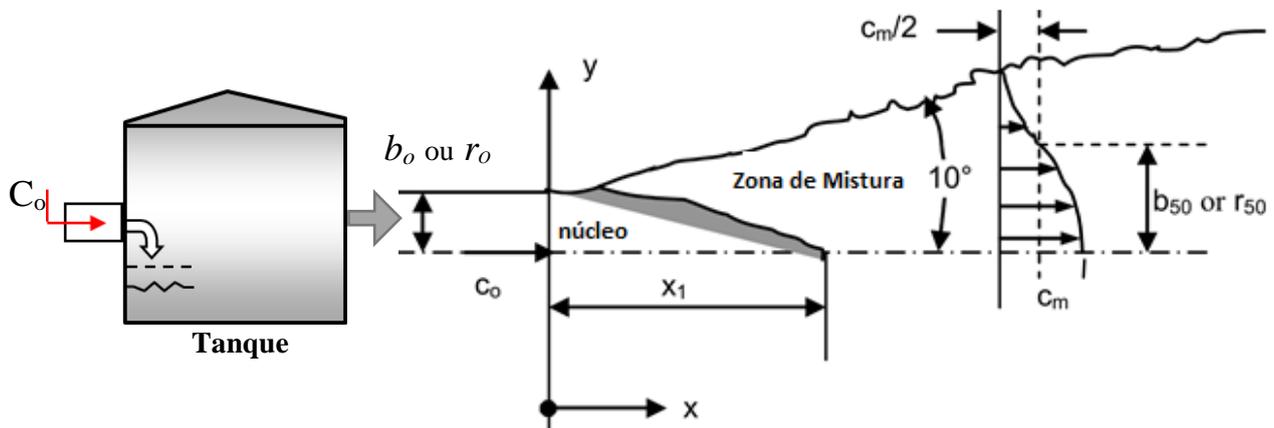


Figura 2-15: Jato Submerso Turbulento

Fonte: Güllich (2020)

Considere um fluido entrando em um tanque com a velocidade C_0 através de um tubo de tal forma que as dimensões do tanque são grandes em relação ao diâmetro do tubo d_0 . Suponha que o tubo leve fluido para o tanque abaixo do nível do líquido. Na saída do tubo, é criado um jato de fluido que se mistura com o conteúdo do tanque por meio de turbulência. Com o aumento da distância x do bico, o jato se expande com um ângulo de abertura de aproximadamente 2.0×10^0 e sua velocidade diminui, conforme indicado na Figura 2-15. No centro do jato, no seu núcleo, a velocidade do bocal C_0 é inicialmente mantida ao longo de uma certa distância x_1 . Posteriormente, a velocidade c_m no centro diminui com o aumento da distância x para as distâncias $x > x_1$. O jato arrasta o fluido de modo que sua vazão de escoamento aumenta com o aumento de x . As fórmulas da Tabela 2-1 podem ser utilizadas para calcular a expansão e a diminuição da velocidade dos jatos planos e redondos.

Tabela 2-1: Jato Submerso Turbulento

Valido para: $Re = \frac{d_o c_o}{\nu} > 3000$ e $10 < \frac{x}{r_o} < 200$				
		Jato Plano	Jato Redondo	Eq.
Comprimento Núcleo com: $c_m = c_o$		$x_1 = 12 b_o$	$x_1 = 10 r_o$	1.2.1
Velocidade da linha central	Apenas para $x > x_1$	$c_m = 3.4 c_o \sqrt{\frac{b_o}{x}}$	$c_m = 12 \frac{r_o}{x} c_o$	1.2.2
Distribuição da velocidade		$c = c_m e^{-57 \left(\frac{y}{x}\right)^2}$	$c = c_m e^{-94 \left(\frac{r}{x}\right)^2}$	1.2.3
Largura ou raio em que a velocidade cai para 50% do valor na linha central do jato		$b_{50} = 0.11 x$	$r_{50} = 0.086 x$	1.2.4
Vazão volumétrica arrastada no jato; vazão na origem é Q_o		$Q = 0.44 Q_o \sqrt{\frac{x}{b_o}}$	$Q = 0.16 \frac{x}{r_o} Q_o$	1.2.5

Fonte: Gülich (2020).

2.2.7 escoamento em Superfície Livre

Um escoamento induzido pela gravidade e caracterizado por uma interface entre o gás e o líquido é denominado escoamento em superfície ou canal livre. Caracteriza-se por ter uma pressão constante ao longo da superfície livre. Este tipo de escoamento apresenta, na realidade, um comportamento tridimensional e é muito comum nas aplicações de engenharia e na natureza. Na área de engenharia, comumente são consideradas simplificações unidimensionais segundo Çengel e Cimbala (2017).

A classificação do escoamento em superfície livre unidimensional segundo os principais critérios são: a profundidade do escoamento e o tempo. A classificação do escoamento em superfície livre quanto à profundidade do escoamento, implica que a velocidade média e a profundidade do escoamento são independentes da coordenada espacial na direção do escoamento. Divide-se em: escoamento uniforme e não-uniforme ou variado. Escoamentos em canal livre do tipo variado destacam-se por mudanças na inclinação ou na seção transversal, comumente por perturbações na trajetória do escoamento, com duas sub-classificações: gradualmente variado (*EGV*) e bruscamente variado (*EBV*). Quanto ao tempo, o escoamento se sub-classifica como permanente ou não-permanente, sendo permanente quando não proporciona variações com o tempo da velocidade média, nem da profundidade do escoamento.

O escoamento em superfície livre é classificado quantitativamente a partir do resultado do número adimensional de Froude (*Fr*), definindo-se três tipos de escoamento: subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr = 1$) e supercrítico ($Fr > 1$).

O escoamento supercrítico é definido como aquele escoamento onde as condições de montante não podem ser influenciadas pelas condições de jusante, quando dominado pelas forças inerciais ou gravitacionais, fisicamente, em um canal aberto. O contrário acontece com o escoamento subcrítico (Potter e Wiggert 2004; Philip J. Pritchard, Robert W. Fox, Alan T. McDonald 2016; Çengel e Cimbala 2017).

Apresenta-se, na transição rápida de um escoamento supercrítico ($Fr > 1$) para um escoamento subcrítico ($Fr < 1$), um fenômeno importante conhecido como ressalto hidráulico. Este fenômeno está relacionado a um processo de dissipação de energia causada pela turbulência e está associado a um escoamento bruscamente variado (EBV), conforme indicado na Figura 2-16 (Potter e Wiggert 2004; Philip J. Pritchard, Robert W. Fox, Alan T. McDonald 2016; Çengel e Cimbala 2017). Apud Vidal (2010).

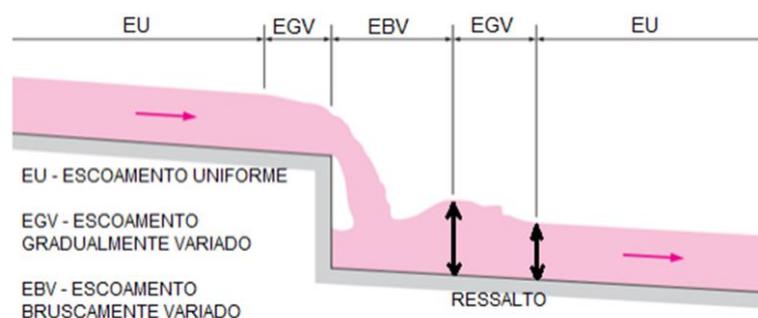


Figura 2-16. Tipos de variação espacial em escoamento de superfície livre

Fonte: Çengel e Cimbala (2017).

2.2.8 Aeração em Canal Livre

Identifica-se o fenômeno de aeração na superfície livre devido a excessiva turbulência na superfície livre, relacionada a escoamentos supercríticos (com o número de $Fr > 1$). Escoamento em canais livres estão sujeitos ao fenômeno de aeração. Vasta é a literatura e estudos a respeito de aeração em superfície livre estão usualmente relacionadas a hidráulica de canais sendo atuantes em duas subdivisões: aeração na superfície livre e aeração na presença de ressalto hidráulico.

A quebra da camada limite da superfície livre é causada eventualmente pela turbulência, resultando no desprendimento de gotículas de líquido em direção a fase gasosa. Em contrapartida, as bolhas de gás são arrastadas para o interior do escoamento devido ao efeito da gravidade. Este fenômeno se intensifica com o aumento da inclinação (Volkart 1980; Wood 1983).

O autor Volkart (1980) foi pioneiro no desenvolvimento de trabalhos experimentais sobre o fenômeno de aeração em superfície livre. Por meio de experimentos em uma bancada de teste (12° de inclinação, 50 m de comprimento e 240 mm de diâmetro) o autor conseguiu adquirir medidas de diâmetros de bolha e gota, altura da queda das gotas e a velocidade. Os diâmetros considerados no estudo foram amplos chegando a uma faixa entre 1 a 6.5 mm. Foi notado que, quando o diâmetro da bolha supera 6 mm, a bolha acaba sendo quebrada em outras menores não sendo considerada esférica. As faixas de diâmetro das gotas ficaram entre 1 e 10 mm, havendo uma incidência maior para a faixa de 2 até 7 mm.

O autor chegou à conclusão que a bolha de gás pode ser prevista mediante um balanço de energia tendo como base as características das gotículas de líquido que se desprenderam. No entanto, é ressaltado que seria preciso uma análise de viés estatístico afim de se chegar nos parâmetros iniciais de cálculo (diâmetro de gotícula despreendida, altura de queda), já que, a turbulência na interface bifásica gera modificações de concentração de ar, o que resulta no conhecimento do momento exato do desprendimento de gotas e, conseqüente geração de bolhas.

Atualmente, diversos autores conseguiram fazer ressalvas e observações que vieram a aprofundar o estudo de Volkart (1980). A pesquisas mostram importantes variáveis do fenômeno, tais como: distribuição de velocidades média da interface, distribuição de bolhas, distribuição de frequência de bolhas, distribuição de tamanho de bolha, padrões de concentração de gás em função da profundidade no escoamento na superfície livre, influência das ondas superficiais na concentração de gás e geração. No entanto, para determinar os parâmetros iniciais de cálculo em todos os casos são necessárias análises estatísticas. Os resultados obtidos nas pesquisas foram implementados em aplicações de oxigenação em escoamentos de superfície livre (Chanson 1993, 1994, 1997a, 1997b; Chanson e Toombes 2002).

O fenômeno de ressalto hidráulico também está presente na aeração em canal livre. Manifestando-se a dissipação de energia presente por meio de turbilhões que puxam o gás em direção no líquido. Desse modo, destaque-se o fenômeno de aeração, mostrado na Figura 2-17.

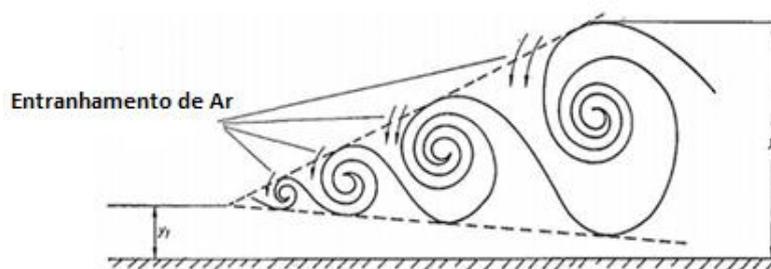


Figura 2-17. Mecanismo de aeração em ressalto hidráulico

Fonte: Hoyt e Sellin (1989).

Vários estudos foram desenvolvidos para entender a correlação entre aeração e ressaltos hidráulicos destacando importantes variáveis para o entendimento do fenômeno como distribuição de bolhas, velocidade interfacial, estrutura da difusão do gás e distribuição de gás em função de profundidade. Os resultados dos estudos, além disso, relacionam o fenômeno de aeração no ressalto hidráulico à perda de carga gerada. De forma ampla, o ressalto hidráulico está vinculado a uma taxa de dissipação de energia sendo caracterizada como energia cinética turbulenta que é reduzida na direção do escoamento (Hoyt e Sellin 1989; Liu, Rajaratnam and Zhu 2004; Gualtieri e Chanson 2007; Kucukali e Cokgor 2007, 2009; Murzyn e Chanson 2009).

A dissipação de energia e transferência de massa (oxigenação por exemplo), apresentada na Figura 2-18, permite compreender o fenômeno de aeração, observada geralmente em estruturas hidráulicas como vertedouros (Nakasone 1987; Gulliver, Thene e Rindels 1990; Chanson 2002, 2004).

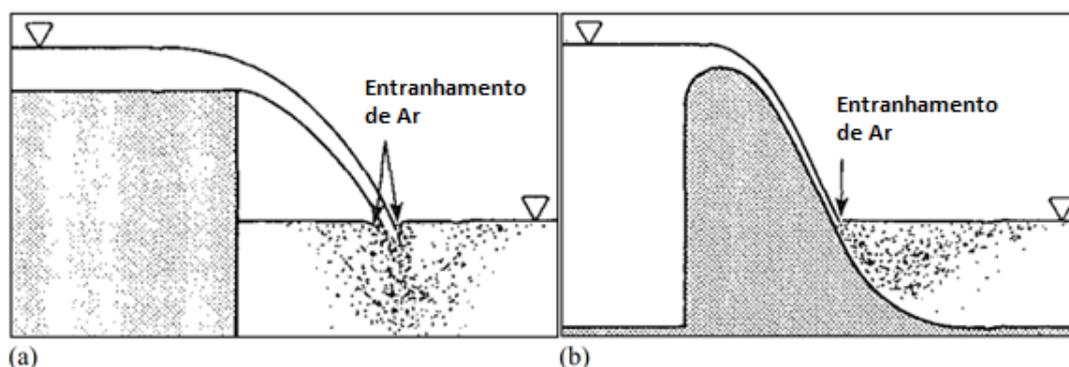


Figura 2-18. Aeração por impacto

Fonte: Gulliver, Thene e Rindels (1990).

Gulliver, Thene e Rindels (1990) realizaram uma análise da eficiência de aeração em estruturas hidráulicas. Na pesquisa, os autores sugerem que na aeração geram-se bolhas que vão se quebrando pelas forças de cisalhamento próprias do escoamento. Observando-se que, isso acontece até um diâmetro de bolha suficientemente pequeno para o qual há equilíbrio das forças de cisalhamento do escoamento com as forças de tensão superficial da bolha.

Marques *et al.* (2004) apresentam uma metodologia para estimar a região de separação entre o escoamento aerado e o escoamento não-aerado, por meio do conhecimento do comportamento médio da superfície livre e das pressões medias junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

Chanson (2006) comprovou que a dissipação de energia pode ser afetada pelos efeitos de escala que contribuem para uma menor aeração na região do rolo. Além disso, explica que os

mecanismos de quebra de bolhas e o aprisionamento de ar são dominados pela tensão superficial do escoamento indicando semelhança com número de Weber.

2.2.9 Ressalto Hidráulico

O ressalto hidráulico está caracterizado pela grande quantidade de bolhas de ar incorporadas no escoamento e mudança rápida do regime de escoamento (supercrítico para subcrítico) por meio da perda de energia devido à turbulência e incorporação de ar (escoamento bifásico). Apesar da superfície livre ser bem definida a montante do escoamento (praticamente lisa), ela se torna fortemente turbulenta, e com uma aparência espumante, através do escoamento bifásico Ar-Água (Chanson e Murzyn, 2007) tal como mostrado na Figura 2-19.

A mudança de regime causada pelo ressalto hidráulico é acompanhada de grande oscilação na superfície de água com propagação de ondas para jusante. Essa agitação decresce significativamente após o fim do rolo e chega ao regime normal do escoamento após o fim da zona de subida de bolhas de ar. A turbulência provocada por este fenômeno no escoamento, transforma uma parte da energia cinética em energia potencial. Em um ressalto hidráulico, o número de Froude do escoamento é sempre maior que a unidade.

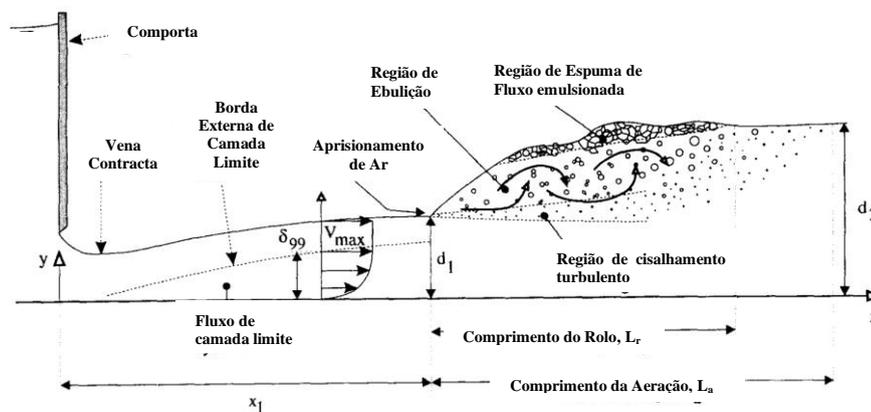


Figura 2-19: Região de escoamento Água-Ar de um ressalto hidráulico

Fonte: Chanson (2009) apud (Chanson 1995; Kucukali e Chanson 2008).

2.2.10 Remistura e Coalescência de Bolhas

A coalescência e a quebra de bolhas são dois fenômenos importantes que influem diretamente no tamanho de bolha. A coalescência de bolhas é o processo pelo qual duas ou mais bolhas se juntam para formar uma nova bolha. Identificando-se nesse processo três etapas: colisão (controlada pela hidrodinâmica da fase líquida), afinamento ou drenagem do filme líquido e ruptura do filme líquido. Em outras palavras, para a coalescência acontecer o filme

líquido deve ajustar-se até alcançar a ruptura total na qual as bolhas se unem. É destacável que, o tempo de adesão das bolhas deve ser maior que o tempo de afinamento do filme, caso contrário, a coalescência não ocorre. Finalmente, o último passo de ruptura é bem mais rápido se comparado com a outra etapa. A quebra de partículas fluidas altera a área de contato entre as fases, e com isto altera-se, significativamente, a transferência de massa e calor nos processos.

Geralmente, a colisão de bolhas em linhas turbulentas acontece devido ao fenômeno da quebra. Neste fenômeno distingue-se, como consequência, a formação de uma distribuição de tamanho de bolhas filhas, cujo volume é uma fração do volume da bolha mãe.

O fenômeno de quebra e a ruptura de uma partícula em pelo menos duas outras partículas menores, pode ser causado pela interação com campos cisalhantes, turbulência ou impacto com outras partículas sólidas ou outras partículas. A turbulência do meio contínuo ocasionada devido à quebra de bolhas é observada em todo escoamento polidisperso fluido-fluido onde exista turbulência com intensidade suficiente para promovê-la.

Resumidamente, existem diversos modelos que tentam explicar a quebra por interação com a turbulência, apoiando-se em uma de duas teorias básicas: colisão entre partículas e vórtices ou ruptura causada pela deformação sofrida pelas partículas por interação com o meio contínuo.

Segundo Estevam (2002) quando ocorre a coalescência de bolhas, uma bolha maior começa a se originar, gerando duas regiões no canal do rotor de uma bomba centrífugas: uma composta pela bolha de ar e a outra pelo filme de líquido que continua escoando no espaço restante do canal. Sobre essa bolha estará atuando uma força de arrasto que procura deslocá-la ao longo do canal, uma força centrífuga, de pequena intensidade em função da baixa densidade do ar, que acelera mais o filme de líquido que a bolha de ar e uma força de empuxo centrífugo que tende a dificultar o deslocamento dessa bolha. Quando ocorrer o equilíbrio entre a força de arrasto e o empuxo centrífugo, essa bolha ficará estacionária dentro do canal. Associado a isso, a aceleração do filme de líquido irá retirar pequenas bolhas de ar dessa bolha alongada, que, a depender dos seus diâmetros, irão escoar para fora do canal do rotor ou ficarão retidas, formando uma região de remistura. Nessa condição, em termos de padrão de escoamento, haverá, no canal, uma região com escoamento estratificado e outra com escoamento em bolhas dispersas.

Tem-se desenvolvido vários modelos para descrever os fenômenos de quebra e coalescência. Araujo (2010) estudou a quebra e a coalescência de gotas de emulsão de água em petróleo ao escoar por um furo na tubulação. Esse tipo de acidente simula a válvula de mistura anterior à dessalgadora (equipamento que separa a água salgada do óleo). O autor utilizou dados experimentais para desenvolver um novo conjunto de modelos de quebra e coalescência que

possam ser utilizados na modelagem da evolução da distribuição volumétrica de tamanho de gotas no escoamento de emulsões em regime turbulento. A avaliação dos modelos disponíveis na literatura e aplicáveis a esse tipo de escoamento e dos novos modelos desenvolvidos consistiu na determinação dos parâmetros de cada modelo utilizando o método da regressão da distância ortogonal. Permitindo concluir que a modelagem desenvolvida foi a que produz os melhores resultados dentre os avaliados.

Coelho (2014) desenvolveu um aparato experimental para o estudo da coalescência do escoamento da água em uma célula de coalescência, onde o escoamento no seu interior foi caracterizado a fim de determinar as escalas de turbulência e estimar a taxa de dissipação de energia para as condições operacionais pré-selecionadas. Para caracterizar o escoamento foram utilizadas duas técnicas de medição de velocidades, anemometria a laser por efeito Doppler (*LDA*) e a velocimetria por imagem de partícula (*PIV*).

2.2.11 Espessura de Filme do Líquido

No estudo do escoamento anular gás-líquido em uma curva, descobriu-se que a variação da espessura de filme do líquido em torno da circunferência do tubo é suficientemente complexa. Diversas pesquisas foram realizadas ao longo dos anos para elucidar a dinâmica da espessura do filme do líquido e sua relação com outros parâmetros do escoamento, a fim de auxiliar no projeto preciso dos numerosos sistemas anulares gás-líquido envolvendo curvas. Abdulkadir (2011) afirma que, nas curvas, a direção do movimento de filme do líquido depende da magnitude relativa das forças de pressão, cisalhamento interfacial, centrífuga e gravitacional que atuam de forma combinada para induzir o escoamento secundário no filme do líquido. Além disso, na condição em que o momento da fase gasosa é maior do que o momento da fase líquida, a espessura máxima de filme do líquido é vista como deslocada para o interior da curva. Vários autores investigaram experimentalmente os efeitos da curvatura na distribuição de filme do líquido em um escoamento anular gás-líquido.

Estevam (2002), realizou um estudo experimental onde fez uma análise fenomenológica real dos fenômenos físicos que ocorrem no canal do rotor de uma bomba centrífuga. O autor observou a presença de uma bolha estacionária originando um escoamento estratificado. Dependendo da condição operacional, o aumento da fração de vazio acarreta um aumento no tamanho da bolha estacionária que se forma no canal do rotor. Quando o tamanho dessa bolha alongada atinge a cerca de 80 % do raio externo do rotor essa condição configura o *bloqueio de gás*, pois a degradação do desempenho da bomba era severa.

Estevam (2002) modelou o escoamento bifásico em um sistema BCSs. Baseado nos dados e observações experimentais, o autor propõe uma modelagem para o cálculo do filme de líquido no canal do rotor e um mapa de desempenho que é função da fração volumétrica de gás e do adimensional chamado Indicador de *Surging* I_s . Para maiores detalhes desta correlação do filme de líquido pode-se consultar no Apêndice E da tese do autor.

$$\rho_L V_s V_s' - \rho_L \omega^2 r \sin \beta = \frac{dp}{ds} - \frac{p}{A_s} \frac{dA_s}{ds} - \frac{1}{2} \rho_L f_\beta V_s^2 \frac{P}{A_s} \quad Eq. (2-19)$$

Onde:

$$V_s' = \frac{dV_s}{ds} \quad Eq. (2-20)$$

Onde: ρ_L é a massa específica do líquido, r o raio do canal, A_s é a área do impelidor na seção normal ao escoamento, p pressão, g a gravidade, f_β é o fator de atrito de Blasius, ω é a velocidade angular, o ângulo β está na direção “ s ” paralela as aletas no impelidor da bomba, V_s a velocidade no filme de líquido, V_s' a derivada parcial da velocidade da direção “ s ”, $\frac{dp}{ds}$ é a diferencial de pressão considerando s direção “ s ” e P é o perímetro molhado.

Destaque-se que a correlação de Estevam (2002) é uma correlação para escoamento no canal do rotor de uma bomba centrífuga, definida na Eq. (2-19), onde o efeito do campo centrífugo é alto a tal ponto que o efeito do campo gravitacional pode ser negligenciado. Portanto, para esta pesquisa é necessário adaptar teoricamente a Eq. (2-19) para escoamento em duto curvo, considerando o efeito gravitacional acoplado ao efeito centrífugo.

Os termos da pressão em função do comprimento do canal foram desprezados porque praticamente o valor é quase nulo. O ângulo β está na direção “ s ” paralela as aletas no impelidor da bomba foi alterado para o ângulo θ , que define o início e o final da bolha alongada estacionária formada. O efeito centrífugo foi alterado para ser representado pela velocidade tangencial. A vazão de gás influencia a coalescência de bolhas e define, deste modo, o início da formação da bolha alongada. O fator de atrito é muito pequeno, mas ajuda na correção da curvatura. A equação final adaptada para duto curvo a partir da correlação de Estevam (2002) é definida por:

$$V_s V_s' - \left(\frac{V_s^2}{R} + g \sin \left(\theta + \frac{s}{R} \right) \right) + f_\beta \frac{V_s^2}{2} \left(\frac{2}{a_s} + \frac{V_s a_s}{Q_L} \right) = 0 \quad \text{Eq. (2-21)}$$

Onde: R o raio meio, a_s é a largura do canal considerando a direção do escoamento, g a gravidade, f_β é o fator de atrito de Blasius, Q_L é a vazão do líquido, s é o comprimento da bolha e V_s a velocidade no filme de líquido.

A Eq. (2-21), em sua forma mais simples pode ser utilizada para a modelagem da previsão da espessura do filme de líquido em dutos curvos, ao longo da bolha alongada estacionária:

$$V V' + A V^2 + B V^3 = C \quad \text{Eq. (2-22)}$$

Onde:

$$V_{(s=s_1=0)} = \frac{(Q_L + Q_G)}{A_{s1}}$$

$$A_{s1} = a_s b$$

$$A = -\frac{1}{R} + \frac{f_B}{a_s}$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{f_B a_s}{Q_L}$$

$$C = g \sin \left(\theta + \frac{s}{R} \right)$$

$$f_B = 0.076 (Re_L)^{-0.25} f_C$$

$$Re_L = \frac{\rho_L Q_L}{a_s \mu_L}$$

$$f_C = \left[Re_L \left(\frac{R_O}{R_C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{20}}$$

$$R_O = R_C = R$$

Onde: ρ_L é a massa específica do líquido, R o raio meio, as é a largura e b é comprimento do canal considerando a direção do escoamento, g a gravidade, f_B é o fator de atrito de Blasius, o ângulo θ define o início e o final da bolha alongada estacionária formada no duto curvo, Q_L é a vazão do líquido, μ_L é a viscosidade do líquido, Q_G é a vazão do gás, Re_L é o número de Reynolds do líquido, s é o comprimento da bolha e V_s a velocidade no filme de líquido.

Liu e Liu (2015) estimaram erosões de areia em cotovelos para escoamento de névoa anular com base na espessura do filme líquido e diâmetro de gotícula usando um método numérico. Em seu trabalho, eles usaram duas correlações de espessura de filme líquido e três modelos de previsão de diâmetro médio de gotículas para comparar os resultados calculados com dados experimentais disponíveis na literatura. Eles também foram capazes de desenvolver procedimentos de predição numérica baseados nas informações da espessura do filme líquido e verificação do diâmetro das gotas.

De acordo com Ju (2015), a espessura de filme do líquido é função das velocidades superficiais do gás e do líquido, das propriedades do gás e do líquido e do diâmetro do tubo. Ao contrário do que muitos pesquisadores consideram, como Berna *et al.* (2014), Asali *et al.* (1985), Sawant (2008) e Fukano e Furukawa (1998), o efeito da velocidade do líquido na espessura do filme líquido é refletido diretamente em uma função do número de Reynolds do líquido. Ju (2015) relatou que o efeito da velocidade do líquido é mais apropriadamente descrito pelo número de Weber do líquido (We_L). Ele concluiu que a força de tensão superficial é mais importante do que a força de viscosidade durante a interação das duas fases.

Outra razão pela qual o número de Weber é mais adequado para a previsão da espessura do filme do líquido do que o número de Reynolds pode ser entendido a partir da física no escoamento anular gás-líquido. O mecanismo que rege a espessura do filme líquido no escoamento anular são as forças de inércia do líquido e do gás sobre a tensão superficial. As forças de inércia tendem a mudar a forma da interface, enquanto a tensão superficial tende a manter a forma da interface. Esses dois mecanismos frequentemente competem entre si no formato da interface.

A Figura 2-20 mostra os resultados obtidos por Ju (2015) considerando o efeito da força inercial do líquido sobre a tensão superficial na espessura do filme. Pode-se observar na Figura

2-20 que ocorre o aumento da espessura do filme com o aumento do Weber do líquido sob o mesmo Weber do gás. Isso está de acordo com as observações anteriores (Belt 2010; Schubring 2009; Alamu; Fukano e Furukawa 1998; Sawant 2008) de aumento da espessura do filme com o aumento da velocidade superficial do líquido.

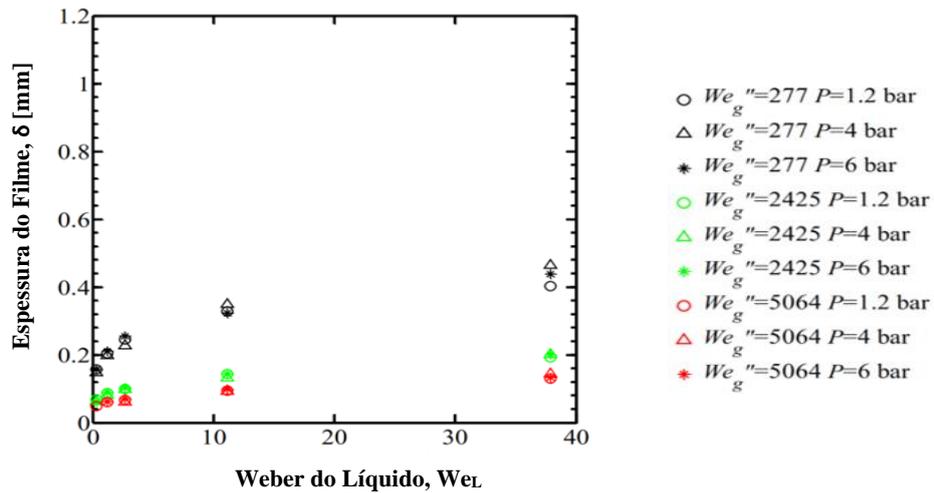


Figura 2-20: Efeito do número de Weber líquido na espessura do filme para diferentes números e pressão de gás modificado

Fonte: Ju (2015)

No trabalho dos autores Abdulkadir *et al.* (2018), uma nova correlação para prever a espessura do filme líquido em uma curva de 180° sob escoamento anular gás-líquido foi desenvolvida. A correlação de espessura de filme do líquido proposta foi baseada em dados experimentais obtidos em uma ampla gama de condições de operação. As velocidades superficiais do líquido variam de 0.02 a 0.2 m/s e as velocidades superficiais do gás de 3.5 a 16 m/s em diferentes locais de medição de 45°, 90° e 135° da curva com um diâmetro de 127 mm. A espessura de filme do líquido no escoamento anular de ar-água e hélio-água pode ser prevista. A validação da correlação proposta para prever a espessura do filme do líquido em escoamentos anulares gás-líquido com diferentes diâmetros de tubo foi examinada em comparação com os dados disponíveis na literatura. Boa concordância foi encontrada entre os valores previstos da espessura de filme do líquido com os dados experimentais em diferentes locais de medição do duto (Abdulkadir *et al.* 2018).

O modelo proposto por Abdulkadir *et al.* (2018) para a previsão da espessura de filme do líquido em uma curva de 180° baseado em dados experimentais pode ser definida de uma maneira geral por:

$$\delta = C(We_L)^a(We_G)^b(Fr_G)^d \quad \text{Eq. (2-23)}$$

Onde: δ é a espessura de filme do líquido, We_L e We_G são o número de Weber modificado para o líquido e o gás, definidos na Eq. (2-15) e Eq. (2-16), respectivamente, Fr_G é o número de Froude do gás (Eq. (2-13)), C é uma constante empírica, a , b e d são números que descrevem a natureza da relação entre a espessura de filme do líquido e os números adimensionais.

Para determinar os valores das constantes empíricas C , a , b e d , o método de Ju (2015) foi adaptado. O método de Ju (2015) envolve fazer um gráfico do lado esquerdo com a espessura do filme do líquido com cada um dos grupos adimensionais (Weber do líquido e do gás modificado e o número de Froude do gás) e do lado direito usando uma relação de lei de potência a fim de obter as constantes empíricas associadas (diferentes expoentes).

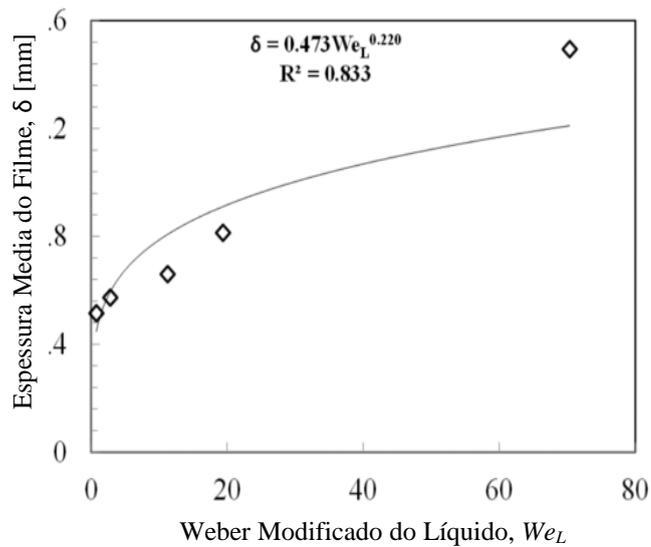


Figura 2-21: Relação entre a espessura média filme líquido e o número Weber do Líquido modificado

Fonte: Abdulkadir *et al.* (2018)

Pode-se deduzir, da Figura 2-21, que a espessura do filme líquido diminui assintoticamente à medida que o número de Weber do líquido modificado aumenta. Isso significa que a força inercial resultante de um aumento no número de Weber do líquido modificado, devido a um aumento na velocidade superficial do gás, tende a diminuir a espessura do filme líquido.

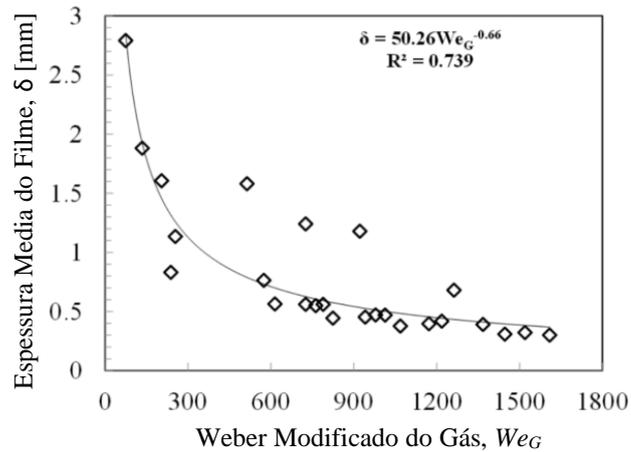


Figura 2-22: Relação entre a espessura média filme líquido e o número Weber do Gás modificado

Fonte: Abdulkadir *et al.* (2018)

A Figura 2-22, mostra a relação que o aumento do número de Weber do gás modificado, determina o aumento da inércia para a fase líquida que move mais líquido para a região de teste, resultando no aumento da espessura do filme de líquido.

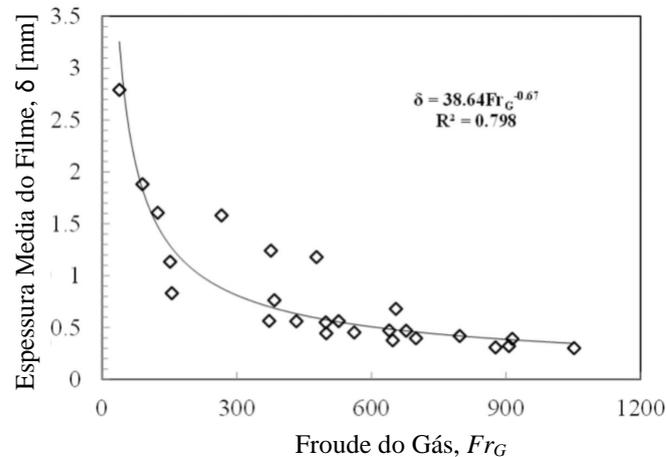


Figura 2-23: Relação entre a espessura média filme líquido e o número Froude do Gás

Fonte: Abdulkadir *et al.* (2018)

A Figura 2-23, indica que a espessura média do filme líquido diminui na medida em que o Número de Froude modificado de gás aumenta. Este número adimensional é muito importante para descrever a distribuição de fase do escoamento através da curva.

Em resumo, a relação entre a espessura média do filme líquido e os vários números adimensionais pode ser definida segundo os resultados obtidos das figuras apresentadas anteriormente.

O coeficiente e expoente do número de Weber do Líquido Modificado fica definido por:

$$\delta = 0.473 We_L^{0.22} \quad Eq. (2-24)$$

Considerando o número de Weber do Gás Modificado a relação fica definida por:

$$\delta = 50.26 We_G^{-0.66} \quad Eq. (2-25)$$

Para o número de Froude do Gás obtêm-se:

$$\delta = 38.64 Fr_G^{-0.67} \quad Eq. (2-26)$$

Com esses resultados os valores das constantes empíricas C (todas as constantes dos números adimensionais são multiplicadas), a , b e d , podem ser definidas por:

$$\delta = 918.5879 We_L^{0.22} We_G^{-0.66} Fr_G^{-0.67} \quad Eq. (2-27)$$

O autor fez um ajuste das constantes da Eq. (2-27) no programa *SOLVER* do *EXCEL* para determinar os valores reais que minimizam o erro entre os valores reais e previstos da espessura do filme líquido. Após várias iterações, os resultados convergentes que minimizam o valor do erro ocorrem quando C , a , b e d são 28,4061, 0,10318, -0,30954 e -0,31423, respectivamente. A base matemática do Solver é a minimização da soma dos mínimos quadrados. A correlação final para o modelo de filme líquido proposto por Abdulkadir *et al.* (2018) pode ser representada por:

$$\delta = 28.4061 We_L^{0.10318} We_G^{-0.30954} Fr_G^{-0.31423} \quad Eq. (2-28)$$

Uma das características atrativas da correlação proposta pelo autor é o fato de que a maioria das variáveis importantes que afetam a espessura de filme do líquido, como as velocidades das fases líquida e gasosa, o diâmetro do tubo, as propriedades físicas das fases e ângulo da curva, são todos considerados dentro do modelo e todos esses parâmetros são facilmente acessados.

Os números de Weber enlaçam as duas forças importantes (forças inerciais e de tensão superficial) que governam a formação da espessura do filme do líquido e o tamanho da bolha dentro do sistema, enquanto o número de Froude do gás quantifica a interação de duas forças importantes (forças centrífugas e gravitacionais) que determinam a distribuição do fases em uma curva. Ou seja, eles refletem a física que rege a interação gás-líquido na curva.

2.2.12 Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas, ou turbo bombas, são máquinas que tem a finalidade de fornecer energia ao fluido. Nesse caso, é do tipo cinética, que é convertida em energia potencial (de pressão). Esta ação é realizada empregando os conceitos do Princípio de Bernoulli. Essa energia pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou até mesmo uma combinação destas.

Para a conversão de energia cinética de rotação, a energia hidrodinâmica do escoamento do fluido é necessária o uso de bombas centrífugas. A energia rotacional normalmente é fornecida pelo acionamento de um motor de combustão ou motor elétrico. Alguns dos usos mais comuns, na indústria de petróleo, são: a sucção de água, transporte e bombeamento dos fluidos de petróleo.

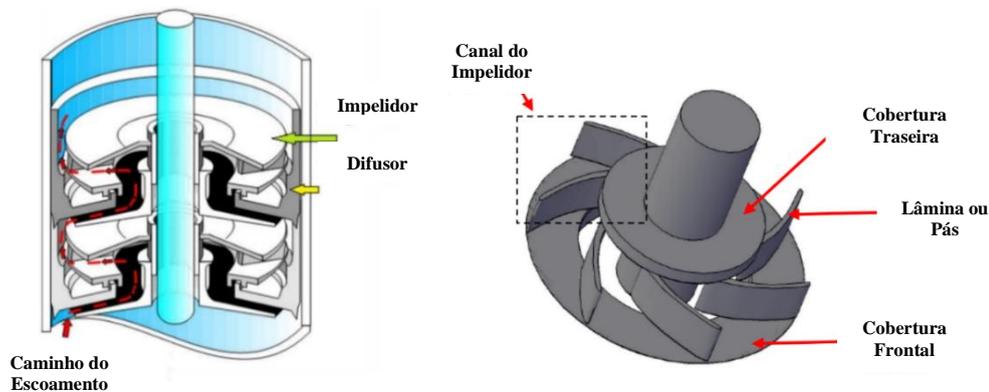


Figura 2-24: Estágios da BCS

Fonte: Vieira Bulgarelli (2018).

Um método de levantamento artificial que se destaca pela excelente produção e ampla aplicabilidade é a Bomba Centrífuga Submersível (*BCS*). O sistema *BCS* consiste em um motor elétrico, sensores e outros componentes que permitem a operação remota. Amplamente utilizada na indústria de exploração de petróleo, o sistema *BCS* utiliza uma bomba centrífuga de vários estágios, com cada estágio tendo um impulsor e um difusor (Figura 2-24). Este tipo de método de elevação artificial oferece energia adicional aos fluidos, convertendo energia cinética (no impulsor) em energia de pressão (no difusor).

2.2.13 Problemas Operacionais nas Bombas Centrífugas

2.2.13.1 *Surging* e *Gas Locking*

A operação de bombas centrífugas na presença de uma fase compressível é caracterizada pela redução da capacidade do equipamento de gerar pressão. Isso não ocorre devido somente a redução da massa específica da mistura, mas também devido a dois fenômenos frequentemente relatados na literatura: *Surging* e *Gas Locking*. Apesar desses termos serem comuns em estudo experimentais de bombas operando com mistura gás-líquido, não existe um consenso sobre as definições e fronteiras desses fenômenos. A seguir, são descritas as interpretações físicas de *Surging* e *Gas Locking* que serão adotadas no presente trabalho e como mostrado na Figura 2-25.

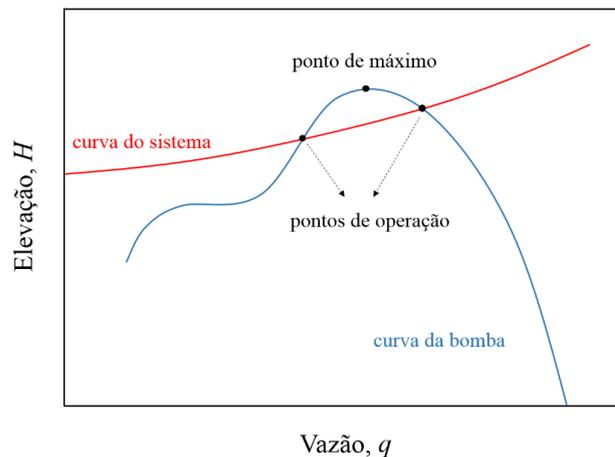


Figura 2-25 Operação instável de bombas centrífugas operando com mistura bifásica gás-líquido.

Fonte: Monte Verde (2016).

O desempenho da bomba com escoamentos de elevadas frações de gás, pode sofrer uma degradação considerável. A presença de gás livre no escoamento resulta em desequilíbrios na curva de pressão versus vazão. Desta forma, a curva passa a apresentar um ponto de máximo, denominado ponto de início de '*Surging*', e, a seguir, uma acentuada queda no ganho de pressão. A capacidade de bombeamento em vazões abaixo desse ponto, fica comprometida, como poder ser visto na Figura 2-25. Um bloqueio na área disponível ao escoamento do rotor, como um bolsão de gás, que se encontra estacionário dentro do canal do rotor, é notado após o ponto de *Surging*. Dessa forma, um aumento da fração de gás livre provoca o bloqueio que impede o escoamento do líquido, resultando em vazão nula. Esse fenômeno é conhecido como *Gas Locking*.

Desta maneira, há um grande interesse em conhecer como é o desempenho dessas bombas fora do ponto de *Surging* e em como evitar o bloqueio de gás (*Gas Locking*), visando reduzir, dessa forma, as perdas de produção e desgastes causados pela presença de gás livre. Portanto, conhecer as condições operacionais e quais os fatores que influenciam o início das instabilidades no desempenho da bomba são de grande importância para a indústria e para este projeto.

Em condições operacionais em torno do ponto de *Surging* é comum que sejam observadas flutuações nos sinais de monitoramento do desempenho da bomba. No sistema *BCS*, a bolha alongada estacionária provoca o *Surging*, que é um fenômeno transiente com oscilação de pressão no escoamento.

O *Gas Locking* é outro importante conceito quando bombas centrífugas operam na presença de gás livre. Nessa condição operacional a degradação do desempenho é tão severa que a bomba perde praticamente toda capacidade de gerar pressão. Assim, a bomba continua girando, consumindo potência, porém é incapaz de transferir energia ao fluido. Se o diferencial de pressão externo não for suficiente para manter o escoamento, o *Gas Locking* resulta em uma vazão nula do sistema. Quando o diferencial de pressão externo é suficiente para manter o escoamento, ocorre a diminuição da vazão e a bomba passa a representar um elemento de perda de carga no sistema.

Em condições operacionais em que o sistema *BCS* sofre *Gas Locking*, é necessário aumentar a pressão de sucção para desbloquear a bomba, ou até mesmo parar o sistema de bombeio permitindo que o gás escoe até a superfície devido ao empuxo. (Monte Verde, 2016)

2.2.14 Visualização de Escoamento Bifásico em BCS

Estudos experimentais de visualização de escoamento bifásico gás-líquido no interior do sistema *BCS* vêm sendo realizados para investigar o desempenho de bombas e a compreensão fenomenológica desse escoamento. Um estudo pioneiro com desenvolvimento do primeiro protótipo de visualização baseado em um sistema *BCS* foi realizado pelo Estevam (2002), seguido de Beltur e Prado (2003), Duran e Prado (2003), Pessoa e Prado (2001), Monte Verde (2011), Paternost (2013), Varon (2013), e Biazussi (2014). A maioria das pesquisas voltadas à indústria do petróleo têm natureza empírica, devido à complexidade do escoamento no interior das bombas centrífugas.

Diversos trabalhos concentram-se na visualização do escoamento bifásico gás-líquido sujeito a campos centrífugos no interior do sistema *BCS*, tais como Barrios (2007), Gamboa (2008), Trevisan (2009), Gamboa e Prado (2010), Trevisan e Prado (2011), Monte Verde (2016)

e Cubas (2017), os quais ressaltaram bolhas de gás em meio ao escoamento de líquidos. Minemura e Murakami (1980), Barrios (2007) e Sabino (2015) fizeram uma análise da dinâmica de bolhas com o objetivo de estudar as forças responsáveis pelo seu movimento em bombas.

A visualização desse tipo de escoamento é uma ferramenta fundamental para compreender sua dinâmica, assim como caracterizar o arranjo topológico das fases em função das propriedades dos fluidos e condições operacionais. Esses resultados servem de base para a modelagem do escoamento, que tem como objetivo prever o comportamento da bomba operando na presença de uma fase compressível.

Estevam (2002) apresenta um estudo experimental e desenvolvimento de modelagem de escoamento bifásico em sistema *BCS* por meio da validação e ajuste do modelo teórico de dois fluidos. Baseado nas observações experimentais, o autor mostra que a existência de bolha no rotor depende da intensidade do campo centrífugo que atua no rotor, do tamanho da bolha discreta de gás que entra no rotor, da tensão superficial do fluido, da viscosidade do líquido, entre outras variáveis. Em um escoamento bifásico no interior da bomba centrífuga, o rotor gira criando um campo centrífugo intenso, determinando a retenção das bolhas dispersas. Desta forma, há um favorecimento da coalescência dessas bolhas na entrada do rotor, fato que resulta na formação de uma bolha alongada. Portanto, a força centrífuga é de vital importância para o estabelecimento do movimento relativo das bolhas dentro do canal do rotor.

Todos esses fenômenos são os que reduzem ou anulam o desempenho da bomba. As análises obtidas por Estevam (2002) consideraram os valores experimentais obtidos pelo autor e existentes na literatura e aqueles obtidos pela modelagem desenvolvida. As análises mostraram que uma bolha alongada, ao ocupar pelo menos 80% do tamanho do raio do rotor, resulta em uma região de *bloqueio de gás*. Para o início dessa região é assumido que a bomba não irá gerar mais do que 20% da pressão obtida através de um escoamento monofásico nas mesmas condições.

Em função da proporção volumétrica do gás na mistura bifásica e das condições operacionais, o autor identificou duas condições operacionais com padrão de escoamento distintos no canal do impelidor da bomba (ver Figura 2-26):

– *Bolhas dispersas*: bolhas de diâmetro médio inferior a um valor crítico, que escoam carregadas, sem coalescência, pelo líquido através do canal do impelidor.

– *Bolhas alongadas*: devido à coalescência das bolhas menores, ocorre a formação de uma grande bolha alongada estacionária que ocupa a entrada do impelidor. Ao redor da bolha alongada escoam predominantemente líquido. O gás entra na bomba e é agregado à bolha alongada. Na extremidade final da bolha alongada há a chamada região de remistura, na qual

bolhas de gás discretas desprendem-se da bolha alongada e são incorporadas ao escoamento de líquido. O padrão de bolhas alongadas também foi associado aos fenômenos de *Surging* e *Gas Locking*.

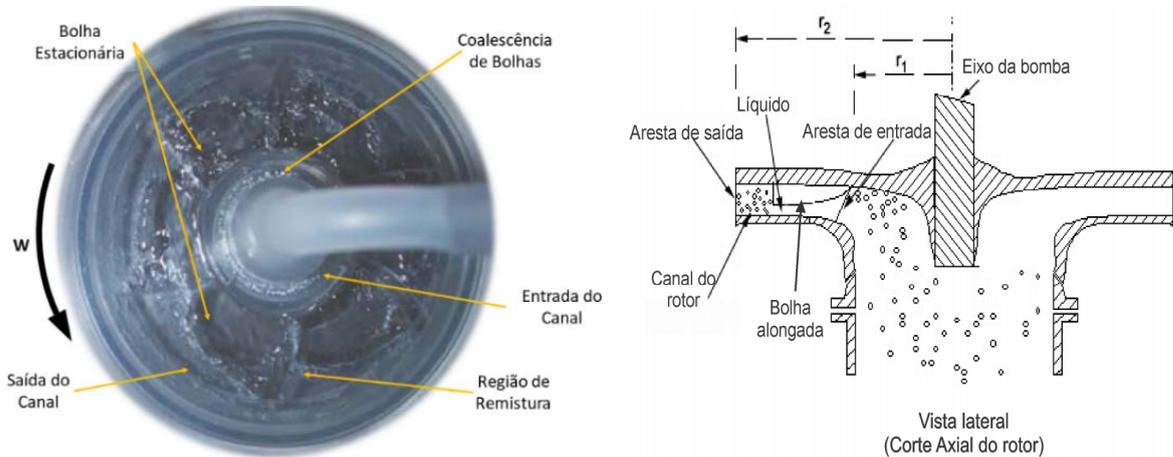


Figura 2-26: Visualização da evolução da formação das bolhas em rotor de bomba centrífuga

Fonte: Estevam (2002).

O Indicador de *Surging* I_s é um número adimensional, obtido a partir da aplicação do modelo de dois fluidos. Relaciona a força de arrasto e a força centrífuga com a fração de vazio na entrada do impelidor. A aplicação do indicador de *Surging* indica qual o padrão de escoamento ocorre nos canais do impelidor quando da operação de uma bomba centrífuga: bolhas dispersas na entrada ou em todo o canal do impelidor; ou estratificado com região de remistura formada por bolhas dispersas. A ocorrência do *Surging* é relacionada com a estratificação do escoamento no interior do impelidor.

A Figura 2-27 apresenta o mapa operacional com os respectivos padrões de escoamento em função do Indicador de *Surging*. Se o I_s é maior que um certo limite, significa que a força de arrasto supera a força devido ao campo centrífugo. Assim, as bolhas escoam para fora do impelidor. Esse caso indica a região de Bolhas Dispersas no mapa de padrões.

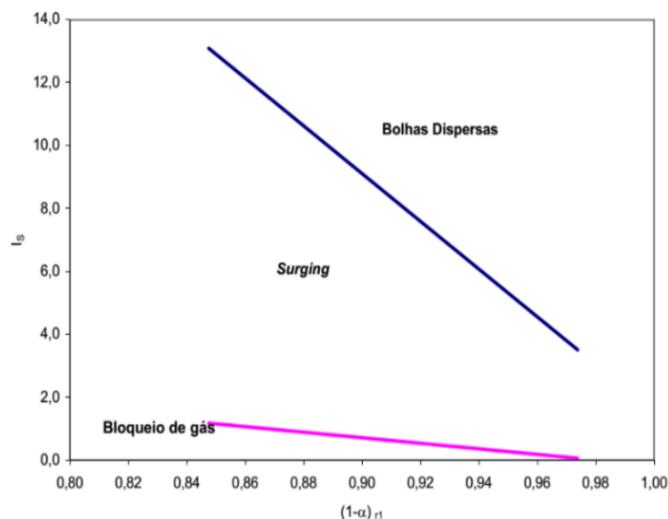


Figura 2-27: Mapeamento dos Padrões de Escoamento Bifásico (Água-Ar) no canal do Impelidor de uma Bomba, indicando as fronteiras para a ocorrência de *Surging* e *Bloqueio de Gás* no canal do impelidor.

Fonte: Estevam (2002).

Caso I_s seja menor que um valor crítico, a força devido ao campo centrífugo é maior que a força de arrasto e a bolha não é capaz de escoar para fora do impelidor. O gás coalesce dentro do impelidor impactando severamente no desempenho da bomba, indicando a região de *Surging* no mapa da Figura 2-27. Finalmente, se o efeito de segregação devido ao campo centrífugo for dominante, o bolsão de gás originado da coalescência das bolhas ocupa todo o canal do impelidor. Essa situação indica a região de *bloqueio de gás* no mapa de padrões proposto.

Barrios (2007) desenvolveu um modelo semiempírico para estudar o funcionamento da bomba do sistema *BCS*. Ela realizou um trabalho teórico-experimental, construiu um protótipo de visualização baseado em um design convencional do sistema *BCS* que permitisse a visualização do escoamento no interior dos canais do impelidor. A autora teve como objetivos determinar o padrão de escoamento e prever as condições operacionais que causam o *surging*. Ao mesmo tempo, tinha o objetivo de fazer medições do tamanho da bolha para completar o modelo unidimensional proposto, assim como modelar as condições operacionais que causam instabilidades no funcionamento da bomba. Barrios (2007) observou, nas filmagens obtidas, que no padrão de escoamento de bolhas dispersas havia uma quantidade significativa de bolhas no interior do sistema *BCS*s que recirculavam na descarga do rotor e também na admissão (*intake*). Observou que à medida que a relação ar-água aumenta, o diâmetro da bolha também aumenta e seu caminho de recirculação na saída do rotor foi aproximado à entrada do impelidor (*rotor*). Em condições de *surging*, uma grande bolha alongada foi encontrada na entrada do

rotor (*impelidor*) e bolhas de gás na saída do rotor alcançaram a entrada do rotor através do caminho de recirculação. O comportamento do escoamento no canal do rotor da bomba pode ser visualizado nas Figura 2-28 e Figura 2-29, respectivamente.

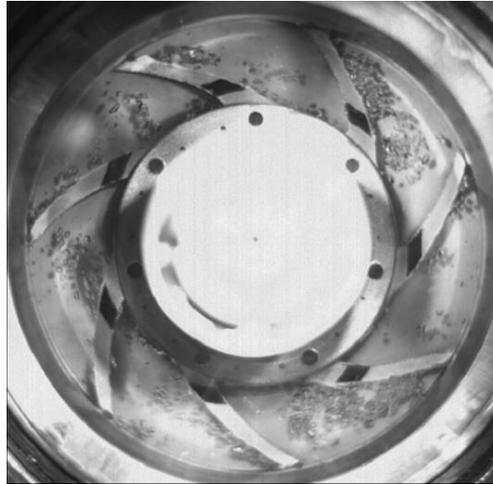


Figura 2-28: Comportamento do Escoamento no Canal do Rotor da Bomba (Vista Superior).

Fonte: Barrios (2007).

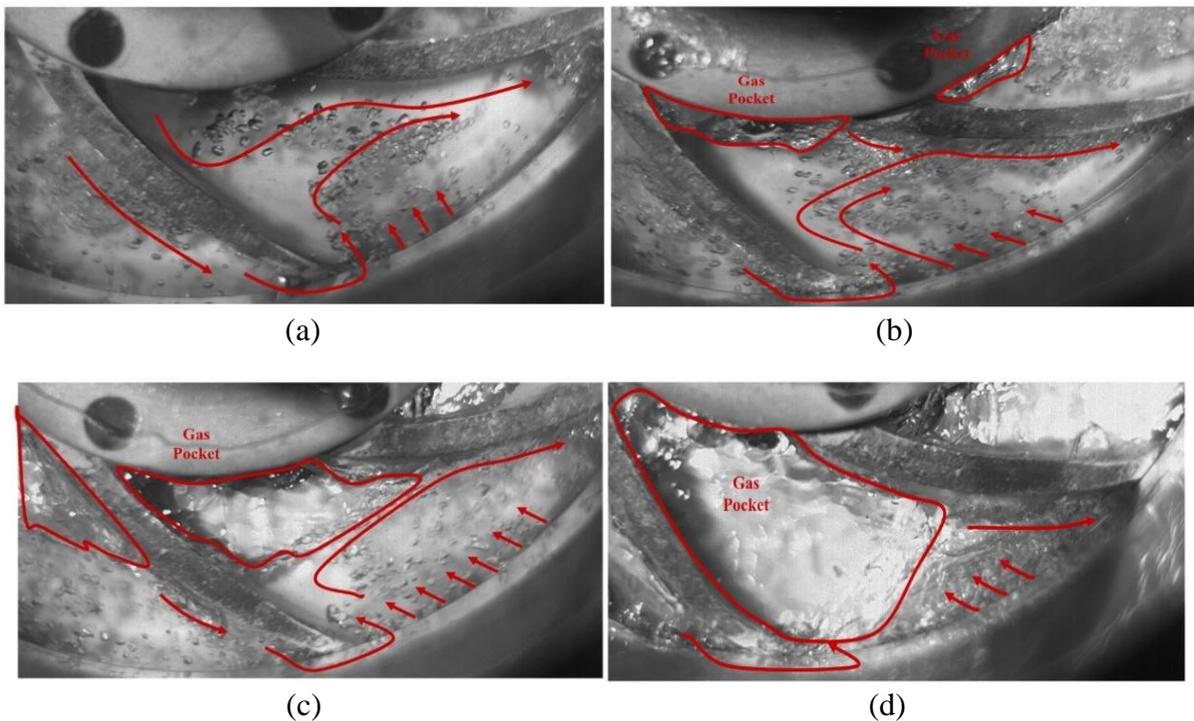


Figura 2-29: Comportamento do Escoamento no Canal do Rotor da Bomba. (Vista nas Pás)

Fonte: Barrios (2007).

Monte Verde (2016) conduziu um trabalho experimental em duas bancadas experimentais com a ideia de avançar no entendimento dos fatores que afetam o desempenho de uma *BCS*, além de identificar os padrões de escoamento gás-líquido no interior do impelidor de *BCS* e

verificar a relação entre o arranjo das fases e o desempenho da bomba. Baseado no estudo anterior, Monte Verde (2011), Monte Verde (2016) identificou quatro diferentes padrões de escoamento que ocorrem conforme a fração de gás aumenta, como é apresentada na Figura 2-30: (a) Bolhas (*Bubble Flow*), (b) Bolhas Aglomeradas (*Agglomerated Bubble Flow*), (c) Bolsão de Gás (*Gas Pocket Flow*) e (d) Segregado (*Segregated Flow*).

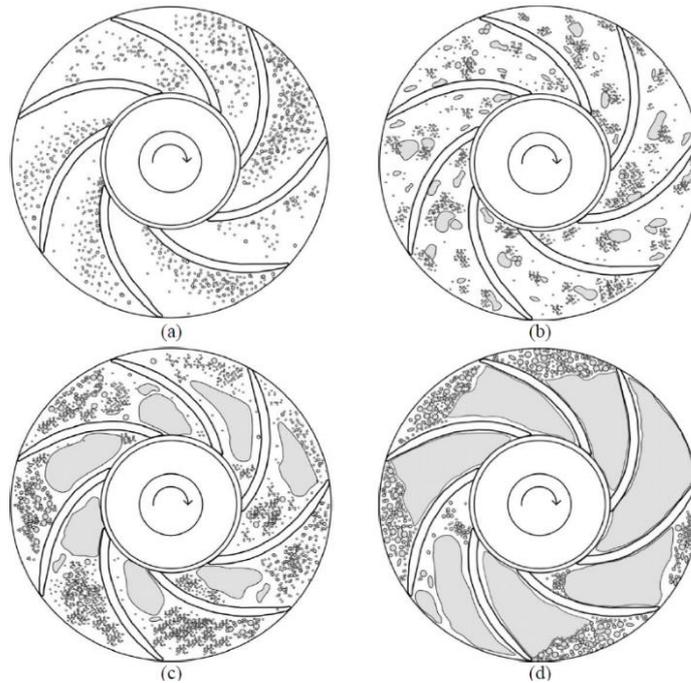


Figura 2-30: Padrões de escoamento gás-líquido no impelidor BCS. (a) Bolhas, (b) Bolhas Aglomeradas, (c) Bolsão de Gás, (d) Segregado

Fonte: Monte Verde (2016) apud Marçal (2021).

O padrão *bolhas* é observado somente para quantidades extremamente baixas de ar e consiste em pequenas bolhas dispersas na fase água. A vazão de gás influencia a quantidade de bolhas no impelidor, enquanto o tamanho e a morfologia são determinados pela rotação e pela vazão de líquido. O padrão *bolhas aglomeradas* ocorre com o aumento da fração de gás, que aumenta a população e o tamanho das bolhas. A maior quantidade de bolhas implica uma interação mais evidente entre elas, com aglomeração e coalescência. O padrão *bolsão de gás* inicia com um incremento ainda maior na vazão de gás, resultando em uma grande bolha com interface deformável e instável. O bloqueio de parte da área do rotor reduz a transferência de energia para o líquido, degradando a capacidade da bomba. O padrão *segregado*, que acontece em frações de gás ainda maiores, consiste em um crescimento das bolhas, as quais aumentam de tamanho na direção radial e passam a ocupar toda a extensão dos canais. A bomba torna-se incapaz de transferir energia para o fluido.

O autor investigou experimentalmente a degradação do desempenho do sistema *BCS* operando com escoamento monofásico de fluido viscoso. O campo centrífugo gerado pela rotação da bomba possui a tendência de separar as fases, devido à diferença de densidades entre elas, enquanto a força de arrasto é responsável por carrear o gás juntamente ao líquido. Já o gradiente de pressão adverso existente no impelidor desacelera as bolhas de ar, que tendem a escoar com velocidade inferior à do líquido ou, ainda, ficar estacionárias dentro dos canais. Fenômenos como acúmulo de gás ou aglomeração e coalescência de bolhas acontecem por efeito das forças mencionadas, definindo os diferentes padrões, de acordo com as características do escoamento.

Cubas (2017) desenvolveu um estudo experimental que teve como objetivo principal avaliar o desempenho de uma bomba centrífuga operando com escoamento bifásico Água-Ar em diferentes condições operacionais visualizando o escoamento. Para este propósito, foram obtidas as curvas de ganho de pressão de uma bomba centrífuga convencional de dois estágios com rotores de tipo radial. Os fluidos de trabalho foram Água e Ar, utilizando velocidades de rotação entre 300 e 600 rpm, frações volumétricas de gás entre 0 e 10%, uma pressão de sucção de 160 kPa e vazões de água entre 0.2 e 1.5 vezes o ponto de máxima eficiência. Do mesmo modo, os diferentes padrões de escoamento dentro do rotor foram identificados para diferentes condições operacionais. Foi utilizado uma bancada experimental onde foi possível realizar, simultaneamente, medição da fração de vazio de entrada, medição de desempenho e visualização dos padrões de gás no rotor da bomba. A bomba centrífuga estudada no trabalho do autor foi uma de duplo estágio, do tipo radial. Para conseguir a visualização o primeiro estágio foi adaptado. As variações de velocidade de rotação, de vazão de líquido e vazão de gás foram variadas para diferentes condições operacionais para a análise do desempenho da bomba centrífuga. Também foi utilizado, na entrada em cada teste, o modelo homogêneo (*não deslizamento*) como referência para calcular a fração de vazio. Além disso, na sucção da bomba foi instalado um sensor de malha de eletrodos (*wire mesh*) com o objetivo de medir frações de vazio reais, que em seguida foram comparadas com os resultados do modelo homogêneo e o de deslizamento (*drift flux*).

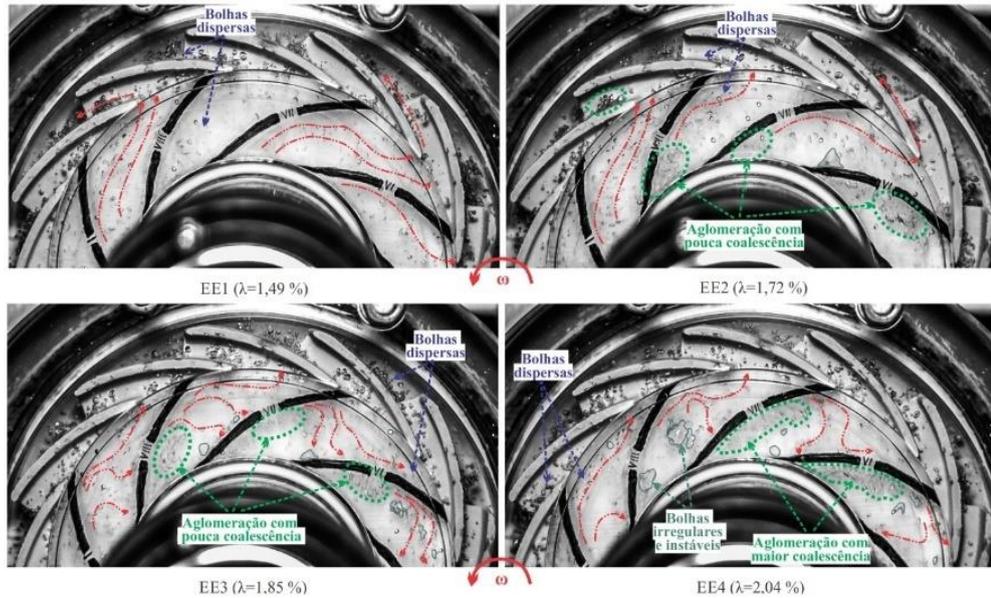


Figura 2-31: Imagens Comportamento das Fases nos Canais do Rotor ($\eta=300 \text{ rpm}$ e $\dot{m}_{Ar}=0.63 \text{ kg/h}$).

Fonte: Cubas (2017) apud Marçal (2021).

Portanto, a Figura 2-31 permite observar o comportamento das bolhas, os padrões de escoamento nos canais do rotor do primeiro estágio e a identificação da distribuição de fases no rotor. A visualização do estágio da bomba permitiu estimar-se os mecanismos que levam à degradação de seu desempenho em função das principais variáveis operacionais como a vazão de líquido, a vazão de gás e a velocidade de rotação.

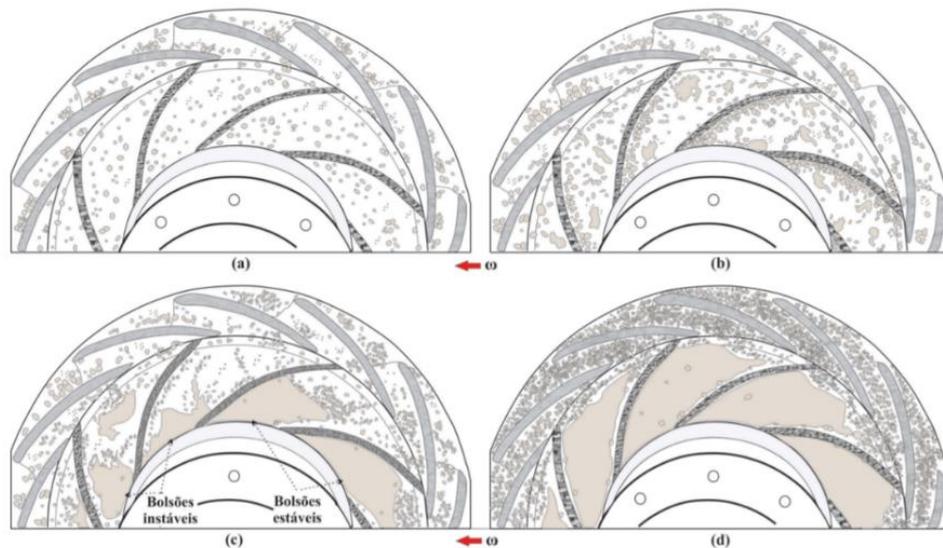


Figura 2-32: Padrões de escoamento bifásico identificados no rotor e difusor do primeiro estágio da bomba: a) escoamento em bolhas, b) bolhas aglomeradas, c) bolsão de gás, d) escoamento segregado.

Fonte: Cubas (2017) apud Marçal (2021).

A análise das curvas de desempenho da bomba foi realizada através da observação das imagens obtidas associadas às instabilidades, com o foco de compreender melhor os fenômenos relacionados à queda de desempenho em operação com escoamento bifásico, em especial nas condições de *surging*. A Figura 2-32 evidencia as características do escoamento observadas pelas imagens obtidas foram propostos esquemas dos diferentes padrões de escoamento observados por Monte Verde (2016). Cubas (2017) observou a distribuição da fase gasosa no difusor.

Apresenta-se na Tabela 2-2 um resumo dos principais trabalhos experimentais revisados nesta subseção, que estão relacionados ao escoamento bifásico gás-líquido em bombas centrífugas.

Tabela 2-2: Resumo dos Trabalhos Revisados em Escoamento Gás-Líquido

Autores	Escoamento	Bombas Utilizadas	Parâmetros Operacionais	Resultados
Estevam (2002)	Água-Ar	Protótipo (1 estágio) e centrífuga radial (2 estágios)	Frações de gás, vazões de líquido e médias rotações	Imagens do escoamento, desempenho da bomba, modelagem teórica
Duran (2003)	Água-Ar	BCS (Multiestágio)	Frações de gás, pressão de sucção, vazões dos fluidos,	Padrões de escoamento e limites de transição, desempenho, influência da densidade do fluido e vazões de escoamento
Barrios (2007)	Água-Ar	Protótipo-BCS (2 estágios)	Frações de gás, vazões de líquido e médias rotações	Padrões de escoamento, condições operacionais de ocorrência de <i>surging</i> , tamanho e trajetória e dinâmica de bolhas, modelo unidimensional
Gamboa (2008)	Água-Ar Água-SF ₆ Isopropanol- Água-Ar	Protótipo (2 estágios) BCS (Multiestágio)	Frações de gás, pressão de sucção, vazões dos fluidos, velocidade de rotação	Transição de padrões de escoamento, desempenho, influência da fração de gás, pressão de sucção e velocidade de rotação
Trevisan (2009)	Água-Ar Óleo-Ar	Protótipo-BCS (2 estágios)	Velocidade de Rotação, pressão de sucção e descarga, vazões de líquido, temperatura do óleo	Padrões de escoamento, influência da densidade, fração de gás e distribuição do tamanho da bolha, desempenho e ocorrência de <i>surging</i>
Drozdv (2010)	Água-Gás Oil-Gás Água-surfactante-Gás	BCS (Multiestágio)	Frações de gás, pressão de sucção, tensão superficial e viscosidade do líquido	Desempenho, influência da pressão de entrada, influência da densidade do gás, grau de dispersão da fase gasosa, formação de espuma e regimes de operação
Monte verde (2011)	Água-Ar	Protótipo (1 estágio) e BCS (3 estágios)	Frações de gás, pressão de sucção, vazões de líquido, velocidade de rotação	Curvas de desempenho e eficiência, ocorrência de <i>surging</i> e <i>gas locking</i> , manuseador de gás, padrão de escoamento
Biazussi (2014)	Água-Ar	3 BCSs diferentes (3 estágios)	Frações de gás, pressão de entrada, vazões de líquido e elevadas rotações	Desempenho, influência da pressão de entrada, proposição de modelo baseado em deslizamento

Autores	Escoamento	Bombas Utilizadas	Parâmetros Operacionais	Resultados
Sabino (2015)	Água-Ar	Centrífuga Radial (2 estágios)	Baixas rotações e vazões de líquido	Imagens do escoamento, velocidade de bolhas, modelagem de forças
Zhang <i>et al.</i> (2015)	Água-Ar	BCS (3 estágios)	Frações de gás, velocidade de rotação e vazões de líquido	Padrões de escoamento na entrada e no impelidor da BCS, desempenho, influência do IGVF
Monte verde (2016)	Água/ Glicerina-Ar Água/Isopropanol-Ar	Protótipo (1 estágio) e BCS (3 estágios)	Frações de gás, pressão de entrada, vazões de líquido, diversas rotações, inclinação da bomba	Padrões de escoamento, influência da viscosidade, tensão superficial e da pressão, viscosidade e inclinação, proposição de modelo para correção viscosa
Cubas (2017)	Água-Ar	BCS (2 estágios)	Frações de gás, pressão de entrada, velocidades de rotação, diversas rotações, inclinação da bomba	Padrões de escoamento, desempenho, influência da pressão, condições de surging e validação de modelo teóricos e numéricos

Fonte: Autor

2.3 Resumo da Revisão Bibliográfica

Na presente seção, foram apresentados diferentes conceitos básicos de escoamento bifásico que serviram para o cálculo das variáveis de interesse nas correlações propostas e uma ampla revisão bibliográfica. Foram mostradas uma vasta quantidade de trabalhos sobre escoamento bifásico focados principalmente em escoamento gás-líquido em curvas quanto em bomba centrífuga. Observou-se que há lacunas científicas na análise e explicação da formação de fenômenos físicos que acontecem ao longo de um escoamento bifásico pela complexidade que este apresenta. Há ainda a necessidade de aprimorar o cálculo desses fenômenos físicos e o cálculo da espessura do filme líquido no escoamento em bolhas ao longo de um escoamento bifásico, em dutos curvos.

Destaque-se que a relação da força de arrasto e a força centrífuga com a fração de vazio indicam o padrão de escoamento que ocorre nos canais do impelidor e a ocorrência dos fenômenos de *Surging* e *Bloqueio de gás* formadas por bolhas dispersas. O campo centrífugo causa, para grandes vazões de gás, a segregação da fase gasosa levando à formação de uma bolha alongada estacionária no rotor com grande degradação do desempenho da bomba. Em tal fenômeno, o gás é acelerado pela própria rotação da bomba e a força de arrasto não é suficiente para escoar a fase gasosa em conjunto. Entretanto, a realização de medições em tais experimentos, por exemplo, de filme de líquido, da fração de vazio e por conseguinte da velocidade da fase líquida e outros parâmetros do escoamento são extremamente complexos em tais geometrias, mas sumamente importantes. Deste modo, neste trabalho, propõem-se comparar os resultados da modelagem fenomenológica com os dados experimentais do

escoamento gás-líquido em um duto curvo de seção não-circular obtidos em conjunto e publicados no trabalho de Marçal (2021). Devido à similaridade entre os escoamentos em duto curvo e no canal do rotor de um sistema *BCS*, a visualização difícil de obter em bombas, pode ser obtida nos dutos curvos. Pode-se relacionar, portanto o que acontece em um rotor do sistema *BCS*, onde uma bolha alongada é observada em distintas angulações. Desta forma, teremos uma melhor compreensão do escoamento em rotores de bombas, ajudando no preenchimento da lacuna científica da falta de estudos neste segmento.

Apresenta-se correlações para o cálculo do filme de líquido os quais serão comparados posteriormente com os dados experimentais obtidos. O mecanismo que rege a espessura do filme líquido no escoamento anular são as forças de inércia do líquido e do gás sobre a tensão superficial. As forças de inércia tendem a mudar a forma da interface, enquanto a tensão superficial tende a manter a forma da interface. Esses dois mecanismos frequentemente competem entre si no formato da interface. O parâmetro que pode representar a força de inércia sobre a força de tensão superficial é o número de Weber. Os números de Weber enlaçam as duas forças importantes (forças inerciais e de tensão superficial) que governam a formação da espessura do filme do líquido dentro do sistema, enquanto o número de Froude do gás quantifica a interação de duas forças importantes (forças centrífugas e gravitacionais) que determinam a distribuição do fases em uma curva.

Finalmente, as correlações propostas demonstram o fato de que a maioria das variáveis importantes que afetam a espessura de filme do líquido, são: as condições de operação como as velocidades das fases líquida e gasosa, o diâmetro do tubo, as propriedades físicas das fases, e ângulo de dobra são todos considerados dentro do modelo.

3. APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia seguida para atingir os objetivos deste trabalho. Esta seção também inclui, toda a configuração experimental e sistema de visualização, os procedimentos e condições experimentais, realizados no presente trabalho. Importante destacar que a aquisição dos dados experimentais e o tratamento das imagens foi feito em conjunto, englobando o estudo de Marçal (2021) e o presente trabalho.

Será mostrado também, neste capítulo, um resumo sobre a instrumentação utilizada no aparato experimental tais como: medidores de pressão, de vazão mássica e sensores de temperatura. O projeto será apresentado de forma esquemática, indicação dos fluidos testados, o processo experimental realizado em conjunto com Marçal (2021). Os dados experimentais obtidos serão utilizados no cálculo e na análise dos resultados a serem apresentados no próximo capítulo.

3.1 Aparato Experimental e Sistema de Aquisição de Dados

Todo o aparato experimental foi construído e montado no Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente Serra” (*LABPETRO*) do Centro de Estudos de Petróleo (*CEPETRO*) da Universidade Estadual de Campinas (*UNICAMP*).

O aparato experimental foi adaptado e adequado para o experimento de duto curvo a partir de um circuito de testes já existente. O aparato experimental é constituído por um circuito fechado para a circulação de líquido (Água ou Óleo mineral) e injeção de gás (Ar comprimido).

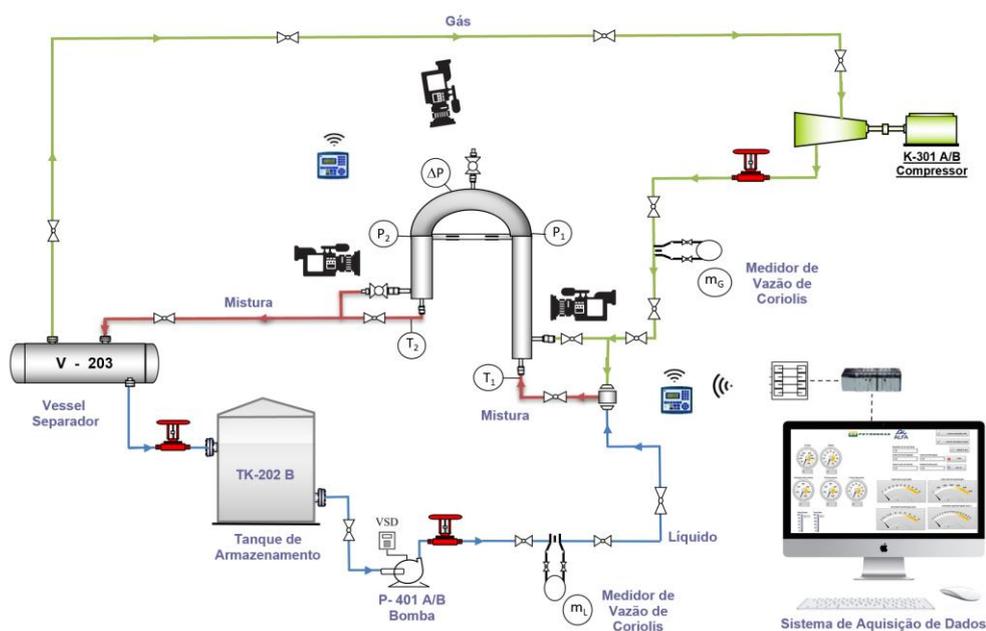


Figura 3-1. Desenho esquemático da linha de Teste

Fonte: Adaptado de Marçal (2021).

O esquema completo do aparelho experimental é mostrado na Figura 3-1. A linha verde representa a fase gasosa (*Ar*), a linha azul o líquido (Óleo mineral ou Água) e a vermelha a mistura das fases.

Detalhando o desenho esquemático, note-se que o tanque de líquido tem capacidade para 500 litros e 87 cm de diâmetro externo, sendo o líquido bombeado por uma bomba de engrenagem auxiliar para água ou óleo, que inclui um motor *WEG* (3 Hp, 1150 rpm). A bomba é controlada por variador de frequência variável (*VSD*). A vazão do escoamento monofásico (óleo/água) no circuito fechado é regulada por uma válvula de agulha automática. Esse líquido é circulado pelas tubulações fabricadas em acrílico com diâmetro interno (*ID*) de 19 mm e diâmetro externo (*DE*) de 25.3 mm (1 polegada de diâmetro nominal). A seção de teste horizontal tem cerca de 10.33 m de comprimento.

Em paralelo, é bombeada uma vazão de ar a qual é regulada por uma válvula de agulha automática e seguidamente medida a vazão por meio de um medidor de Coriolis. As duas linhas se juntam em um pequeno misturador formando um escoamento bifásico, o qual ingressa em um duto curvo de seção retangular de diâmetro 40 x 30 mm feito de acrílico.

No duto foram instalados um medidor de pressão absoluta (*Rosemount*) e dois medidores de pressão (*Rosemount*) no início e final da curvatura do duto. Também foram instalados dois sensores de temperatura (*RTD*), uma, no início e outra no final do duto curvo como é mostrado na Figura 3-1. A mistura continua seu curso pelo circuito passando pelo separador com o líquido retornando para o tanque de armazenamento. Finalmente, o sistema de aquisição de dados é composto por um microcomputador interligado ao módulo Chassis de aquisição de dados *National Instruments* com um programa desenvolvido no software *LabView* 2016. Este programa possui uma interface gráfica amigável para visualizar o estado dos sinais analógicos enviados pela instrumentação, operar os equipamentos remotos (variador da bomba *Booster*, da *BCS* e as válvulas pneumáticas *choke* e *By-pass*) e pode armazenar os dados em um arquivo digital de forma ordenada e precisa.

No programa supervisor do software *LabView* 2016, o usuário pode alterar a vazão, pressão e o número de amostras desejadas.

Além disso, cada ponto experimental gravado é imediatamente desenhado em um gráfico, permitindo observar a qualidade dos dados que estão sendo obtidos (elevação e eficiência em função da vazão) em tempo real. Na Figura 3-2, é mostrada a interface gráfica do programa (layout) supervisor e na Tabela 3-1 é mostrada, de maneira mais detalhada, a descrição dos dispositivos utilizados na coleta de dados. Para mais detalhes sobre a explicação do design do layout do software de aquisição de dados consultar a dissertação de Marçal (2021).

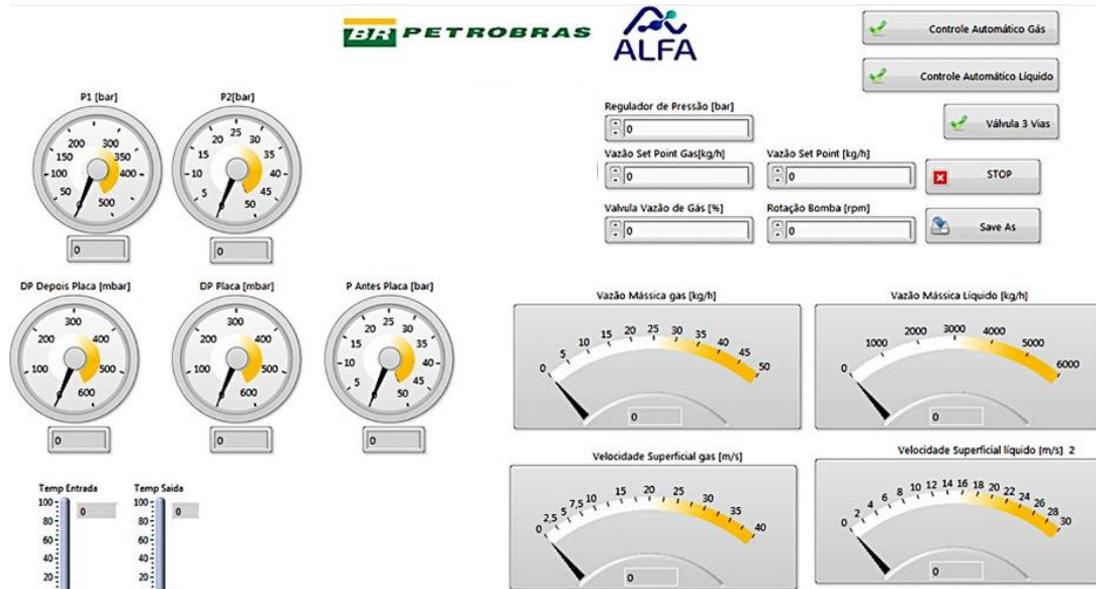


Figura 3-2. Layout Labview.

Fonte: Marçal (2021).

Tabela 3-1. Descrição de Dispositivos utilizados.

DISPOSITIVO	MODELO	DESCRIÇÃO	INCERTEZA	UNIDADE
Coriolis flow meter (MFR)	Metroval <i>RHM 12</i>	Flanges: <i>DN 25/1"</i> . Pressão máxima de trabalho: <i>15 bar</i> Faixa: <i>MFR: 10 - 6000 Kg/h</i>	$\pm 0.8\%$ (valor lido)	[kg/h]
Coriolis flow meter (MFR)	Micromotion <i>CMF15</i>	Flanges: <i>DN 25/1"</i> . Saída analógica de <i>4-20 mA</i> Faixa Operação <i>0-32650 kg/h</i> .	$\pm 0.8\%$ (valor lido)	[kg/h]
Medidor de pressão absoluta	Rosemount/Série <i>2051TG3A2B21AQ4</i>	Faixa: <i>0-2 Bar</i> . Pressão de trabalho máxima: <i>25 bar 4-20mA Hart</i>	$\pm 0.8\%$ (fundo de escala)	[Bar]
Medidores de pressão	Rosemount/Série <i>2051TG3A2B21AQ4</i>	Faixa: <i>0-2 Bar</i> . Pressão de trabalho máxima: <i>20 bar 4-20mA Hart</i>	$\pm 0.5\%$ (fundo de escala)	[Bar]
Sensor de Temperatura	PT-100/PT101	Sensor de temperatura <i>RTD</i> com faixa de operação <i>0-100 °C</i> .	$\pm 0.5\%$ (fundo de escala)	[°C]
Bomba	EDRAL-ED1 <i>1/2x60A/ P-401 A/B</i>	Motor Weg <i>3kW/100L Classe IR2</i> ; Potência: <i>3 HP</i>	[-]	[Bar]
Compressor	<i>K-301 A/B</i>	Modelo: Ingersoll-Rand Capacidade: <i>205 PCM (348,3 m³/h)</i> Pressão operacional: <i>140 PSI (9,6 bar)</i>	[-]	[Psi]
Câmera de alta definição	Canon <i>T6i</i>	Câmera com resolução máxima de <i>24,2 megapixel</i> . Vídeos em full hd a <i>30 FPS</i> e <i>ISO</i> variando de <i>100</i> até <i>12,800</i> . Processador <i>DIGIC 6</i> . Peso: <i>55 g</i> Dimensões de <i>131,9 x 100,9 x 77,8 mm</i>	[-]	[s]

DISPOSITIVO	MODELO	DESCRIÇÃO	INCERTEZA	UNIDADE
Aquisição de sinais	National Instruments <i>NI CompactDAQ 9188</i>	Chassis para módulo de aquisição de sinais com Interface de comunicação padrão <i>IEEE802.3ab Gigabit Ethernet</i> , capacidade de até 256 canais de sensores, E/S analógicos e sinais de E/S digitais.	[-]	[-]
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments <i>NI 9208</i>	Módulo de 16 canais de entrada para sinais de [-] 20 mA - [+] 20 mA	[-]	[-]
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments <i>NI 9217</i>	Módulo de 4 canais de entrada (4 RTD) para sinais de 0-400 [ohms].	[-]	[-]
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments <i>NI 9265</i>	Módulo de 4 canais de saída para sinais de 0 mA - 20 mA	[-]	[-]

Fonte: Autor

3.1 Sistema de Visualização

Toda a configuração experimental será exposta indicando cada fase antes, durante e depois da passagem na linha de teste. A Figura 3-3, mostra duas figuras onde pode-se verificar o desenho técnico em 2 e 3 dimensões do duto curvo utilizado nos experimentos. O duto tem seção retangular de 30 x 40 mm (altura x largura). A injeção é feita pela parte inferior (direita) da curva com 820 mm de comprimento como é mostrada na Figura 3-3.

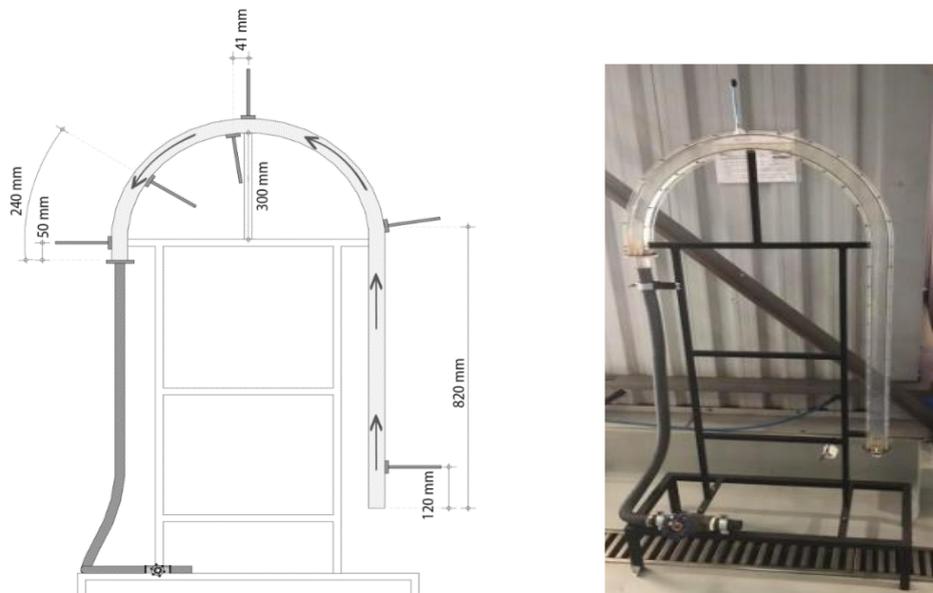


Figura 3-3. Vista frontal de desenho em 2D e 3D do duto curvo.

Fonte: Marçal (2021).

Com ajuda de uma câmera de alta velocidade foi realizada a filmagem e a análise dos diferentes padrões de escoamento nas distintas vazões mássicas de líquidos e gases medidos, presenciando a singularidade de cada padrão de escoamento. Foi necessária uma análise cuidadosa do escoamento para caracterizar o comportamento do mesmo e calcular os parâmetros hidrodinâmicos, tais como a variação de pressão ao longo do escoamento no duto curvo.

Os dados experimentais adquiridos podem ajudar a compreender melhor os fenômenos de formação da bolha alongada em um rotor de uma bomba centrífuga, fenômeno denominado *Gas Locking* e *Surging*. Também ajuda a compreender melhor a parte do ressalto hidráulico, remistura e coalescência das bolhas na entrada e na saída do tubo. Vale lembrar, porém, que o foco desse trabalho é analisar apenas a espessura do filme de líquido formado devido a presença da bolha alongada estacionária no escoamento.

3.2 Procedimentos Experimental

Define-se na Figura 3-4 o procedimento experimental utilizado em todas as rodadas por meio de um fluxograma operacional a respeito da realização dos testes e o processamento de dados. Para mais detalhes consultar a dissertação de Marçal (2021).

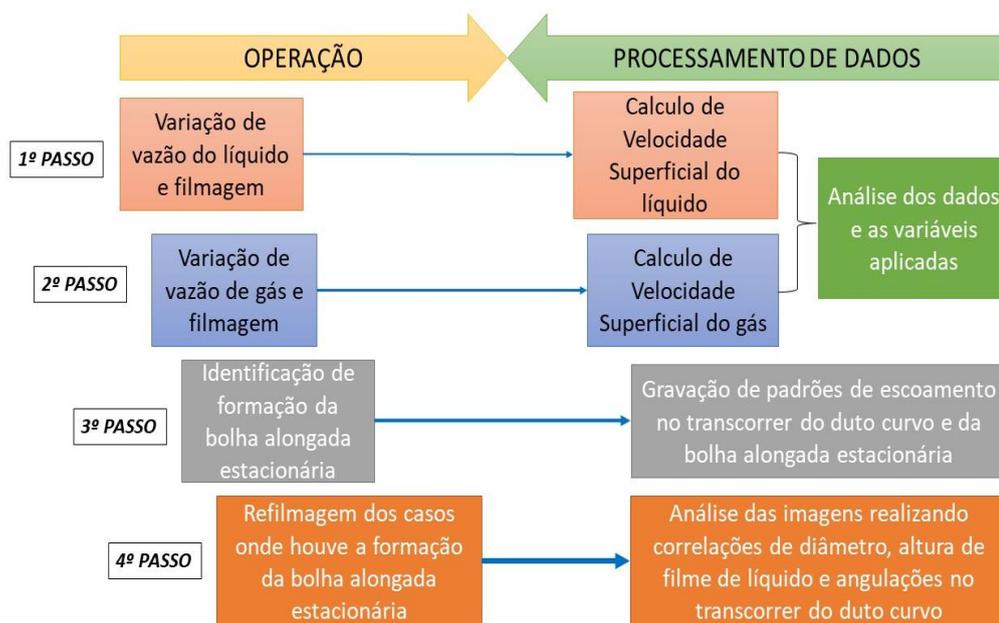


Figura 3-4: Cronograma Operacional

Fonte: Adaptado de Marçal (2021).

Os testes com água e óleo seguiram a mesma sequência para operação e aquisição de dados. Inicialmente utilizou-se o aparato experimental para variar a vazão de líquido (Água-

Óleo) que escoam dentro do duto curvo para obter os pontos de ajuste da vazão tanto do líquido quanto do gás. Dessa forma foi realizado o planejamento de uma amplitude de testes que abrangessem os parâmetros importantes a serem obtidos no escoamento.

Os dados de cada escoamento específico foram coletados pelo software *LabView* e tratados em planilha *Excel*. Foram tratados e analisados os dados e as imagens dos testes onde ocorreu a formação da bolha alongada estacionária, com a finalidade de entender a variação presente nos padrões de escoamento em distintos parâmetros e as características de escoamento no interior do duto. Dessa forma foram medidas as espessuras de filme líquido considerando as angulações no transcorrer do duto curvo. Os valores obtidos serão apresentados no Capítulo 4.

3.3 Descrição de Materiais

3.3.1 Fluidos utilizados

Foram utilizados três fluidos de trabalho: água, gás (Ar comprimido) e óleo mineral. Os fluidos foram divididos considerando dois casos de misturas diferentes: Água-Ar e Óleo-Ar, medidos na temperatura ambiente.

O comportamento dos fluidos no escoamento depende muito das condições e da influência das propriedades dos fluidos. É muito importante que conheçamos algumas condições de escoamento em questão porque as variáveis dos fluidos durante o escoamento são determinadas a partir dos dados adquiridos de laboratório ou correlações empíricas. Portanto, pode-se mencionar:

- a) **Variáveis Operacionais:** Vazão, Pressão, velocidade e temperatura.
- b) **Propriedades dos Fluidos:** massa específica (998 kg/m^3 , 860 kg/m^3 e média 1.6 kg/m^3 para a água, o óleo e o ar respectivamente) viscosidade (1 cP, 19 cP para a água e o óleo respectivamente) tensão superficial, etc.
- c) **Variáveis Geométricas:** profundidade, espessura, diâmetro, inclinação, etc.

Algumas propriedades importantes devem ser compreendidas e entendidas, porque elas podem causar certas dificuldades ou benefícios durante o escoamento. Também, são importantes para poder compreender os efeitos e a fenomenologia do que ocorre ao longo do escoamento. Maiores detalhes destes fluidos podem ser obtidos na dissertação de Marçal (2021).

3.4 Condições Experimentais

Foram realizados 341 testes de escoamentos bifásicos, sendo 141 testes com Água-Ar e 200 testes com Óleo-Ar à temperatura ambiente.

As variações nos experimentos Água-Ar e Óleo-Ar foram feitas em faixas, onde a vazão mássica de água variou de 500 kg/h a 2000 kg/h, a vazão mássica de ar de 0.09 kg/h a 1 kg/h; a vazão mássica de óleo variou entre 200 kg/h a 2600 kg/h e a vazão mássica de gás variou entre 0.07 kg/h a 5 kg/h. Considerando que a pressão operacional máxima suportada pela linha é de 3 bar, então as pressões de operação variaram de 0 até 2.5 bar. Ao mesmo tempo, o autor, observando os limites operacionais dos experimentos, restringiu as vazões mássicas em valores inferiores a 3500 kg/h para água e a 3000 kg/h para o óleo.

3.5 Calibração dos Equipamentos de Medição

Visando garantir a precisão dos dados adquiridos, alguns equipamentos de calibração foram utilizados para configurar os dispositivos de medição do aparato experimental.

Os transdutores de queda de pressão foram calibrados usando um calibrador de pressão portátil da série *Druck DPI 615 (GE)* com uma precisão de cerca de 0.025% da escala completa.

Calibrador a seco *ECIL BT* foi utilizado para configurar os sensores de temperatura com uma resolução de cerca de 0.1 °C. Na Tabela 3-2 descreve-se a precisão dos instrumentos de medição do teste.

Tabela 3-2. Descrição da Precisão dos Instrumentos de Medição do Teste.

Variável	Incerteza Relativa
ΔP	$U_{\Delta P} = \pm 0.8\%$
P_1 entrada	$U_{P_1} = \pm 0.5\%$
P_2 saída	$U_{P_2} = \pm 0.5\%$
$T_{entrada}$	$U_{T_e} = \pm 0.5\%$
$T_{saída}$	$U_{T_s} = \pm 0.5\%$
\dot{m}_{H_2O}	$U_{\dot{m}_{H_2O}} = \pm 0.8\%$
$\dot{m}_{\acute{o}leo}$	$U_{\dot{m}_{\acute{o}leo}} = \pm 0.8\%$
$\dot{m}_{g\acute{a}s}$	$U_{\dot{m}_{g\acute{a}s}} = \pm 0.8\%$

Fonte: Marçal (2021).

3.6 Metodologia

3.6.1 Tratamento dos Dados Experimentais

Os dados experimentais aqui apresentados englobam o trabalho de Marçal (2021) e o presente trabalho. Esses dados já foram publicados por Marçal (2021). O levantamento de dados experimentais foi feito em conjunto com a colaboração do presente autor e são apresentados apenas os resultados necessários para a análise da espessura do filme de líquido.

Apresenta-se um fluxograma na Figura 3-5, para o tratamento dos dados obtidos para ambos dos casos, usada para a medição da espessura do filme líquido ao longo do escoamento em distintos pontos da bolha alongada estacionária, utilizando o software *Autocad* em duas dimensões (2D), na versão de estudante e o software *Photoshop*, na versão *online*, para o tratamento preliminar das imagens. Desse modo, pode-se estimar-se, de forma simplificada, a espessura de filme do líquido e a metodologia desenvolvida para o cálculo e a análise dos resultados.

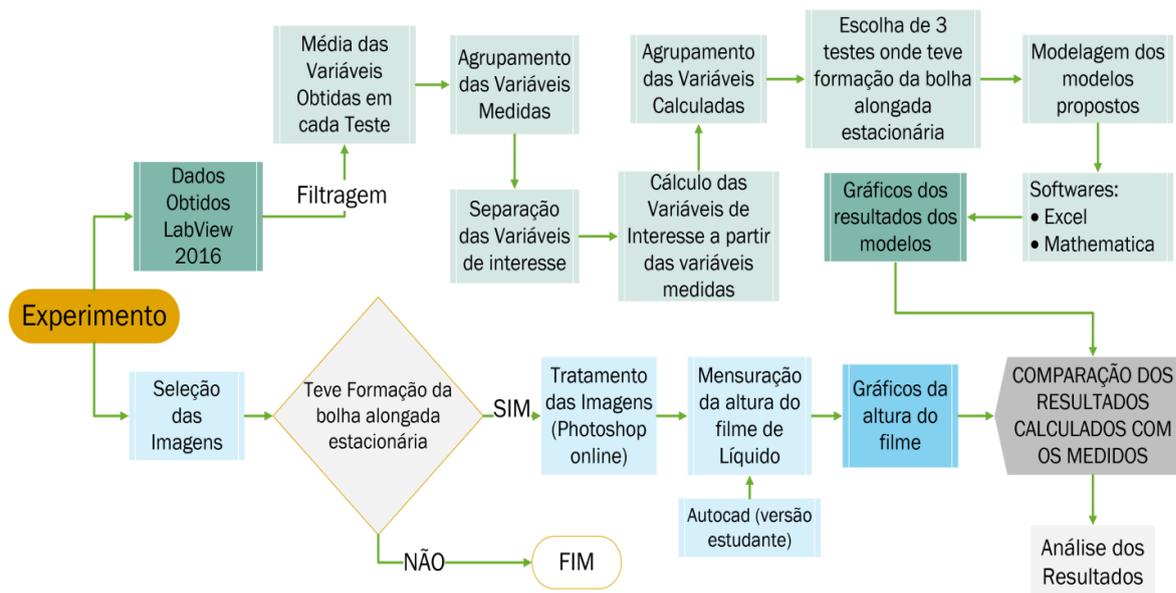


Figura 3-5: Fluxograma para Tratamento dos Dados

Fonte: Autor

3.7 Resumo do Aparato Experimental

No presente capítulo foi apresentada uma descrição de materiais e fluidos utilizados na parte experimental do escoamento bifásico, a metodologia desenvolvida e as diferentes condições experimentais para escoamento bifásico realizados em conjunto com a colaboração do presente autor e Marçal (2021).

Foi realizada a descrição e configuração detalhada do aparato experimental de duto curvo e o processamento de dados obtidos utilizados neste trabalho e já publicados na tese de Marçal (2021).

Para conseguir desenvolver com sucesso o projeto proposto, o aparato experimental indicado na Figura 3-1, utilizou uma linha de teste de circuito fechado, para dois diferentes tipos de fluidos: Água-Ar e Óleo-Ar.

Para obter dados mais precisos foram utilizados determinados equipamentos de calibração para configurar os dispositivos de medição do aparato experimental.

Os resultados a serem analisados no Capítulo 4 estão baseados nas condições experimentais anteriormente mencionadas e no fluxograma de tratamento de dados desenvolvido apresentado na Figura 3-5. Os fenômenos relacionados ao escoamento bifásico líquido-gás e formação de bolhas e bolha alongada estacionária no escoamento em duto curvo foram apresentados na Seção 2.2.

As equações básicas e modelos utilizados no cálculo dos parâmetros analisados foram indicados, em detalhes, na Seção 2.

Foram observados todos os fenômenos que acontecem ao longo do escoamento desde a entrada até a saída. Foi possível medir a espessura e o comprimento do filme de líquido através da parede lateral do duto por meio do tratamento de imagens. É recomendável automatizar este procedimento através de um software *opensource*. Neste caso, deve-se utilizar uma tinta ou corante para poder ter o contraste necessário e permitir que os softwares possam reconhecer os fluidos e realizar a mensuração mais precisa do filme do líquido e das bolhas de gás corretamente.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos.

Inicialmente são exibidos os resultados experimentais bifásicos (Óleo-Ar e Água-Ar) obtidos em conjunto com Marçal (2021). Na sequência será indicado o procedimento e ajuste do modelo bifásico para cálculo da espessura do filme de líquido e é feita a comparação dos resultados experimentais com os resultados calculados.

Considerando a revisão bibliográfica indica no capítulo 2, os modelos utilizados para previsão da espessura de filme do líquido escolhidos para este estudo foram: modelagem de Estevam (2002), a correlação de Abdulkadir *et al.* (2018) e uma correlação proposta.

Finalmente, é realizada uma análise dos fenômenos físicos que interferem na formação da bolha alongada estacionária considerando as características do filme e fenômenos para a formação da bolha que foram observadas na medição das características do filme de líquido no duto curvo de 180 graus publicado por Marçal (2021).

4.1 Agrupamento de Dados por Condição Operacional

Foram selecionados os testes, para cada condição experimental onde ocorreu a formação da bolha alongada estacionária. Foram realizadas medições de parâmetros desde o início da bolha alongada até o seu final. A Tabela 4-1 até 4-3 mostram as condições operacionais medidas e calculadas para o caso do Óleo-Ar e a Tabela 4-4 até 4-6 mostram as condições operacionais medidas e calculadas para o caso da Água-Ar.

Os dados mostrados nas próximas tabelas são dados medidos e calculados. Os dados medidos para ambos os casos Óleo-Ar como para a Água-Ar são: temperatura de entrada, pressão de entrada e da saída do duto curvo; a vazão mássica (\dot{m}_f), a massa específica (ρ_f), a espessura do filme no início e no final (H_f), o holdup da espessura do filme dos fluidos (ε_f). Os dados calculados a partir dos dados medidos foram: a fração de vazão (FLG), o holdup do líquido (λ_L), a diferença da pressão da saída e da entrada (ΔP), a vazão volumétrica (Q_f), as velocidades superficiais (J_f) e a velocidade in-situ ou real do fluido (V_f) no início e no final, os números adimensionais de Weber modificado (We_f), o número de Froude, o número de Reynolds do líquido (Re_L) e a tensão superficial (σ_L).

Tabela 4-1: Condições Operacionais Medidas – Escoamento Óleo-Ar (a)

Numero de Teste	Vazões [kg/h]		Densidade [kg/m ³]		Altura do Filme [mm]				Angulação [graus]		Pressões [bar]		Hold-up da Espessura do Filme				Temperatura [°C]
	\dot{m}_L	\dot{m}_G	ρ_L	ρ_G	H_{Li}	H_{Lf}	H_{Gi}	H_{Gf}	Θ_i	Θ_f	$P_{1\text{ entrada}}$	$P_{2\text{ saída}}$	ϵ_{Li}	ϵ_{Lf}	ϵ_{Gi}	ϵ_{Gf}	T
9	2199.13	0.09	860	1.73	36.00	6.00	4.00	34.00	101	143	1.12	0.47	0.90	0.15	0.10	0.85	27.53
10	2404.48	0.09	860	1.80	36.00	10.00	4.00	30.00	102	143	1.26	0.53	0.90	0.25	0.10	0.75	27.45
16	1612.10	0.10	860	1.56	16.27	6.53	23.73	33.47	103	163	0.75	0.33	0.41	0.16	0.59	0.84	27.91
28	1996.41	0.12	860	1.69	20.88	7.22	19.12	32.78	103	161	0.99	0.45	0.52	0.18	0.48	0.82	27.68
39	2188.65	0.19	860	1.76	22.26	3.51	17.74	36.49	103	169	1.12	0.51	0.56	0.09	0.44	0.91	27.58
40	2393.71	0.11	860	1.80	36.00	8.00	4.00	32.00	101	163	1.25	0.54	0.90	0.20	0.10	0.80	27.39
41	589.56	1.81	860	1.46	26.46	7.87	13.54	32.13	106	157	0.35	0.25	0.66	0.20	0.34	0.80	27.45
50	2391.57	0.25	860	1.86	34.55	8.00	5.45	32.00	102	167	1.29	0.59	0.86	0.20	0.14	0.80	27.45
51	2576.76	0.17	860	1.89	26.18	6.23	13.82	33.77	103	163	1.56	0.62	0.65	0.16	0.35	0.84	26.93
52	609.15	2.08	860	1.48	28.45	8.67	11.55	31.33	106	155	0.37	0.27	0.71	0.22	0.29	0.78	26.86
60	2196.31	0.60	860	1.89	25.86	7.75	14.14	32.25	104	169	1.23	0.62	0.65	0.19	0.35	0.81	27.37
61	2396.64	0.47	860	1.92	31.34	11.77	8.66	28.23	102	163	1.34	0.65	0.78	0.29	0.22	0.71	27.27
62	2532.72	0.35	860	1.95	33.33	6.15	6.67	33.85	101	160	1.54	0.67	0.83	0.15	0.17	0.85	27.13
74	600.76	2.87	860	1.48	28.81	12.40	11.19	27.60	102	163	0.37	0.27	0.72	0.31	0.28	0.69	27.22

Fonte: Autor

Tabela 4-2: Condições Operacionais Calculadas – Escoamento Óleo-Ar (b)

Numero de Teste	Vazões [m ³ /s]		Velocidades Superficiais [m/s]			Velocidade Real "In-Situ" [m/s]				Pressões [bar]		Hold-up do líquido	Fração de Vazio (FLG)
	Q_L	Q_G	J_m	J_L	J_G	V_{Li}	V_{Lf}	V_{Gi}	V_{Gf}	$\Delta P = P_1 - P_2$	P_{set}	λ	α
9	7.10E-04	1.40E-05	0.60	0.59	0.01	0.66	3.95	0.12	0.01	0.64	0.30	0.98	0.02
10	7.77E-04	1.41E-05	0.66	0.65	0.01	0.72	2.59	0.12	0.02	0.73	0.30	0.98	0.02
16	5.21E-04	1.76E-05	0.45	0.43	0.01	1.07	2.66	0.02	0.02	0.41	0.40	0.97	0.03
28	6.45E-04	2.02E-05	0.55	0.54	0.02	1.03	2.98	0.04	0.02	0.54	0.50	0.97	0.03
39	7.07E-04	3.05E-05	0.61	0.59	0.03	1.06	6.71	0.06	0.03	0.61	0.60	0.96	0.04
40	7.73E-04	1.73E-05	0.66	0.64	0.01	0.72	3.22	0.14	0.02	0.71	0.60	0.98	0.02
41	1.90E-04	3.45E-04	0.45	0.16	0.29	0.24	0.81	0.85	0.36	0.10	0.70	0.36	0.64
50	7.72E-04	3.76E-05	0.68	0.64	0.03	0.75	3.22	0.23	0.04	0.70	0.70	0.95	0.05
51	8.32E-04	2.43E-05	0.71	0.69	0.02	1.06	4.45	0.06	0.02	0.94	0.70	0.97	0.03
52	1.97E-04	3.91E-04	0.49	0.16	0.33	0.23	0.76	1.13	0.42	0.10	0.80	0.33	0.67
60	7.09E-04	8.79E-05	0.66	0.59	0.07	0.91	3.05	0.21	0.09	0.61	0.80	0.89	0.11
61	7.74E-04	6.75E-05	0.70	0.65	0.06	0.82	2.19	0.26	0.08	0.70	0.80	0.92	0.08
62	8.18E-04	5.03E-05	0.72	0.68	0.04	0.82	4.43	0.25	0.05	0.87	0.80	0.94	0.06
74	1.94E-04	5.39E-04	0.61	0.16	0.45	0.22	0.52	1.61	0.65	0.10	1.00	0.26	0.74

Fonte: Autor

Tabela 4-3: Condições Operacionais Calculadas – Escoamento Óleo-Ar (c)

Numero de Teste	Fr_{Li}	Fr_{Lf}	Fr_{Gi}	Fr_{Gf}	Re_{Li}	Re_{Lf}	We_{Li}	We_{Lf}	We_{Gi}	We_{Gf}	σ [kg/s ²]
9	0.11	0.17	0.00004	0.00007	1584.05	484.01	416.22	14983.76	3.273	0.045	0.03
10	0.13	0.21	0.00004	0.00007	1735.74	795.55	497.71	6450.33	3.33	0.06	0.03
16	0.06	0.19	0.00007	0.00022	772.07	392.49	1094.94	6797.34	0.15	0.07	0.03
28	0.09	0.26	0.00009	0.00026	1121.66	530.20	1019.85	8529.49	0.30	0.10	0.03
39	0.11	0.54	0.00020	0.00100	1291.11	317.50	1078.73	43386.07	0.79	0.19	0.03
40	0.12	0.42	0.00006	0.00021	1811.51	699.18	493.21	5225.52	4.99	0.10	0.03
41	0.01	0.02	0.02537	0.06242	382.36	169.55	55.25	624.60	172.63	30.66	0.03
50	0.13	0.54	0.00030	0.00129	1791.84	704.78	534.86	9975.99	12.69	0.37	0.03
51	0.15	0.49	0.00012	0.00042	1689.82	623.55	1080.05	19072.53	0.83	0.14	0.03
52	0.01	0.02	0.03260	0.07414	415.23	191.27	50.94	548.56	304.32	41.36	0.03
60	0.11	0.54	0.00163	0.00831	1433.74	635.81	805.24	8965.63	10.32	1.98	0.03
61	0.13	0.42	0.00096	0.00320	1729.90	954.07	652.78	4628.18	16.23	1.53	0.03
62	0.14	0.40	0.00053	0.00152	1888.07	610.32	644.45	18928.20	15.20	0.59	0.03
74	0.01	0.03	0.06103	0.20419	418.08	249.59	48.37	261.12	618.36	101.64	0.03

Fonte: Autor

Tabela 4-4: Condições Operacionais Medidos – Escoamento Água-Ar (a)

Numero de Teste	Vazões [kg/h]		Densidade [kg/m ³]		Altura do Filme [mm]				Angulação [graus]		Pressões [bar]		Hold-up da Espessura do Filme				Temperatura [°C]
	\dot{m}_L	\dot{m}_G	ρ_L	ρ_G	H_{Li}	H_{Lf}	H_{Gi}	H_{Gf}	Θ_i	Θ_f	$P_{1\text{ entrada}}$	$P_{2\text{ saída}}$	ϵ_{Li}	ϵ_{Lf}	ϵ_{Gi}	ϵ_{Gf}	T
10	998.02	0.15	996.64	1.24	24.36	1.27	15.64	38.73	83	164	0.206	0.057	0.61	0.03	0.39	0.97	25.20
11	1064.83	0.18	996.64	1.25	20.3	2.94	19.7	37.06	85	156	0.217	0.059	0.51	0.07	0.49	0.93	25.09
12	1257.96	0.14	996.64	1.25	23.49	3.51	16.51	36.49	86	152	0.252	0.065	0.59	0.09	0.41	0.91	25.08
13	1313.78	0.13	996.64	1.26	26.06	4.39	13.94	35.61	88	145	0.269	0.069	0.65	0.11	0.35	0.89	25.16
14	1393.21	0.11	996.64	1.26	28.11	5.59	11.89	34.41	88	141	0.286	0.074	0.70	0.14	0.30	0.86	25.14
15	1499.13	0.10	996.64	1.27	24.98	5.29	15.02	34.71	90	137	0.313	0.081	0.62	0.13	0.38	0.87	25.12
18	1779.16	0.17	996.64	1.34	34	3.57	6	36.43	95	152	0.424	0.134	0.85	0.09	0.15	0.91	22.82
19	1879.26	0.14	996.64	1.36	36.36	5.45	3.64	34.55	94	151	0.461	0.147	0.91	0.14	0.09	0.86	22.90
20	1995.08	0.13	996.64	1.37	35.38	6.00	4.62	34.00	95	144	0.501	0.157	0.88	0.15	0.12	0.85	22.91
41	1682.67	0.32	996.64	1.34	21.52	0.97	18.48	39.03	97	160	0.411	0.142	0.54	0.02	0.46	0.98	24.88
42	1808.36	0.31	996.64	1.36	33.33	3.60	6.67	36.40	95	158	0.453	0.156	0.83	0.09	0.17	0.91	24.87
43	1909.78	0.28	996.64	1.39	34.55	5.45	5.45	34.55	94	158	0.505	0.182	0.86	0.14	0.14	0.86	24.87
44	2003.60	0.26	996.64	1.41	24.85	2.89	15.15	37.11	100	156	0.541	0.196	0.62	0.07	0.38	0.93	24.78

Fonte: Autor

Tabela 4-5: Condições Operacionais Calculadas – Escoamento Água-Ar (b)

Numero de Teste	Vazões [m ³ /s]		Velocidades Superficiais [m/s]			Velocidade Real "In-Situ" [m/s]				Pressões [bar]		Hold-up do líquido	Fração de Vazio (FLG)
	Q_L	Q_G	J_m	J_L	J_G	V_{Li}	V_{Lf}	V_{Gi}	V_{Gf}	$\Delta P = P_1 - P_2$	P_{set}	λ	α
10	2.78E-04	3.24E-05	0.259	0.232	0.027	0.381	7.301	0.069	0.028	0.149	0.2	0.90	0.10
11	2.97E-04	4.07E-05	0.281	0.247	0.034	0.487	3.365	0.069	0.037	0.158	0.2	0.88	0.12
12	3.51E-04	3.14E-05	0.318	0.292	0.026	0.498	3.330	0.063	0.029	0.187	0.2	0.92	0.08
13	3.66E-04	2.78E-05	0.328	0.305	0.023	0.468	2.780	0.066	0.026	0.200	0.2	0.93	0.07
14	3.88E-04	2.47E-05	0.344	0.324	0.021	0.460	2.315	0.069	0.024	0.213	0.2	0.94	0.06
15	4.18E-04	2.16E-05	0.366	0.348	0.018	0.558	2.633	0.048	0.021	0.232	0.2	0.95	0.05
18	4.96E-04	3.47E-05	0.442	0.413	0.029	0.486	4.630	0.193	0.032	0.290	0.3	0.93	0.07
19	5.24E-04	2.89E-05	0.461	0.436	0.024	0.480	3.204	0.265	0.028	0.314	0.3	0.95	0.05
20	5.56E-04	2.60E-05	0.485	0.463	0.022	0.524	3.089	0.188	0.025	0.344	0.3	0.96	0.04
41	4.69E-04	6.59E-05	0.446	0.391	0.055	0.726	16.116	0.119	0.056	0.270	0.4	0.88	0.12
42	5.04E-04	6.36E-05	0.473	0.420	0.053	0.504	4.667	0.318	0.058	0.297	0.4	0.89	0.11
43	5.32E-04	5.59E-05	0.490	0.444	0.047	0.514	3.256	0.342	0.054	0.322	0.4	0.90	0.10
44	5.58E-04	5.16E-05	0.508	0.465	0.043	0.749	6.441	0.114	0.046	0.345	0.4	0.92	0.08

Fonte: Autor

Tabela 4-6: Condições Operacionais Calculadas – Escoamento Água-Ar (c)

Numero de Teste	Fr _{Li}	Fr _{Lf}	Fr _{Gi}	Fr _{Gf}	Re _{Li}	Re _{Lf}	We _{Li}	We _{Lf}	We _{Gi}	We _{Gf}	σ [kg/s ²]
10	0.02	0.06	2.17E-04	7.81E-04	6592.85	597.52	68.76	25297.05	0.56	0.09	0.072
11	0.02	0.04	3.42E-04	8.37E-04	6337.21	1401.50	112.71	5373.58	0.56	0.16	0.072
12	0.03	0.05	2.03E-04	4.32E-04	8148.80	1943.64	117.48	5261.56	0.48	0.10	0.072
13	0.03	0.05	1.58E-04	2.76E-04	9011.83	2474.71	104.11	3668.70	0.52	0.08	0.072
14	0.03	0.05	1.25E-04	1.99E-04	9947.99	3230.05	100.63	2544.53	0.57	0.07	0.072
15	0.04	0.05	9.57E-05	1.40E-04	10059.79	3318.98	147.53	3289.72	0.27	0.05	0.072
18	0.05	0.11	2.48E-04	5.27E-04	13546.11	2711.64	112.17	10173.93	4.41	0.12	0.072
19	0.06	0.12	1.72E-04	3.54E-04	14769.33	4144.04	109.43	4870.52	8.30	0.09	0.072
20	0.06	0.11	1.39E-04	2.36E-04	15488.46	4770.28	130.26	4529.12	4.17	0.08	0.072
41	0.05	0.13	8.98E-04	2.61E-03	10291.18	771.67	250.44	123267.76	1.67	0.38	0.072
42	0.05	0.14	8.34E-04	2.22E-03	13946.04	2839.15	120.59	10336.19	11.98	0.40	0.072
43	0.06	0.16	6.42E-04	1.71E-03	14984.34	4303.94	125.16	5030.02	13.84	0.34	0.072
44	0.06	0.16	5.55E-04	1.34E-03	13320.69	2583.51	266.30	19688.90	1.53	0.25	0.072

Fonte: Autor

Para caracterizar o filme de líquido, há que se medir a evolução da espessura do filme e o comprimento correspondente à condição de regime permanente. Na Tabela 4-7 a 4-12, são apresentados os dados experimentais agrupados e as configurações básicas de cinco diferentes testes escolhidos aleatoriamente onde ocorreu a formação da bolha alongada estacionária para o caso de escoamento bifásico Óleo-Ar.

Tabela 4-7. Configuração dos dados experimentais de entrada Óleo-Ar

TESTE	PRESSÃO [Bar]	\dot{m}_L [kg/h]	\dot{m}_G [kg/h]	T [°C]
9	0.4	2200	0.1	27.5
10	0.5	2400	0.1	27.4
40	0.5	2400	0.1	27.4
50	0.6	2400	0.3	27.4
62	0.7	2500	0.4	27.1

Fonte: Autor

Tabela 4-8. Descrição dos dados experimentais, Teste 9 (Óleo-Ar)

Teste	q _L [m ³ /s]	q _G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	H _L Medido [mm]	We _L	We _G	Fr _G
9	7.11E-04	1.40E-05	860	101	36.00	416.22	3.27	4.10E-05
				110	20.00	1348.54	0.13	4.29E-05
				117	16.00	2107.09	0.09	4.52E-05
				125	12.00	3745.94	0.07	4.92E-05
				130	10.00	5394.16	0.06	5.26E-05
				143	6.00	14983.77	0.05	6.69E-05

Fonte: Autor

Tabela 4-9. Descrição dos dados experimentais, Teste 10 (Óleo-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
10	7.75E-04	1.41E-05	860	102	36.00	497.71	3.33	4.19E-05
				112	20.00	1612.58	0.13	4.42E-05
				117	18.00	1990.84	0.11	4.60E-05
				130	14.00	3290.98	0.08	5.35E-05
				136	12.00	4479.40	0.07	5.90E-05
				143	10.00	6450.33	0.06	6.81E-05

Fonte: Autor

Tabela 4-10. Descrição dos dados experimentais, Teste 40 (Óleo-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
40	7.75E-04	1.73E-05	860	101	36.00	493.21	4.99	6.26E-05
				103	30.00	710.23	0.80	6.30E-05
				117	16.00	2496.89	0.14	6.89E-05
				130	12.00	4438.92	0.10	8.02E-05
				143	10.00	6392.05	0.09	1.02E-04
				163	8.00	9987.57	0.08	2.10E-04

Fonte: Autor

Tabela 4-11. Descrição dos dados experimentais, Teste 50 (Óleo-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
50	7.75E-04	3.74E-05	860	102	34.55	534.86	12.69	2.96E-04
				104	29.09	754.48	3.17	2.99E-04
				117	18.18	1931.74	0.79	3.25E-04
				130	12.73	3939.85	0.51	3.78E-04
				143	10.00	6384.63	0.42	4.81E-04
				167	8.00	9975.99	0.37	1.29E-03

Fonte: Autor

Tabela 4-12. Descrição dos dados experimentais, Teste 62 (Óleo-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
62	8.07E-04	5.0E-05	860	101	33.33	644.45	15.20	5.30E-04
				105	28.89	857.76	5.48	5.38E-04
				118	15.56	2956.93	1.13	5.89E-04
				131	12.31	4724.36	0.88	6.89E-04
				143	9.23	8403.42	0.71	8.64E-04
				160	6.15	18928.20	0.59	1.52E-03

Fonte: Autor

O comprimento da bolha alongada estacionária é a diferença entre o comprimento do arco total menos o comprimento do arco do início da bolha. Ou seja, o comprimento da bolha estacionária é dado pela diferença do ângulo final da bolha menos o início da bolha vezes o raio médio. No Anexo I, se apresentam as Figura I-1 a I-5 correspondentes a espessura do filme do líquido medido experimentalmente em função do comprimento da bolha alongada estacionária do início até o final do filme para o caso do Óleo-Ar.

Na Tabela 4-13 a 4-18, são apresentados os dados experimentais escolhidos aleatoriamente também da mesma forma que foi apresentado no caso anterior, onde ocorreu a formação da bolha alongada estacionária para o escoamento bifásico Água-Ar.

Tabela 4-13. Configuração dos dados experimentais de entrada Água-Ar

TESTE	PRESSÃO [Bar]	\dot{m}_L [kg/h]	\dot{m}_G [kg/h]	T [°C]
18	0.4	1800	0.17	22.8
19	0.3	1800	0.14	22.9
20	0.5	2000	0.13	22.9
42	0.4	1600	0.32	27.9
43	0.4	1900	0.28	24.9

Fonte: Autor

Tabela 4-14. Descrição dos dados experimentais, Teste 18 (Água-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
18	5.02E-04	3.47E-04	997	95	34.00	112.17	4.41	2.48E-04
				108	14.00	661.56	0.24	2.60E-04
				120	10.00	1296.66	0.18	2.86E-04
				129	8.89	1640.67	0.16	3.18E-04
				137	6.67	2914.56	0.14	3.63E-04
				151	4.44	6577.47	0.13	5.10E-04

Fonte: Autor

Tabela 4-15. Descrição dos dados experimentais, Teste 19 (Água-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
19	5.02E-04	2.87E-05	997	94	36.36	109.43	8.30	1.72E-04
				104	18.18	437.70	0.23	1.77E-04
				112	10.91	1215.40	0.13	1.85E-04
				121	9.09	1750.82	0.12	2.00E-04
				133	7.27	2737.16	0.10	2.34E-04
				151	5.45	4870.52	0.09	3.54E-04

Fonte: Autor

Tabela 4-16. Descrição dos dados experimentais, Teste 20 (Água-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
20	5.57E-04	2.60E-05	997	95	35.38	130.26	4.17	1.39E-04
				105	16.92	569.53	0.17	1.43E-04
				114	12.31	1075.97	0.12	1.52E-04
				123	10.00	1630.48	0.10	1.65E-04
				133	8.00	2547.63	0.09	1.89E-04
				144	6.00	4529.12	0.08	2.36E-04

Fonte: Autor

Tabela 4-17. Descrição dos dados experimentais, Teste 42 (Água-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
42	4.46E-04	6.53E-05	997	95	33.33	120.59	11.98	8.34E-04
				104	18.89	375.41	1.20	8.56E-04
				117	8.90	1691.16	0.55	9.32E-04
				131	6.01	3708.66	0.46	1.10E-03
				143	4.00	8372.32	0.41	1.38E-03
				158	3.60	10336.19	0.40	2.22E-03

Fonte: Autor

Tabela 4-18. Descrição dos dados experimentais, Teste 43 (Água-Ar)

Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	θ [graus]	H_L Medido [mm]	We_L	We_G	Fr_G
43	5.30E-04	5.59E-05	997	94	34.55	125.16	13.84	6.42E-04
				105	18.18	452.04	0.86	6.63E-04
				118	10.91	1255.20	0.49	7.26E-04
				130	9.09	1808.15	0.43	8.37E-04
				142	8.00	2334.44	0.40	1.04E-03
				158	5.45	5030.02	0.34	1.71E-03

Fonte: Autor

No Anexo I, as Figura I-6 a I-10 mostram a espessura do filme do líquido medido experimentalmente em função do comprimento da bolha alongada estacionária do início até o final do filme para o caso da Água-Ar.

Note-se que depois de analisar e comparar os diferentes números de testes presentes tanto no Óleo-Ar como na Água-Ar, a formação da bolha alongada estacionária ocorre geralmente no regime de escoamento de entrada de padrão bolhas.

4.2 Correlação Abdulkadir *et al.* (2018) para Cálculo da Espessura do Filme

A correlação proposta por Abdulkadir *et al.* (2018) foi definido no capítulo 2 na Eq. (2-28).

$$\delta = 28.4061 We_L^{-0.10318} We_G^{-0.30954} Fr_G^{-0.31423} \quad Eq. (2-28)$$

Decidiu-se fazer o cálculo para um teste de cada caso com a Eq. (2-28) e foram comparados com os dados medidos experimentalmente neste projeto. Os resultados da correlação proposta por Abdulkadir *et al.* (2018) aplicado e comparados com os dados experimentais deste estudo são apresentados na Figura 4-1 para o caso do fluido Óleo-Ar. Os resultados comparados para o caso Água-Ar estão indicados na Figura 4-2.

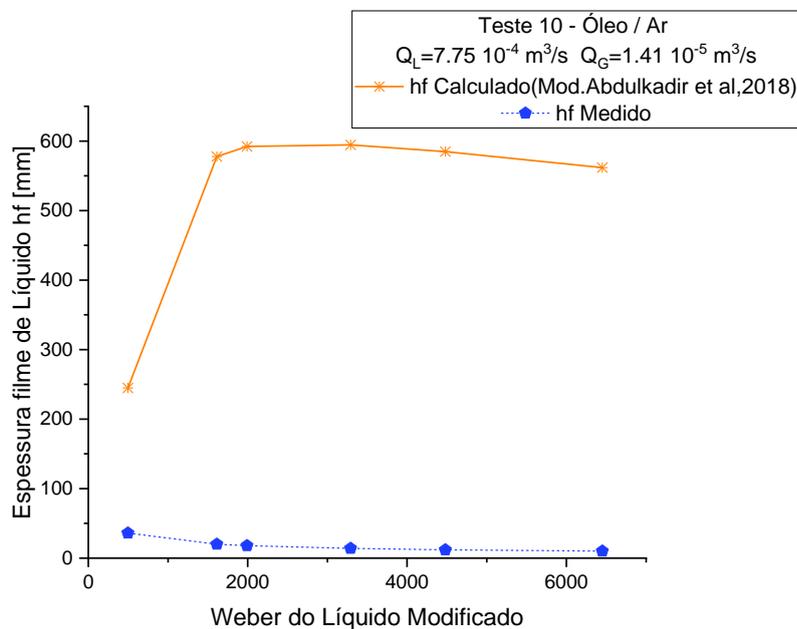


Figura 4-1: Weber do Líquido Modificado vs a Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Abdulkadir *et al.* 2018) , Teste 10 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

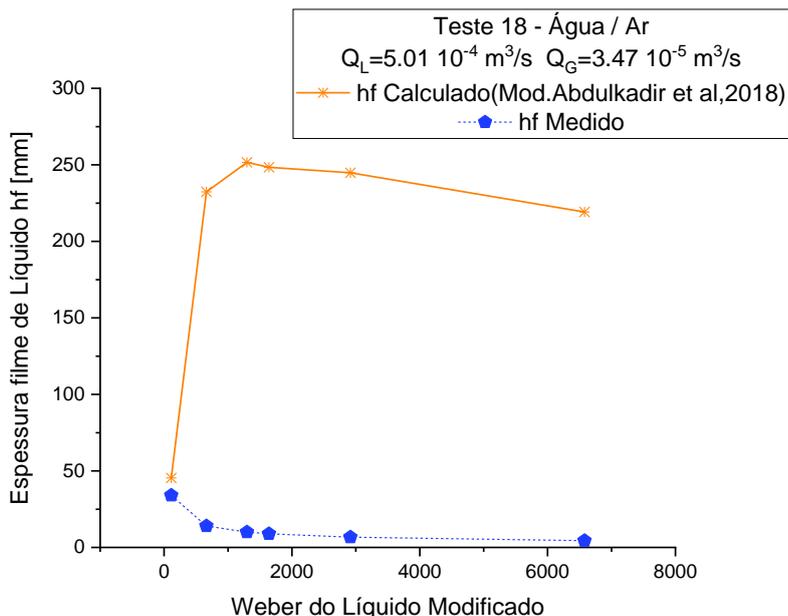


Figura 4-2: Weber do Líquido Modificado vs a Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Abdulkadir *et al.* 2018), Teste 18 (Água-Ar)

Fonte: Autor

Pode-se observar, em ambos os gráficos, que o resultado é diferente e não tem relação com os valores medidos porque são condições experimentais diferentes. A correlação experimental de Abdulkadir *et al.* (2018) foi desenvolvida para filme de líquido considerando dados de um escoamento anular observado em seus experimentos. Daí a importância de considerar as variáveis devido ao gás e do líquido (We_L , We_G e Fr_G). Porém, no presente trabalho o escoamento, tem um filme de líquido com formação de bolha alongada estacionária sem movimento de gás nesse volume de controle. A coalescência de bolha no início do filme de líquido e retirada de bolhas no seu final estão fora do volume de controle analisado. Em função dessas considerações, pode-se concluir que a correlação proposta por Abdulkadir *et al.* (2018) não é aplicável para este estudo.

Além disso, a adaptação da correlação para o caso em estudo, também não dará resultado coerente porque a correlação do Abdulkadir *et al.* (2018) foi obtida em padrão de escoamento onde a velocidade do gás é superior à velocidade do líquido, o que não ocorre no escoamento em padrão bolhas no duto curvo com formação de bolha alongada onde a velocidade do gás é praticamente nula.

4.3 Correlação Proposta para Cálculo da Espessura do Filme de Líquido

Até o momento, os modelos e as correlações para cálculo da espessura de filme do líquido são limitados a tubos verticais e horizontais. Esses modelos foram baseados em intervalos

limitados de dados experimentais. Além disso, iterações exaustivas são necessárias quando esses modelos são utilizados para estimar a espessura do filme do líquido. Desse modo, não são muito práticos para utilizar na indústria.

Nesta pesquisa, foi considerado o número de Froude do líquido modificado calculado para a velocidade superficial do líquido como o número adimensional que depende dos valores de θ . A faixa visualizada no experimento indicaram o início e o final de bolha alongada estacionária formada entre 90° e 100° até 150° e 160° graus na curvatura do duto utilizado no aparato experimental.

Propõe-se uma nova correlação experimental para estimar a espessura do filme em duto curvo com seção retangular, baseada no procedimento da correlação proposta por Abdulkadir *et al.* (2018) quando tem-se a formação de bolha alongada estacionária sem movimento de gás, definida na sua adimensionalizada por:

$$\frac{\delta}{D_H} = C(Fr_{\theta L})^x \quad \text{Eq. (4-1)}$$

Onde: δ é a espessura de filme do líquido, $Fr_{\theta L}$ é o número de Froude do líquido (Eq. (2-12)). Consideramos que C (constante empírica) e x (expoente empírico) dependem dos valores experimentais obtidos.

$$Fr_{\theta L} = \frac{J_L^2}{\left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}\right) R g \sin \theta} \left[1 - \frac{\rho_G J_G^2}{\rho_L J_L^2} \right] \quad \text{Eq. (2-12)}$$

O coeficiente (C) e o expoente (x) foram obtidos através de análise gráfica de resultados. O procedimento para obtenção dos valores do coeficiente e do expoente considerou a análise gráfica visando reduzir o erro. Foram adotados os seguintes passos para ambos os casos:

- (a) Utilizar uma planilha *Excel*;
- (b) Considerar os resultados obtidos indicados na Figura 4-3 até 4-8 para Óleo-Ar e Água-Ar respectivamente;
- (c) Considerar que os resultados experimentais apresentam duas inclinações quando plotados em relação ao número de Froude do líquido. Deve-se inserir, portanto, apenas os primeiros pontos do início da bolha (espessura de filme acima de 20 mm);

- (d) Descartar os demais pontos pertencentes a outra inclinação, porque não há uma acomodação única de curva exponencial para todos os pontos;
- (e) Obter uma linha de tendência com equação e valor de R^2 considerando a característica de potência para essa condição;
- (f) Acrescentar os pontos com espessura de filme abaixo de 20 mm. A curva de tendência foi se ajustando para esses novos pontos;
- (g) Obter uma equação geral para todos os pontos através da linha de tendência com o respectivo valor de R^2 ;
- (h) Calcular os valores de espessura de filme considerando as equações gerais obtidas nos itens anteriores;
- (i) Ajustar o coeficiente e expoente de cada equação para minimizar o erro;
- (j) Verificar o limite de valores de $Fr_{\theta L}$ para cada uma das 2 inclinações da curva final obtida conforme indicado na Figura 4-3 até 4-8 para Óleo-Ar e Água-Ar respectivamente;
- (k) Obter a correlação considerando os valores limites de validade indicados no item anterior.

Todos os pontos estão representados na aplicação da correlação. Deve-se ressaltar que na transição das inclinações, precisaremos de mais pontos para definir a real fronteira referente ao número de Froude de líquido.

4.3.1 Resultados para o caso Óleo-Ar

Considerando os dados experimentais obtidos em 3 testes selecionados (Teste 10, Teste 40 e Teste 50) para o escoamento Óleo-Ar, foram calculados os valores de $Fr_{\theta L}$ pela Eq. (2-12), baseado na Eq. (4-1). A seguir foram obtidos os valores dos coeficientes e expoentes conforme procedimento descrito anteriormente. A correlação proposta para o escoamento Óleo-Ar será obtida através de:

$$\frac{\delta}{D_H} = 0,050 (Fr_{\theta L})^{-1.38} \text{ se } Fr_{\theta L} < 0.13 \quad \text{Eq. (4-2)}$$

$$\frac{\delta}{D_H} = 0,038 (Fr_{\theta L})^{-1.30} \text{ se } Fr_{\theta L} \geq 0.13 \quad \text{Eq. (4-3)}$$

Os limites de validade, considerando o valor de $Fr_{\theta L}$ (mudança de inclinação nas curvas), afetam os valores da espessura de filme de líquido obtidos. Nas Tabelas (Tabela 4-19 até 4-21)

e Figuras (Figura 4-3 até 4-5) estão apresentados os resultados calculados através da correlação proposta.

Tabela 4-19: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 10 (Óleo-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	Fr_{eL}	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
10	7.77E-04	1.41E-05	860	1.80	0.13	102	0.0	36.0	1.2	0.9	30.0
					0.13	112	60.2	20.0	0.7	0.5	24.2
					0.14	117	90.3	18.0	0.6	0.5	20.1
					0.16	130	168.6	14.0	0.5	0.4	15.6
					0.18	136	204.7	12.0	0.4	0.4	13.3
					0.21	143	246.9	10.0	0.3	0.3	13.6

Fonte: Autor

Tabela 4-20: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 40 (Óleo-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	Fr_{eL}	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
40	7.73E-04	1.73E-05	860	1.80	0.13	101	0.0	36.0	1.2	0.9	28.7
					0.13	103	12.0	30.0	1.0	0.9	15.4
					0.14	117	96.3	16.0	0.5	0.5	9.0
					0.16	130	174.6	12.0	0.4	0.4	0.3
					0.20	143	252.9	10.0	0.3	0.3	12.6
					0.42	163	373.3	8.0	0.3	0.1	57.3

Fonte: Autor

Tabela 4-21: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 50 (Óleo-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	Fr_{eL}	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
50	7.72E-04	3.76E-05	860	1.86	0.13	102	0.0	34.6	1.2	0.9	25.9
					0.13	104	12.0	29.1	1.0	0.9	13.0
					0.14	117	90.3	18.2	0.6	0.5	19.8
					0.16	130	168.6	12.7	0.4	0.4	5.8
					0.20	143	246.9	10.0	0.3	0.3	12.4
					0.55	167	391.4	8.0	0.3	0.1	69.5

Fonte: Autor

Fazendo uma análise dos resultados obtidos e comparando com os valores medidos tem-se um erro significativo em alguns pontos, devido às incertezas na medição do ângulo (1°) e da espessura do filme medido (1 mm) por Marçal (2021). Esses valores foram obtidos através de medição em imagens e manualmente. Mas se tivesse sido utilizado, por exemplo, uma medição direta com ultrassom, o erro relativo poderia ser menor. Destaque-se que os valores da espessura

do filme do líquido medido e calculado mostrados nas tabelas anteriores foram adimensionalizados.

As Figuras 4-3 até 4-5 mostram os resultados da espessura do filme do líquido medido adimensionalizada em função do Froude do líquido modificado, para o caso do escoamento Óleo-Ar de acordo com os resultados indicados nas Tabelas (4-19 até 5-21).

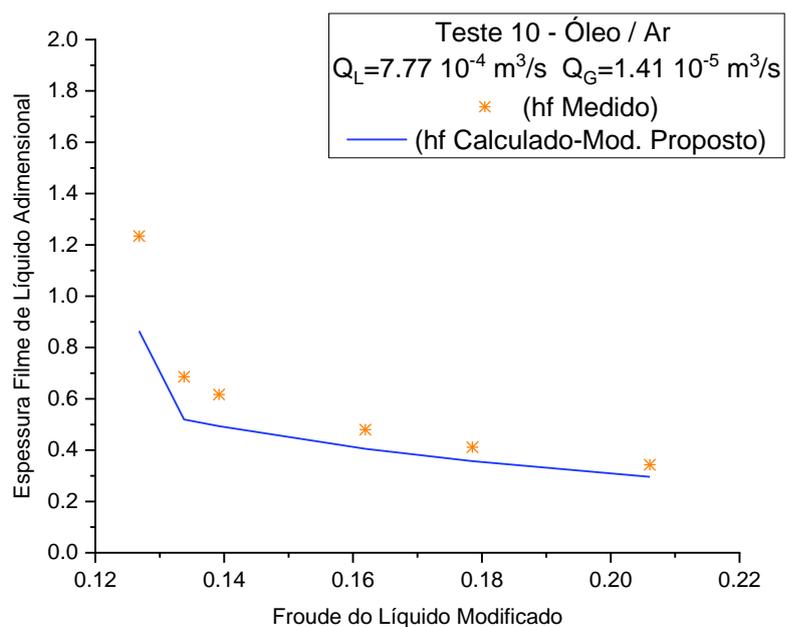


Figura 4-3: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 10 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

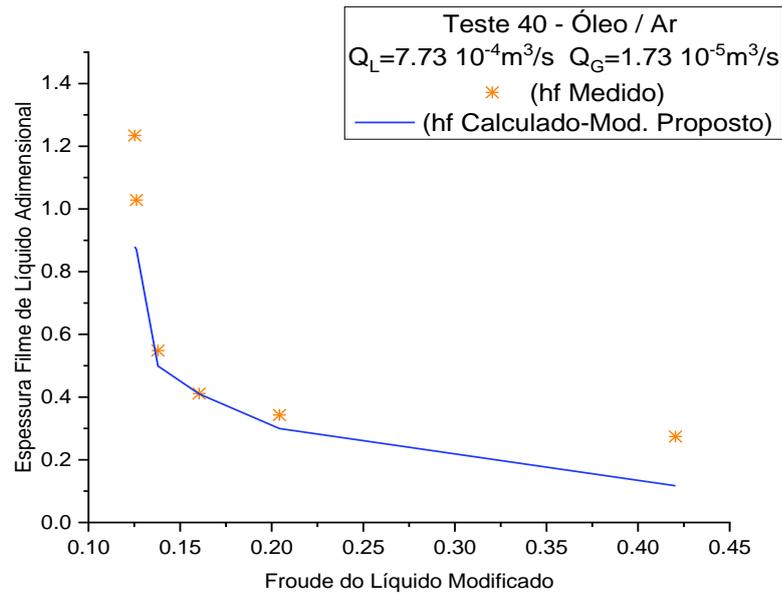


Figura 4-4: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 40 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

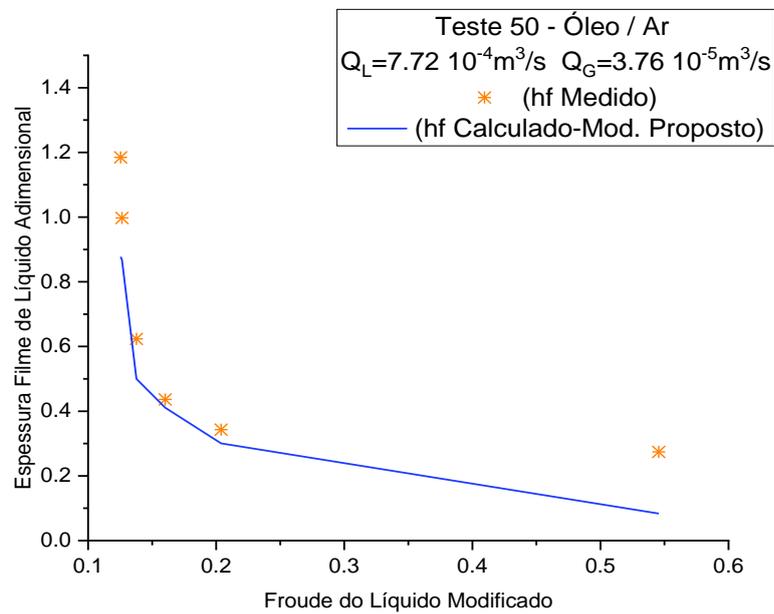


Figura 4-5: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 50 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

4.3.2 Resultados para o caso Água-Ar

Adotando as mesmas considerações e procedimentos do item anterior (escoamento Óleo-Ar) foram obtidas as seguintes equações para a correlação proposta no escoamento Água-Ar aplicados no Teste 18, Teste 19 e Teste 42):

$$\frac{\delta}{D_H} = 0,032 (Fr_{\theta L})^{-1.15} \text{ se } Fr_{\theta L} \leq 0.06 \quad \text{Eq. (4-4)}$$

$$\frac{\delta}{D_H} = 0,025 (Fr_{\theta L})^{-0.85} \text{ se } Fr_{\theta L} > 0.06 \quad \text{Eq. (4-5)}$$

As Tabelas (Tabela 4-22 até 4-24) e Figuras (Figura 4-6 até 4-8) mostram os resultados calculados considerando essa correlação proposta.

Tabela 4-22: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 18 (Água-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	$Fr_{\theta L}$	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
18	4.96E-04	3.47E-05	997	1.34	0.05	95	0.0	34.0	1.2	1.0	15.3
					0.05	108	78.3	14.0	0.5	0.9	94.9
					0.06	120	150.5	10.0	0.3	0.3	18.4
					0.07	129	204.7	8.9	0.3	0.3	16.3
					0.07	137	252.9	6.7	0.2	0.2	0.1
					0.10	151	337.2	4.4	0.2	0.2	12.3

Fonte: Autor

Tabela 4-23: Resultado da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 19 (Água-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	$Fr_{\theta L}$	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
19	5.24E-04	2.89E-04	997	1.36	0.06	94	0.0	36.4	1.2	0.9	30.1
					0.06	104	60.2	18.2	0.6	0.3	54.9
					0.06	112	108.4	10.9	0.4	0.3	27.8
					0.07	121	162.6	9.1	0.3	0.3	18.9
					0.08	133	234.8	7.3	0.2	0.2	11.4
					0.12	151	343.2	5.5	0.2	0.2	16.7

Fonte: Autor

Tabela 4-24: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (modelo proposto), Teste 42 (Água-Ar)

TESTE	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_G [kg/m ³]	Fr_{el}	Θ [graus]	Comprimento da bolha [mm]	$h_{fMedido}$ [mm]	Espessura filme Líquido adimensional Medido	Espessura filme Líquido adimensional Calculado	Erro Relativo [%]
42	5.04E-04	6.36E-05	997	1.36	0.05	95	0.0	33.3	1.1	1.0	16.8
					0.05	104	54.2	18.9	0.6	0.9	42.4
					0.06	117	132.5	8.9	0.3	0.3	8.6
					0.07	131	216.8	6.0	0.2	0.2	17.5
					0.09	143	289.0	4.0	0.1	0.2	45.7
					0.14	158	379.3	3.6	0.1	0.1	8.2

Fonte: Autor

Fazendo uma análise dos valores calculados com a correlação proposta com os valores medidos pode-se observar um erro significativo para alguns pontos. Destaque-se que os valores da espessura do filme do líquido medido e calculado foram adimensionalizados.

As Figuras 4-6 até 4-8 mostram os resultados da espessura do filme do líquido medido e calculado em função do Froude do líquido modificado, para o caso do escoamento Água-Ar baseado nos resultados indicados nas Tabelas 4-22 até 4-24.

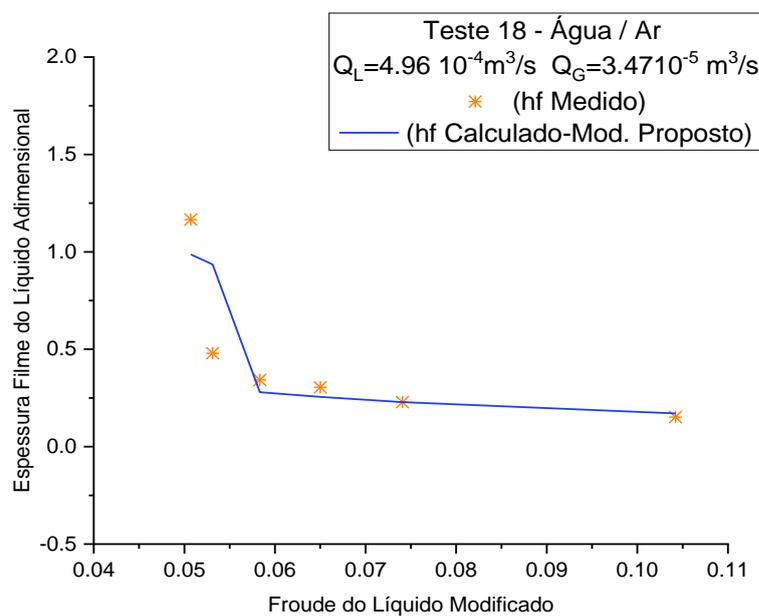


Figura 4-6: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 18 (Água-Ar)

Fonte: Autor

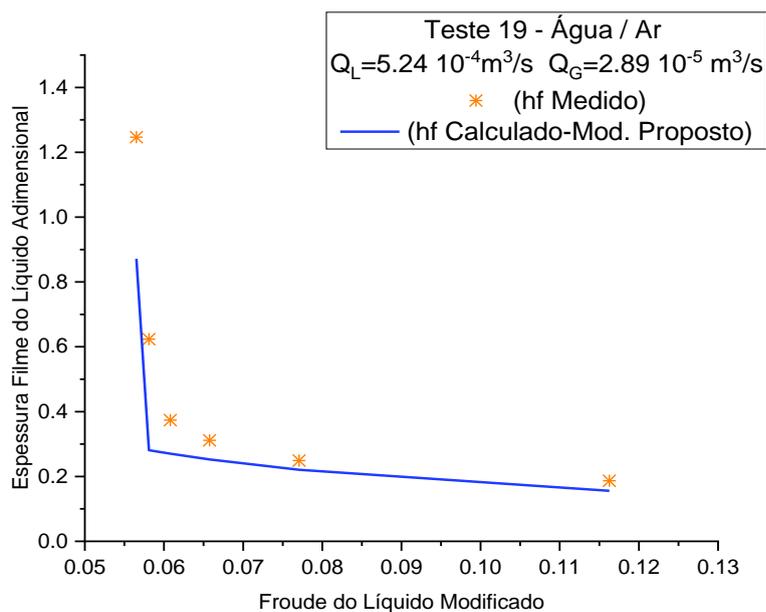


Figura 4-7: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 19 (Água-Ar)

Fonte: Autor

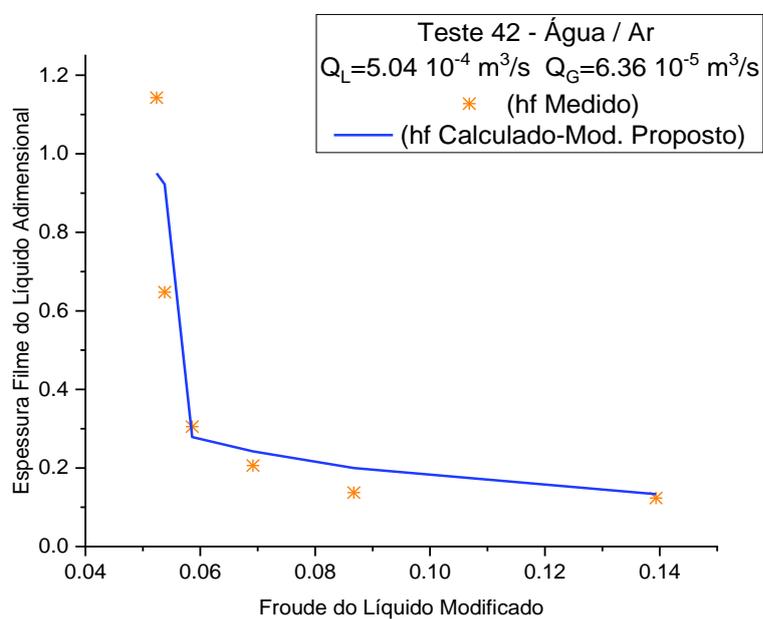


Figura 4-8: Froude do líquido modificado vs Espessura Filme do Líquido medido e calculado (Mod. Proposto), Teste 42 (Água-Ar)

Fonte: Autor

No Anexo I as Figuras I-1 até I-10 mostram os resultados da espessura do filme do líquido medido e calculado em função do comprimento da bolha alongada estacionária, para caso do Óleo-Ar e da Água-Ar, respectivamente.

Na Figura 4-9 e Figura 4-10 destaque-se igual que o caso do modelo anterior a comparação dos resultados de valores calculados com os valores medidos da espessura do filme de líquido para os testes do Óleo-Ar e Água-Ar, respectivamente. A análise dos valores medidos e calculados é a mesma que para o modelo do Estevam (2002), onde os erros relativos maiores ocorrem para pequenas espessuras de filme. Devido ao método de medição utilizado através de análise de imagens de forma manual é impreciso, acrescido da dificuldade para definir a interface entre bolha alongada estacionária e o filme de líquido. Observe-se igual que no caso do modelo de Estevam (2002) os erros são maiores para os testes de Água-Ar.

Conforme já comentado na aplicação do modelo Estevam (2002), verifica-se que há erro da ordem de 20% no método utilizado para medir as espessuras de filme de líquido. Daí a consideração de uma faixa de $\pm 30\%$. Especula-se isso está indicando a necessidade de um ajuste no fator de atrito que poderia ser feito para trabalhos futuros.

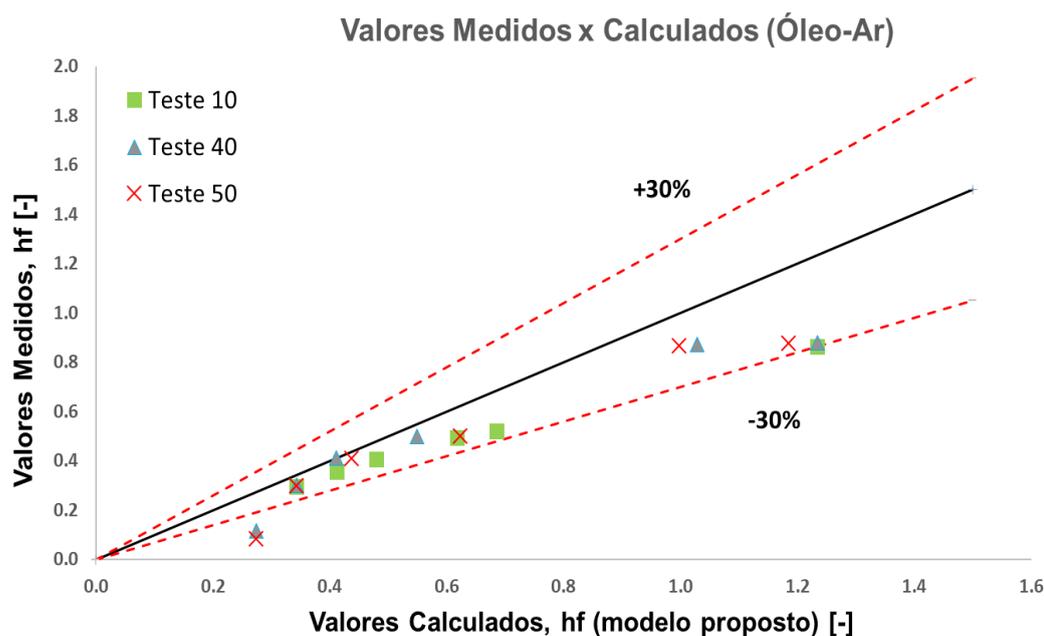


Figura 4-9: Espessura do Filme líquido calculado (Modelo Proposto) vs espessura do filme líquido medido para diferentes comprimentos, (Testes Óleo-Ar)

Fonte: Autor

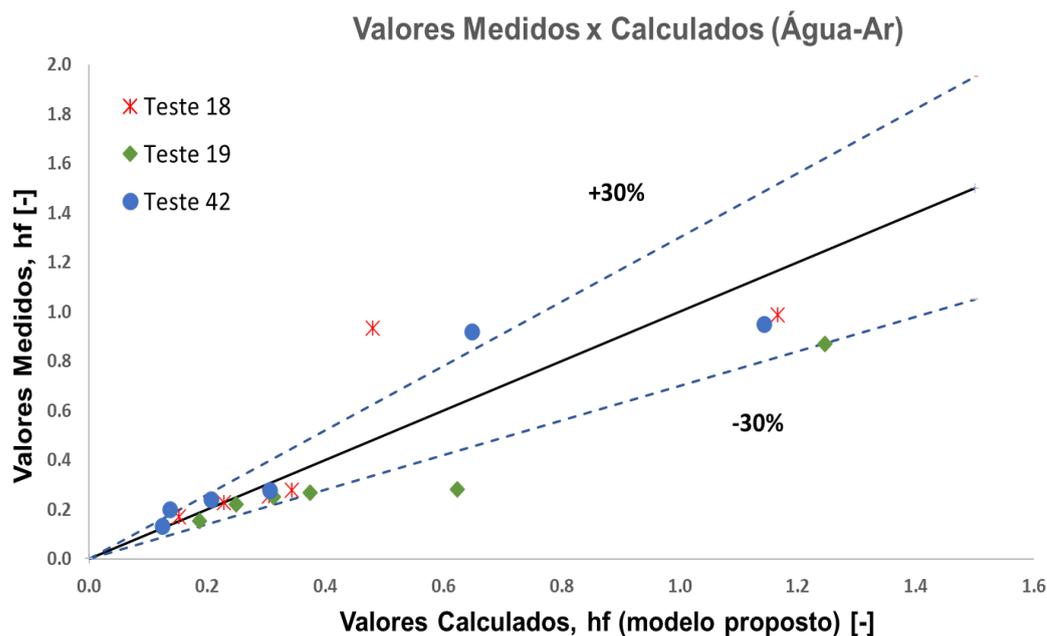


Figura 4-10: Espessura do Filme líquido calculado (Modelo Proposto) vs espessura do filme líquido medido para diferentes comprimentos, (Testes Água-Ar)

Fonte: Autor

4.4 Modelagem Estevam (2002) para Cálculo da Espessura do Filme

O modelo de Estevam (2002) foi adaptado para o presente estudo de duto curvo, devido ao fato dessa modelagem ter sido desenvolvida para o cálculo da espessura de filme de líquido dentro do canal do rotor de uma bomba centrífuga. Como indicado no capítulo 2, definiu-se a Eq. (2-21) como a equação final a ser adotada nesse estudo. Os resultados de integração analítica do modelo de Estevam (2002) foram obtidos no *Mathematica* na versão de *estudante 12.3* para ambos casos.

$$V_s V_s' - \left(\frac{V_s^2}{R} + g \sin \left(\theta + \frac{s}{R} \right) \right) + f_\beta \frac{V_s^2}{2} \left(\frac{2}{a_s} + \frac{V_s a_s}{Q_L} \right) = 0 \quad \text{Eq. (2-21)}$$

No duto curvo a componente da gravidade é importante e tem que aparecer associada ao efeito do campo centrífugo. Note-se, que foi considerado a soma da aceleração centrífuga com a aceleração da gravidade. Há diferenças significativas também no fim da bolha alongada estacionária. Essa influência é devido a atuação dos campos gravitacional e centrífugo e também do atrito.

A bolha alongada estacionária, no sistema *BCS*, segundo Estevam (2002), forma-se quando o campo centrífugo acelera o líquido e atrasa o escoamento do gás. Isso facilita a coalescência das bolhas na entrada do canal do rotor. Ela será estacionária devido ao fato de ocorrer um equilíbrio entre as forças de pressão, de arrasto, centrífuga e com as perdas por atrito. A vazão mássica de gás permanece constante porque na medida em que há a coalescência adicionando massa ao volume de controle, há retirada de massa pelo filme de líquido.

No caso do duto curvo, há a coalescência de bolhas associada a separação de fluido, o que determina a formação da bolha alongada. A ação de força centrífuga e da gravidade atuam para acelerar o filme de líquido e atrasar a velocidade do gás. A velocidade do filme de líquido irá retirar bolhas da bolha alongada mantendo um equilíbrio com a vazão mássica de gás que coalesce. Se a vazão mássica de gás for muito alta, então o equilíbrio só irá ocorrer para comprimento de bolhas alongadas maiores. O equilíbrio poderá não ocorrer e não haverá a formação da bolha alongada estacionária.

4.4.1 Resultado para o caso Óleo-Ar

Para o escoamento do fluido Óleo-Ar, foram escolhidos os Teste 9, Teste 10, Teste 40, Teste 50 e Teste 62. Os resultados obtidos modelo de Estevam (2002) foram comparados com os dados experimentais medidos e são apresentados na Tabela 4-25 até Tabela 4-29 e na Figura 4-11 até Figura 4-15.

Tabela 4-25: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 9 (Óleo-Ar)

Número do Teste	Valores Medidos						Valores Calculados		
	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimento s [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimento s [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
9	7.11E-04	1.40E-05	860	101	0.0	36,0	0.0	39.2	9.0
				110	54.2	20,0	50.6	19.3	3.5
				117	96.3	16,0	101.2	14.1	11.7
				125	144.5	12,0	151.7	11.5	4.2
				130	174.6	10,0	202.3	9.8	1.5
				143	252.9	6,0	252.9	8.7	45.2

Fonte: Autor

Tabela 4-26: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 10 (Óleo-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
10	7.75E-04	1.41E-05	860	102	0.0	36,0	0.0	39.3	9.1
				112	60.2	20,0	49.4	20.7	3.5
				117	90.3	18,0	98.7	15.3	14.9
				130	168.6	14,0	148.1	12.5	10.7
				136	204.7	12,0	197.5	10.7	10.8
				143	246.9	10,0	246.9	9.5	5.4

Fonte: Autor

Tabela 4-27: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 40 (Óleo-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
40	7.75E-04	1.73E-05	860	101	0.0	36.0	0.0	39.1	8.7
				103	12.0	30.0	74.7	17.4	42.1
				117	96.3	16.0	149.3	12.4	22.6
				130	174.6	12.0	224.0	9.9	17.2
				143	252.9	10.0	298.7	8.4	15.6
				163	373.3	8.0	373.3	7.4	7.0

Fonte: Autor

Tabela 4-28: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 50 (Óleo-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
50	7.75E-04	3.74E-05	860	102	0.0	34.5	0.0	38.2	10.4
				104	12.0	29.1	78.3	16.9	41.8
				117	90.3	18.2	156.6	12.1	33.6
				130	168.6	12.7	234.8	9.7	24.0
				143	246.9	10.0	313.1	8.2	17.8
				167	391.4	8.0	391.4	7.3	9.3

Fonte: Autor

Tabela 4-29: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 62 (Óleo-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	theta [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
62	8.07E-04	5.00E-05	860	101	0.0	33.3	0.0	37.7	13.0
				105	24.1	28.9	71.1	18.1	37.5
				118	102.4	15.6	142.1	13.0	16.3
				131	180.6	12.3	213.2	10.5	15.0
				143	252.9	9.2	284.2	8.9	3.7
				160	355.3	6.2	355.3	7.8	27.1

Fonte: Autor

Os gráficos 4-11 a 4-15, apresentam a comparação gráfica dos resultados dos valores obtidos para o modelo modificado e adaptado de Estevam (2002) juntamente com os valores experimentais medidos para o caso Óleo-Ar.

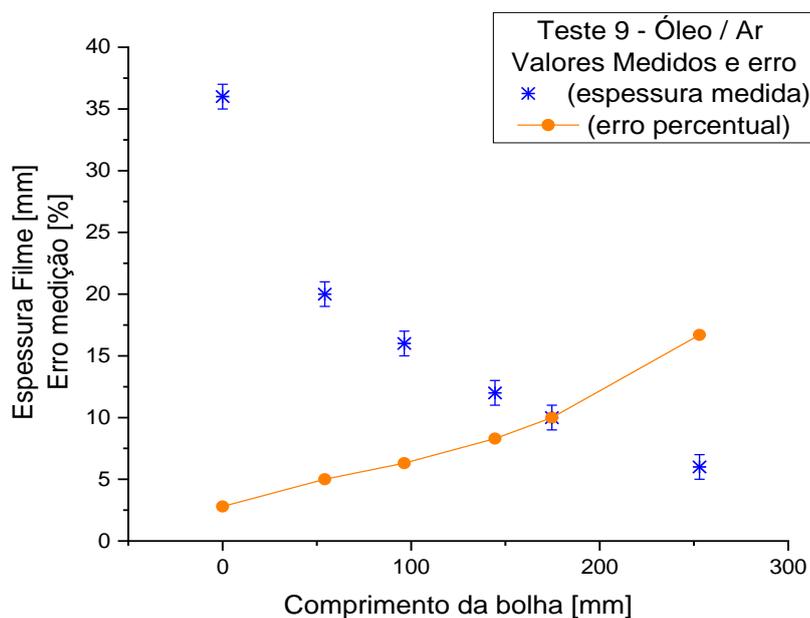


Figura 4-11: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme medidos e erro medição (Estevam, 2002)
Teste 9 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

Na Figura 4-11 pode-se observar os valores medidos com o erro relativo de cada medida. O erro percentual relativo considerou que a incerteza na medição fica em torno de 1 mm para a espessura de filme de líquido e de 1° para o comprimento da bolha. O erro percentual relativo na medição do comprimento da bolha é pequeno, da ordem de 1% e, portanto, não foi mostrado.

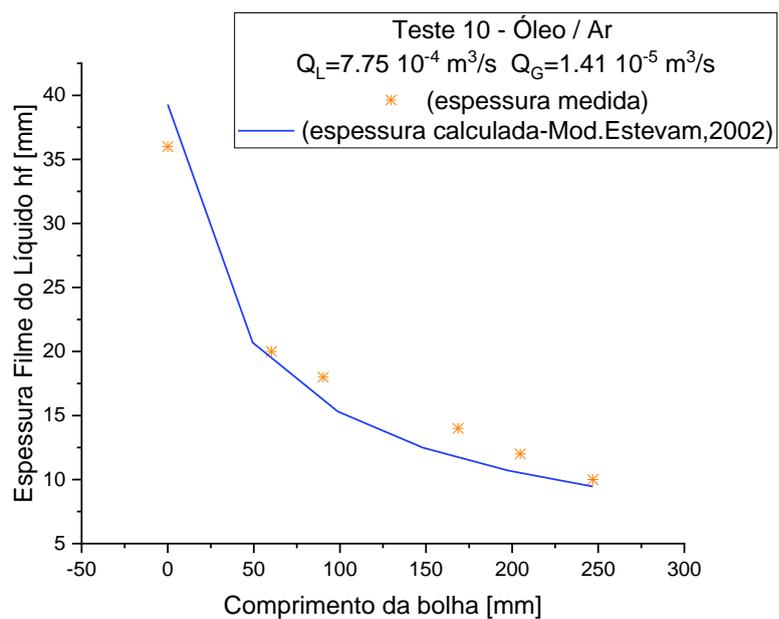


Figura 4-12: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 10 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

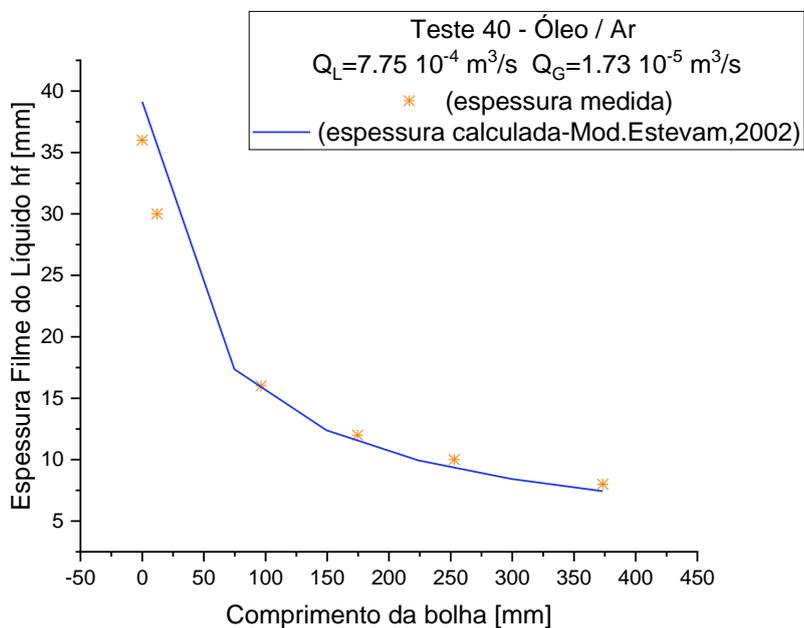


Figura 4-13: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 40 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

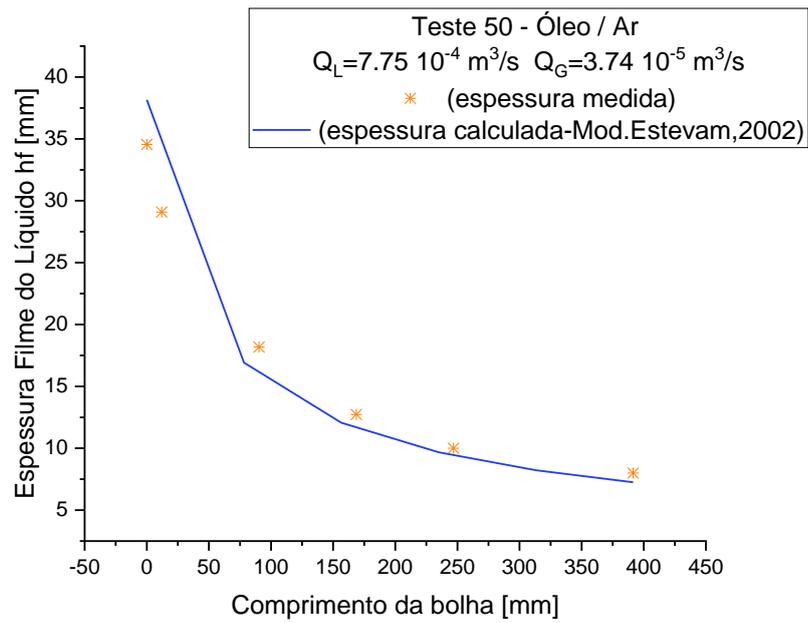


Figura 4-14: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 50 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

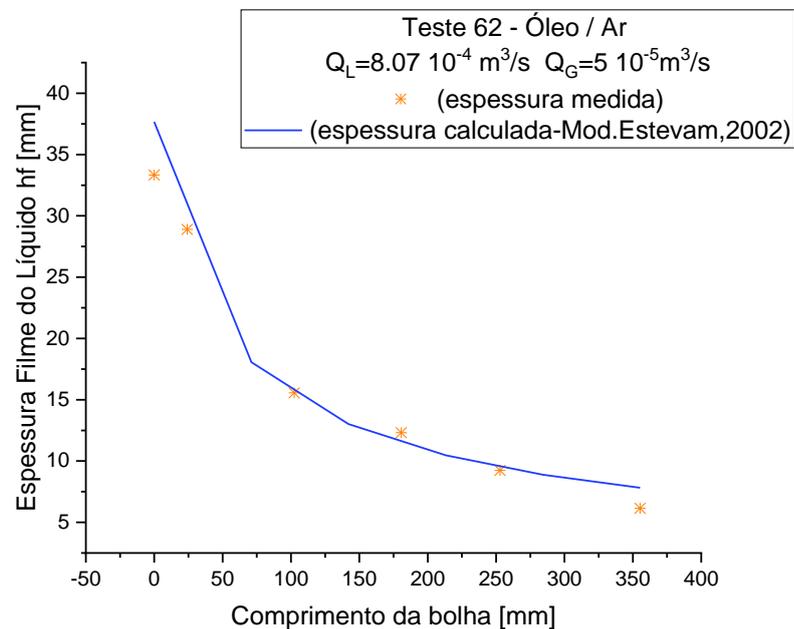


Figura 4-15: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 62 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

4.4.2 Resultado para o caso Água-Ar

Foram escolhidos o Teste 18, Teste 19, Teste 20, Teste 42 e Teste 43 para o fluido Água-Ar e calculados, pela correlação Estevam (2002), os comprimentos da bolha alongada estacionária com as respectivas espessuras de filme de líquido. Os resultados obtidos são comparados na Tabela 4-30 até 4-34 e na Figura 4-16 até 4-20.

Tabela 4-30: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 18 (Água-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
18	5.02E-04	3.47E-05	997	95	0.0	34.0	0.0	37.41	10.0
				108	78.3	14.0	67.4	12.5	10.5
				120	150.5	10.0	134.9	8.6	13.5
				129	204.7	8.9	202.3	6.8	23.5
				137	252.9	6.7	269.8	5.7	14.6
				151	337.2	4.4	337.2	4.9	11.5

Fonte: Autor

Tabela 4-31: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 19 (Água-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
19	5.02E-04	2.87E-05	996.64	94	0.0	36.4	0.0	37.8	4.1
				104	60.2	18.2	68.6	12.4	31.6
				112	108.4	10.9	137.3	8.5	21.6
				121	162.6	9.1	205.9	6.7	26.1
				133	234.8	7.3	274.6	5.6	22.7
				151	343.2	5.4	343.2	4.9	10.5

Fonte: Autor

Tabela 4-32: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 20 (Água-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
20	5.57E-04	2.60E-05	996.64	95	0.0	35.4	0.0	38.22	8.0
				105	60.2	16.9	59.0	14.63	13.5
				114	114.4	12.3	118.0	10.23	16.9
				123	168.6	10.0	177.0	8.08	19.2
				133	228.8	8.0	236.0	6.76	15.5
				144	295.0	6.0	295.0	5.85	2.5

Fonte: Autor

Tabela 4-33: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 42 (Água-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
42	4.46E-04	6.53E-05	996.64	95	0.0	33.3	0.0	34.9	4.7
				104	54.2	18.9	75.9	10.6	43.9
				117	132.5	8.9	151.7	7.3	18.4
				131	216.8	6.0	227.6	5.7	4.9
				143	289.0	4.0	303.5	4.8	20.3
				158	379.3	3.6	379.3	4.2	17.2

Fonte: Autor

Tabela 4-34: Resultados da Espessura do Filme do Líquido (Estevam, 2002), Teste 43 (Água-Ar)

Valores Medidos							Valores Calculados		
Número do Teste	q_L [m ³ /s]	q_G [m ³ /s]	ρ_L [kg/m ³]	Θ [graus]	Comprimentos [mm]	$h_{fmedido}$ [mm]	Comprimentos [mm]	$h_{fcalculado}$ Estevam (2002) [mm]	Erro relativo (%)
43	5.30E-04	5.59E-05	996.64	94	0.0	34.5	0.0	36.2	4.7
				105	66.2	18.2	77.1	12.2	33.0
				118	144.5	10.9	154.1	8.3	23.6
				130	216.8	9.1	231.2	6.5	28.3
				142	289.0	8.0	308.3	5.4	32.2
				158	385.4	5.4	385.4	4.7	13.8

Fonte: Autor

Os gráficos 4-16 a 4-20, apresentam a comparação gráfica dos resultados dos valores obtidos para o modelo modificado e adaptado de Estevam (2002) juntamente com os valores experimentais medidos para o caso Água-Ar.

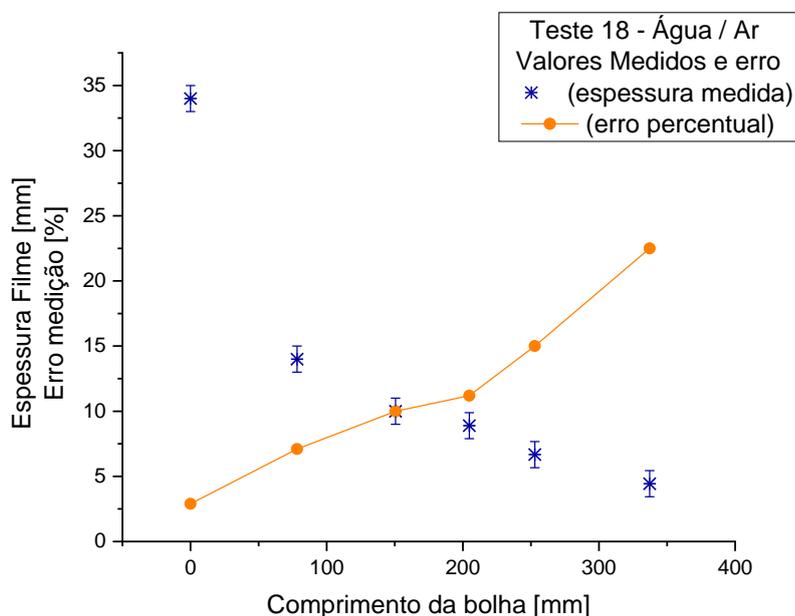


Figura 4-16: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme medidos, erro medição (Estevam, 2002)

Teste 18 (Água-Ar)

Fonte: Autor

Na Figura 4-16 pode-se observar os valores medidos com o erro percentual de medição de cada medida, pelo qual pode-se afirmar que a diferença entre os valores calculados com os valores medidos será afetada por um erro de medição. Conforme indicado nos testes Óleo-Ar, foi considerada a incerteza na medição de 1 mm para a espessura de filme de líquido e de 1° para o comprimento da bolha.

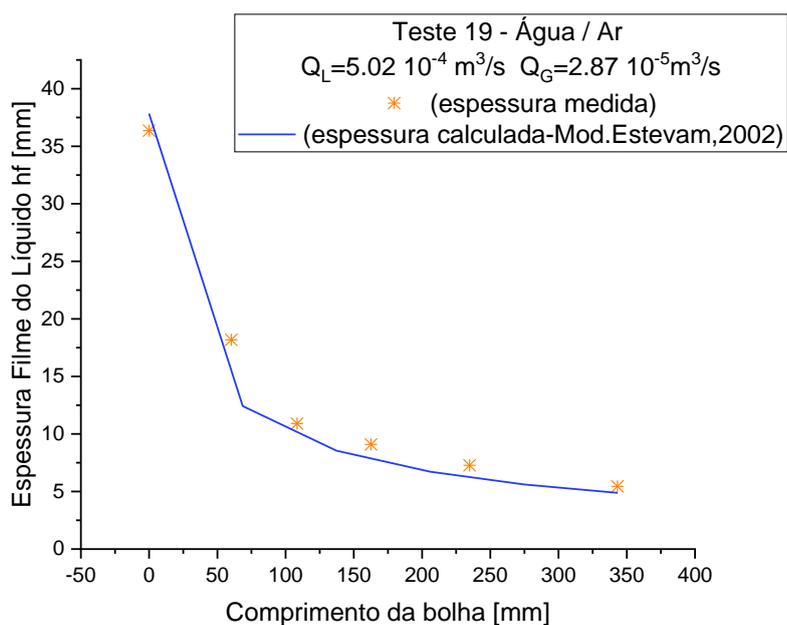


Figura 4-17: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 19 (Água-Ar)

Fonte: Autor

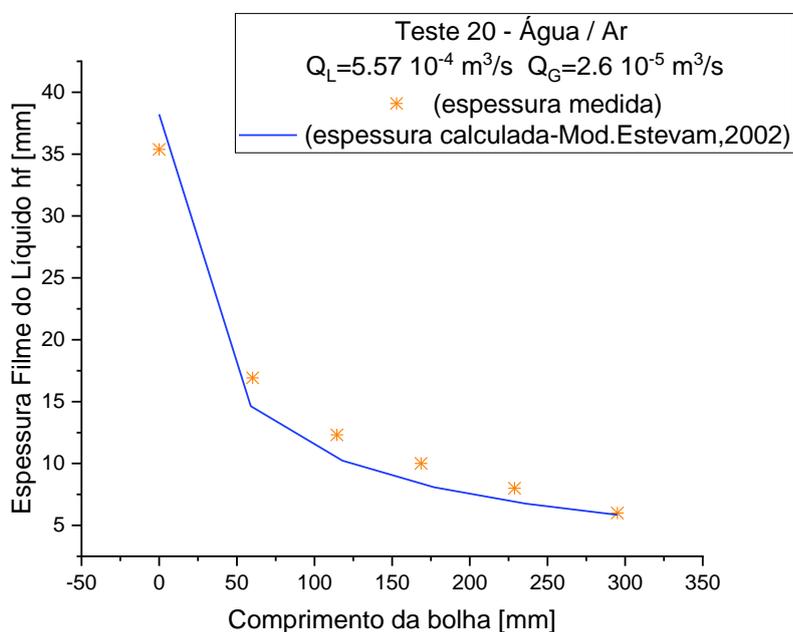


Figura 4-18: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 20 (Água-Ar)

Fonte: Autor

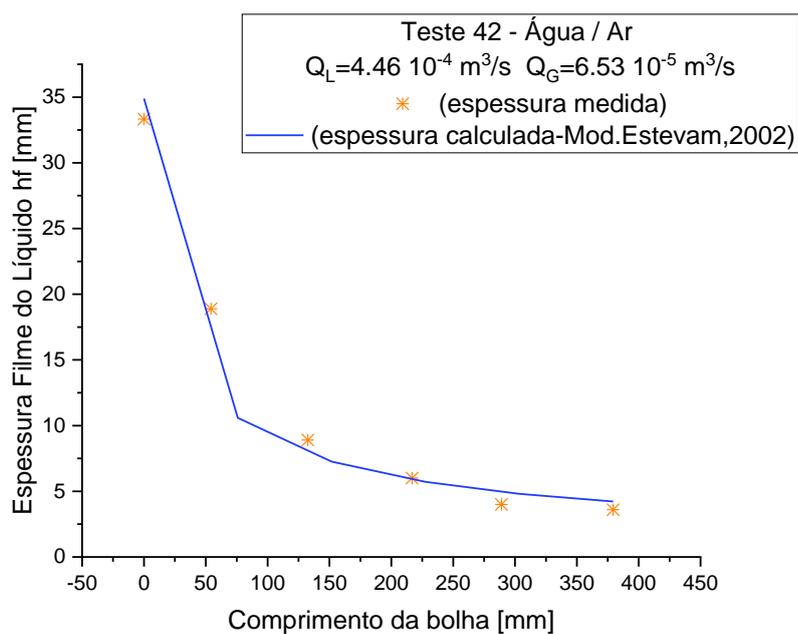


Figura 4-19: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 42 (Água-Ar)

Fonte: Autor

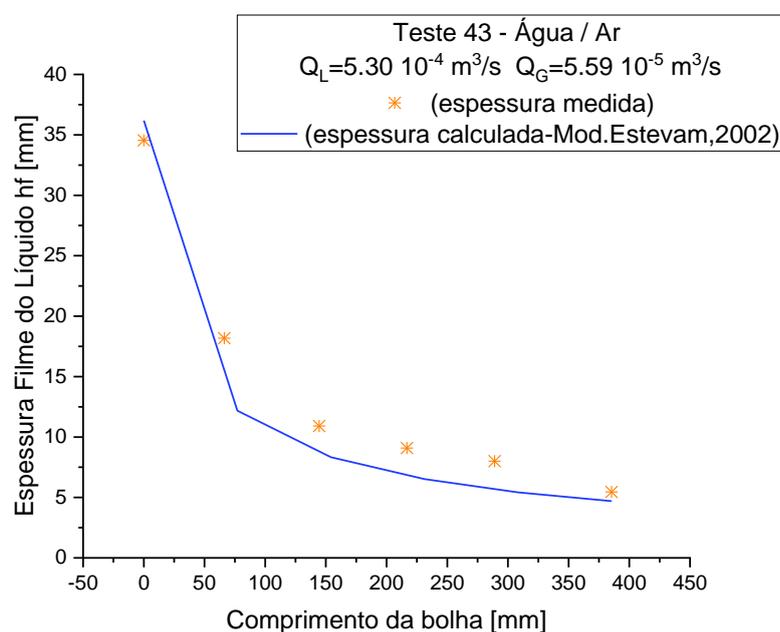


Figura 4-20: Comprimento da Bolha vs Espessura do Filme do Líquido medido e calculado (Estevam, 2002), Teste 43 (Água-Ar)

Fonte: Autor

Na Figura 4-21 e Figura 4-22 destaque-se a comparação de todos os valores da espessura de filme de líquidos calculados do modelo Estevam (2002) com os valores medidos

experimentalmente para o caso do Óleo-Ar e Água-Ar, respectivamente. Fazendo uma análise dos valores medidos e calculados, destaque-se que os erros relativos maiores ocorrem para pequenas espessuras de filme. Isso ocorre porque o método de medição através de análise de imagens de forma manual é impreciso, acrescido da dificuldade para definir a interface entre bolha alongada estacionária e o filme de líquido. Isso determina erros relativos medidos da ordem de 20%. Outra observação: os valores calculados são menores que os medidos nessa faixa de espessura de filme de líquido com valores reduzidos. Isso configura a imprecisão na leitura desses dados. Recomenda-se, portanto, a utilização de um método online mais preciso, tipo ultrassom, para obter os valores de espessura de filme de líquido. Note-se também que para os testes Água-Ar os erros estão maiores.

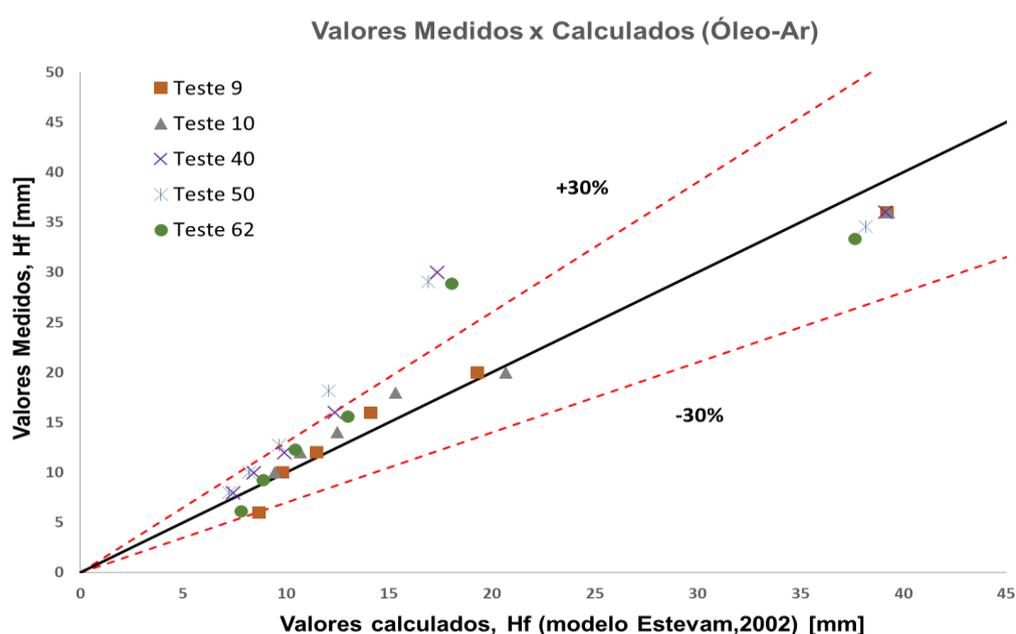


Figura 4-21: Espessura do Filme líquido calculado (Estevam, 2002) vs espessura do filme líquido medido para diferentes comprimentos, (Testes Óleo-Ar)

Fonte: Autor

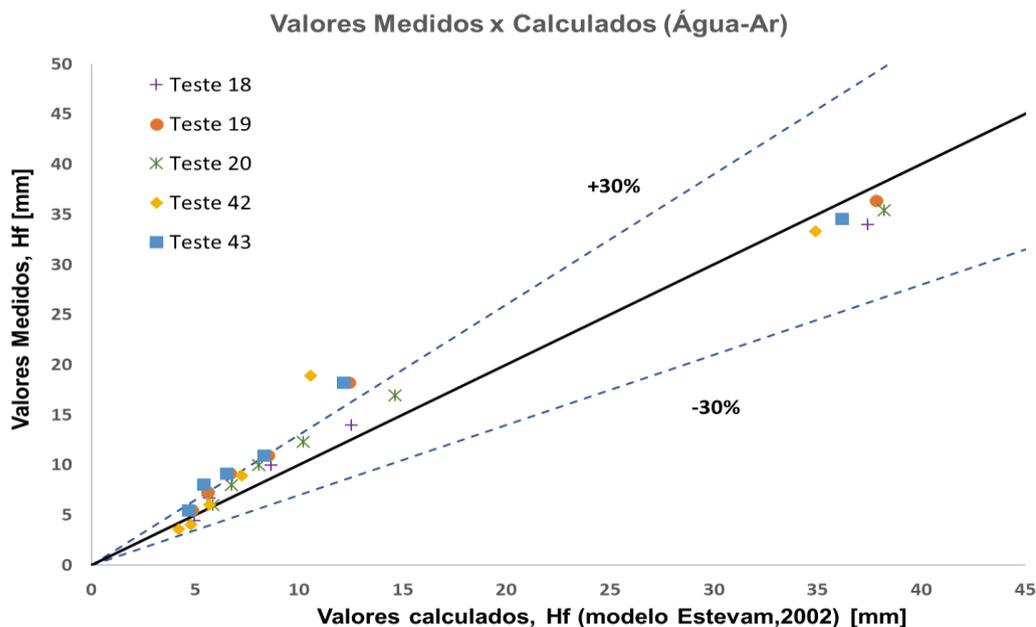


Figura 4-22: Espessura do Filme líquido calculado (Estevam, 2002) vs espessura do filme líquido medido para diferentes comprimentos, (Testes Água-Ar)

Fonte: Autor

Analisando o desempenho entre os resultados obtidos do modelo proposto com respeito ao modelo de Estevam (2002), observe-se que os resultados do modelo proposto poderão ser melhorados considerando a aquisição de mais dados (como por exemplo a influência da viscosidade, pressão de entrada e saída entre outras variáveis), a obtenção de mais pontos no início da bolha para definir melhor a transição na inclinação, a obtenção da distribuição das bolhas e o diâmetro crítico. Além disso, trabalhar de forma iterativa com as velocidades locais e tratar a obtenção dos dados experimentais da espessura do filme de líquido de forma mais precisa. Também, será preciso também inserir um parâmetro que considere a fração de água para detalhar escoamentos com a presença de Óleo-Água. Recomenda-se isso como trabalho futuro.

Mas comparando de uma forma mais global os valores da espessura de filme de líquido calculados através do modelo de Estevam (2002) e a correlação proposta com os valores medidos, verifica-se que os resultados de ambos modelos seguem a mesma tendência e estão muito próximos apesar de ter um erro relativo médio em torno ao 15%.

Destaque-se que o modelo de Estevam (2002) adaptado para duto curvo é teórico, bem robusto e não tem nenhuma variável ou coeficiente a ser definido por dados experimentais. Os resultados obtidos indicaram que estão muito próximos dos dados experimentais medidos

indicando que se trata de uma boa opção para a obtenção da espessura de filme de líquido quando da formação de bolha alongada estacionária em escoamentos bifásicos em duto curvo.

Um resumo dos resultados mostra os seguintes aspectos importantes:

- a) Quando o escoamento se torna descendente, mas não há velocidade suficiente para arrastar a grande bolha de ar que se forma, então o filme de líquido é acelerado com uma velocidade tal que permite retirar, na região de remistura, formada na extremidade da bolha de ar, pequenas bolhas, que dependendo do seu tamanho serão retiradas do duto, ou retornarão à posição de início da região de remistura. (Estevam, 2002);
- b) Uma das falhas que se pode apontar, considerando os dados de pressão registrados, foi que as pressões dos líquidos injetados não foram equalizadas corretamente de acordo com a pressão definida (P_{set}). Sugere-se, inicialmente, injetar-se a água ou o óleo no duto, enchendo-se totalmente o trecho curvo e verificar, nos medidores, até ter a pressão definida colocada no *LabView*. Depois injeta-se o ar e aguarda-se uns minutos antes de começar a gravação das imagens e aquisição de dados;
- c) Foram calculadas as variáveis de interesse a partir das variáveis medidas. Dessa forma foram obtidas as velocidades superficiais da mistura Água-Ar, com valores entre 0.20 a 0.51 m/s. Já as velocidades superficiais da mistura Óleo-Ar variaram entre 0.07 e 0.71 m/s;
- d) É importante calcular o tamanho da bolha alongada estacionária porque somente o restante do canal do rotor de uma bomba centrífuga é que gera pressão;
- e) O desenvolvimento das correlações para o cálculo da espessura do filme de líquido foi apresentado no capítulo 2, na seção 2.2.11. Cada uma das correlações apresentadas tem diferentes abordagens, mas o resultado é muito similar;
- f) Foram calculados números adimensionais e diferentes variáveis da correlação sugerida por Estevam (2002), Abdulkadir *et al.* (2018) e da correlação proposta. O modelo de Estevam (2002) foi adaptado e a modelagem proposta pode ser aplicada para escoamento bifásico em duto curvo, com formação de bolha alongada estacionária. Obteve-se resultados coerentes em ambas correlações no cálculo da espessura do filme do líquido para ambos os experimentos Óleo-Ar e Água-Ar, respectivamente;
- g) Também é importante apontar que a correlação proposta é muito influenciada pelos valores do ângulo θ . Em dois casos do escoamento Água-Ar isso fica evidente. Como provavelmente ocorreu erro na medição do valor do ângulo θ isso irá afetar a faixa de validade indicada pela correlação no cálculo de $Fr_{\theta L}$. A faixa de validade para os valores de

$Fr_{\theta L}$ poderá ser revista quando ocorrer a redução da incerteza na obtenção dos valores de θ medidos;

- h) O foco de apresentar uma correlação deve-se ao fato do modelo Estevam (2002) ter sido desenvolvido para escoamento em canal de rotor de bomba centrífuga e não especificamente para escoamento em duto curvo. A ideia será publicar, no futuro, um estudo considerando uma correlação ampliada, a exemplo daquela desenvolvida por Abdulkadir *et al.* (2018), que considere a velocidade superficial do líquido e do gás obtidas através de cálculo iterativo ou adaptar o modelo de Fagundes Netto (1999) baseado no modelo de dois fluidos;
- i) A análise dos resultados mostra que o procedimento adotado apresentou bons resultados comparados com os valores medidos. O cálculo da espessura do filme de líquido através da correlação proposta poderá ser melhorado com valores experimentais mais precisos. Os dados experimentais medidos da espessura de filme de líquido têm uma incerteza da ordem de 20%.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente estudo, foram obtidos dados experimentais através de um aparato que considera o escoamento bifásico em duto curvo. Os resultados da espessura de filme de formado foram adquiridos quando da formação de uma bolha alongada estacionária. Os resultados experimentais foram comparados com valores calculados considerando modelos já existentes na literatura e com uma correlação empírica proposta.

A) As principais conclusões do presente trabalho são as seguintes:

- ✓ Observe-se que com o aumento da fração de gás, as aglomerações e dispersões de bolhas, aumentam, assim como o tamanho das bolhas;
- ✓ A formação da bolha alongada estacionária é um fator muito importante dentro do trabalho desenvolvido. A bolha alongada estacionária foi observada na curvatura do duto, sendo o fenômeno similar ao que ocorre na entrada do canal do rotor de uma bomba centrífuga, gerando alterações nos padrões de escoamento e alterando a transferência de energia para a mistura bifásica. Fato este, que pode explicar a redução do desempenho de uma bomba centrífuga;
- ✓ O início da bolha alongada estacionária começa onde termina a coalescência das bolhas. Ou seja, as bolhas vão para o ponto mais alto do duto e ali coalescem permitindo o início da formação de uma bolha alongada. Não foi possível perceber visualmente esse movimento porque elas são incorporadas imediatamente na bolha alongada inicialmente formada;
- ✓ A formação do início da bolha alongada estacionária está associada diretamente com a viscosidade dos fluidos, a vazão de gás, a vazão do líquido, a massa específica do gás, a massa específica do líquido, angulação ou geometria do canal, ao fator de atrito e padrão de escoamento;
- ✓ Nos experimentos com fluido Óleo-Ar a formação da bolha alongada estacionária ocorre depois da curvatura do duto. Já no experimento da Água-Ar, a formação da bolha alongada estacionária ocorre antes da curvatura no duto, determinando, dessa forma, a formação de bolhas alongadas estacionárias com comprimentos maiores. Isso ocorre devido a viscosidade que dificulta a coalescência de bolha e a separação dos fluidos. Dessa forma, o filme de líquido formado tem uma espessura maior no caso de escoamento Óleo-Ar que em Água-Ar;

- ✓ Foi confirmada a observação de Marçal (2021) dizendo que as bolhas maiores formadas através da coalescência têm formato indefinido e são intensamente deformadas pelo escoamento. A força de arrasto não é suficiente para carrear essas bolhas deformáveis juntamente ao líquido. O gradiente de pressão adverso existente no interior do duto curvo desacelera as bolhas de ar que tendem a ficar estacionárias na curvatura escoando com uma velocidade inferior à do líquido;
- ✓ Não foi possível trabalhar com precisão na medição da espessura do filme do líquido obtido experimentalmente. A medição foi realizada de maneira manual com a ajuda do programa *Autocad* na versão de estudante e *Photoshop online* conforme indicado no trabalho de Marçal (2021). Para melhorar este ponto, recomenda-se automatizar o tratamento das imagens com uma ferramenta de *programação* como por exemplo nos programas *Python* ou *Matlab*;
- ✓ O modelo de Estevam (2002) foi modificado para duto curvo, considerando que ele foi desenvolvido para o cálculo da espessura do filme do líquido no interior do canal do rotor de uma bomba centrífuga. Os resultados obtidos indicaram que estão muito próximos dos dados experimentais medidos. No modelo modificado foi considerado o efeito gravitacional e o efeito centrífugo, o que trouxe maior precisão no cálculo da espessura do filme de líquido;
- ✓ O principal resultado do trabalho é a confirmação de que o modelo de Estevam (2002) adaptado, apesar do fato de ter sido desenvolvido para escoamento em canal de rotor de bomba centrífuga e não especificamente para escoamento em duto curvo pode ser utilizado para a determinação da espessura do filme de líquido quando há a formação de bolhas alongadas estacionárias. Como o modelo foi desenvolvido considerando as variáveis importantes que atuam no fenômeno físico e esse escoamento é semelhante ao que ocorre em canal de rotor de uma bomba centrífuga, então era esperado que os resultados a serem obtidos seriam pelo menos coerentes. A utilização da modelagem fenomenológica proposta pelo autor conseguiu prever muito bem os resultados com um erro relativo médio em torno de 15%. Um ajuste na correlação para o fator de atrito poderá melhorar esses resultados;
- ✓ A correlação modificada de Abdulkadir *et al.* (2018) teve seus resultados comparados com os dados experimentais medidos, onde pode-se confirmar a sua não adequação para o caso em estudo. Esse autor estudou escoamento anular em dutos curvos e não escoamento com formação de bolha alongada estacionária. Devido a isso, os resultados foram incoerentes;

- ✓ A correlação proposta para a determinação da espessura do filme de líquido em duto curvo com escoamento em bolhas dispersas e formação de bolha alongada estacionária, visa propor uma correlação de fácil aplicação na indústria. Além disso, ela permite avaliar os resultados considerando números adimensionais;
- ✓ A correlação apresentada no presente trabalho erra muito nos pontos de início de bolha, onde é complexa a identificação da espessura porque há ali coalescência de bolhas. Além disso, as medições da altura do líquido foram obtidas através de fotos, em uma fronteira entre líquido e gás não bem definida. Apesar disso, os resultados encontrados foram adequados para a maioria dos pontos. Recomenda-se que, para próximas medições da espessura de filme de líquido, seja utilizado um ultrassom, de forma *online*;
- ✓ Importante destacar que a correlação proposta é empírica apenas, porque é obtida através de dados experimentais medidos. Já o modelo de Estevam (2002) adaptado é teórico e não tem nenhuma variável ou coeficiente a ser definido por dados experimentais. Uma correlação semiempírica para o escoamento bifásico em duto curvo teria que considerar os efeitos de coalescência de bolhas e da região de remistura no comprimento da bolha alongada estacionária. E isso está fora do escopo do presente trabalho;
- ✓ Pode-se afirmar que o objetivo do trabalho foi cumprido com sucesso porque as correlações apresentadas permitem calcular de maneira simples a espessura de filme do líquido para duto curvo. Isso representou um acréscimo ao conhecimento considerando que os modelos atuais na literatura são complexos e limitados a tubos verticais e horizontais;
- ✓ A representação gráfica dos resultados permite comparar e concluir, tanto qualitativamente como quantitativamente, que as duas abordagens consideradas podem ser aplicadas na obtenção da espessura de filme de líquido formado nos escoamentos bifásicos em duto curvo quando ocorre a formação da bolha alongada estacionária. O erro relativo médio calculado está em torno de 15%;
- ✓ O Anexo I mostra os gráficos da espessura do filme de líquido medida em função do comprimento da bolha alongada estacionária para ambos experimentos Óleo-Ar e Água-Ar;
- ✓ O Anexo II mostra o código da modelagem para o cálculo da espessura do filme de líquido considerando o modelo modificado de Estevam (2002) no programa *Mathematica* na versão de *estudante 12.3*;

- ✓ A utilização de modelos recursivos, onde é necessário adotar um valor inicial de altura de filme de líquido e obter uma convergência desse valor, dentro de um erro admissível, poderá ser considerada em trabalhos futuros;

B) As principais recomendações para trabalhos futuros são as seguintes:

- ✓ Realizar novas medições considerando as variáveis necessárias para o estudo da região de remistura na saída do canal do duto curvo e na obtenção da distribuição das bolhas, do diâmetro crítico de bolhas, viscosidades, pressão e tensão superficial. Além disso, recomenda-se fazer a medição do diâmetro das bolhas dispersas no início e na saída do canal do duto curvo;
- ✓ Considerar, entre outras recomendações experimentais, a utilização de um corante para facilitar a visualização do contraste dos fluidos para o tratamento das imagens, e dessa forma, permitir a melhora na medição dos dados e na observação visual das diferenças da formação da bolha alongada estacionária desde o início até o final;
- ✓ Aprimorar o modelo de Estevam (2002) adaptado considerando ajustes no fator de atrito;
- ✓ Desenvolver um estudo considerando uma correlação ampliada, a exemplo daquela desenvolvida por Abdulkadir *et al.* (2018), que considere a velocidade superficial do líquido e do gás obtidas através de cálculo iterativo;
- ✓ Dar continuidade ao estudo do escoamento bifásico em duto curvo considerando os seguintes itens:
 - Estudar o escoamento em ressalto hidráulico formado logo após o final da bolha alongada;
 - Estudar o escoamento bifásico em duto curvo na região de remistura formada após o final da bolha alongada;
 - Estudar e verificar se há alguma correlação entre espessura do filme de líquido e a vazão de gás induzida na extremidade da bolha alongada;
 - Estudar com mais detalhe a influência da viscosidade do líquido nas pressões e no tamanho da bolha alongada estacionária em uma mistura bifásica em duto curvo;
 - Estudar, a nível de doutorado, o desenvolvimento de modelos para o estudo da região de remistura, onde deverá ser considerado o acoplamento entre filme de líquido com bolha alongada estacionária, a região de remistura e restrições de escoamento na saída do duto curvo. Pode-se considerar inicialmente uma abordagem a partir do modelo proposto por Fagundes Netto (1999);

- Considerar, em trabalhos futuros, a utilização softwares livres e mais adequados para a análise e tratamento de imagens.

REFERENCIAS

Abdulkadir, M., Zhao, D., Azzi, A., Lowndes, I. S., *et al.* (2012) ‘Two-phase air-water flow through a large diameter vertical 180° return bend’, *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 79(June 2014), pp. 138–152. doi: 10.1016/j.ces.2012.05.029.

Abdulkadir, M. *et al.* (2014) ‘Liquid film thickness behaviour within a large diameter vertical 180° return bend’, *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 107, pp. 137–148. doi: 10.1016/j.ces.2013.12.009.

Abdulkadir, M. *et al.* (2018) ‘Annular liquid film thickness prediction in a vertical 180° return bend’, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 96, pp. 205–215. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.03.006.

Abdullahi, M. K. (2013) *Slug front gas entrainment in gas-liquid two-phase flow in horizontal and near horizontal pipes*. Imperial College London South.

Barrios, L. J. (2007) *Visualization and Modeling of Multiphase Performance Inside an Electrical Submersible Pump*. The University Of Tulsa. Available at: [http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB II.pdf](http://digilib.unila.ac.id/4949/15/BAB%20II.pdf).

Bressani, M. (2016) *Estudo Experimental da Transição Vertical Ascendente para Horizontal no escoamento Bifásico Padrão Intermitente*. Universidade Estadual de Campinas.

Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2017) *Fluids Mechanics - Fundamentals and Applications*. 4ta edn, *Journal of Chemical Information and Modeling*. 4ta edn. McGraw-Hill College. Available at: <https://b-ok.lat/book/3423816/65b879>.

Chanson, H. (2006) *Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps. Similitude and Scale Effects*. Brisbane, Australia. Available at: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:8723>.

Chanson, H. (2009) ‘Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results’, *European Journal of Mechanics, B/Fluids*. Elsevier Masson SAS, 28(2), pp. 191–210. doi: 10.1016/j.euromechflu.2008.06.004.

Chanson, H. and Murzyn, F. (2007) *Free Surface, Bubbly flow and Turbulence Measurements in Hydraulic Jumps*. Brisbane, Australia. Available at: https://www.researchgate.net/publication/43471671_Free_Surface_Bubbly_flow_and_Turbulence_Measurements_in_Hydraulic_Jumps.

Coelho, D. B. (2014) ‘Projeto e construção de uma célula de coalescência de bolhas’, p. 147. Available at: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2014-1/282-projeto-e-construcao-de-uma-celula-de-coalescencia-de-bolhas/file>.

Corrêa, F. C. (2009) ‘Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido

Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido’. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/296854774.pdf>.

Cubas, J. M. C. (2017) *Estudo Experimental Do Escoamento Bifásico Ar-Água Em Uma Bomba Centrífuga Radial*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Available at: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2844/1/CT_PPGEM_M_Cubas%2C Jhoan Miguel Cubas_2017.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2844/1/CT_PPGEM_M_Cubas%2C%20Jhoan%20Miguel%20Cubas_2017.pdf).

Dr. Oven BRATLAND (2010) *Pipe Flow 2 : Multi-phase Flow Assurance*. Segunda. Edited by DRBRATLAND. Available at: <http://www.drbratland.com/download-two-free-books-on-flow-assurance/>.

Estevam, V. (2002) *Uma Análise Fenomenológica da Operação de Bomba Centrífuga com Escoamento Bifásico*. Universidade Estadual de Campinas. Available at: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/263012>.

França, F. A. (2008) ‘Modelagem de Escoamentos Multifásicos’, 2008, p. 13. Available at: http://www.fem.unicamp.br/~ffranca/MultiPhase_2008_01.pdf.

Gardner, G. C. and Neller, P. H. (1969) ‘Phase Distributions in Flow of an Air-Water Mixture round Bends and past Obstructions at the Wall of a 76-mm Bore Tube’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 184(3), pp. 93–101. doi: 10.1243/PIME_CONF_1969_184_084_02.

Gulich, J. F. (2020) *Centrifugal Pumps*. Springer N, *Water Well Journal*. Springer N. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-14788-4.

Hibiki, T. *et al.* (1994) ‘Visualization of fluid phenomena using a high frame-rate neutron radiography with a steady thermal neutron beam’, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 351(2–3), pp. 423–436. doi: 10.1016/0168-9002(94)91371-4.

Hoang, K. and Davis, M. R. (1984) ‘Flow Structure and Pressure Loss for Two Phase Flow in Return Bends’, *Journal of Fluids Engineering*, 106(1), pp. 30–37. doi: 10.1115/1.3242398.

Hoyt, J. W. and Sellin, R. H. J. (1989) ‘Hydraulic Jump as “Mixing layer”’, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(12), pp. 1607–1614. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:12(1607).

Ishii, M. and Hibiki, T. (2011) *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow (Second edition)*. Second, *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow (Second Edition)*. Second. Edited by Springer. New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-7985-8.

James P. Brill and Hemanta Mukherjee (1999) ‘Multiphase Flow in Wells’, in *Multiphase Flow in Wells*. First Prin. Texas: Richardson, pp. 5–7.

Kucukali, S. and Chanson, H. (2008) ‘Turbulence measurements in the bubbly flow region

of hydraulic jumps’, *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier Inc., 33(1), pp. 41–53. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.06.012.

Kucukali, S. and Cokgor, S. (2009) ‘Energy Concept for Predicting Hydraulic Jump Aeration Efficiency’, *Journal of Environmental Engineering*, 135(2), pp. 105–107. doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2009)135:2(105).

Liu, M., Rajaratnam, N. and Zhu, D. Z. (2004) ‘Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers’, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(6), pp. 511–520. doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:6(511).

Marçal, R. A. (2021) *Estudo Experimental do escoamento Bifásico Gás-Líquido em Duto Curvo*. Universidade Estadual de Campinas.

Matos, A. de (2004) *Distribuição de Fases de Escoamento a Bolhas em Duto de Seção Quadrada Através de Curva de 180° no Plano Vertical*. Universidade Estadual de Campinas. Available at: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264137>.

Monte Verde, W. (2016) *Modelagem do desempenho de bombas de BCS operando com misturas gás-óleo viscoso*. Universidade Estadual de Campinas. Available at: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/321242>.

Moujaes, S. F. and and Dougall, R. S. (1987) ‘Experimental Investigation of Concurrent Two-Phase Flow in a Vertical Rectangular Channel’, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 65(5), p. 715. Available at: https://digitalscholarship.unlv.edu/me_fac_articles/164/.

Oliveira, D. M. F. and Loures, P. V. M. V. (2016) *Análise do comportamento do fluido escoando através de dutos curvos em formato S com diferentes geometrias.*, Universidade Federal Fluminense. Engenharia de Petróleo da Universidade Federal Fluminense, Niterói. Available at: [https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/2661/1/Maria Fernanda e Paulo.pdf](https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/2661/1/Maria%20Fernanda%20e%20Paulo.pdf).

Philip J. Pritchard, Robert W. Fox, Alan T. McDonald, J. C. L. (2016) *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8ª Edição. Edited by Grupo Editorial Nacional (GEN). LTC.

Potter, M. C. . and Wiggert, D. C. (2004) *Mecânica dos fluidos*. 3ed edn. Edited by P. T. Learning. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

Rosa, E. S. (2012) *Escoamento multifásico isotérmico: modelos de multfluidos e de mistura*. PETROBRAS. Edited by PETROBRAS. Porto Alegre: Bookman. Available at: https://www.academia.edu/39782367/Escoamento_Multifásico_Isotérmico.

Sakamoto, G., Doi, T., Murakami, Y., and Usui, K. (2004) ‘Profiles of liquid film thickness and droplet flow rate in U-bend annular mist flow.’, *5th International Conference on Multiphase Flow, Japan.*, ICMF 2004(May 30-June 4).

Sawant, P. H. (2008) *Dynamics of annular two-phase flow*. Purdue Univeristy, West Lafayette, USA. Available at: http://www.purdue.edu/policies/pages/teach_res_outreach/c_22.html.

Sene, K. J. (1988) 'Air entrainment by plunging jets', *Chemical Engineering Science*, 43(10), pp. 2615–2623. doi: 10.1016/0009-2509(88)80005-8.

Shoham, O. (2006) *Mechanistic Modeling Of Gas-Liquid Two-Phase Flow In Pipes*. 1^a Ed. Eng, *Journal of Chemical Information and Modeling*. 1^a Ed. Eng. Edited by T. : S. of P. E. Richardson. Texas: Society of Petroleum Engineers (SPE).

Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E. (1980) 'Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes', *AIChE Journal*, 26(3), pp. 345–354. doi: 10.1002/aic.690260304.

Taitel, Y. and Dukler, A. E. (1976) 'A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow', *AIChE Journal*, 22(1), pp. 47–55. doi: 10.1002/aic.690220105.

Takemura, T. *et al.* (1986) 'Dryout characteristics and flow behavior of gas-water two-phase flow through U-shaped and inverted U-shaped bends', *Nuclear Engineering and Design*, 95(C), pp. 365–373. doi: 10.1016/0029-5493(86)90061-0.

Usui, K., Aoki, S. and Inoue, A. (1983) 'Flow Behavior and Phase Distribution in Two-Phase Flow around Inverted U-Bend', *Journal of Nuclear Science and Technology*, 20(11), pp. 915–928. doi: 10.1080/18811248.1983.9733489.

USUI, K., Aoki, S. and Inoue, A. (1980) 'Flow Behavior and Pressure Drop of Two-Phase Flow through C-Shaped Bend in Vertical Plane, (I)', *Journal of Nuclear Science and Technology*, 17(12), pp. 875–887. doi: 10.1080/18811248.1980.9732670.

Vieira Bulgarelli, N. A. (2018) 'Experimental Study of Electrical Submersible Pump (ESP) Operating with Water / Oil Emulsion Estudo Experimental de Bomba Centrífuga Submersa (BCS) Operando com Emulsão Água / Óleo Experimental Study of Electrical Submersible Pump (ESP) Operating wit', p. 135.

Volkart, P. (1980) 'The mechanism of air bubble entrainment in self-aerated flow', *International Journal of Multiphase Flow*, 6(5), pp. 411–423. doi: 10.1016/0301-9322(80)90003-8.

Xu, J. L., Cheng, P. and Zhao, T. S. (1999) 'Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps', *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3), pp. 411–432. doi: 10.1016/S0301-9322(98)00057-3.

ANEXO I – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste anexo são apresentadas as figuras dos resultados dos testes para o caso de Óleo-Ar e Água-Ar. Foi calculado o comprimento da bolha alongada estacionária medida experimentalmente.

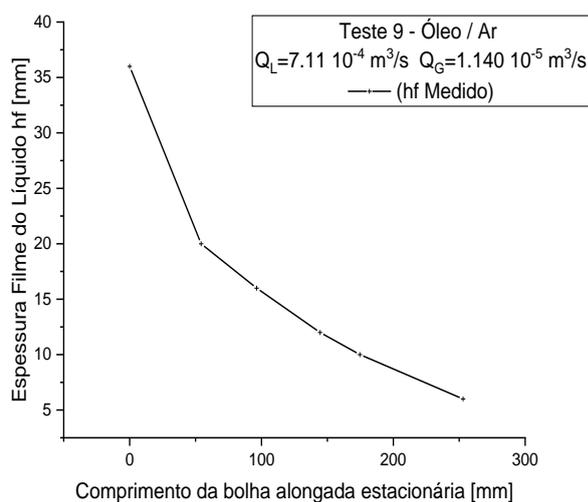


Figura I-1: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 10 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

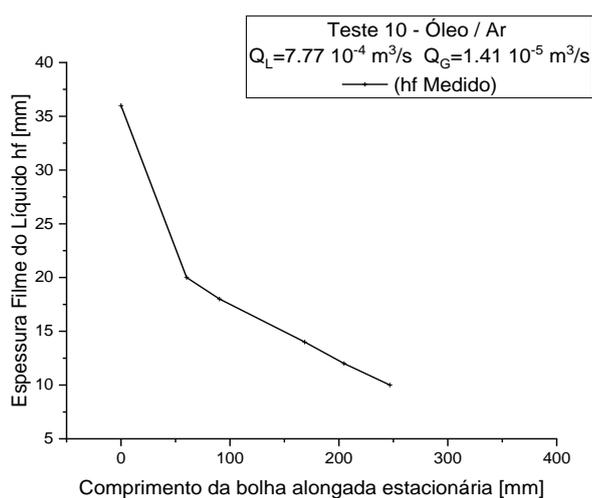


Figura I-2: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 10 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

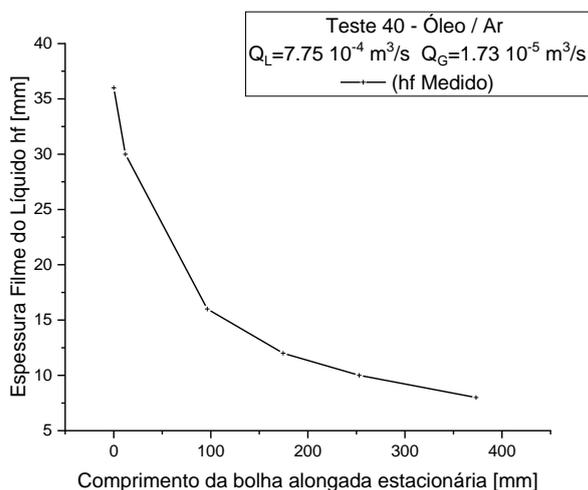


Figura I-3: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 40 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

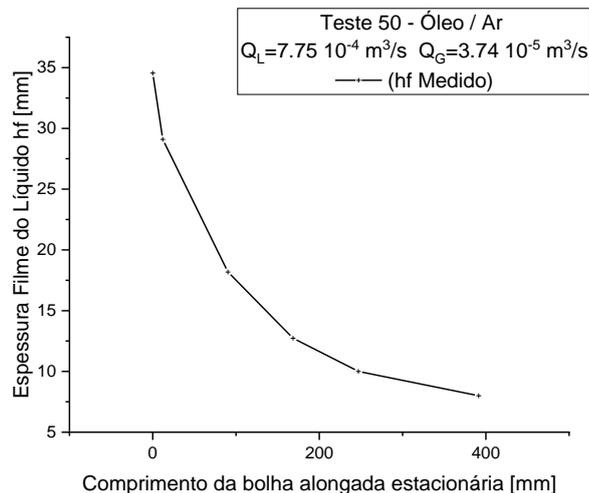


Figura I-4: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 50 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

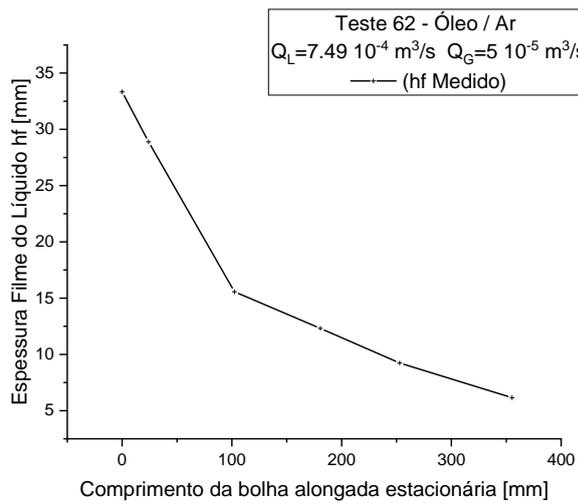


Figura I-5: Comprimento da bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 62 (Óleo-Ar)

Fonte: Autor

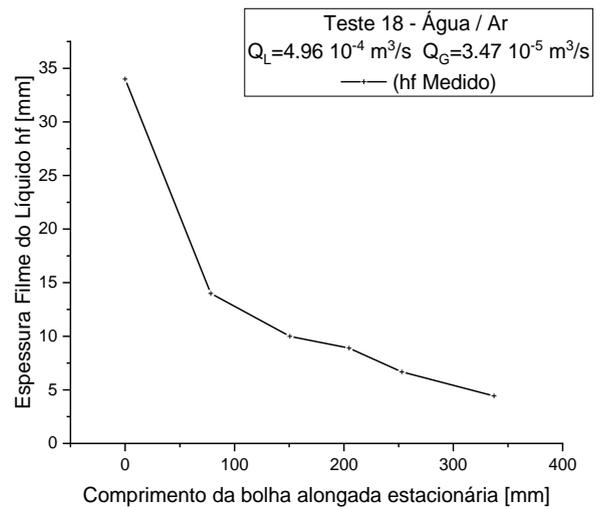


Figura I-6: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 18 (Água-Ar)

Fonte: Autor

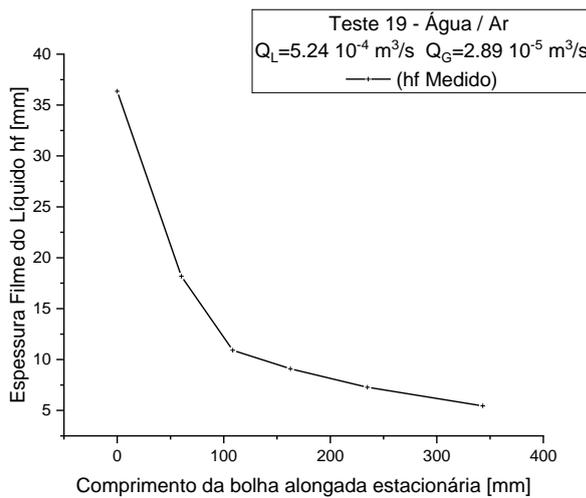


Figura I-7: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 19 (Água-Ar)

Fonte: Autor

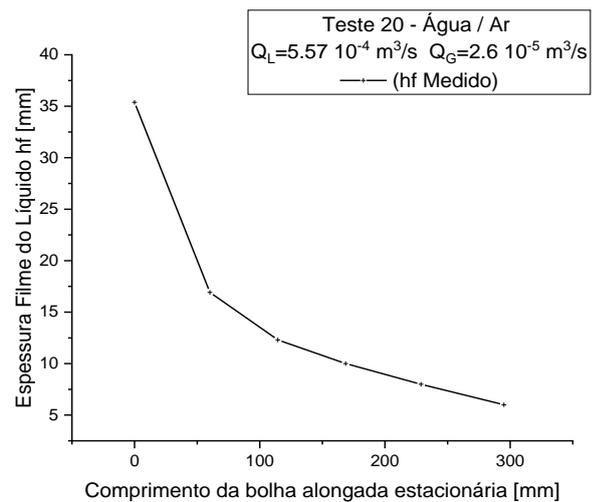


Figura I-8: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 20 (Água-Ar)

Fonte: Autor

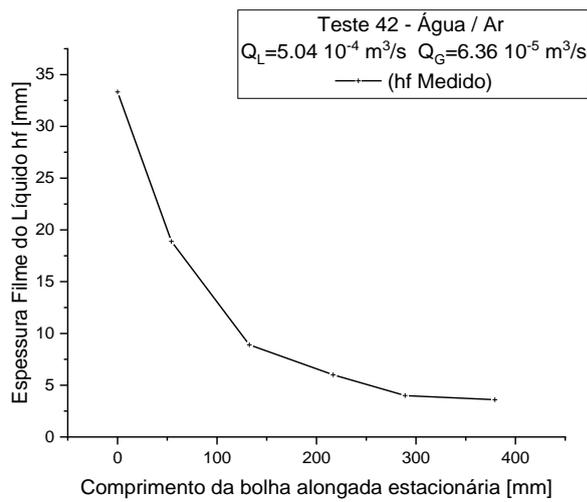


Figura I-9: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 42 (Água-Ar)

Fonte: Autor

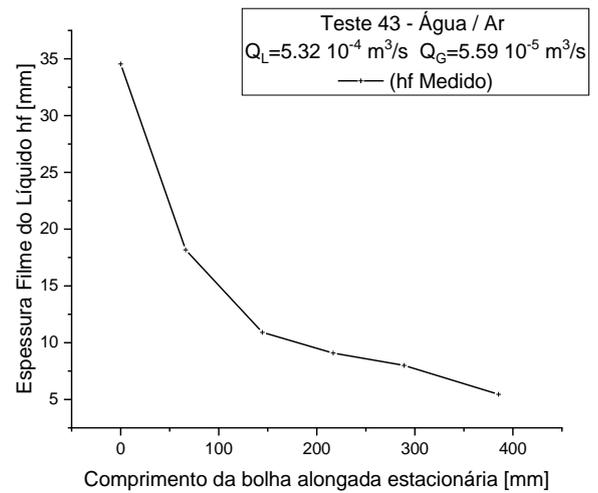


Figura I-10: Comprimento bolha alongada estacionária vs Altura Filme, Teste 43 (Água-Ar)

Fonte: Autor

ANEXO II – CÓDIGO DO PROGRAMA DE MODELAGEM NO MATHEMATICA MODELO ESTEVAM (2002)

ENTRADA:

(*Equação Filme de Líquido Mathematica Óleo – Ar*)

(*TESTE 10 *)

$$g = 9.81(*[m/s^2]*);$$

$$\rho_L = 860(*[kg/m^3]*)(*tabelas, colocar valor para cada teste*);$$

$$\rho_G = 1.797(*[kgm^3]*)(*tabelas, colocar valor para cada teste*);$$

$$\mu_L = 0.010494524(*[Pas]*)(*tabelas, colocar valor para cada teste*);$$

$$W = 2400(*[kg/h]*)(*tabelas, colocar valor para cada teste*)$$

$$Q_L = \left(\frac{W}{\rho_L}\right) * (1/3600)(*[m^3/s]*)$$

$$Q_g = 0.0000141(*[m^3/s]*)$$

$$as = 0.03(*[m]*)(*7*);$$

$$b = 0.04(*[m]*);$$

$$D_H = 0.034(*[m]*);$$

$$R = 0.345(*[m]*);$$

$$V_i = (Q_L + Q_g)/(as * b) (*[m/s]*)$$

$$t1 = 1/(1 * ((Q_L + Q_g)/(as * b))/(R * 3.1415)) (*[1/s]*);$$

$$w = V_i/R$$

$$ac = w * w * R;$$

$$\theta_i = 102(*[graus]*)$$

$$\theta_f = 143(*[graus]*)$$

$$d\theta = ((\theta_f - \theta_i) * (3.141593/180))/1 (*[radianos]*)$$

$$s1 = 0(*[m]*)$$

$$s2 = R*d\theta(*[m]*)(*colocar valor para cada teste, s = R * \theta*)$$

$$ds = (s2 - s1)/5 (*[m]*)(*17*)$$

$$theta = \theta_f - \theta_i(*[graus]*)(*18*)$$

$$trad1 = \theta_i * 3.1415/180$$

$$trad2 = \theta_f * 3.1415/180$$

$$h_{F1} = b(*[m]*)(*19*);$$

$$a = as(*[m]*)(*20*);$$

$$\text{Re}_i = (\rho_L * Q_L) / (as * \mu_L) (*21*)$$

$$\text{fc} = \text{Re}_i^{(1/20)(*22*)}$$

$$\text{fb} = 0.076 * \text{fc} / (\text{Re}_i)^{0.25}$$

$$V = \text{NDSolve} \left[\left\{ \rho_L * \left(y[s] * y'[s] - \left((y[s] * y[s] / R) + g * \text{Sin}[(\text{trad1} + s/R)] \right) \right) + (0.5) \right. \right. \\ \left. \left. * \rho_L * \text{fb} * y[s]^2 * \left(2/as + (y[s] * (as/Q_L)) \right) == 0, y[s1] = \right. \right. \\ \left. \left. = V_i \right\}, y[s], \{s, s1, s2\} \right]$$

$$V_s[s] = \text{Table}[\{s, \text{Evaluate}[y[s] /. V[[1,1]]]\}, \{s, s1, s2, ds\}] // \text{MatrixForm}$$

$$h_t = \text{Table}[\{s, \text{Evaluate}[Q_L / (y[s] * as) /. V[[1,1]]]\}, \{s, s1, s2, ds\}] // \text{MatrixForm}$$

SAÍDA:

WOLFRAM MATHEMATICA | STUDENT EDITION

Demonstrations | MathWorld | Wolfram Community | Help

Cell Behavior | Generated Options | Generate

Out[*]= 2400

Out[*]= $\frac{1}{1290}$

Out[*]= 0.657745

Out[*]= 1.90651

Out[*]= 102

Out[*]= 143

Out[*]= 0.715585

Out[*]= 0

Out[*]= 0.246877

Out[*]= 0.0493754

Out[*]= 41

Out[*]= 1.78018

Out[*]= 2.49575

Out[*]= 2117.51

Out[*]= 1.46653

Out[*]= 0.0164304

Out[6]= $\left\{ \left\{ y[s] \rightarrow \text{InterpolatingFunction} \left[\begin{array}{c} \text{Domain: } \{ \{0, 0.247\} \} \\ \text{Output: scalar} \end{array} \right] [s] \right\} \right\}$

Out[7]//MatrixForm=

$$\begin{pmatrix} 0. & 0.657745 \\ 0.0493754 & 1.24845 \\ 0.0987507 & 1.68711 \\ 0.148126 & 2.0678 \\ 0.197501 & 2.4132 \\ 0.246877 & 2.7318 \end{pmatrix}$$

Out[8]//MatrixForm=

$$\begin{pmatrix} 0. & 0.0392854 \\ 0.0493754 & 0.0206974 \\ 0.0987507 & 0.015316 \\ 0.148126 & 0.0124963 \\ 0.197501 & 0.0107077 \\ 0.246877 & 0.00945888 \end{pmatrix}$$