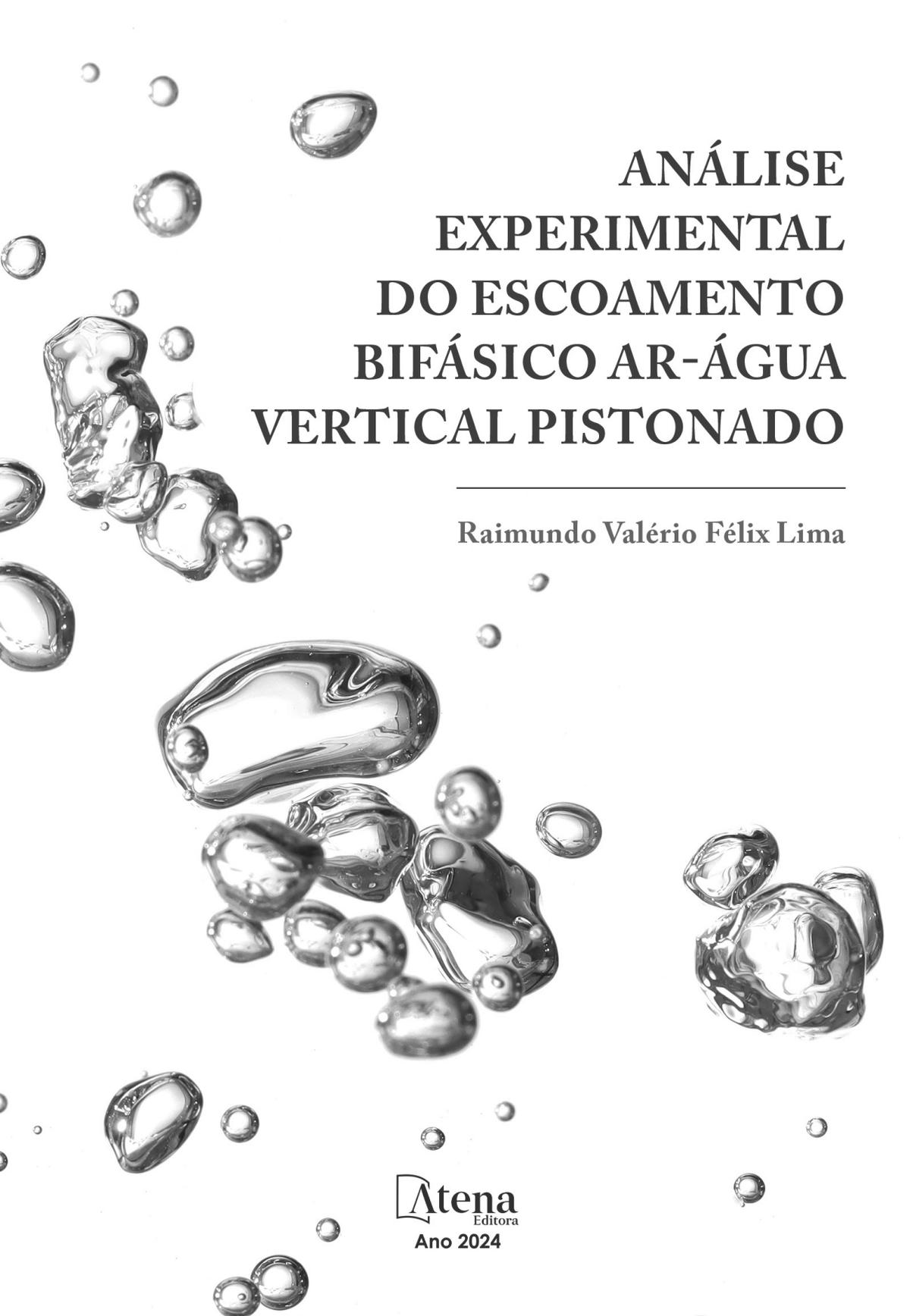


ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA VERTICAL PISTONADO

Raimundo Valério Félix Lima



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA VERTICAL PISTONADO

Raimundo Valério Félix Lima

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 O autor

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à

Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaína/TO

Profª Drª Cristina Aledi Felseburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz

Profª Drª Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo

Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Profª Drª Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Análise Experimental do Escoamento Bifásico Ar - Água Vertical Pistonado

Diagramação: Ellen Andressa Kubisty
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: O autor
Autor: Raimundo Valério Félix Lima

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L732 Lima, Raimundo Valério Félix
Análise experimental do escoamento bifásico ar - água
vertical pistonado / Raimundo Valério Félix Lima. –
Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-2719-3
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.193240708>

1. Propriedades dos sólidos. I. Lima, Raimundo Valério
Félix. II. Título.

CDD 530.4

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Agradeço primeiramente a Deus, em quem não há mudança nem sombra de variação, e de quem descende toda boa dádiva e todo dom perfeito, por que sem Ele nada poderia ter feito.

Agradeço a minha família, a meu pai com quem junto passamos a apreciar o sol de cada manhã, a minha mãe que apesar de pouco entender as dificuldades deste trabalho, no entanto, como toda mãe de uma maneira que não se pode explicar, no íntimo torceu por mim, a meu irmão pela grande parceria a toda hora, a minha irmã que apesar de longe, também torceu por mim.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Oliveira, pela disposição em iniciar uma linha de pesquisa sem recurso algum, a não ser do próprio bolso, mas que resultou neste trabalho e vai resultar em tantos outros.

Agradeço a professora Danielle Regina, por emprestar a câmera com a qual foi possível a realização dos filmes, para a técnica de filmagem de alta velocidade utilizada neste trabalho.

Agradeço ao colega do mestrado Djohn Maciel, que me auxiliou na realização dos experimentos, cuja ajuda foi fundamental para a obtenção dos resultados, e também aos alunos do curso de Engenharia Mecânica, Aline, Nayara, Diego e Kaíque, cada um a seu tempo, me ajudou de alguma forma com a realização dos experimentos.

Agradeço ao técnico laboratorista, o Sr. Lázaro, com o qual sempre pudemos contar no tocante a montagem do aparato experimental.

Agradeço ao secretário do PPGEM, o Sr. Ronivaldo, pela paciência, atenção e orientação, sempre a mim dispensadas.

Agradeço a todos os professores da coordenação do curso de mecânica do Instituto Federal de Pará, pelo apoio e solidariedade para comigo.

*Às vezes Deus te leva pelo caminho mais longo não para te punir,
mas sim para te preparar. (autor desconhecido)*

O escoamento bifásico é típico de aplicações em sistemas industriais, em especial aqueles em que se tem líquido e gás escoando por tubulações. Em função disto, a determinação dos parâmetros deste escoamento, particularmente aqueles relacionados com a fase gasosa tem grande relevância, uma vez que, o comportamento característico desta fase em um padrão de escoamento denominado de *slug flow* (pistonado) é na forma de bolhas alongadas, as quais são algumas vezes indesejáveis, em função de poderem ocasionar dificuldades de operação dos sistemas e até mesmo causar acidentes. Este trabalho utiliza a técnica da sonda condutiva para medir a fração de vazio média, o tamanho e a velocidade das bolhas alongadas e o tamanho dos pistões de líquido em um escoamento pistonado contínuo. Uma sonda condutiva constituída por dois sensores foi construída no próprio laboratório de forma artesanal, e em seguida foi caracterizada para se determinar a distância entre as pontas dos sensores, bem como a área e o perímetro da ponta da sonda, que são parâmetros importantes deste instrumento para a obtenção de resultados confiáveis. Um aparato experimental foi construído no qual, na tubulação da seção de teste, em duas estações de medição, localizadas a 1 metro e a 2 metros da injeção de ar, respectivamente, a sonda condutiva foi montada, e o experimento foi realizado, com alguns pares de vazão, sendo ajustados para o escoamento ar-água. Os valores da velocidade e tamanho das bolhas alongadas e do tamanho do pistão líquido, apreendidos pela sonda condutiva, foram comparados aos mesmos parâmetros obtidos para o mesmo escoamento, pela técnica de filmagem de alta velocidade, utilizando uma câmera filmando a 1000 quadros por segundos. A técnica da filmagem de alta velocidade, não possui caráter intrusivo, e assim, pode-se estimar a intrusividade da sonda condutiva para a obtenção dos parâmetros do escoamento. A comparação dos resultados mostrou que os valores obtidos para os parâmetros do escoamento, pela sonda condutiva, em média, ficaram abaixo 15% dos valores obtidos pela filmagem de alta velocidade, mesmo na condição do escoamento não se encontrar inteiramente desenvolvido.

PALAVRAS-CHAVE: Bifásico; Sonda Condutiva; Bolhas Alongadas; Pistonado; Filmagem de Alta Velocidade.

The two-phase flow is typical of applications in industrial systems especially those in which liquid and gas are flowing through pipes. Due to this determination of the flow parameters, particularly those related to the gas phase has great relevance, since the characteristic behavior of this phase at a flow pattern known as slug flow is in the form of elongated bubbles, which are sometimes undesirable, because that can cause systems operating difficulties and even cause accidents. This work uses the conductive probe technique to measure the mean void fraction, the size and speed of the elongated bubbles and the size of the slugs in a continuous slug flow. The conductive probe comprises two sensors were built in the laboratory by hand, and then were characterized to determine the distance between the tips of the sensors, as well as the area and the perimeter of the tip of the probe, which are important parameters in this instrument to obtain reliable results. An experimental apparatus was constructed in which the pipe test section, two measuring stations located at 1 meter and 2 meters of air injection respectively, conductive probe was mounted, and the experiment was conducted, with some pairs flow being adjusted to the flow air-water. The values of the speed and size of the elongated bubbles and the size of the slugs, obtained by the conductive probe are compared to the same parameters obtained for the same flow by the high speed recording technique using a camera filming the 1000 frames per second. The high speed recording technique, there has intrusive characteristic, and thus can estimate the intrusiveness of the conductive probe to obtain the flow parameters. A comparison of the results showed that the values for the flow parameters by conductive probe on average were below 15% of the values obtained by high speed recording at the same flow condition has not been fully developed.

KEYWORDS: Two-phase; Conductive Probe; Elongated Bubbles; Slugs; High-Speed Recording.

A	Área transversal interna do duto (mm^2)
AN_{pix}	Área para a ponta da sonda (pixels)
AN_{pixref}	Área tomada como referência (pixels)
A_{ref}	Área tomada como referência (mm^2)
A_s	Área da ponta da sonda
C_1	Razão entre as velocidades máxima e média do perfil de velocidade, e coeficiente nas equações 2.35 e 2.36.
C_2	Definida nas equações 2.38 e 2.39, e coeficiente da equação 2.35 e 2.36.
D	Diâmetro interno da tubulação (mm)
f	Fator de fricção para o número de Reynolds
f_2	Frequência de aquisição da câmera de alta velocidade
EL	Distância de referência para medições com a câmera de alta velocidade (mm)
E_o	Número de Eotvos
EN_{pix}	Distância para a ponta da sonda (pixels)
EN_{pixref}	Distância tomada como referência (pixels)
E_{ref}	Distância tomada como referência (mm)
ES	Distância entre pontas da sonda (mm)
Fr	Número de Froude
G	Velocidade mássica (Kg/m^2)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Fração volumétrica
K	Número de bolhas dispersas pareadas no pistão líquido
L	Comprimento (mm)
\dot{M}	Vazão mássica (Kg/s)
N	Número de bolhas alongadas pareadas
PN_{pix}	Perímetro para a ponta da sonda (pixels)
PN_{pixref}	Perímetro para a área tomada como referência (pixels)
P_{ref}	Perímetro da área tomada como referência (mm)
P_s	Perímetro da ponta da sonda (mm)
Q	Vazão volumétrica (m^3/s)
Re	Número de Reynolds
S	Razão de deslizamento
$S(\bar{w})$	Desvio padrão experimental da média
T	Tempo total de aquisição
U	Velocidade (m/s)
u	Incerteza de mediação
V	Volume (m^3)

\bar{w}	Grandeza arbitrária
w	Média da grandeza arbitrária
X	Distância vertical referente a localização das estações de medição desde a injeção de ar
x	Título da mistura
ΔQ_1	Diferença entre quadros definida na equação 4.8
ΔQ_2	Diferença entre quadros definida na equação 4.9
Δt	Intervalo de tempo decorrido entre o toque do primeiro e do segundo sensor na bolha.
$\Delta t'$	Intervalo de tempo de permanência do primeiro sensor dentro da bolha alongada
$\Delta t''$	Intervalo de tempo de permanência do primeiro sensor no pistão líquido
$\Delta t'''$	Intervalo de tempo de permanência do primeiro sensor dentro da bolha dispersa no pistão líquido.

Subscritos

d	<i>Drift</i> (Desvio)
e	Entrada
h	Homogênea
g	Fase gasosa
l	Fase líquida
m	Mistura
max	Máxima
med	Média
N	Nariz de uma bolha alongada
r	Relativa
s	Pistão líquido
sf	Pistão líquido pela filmagem rápida
sg	Superficial do gás
sl	Superficial do líquido
ss	Pistão líquido pela sonda condutiva
TB	Bolha de Taylor (Bolha alongada)
TBf	Bolha de Taylor pela filmagem rápida
TBs	Bolha de Taylor pela sonda condutiva

Símbolos gregos

α	Fração de vazio
β	Ângulo de inclinação da tubulação com a horizontal (Rad)

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica (Kg/m ³)
Σ	Parâmetro da tensão superficial
σ	Tensão superficial (N/m)
μ	Viscosidade absoluta (N.s/m ³)
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.2 JUSTIFICATIVA	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO.....	7
2.2 CONCEITOS BÁSICOS PARA O ESCOAMENTO BIFÁSICO.....	7
2.3 MODELOS DE ESCOAMENTO BIFÁSICO	11
2.3.1 O modelo homogêneo	11
2.3.2 O modelo de dois fluídos ou fluxos separados.....	11
2.4 PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO.....	11
2.4.1 <i>Bubbly flow</i> (Escoamento borbulhante).....	12
2.4.2 <i>Slug flow</i> (Escoamento pistonado).....	12
2.4.3 <i>Churn flow</i> (Escoamento agitado).....	13
2.4.4 <i>Annular flow</i> (Escoamento anular)	13
2.5 MAPAS DE PADRÕES DE ESCOAMENTO	13
2.6 TRANSIÇÕES DOS MAPAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO.....	15
2.6.1 Transição do padrão borbulhante para padrão pistonado.....	16
2.6.2 Transição do padrão pistonado para o padrão agitado.....	17
2.7 A HIDRODINÂMICA DO PADRÃO DE ESCOAMENTO PISTONADO VERTICAL ASCENDENTE	19
2.7.1 A Estrutura do escoamento	19
2.7.2 O movimento das bolhas	20
2.7.3 A velocidade de ascensão das bolhas	21
2.7.4 O movimento de várias bolhas alongadas	23

3. AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO UTILIZADAS	28
3.1 A TÉCNICA DE MEDIÇÃO POR SONDA CONDUTIVA	28
3.1.1 Um breve histórico acerca da utilização da sonda condutiva.....	28
3.1.2 A configuração da sonda condutiva	30
3.1.3 O princípio de funcionamento da sonda condutiva.....	31
3.1.4 O circuito de aquisição de sinais.....	33
3.1.5 Determinação do nível de corte.....	35
3.1.6 As desvantagens da utilização da técnica	36
3.1.7 Critério de seleção de bolhas alongadas	37
3.2 A TÉCNICA DE MEDIÇÃO POR FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE.....	39
3.2.1 O princípio de utilização da técnica	40
3.2.2 As desvantagens na utilização da técnica	41
4. O DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1 A CONSTRUÇÃO DA SONDA CONDUTIVA	43
4.1.1 A preparação dos sensores da sonda.....	43
4.2 A CARACTERIZAÇÃO DA SONDA CONDUTIVA	45
4.2.1 A caracterização da distância entre pontas da sonda.....	46
4.2.2 A caracterização da área e do perímetro da ponta da sonda.....	48
4.3 O APARATO EXPERIMENTAL	52
4.3.1 O funcionamento do aparato experimental.....	52
4.3.2 Os elementos do aparato experimental	52
4.4 A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	55
4.4.1 As condições de fluxo do experimento	56
4.4.2 As propriedades do ar e da água no experimento.....	56
4.4.3 O procedimento experimental	57
4.5 O PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO COM A SONDA CONDUTIVA.....	58
4.5.1 A montagem da sonda condutiva ao aparato experimental.....	58

4.5.2 O procedimento para a aquisição de sinais	60
4.5.3 O processamento dos dados experimentais.....	62
4.5.4 A determinação da velocidade da bolha de Taylor	64
4.5.5 A determinação do comprimento da bolha de Taylor	65
4.5.6 A determinação do comprimento do pistão de líquido.....	65
4.5.7 A determinação da fração de vazio média na tubulação.....	65
4.6 O PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO COM FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE.....	66
4.6.1 O procedimento para a gravação dos vídeos	66
4.6.2 O tratamento dos vídeos realizados	69
4.6.3 A determinação da velocidade da bolha alongada	70
4.6.4 A determinação do tamanho da bolha alongada	71
4.6.5 A determinação do tamanho do pistão de líquido.....	72
4.7 A ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	74
4.7.1 O valor medido e o valor verdadeiro	74
4.7.2 A incerteza de medição.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL AOS MAPAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO.....	76
5.2 RESULTADOS PARA A FRAÇÃO DE VAZIO MÉDIA NA TUBULAÇÃO.....	78
5.3 RESULTADOS PARA A VELOCIDADE DAS BOLHAS ALONGADAS.....	83
5.3.1 Os valores experimentais de C_1 e da velocidade de desvio U_d	88
5.4 RESULTADOS PARA O COMPRIMENTO DAS BOLHAS ALONGADAS.....	91
5.5 RESULTADOS PARA A FREQUÊNCIA DE BOLHAS ALONGADAS.....	98
5.6 RESULTADOS PARA O COMPRIMENTO DOS PISTÕES DE LÍQUIDO.....	101
6. CONCLUSÃO	108
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
ANEXOS.....	115
ANEXO A – ESBOÇO DO ALGORÍTMO DESENVOLVIDO EM MATLAB / SIMU-LINK.....	115
APÊNDICES.....	116
APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DA SONDA 2	116
APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO.....	117
SOBRE O AUTOR	119

INTRODUÇÃO

A definição dos parâmetros relativos ao fluxo das fases líquida e gasosa, em regime de escoamento multifásico, tem sido matéria de muitos trabalhos realizados por pesquisadores há algumas décadas. A caracterização de ambas as fases em escoamentos deste tipo se faz necessária, visto que, em muitos processos que acontecem no âmbito industrial, a ocorrência simultânea de duas fases, seja de uma mesma substância ou de substâncias diferentes é muito comum.

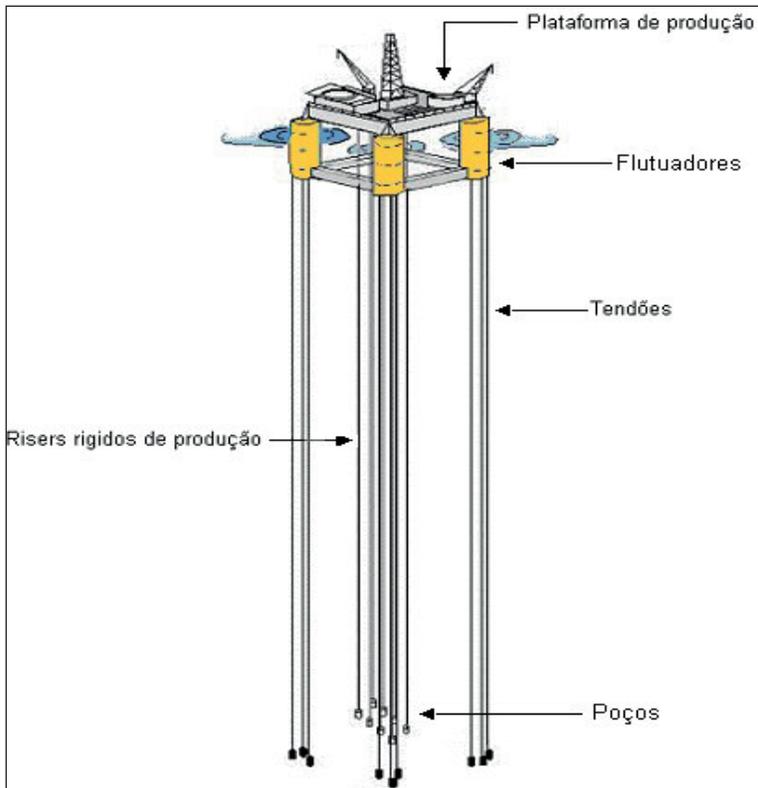
O transporte de energia, quantidade de movimento e de massa em um escoamento multifásico, depende fortemente da distribuição da área interfacial, que é determinada pelos valores locais de tamanho das bolhas de gás e de retenção gasosa (fração de vazio média na tubulação), além do tamanho das porções de líquido, que por sua vez, dependem da velocidade relativa média entre as fases, os quais assim se constituem, como os parâmetros do escoamento multifásico.

Um caso particular de escoamentos multifásicos são os escoamentos bifásicos de líquido e gás, frequentemente encontrados em tubulações de diversas atividades industriais. Escoamentos bifásicos são encontrados em sistemas de bombeamento de emprego geral, nos quais a presença de gás, geralmente traz sérios transtornos a operação. Também ocorrem nos processos de vaporização e condensação em sistemas térmicos, onde a mudança de fase é significativa e a convecção forçada, se constitui como o principal mecanismo de transferência de calor, como acontece no interior de caldeiras e condensadores de sistemas de geração de energia, em sistemas de refrigeração industrial de um modo geral, em trocadores de calor de contato direto, e em processos de absorção de gases, estes dois últimos relacionados a indústria química.

Dentre os diversos processos, duas aplicações industriais em particular, para as quais a obtenção dos parâmetros relativos ao escoamento bifásico é de relevante importância, podem ser aqui mencionadas.

Na indústria do óleo e gás, como é o caso dos risers, que são tubulações de grande comprimento, utilizados na extração de petróleo em águas profundas, como ilustrado na figura 1.1, por dentro dos quais escoam uma mistura de petróleo, água, gases e areia do fundo do mar. O conhecimento dos parâmetros relativos ao escoamento das fases envolvidas, principalmente a gasosa é de grande relevância na prevenção de acidentes em plataformas marítimas, pela atuação direta no controle da velocidade e no tamanho das bolhas de gás, que se formam por ocasião do desenvolvimento da extração do petróleo e se propagam pelo interior dos risers.

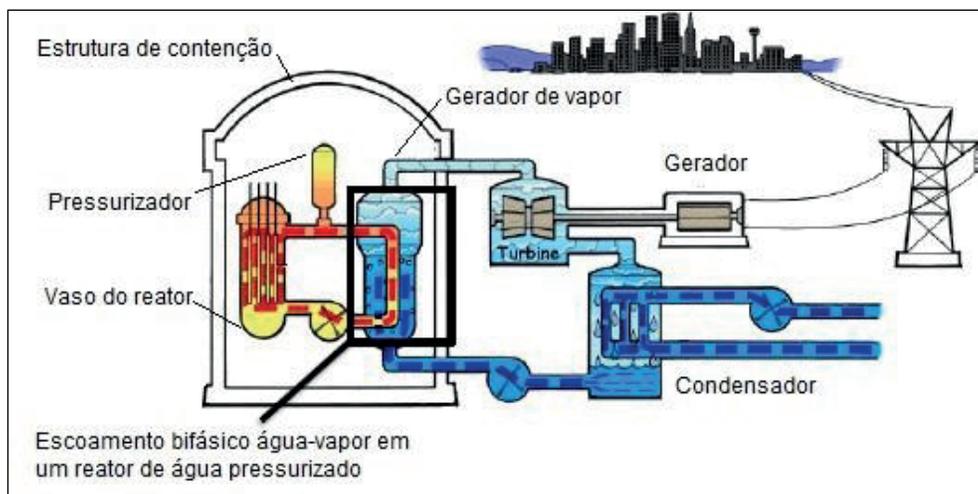
Figura 1.1 - Esquema da configuração dos risers em uma plataforma de extração de petróleo



Fonte: Adaptado de www.offshore-technology.com

A indústria nuclear é um campo onde o escoamento bifásico adquire uma importância especial. Em uma planta de geração de energia nuclear, por exemplo, um reator pressurizado de água secundário, como ilustrado na figura 1.2, contém uma mistura de água e vapor, em altas pressões e temperaturas, suficientes para promover uma constante mudança de fase. As duas fases interagem dentro dos tubos do trocador de calor, de tal maneira que, dependendo do título do vapor, das velocidades de ambas as fases e da forma como elas estão distribuídas, em caso de um acidente com depressurização, o conhecimento desses parâmetros vai servir para controlar, a troca de calor e a criação de hidrogênio, oriundas dessa condição, prevenindo os eventuais danos que venham a ocorrer a instalação, além de também servir para revelar, os possíveis erros que teriam sido cometidos na operação da planta, para que se chegasse a este estado.

Figura 1.2 - Esquema de um reator de água pressurizado de uma planta de geração de energia.



Fonte: Adaptado de www.fisicadereatoresnucleares.com

O escoamento bifásico possui uma natureza complexa, caracterizada algumas vezes por uma intensa turbulência, pela interface das fases possuírem um aspecto deformado, pela interação contínua com o permanente deslizamento entre as fases e pela compressibilidade da fase gasosa. Esse quadro torna difícil a obtenção de modelos de escoamento confiáveis, até mesmo em função, dele proporcionar uma estrutura de padrões de fluxos diferentes, os quais apresentam geometrias e distribuição de fases dependentes de um considerável número de parâmetros.

A superfície de separação dos fluidos denominada área interfacial, particularmente no escoamento bifásico líquido-gás, está distribuída geometricamente de diferentes formas, as quais dependem das condições operacionais (vazão e pressão), das propriedades físicas dos fluidos, e da configuração e disposição geométrica do duto. Os diferentes arranjos são conhecidos como padrões de escoamento, e sua identificação é fundamental para o desenvolvimento de modelos matemáticos (MEDINA, 2011).

Um dos padrões de escoamento bifásico de maior ocorrência, nas aplicações industriais acima citadas é o denominado *continuous slug flow* (escoamento pistonado contínuo), o qual possui natureza intermitente, e que existe em uma ampla faixa de velocidades das fases, segundo os estudos de diversos autores, dentre os quais estão os trabalhos de Taitel *et al* (1980) e Mishima *et al* (1984). Esse padrão de escoamento será o objeto deste trabalho, e ele é caracterizado pela presença de uma bolha de gás alongada, seguida por um pistão líquido que pode ou não conter pequenas bolhas de gás entranhadas.

Shemer (2003) comenta que, o escoamento pistonado contínuo ao longo da tubulação é muito dependente das velocidades relativas entre as bolhas. Quando as bolhas

alongadas possuem distâncias de separação curtas entre si, elas aceleram uma em direção as outras, se misturando. Durante o processo de mistura, ambos as bolhas alongadas e os pistões líquidos aumentam de tamanho, este processo se finaliza, quando todas as bolhas alongadas propagam-se com a mesma velocidade translacional.

Em função da necessidade de se avaliar, as diversas condições de ocorrência do escoamento multifásico, como o que diz respeito ao padrão pistonado, por exemplo, há algumas décadas, pesquisadores têm desenvolvido várias soluções para a medição dos parâmetros envolvidos. Isto resultou na concepção de alguns instrumentos que são usados, não só na obtenção dos parâmetros, mas também na identificação do padrão de escoamento multifásico.

Inicialmente, a instrumentação em escoamentos gás-líquido foi desenvolvida visando, a determinação de perfis médios e locais de fração de vazio. Com o passar do tempo, o progresso dos métodos experimentais permitiu que velocidades médias e locais de ambas as fases, assim como, frequências de passagem das interfaces e a temperaturas das fases, pudessem ser quantificadas (BARBOSA Jr, 1997).

Diversas técnicas experimentais foram sendo propostas no decorrer do tempo, e vêm sendo utilizadas para determinar os parâmetros do escoamento pistonado, dentre elas se pode citar, as técnicas da sonda condutiva e da sonda capacitiva, e as técnicas complexas, como a tomografia por raios X e raios gama.

Mas recentemente, as técnicas por ultrassom e por sonda de fibra ótica, ganharam bastante espaço, por utilizarem radiação não ionizante, e possuem transdutores robustos. Contudo, especialmente a técnica por ultrassom, ainda necessita de validação experimental em escoamentos bifásicos. (MAYOR *et. al*, 2007)

Outra técnica bastante empregada recentemente, embora já se fizesse algum uso dela no passado é a técnica de filmagem de alta velocidade ou câmera de alta velocidade. Hoje, sobretudo, pelos métodos de análise de imagens terem sido bastante aperfeiçoados, esta técnica vem ganhando muito espaço, porque propicia o acompanhamento visual do escoamento, sendo de grande valia para o seu entendimento, sem contar o fato de não ser intrusiva, e servir de verificação dos resultados obtidos por outras técnicas.

Qualquer das técnicas mencionadas acima, não tem uma aplicação universal, e seu uso pode ser restrito a algumas condições específicas do escoamento. Contudo, dentre as diversas técnicas experimentais, a técnica da sonda condutiva de sensor duplo é uma das mais conhecidas e utilizadas, para obter parâmetros do escoamento como velocidade e tamanho das bolhas, por exemplo.

Heringe e Davis (1974) mostraram ser a técnica de sonda condutiva, comparativamente entre outras técnicas de reconhecimento de fase, a mais adequada para detectar a fase local em escoamento gás-líquido, desde que a fase líquida seja condutiva.

Entretanto, a literatura que trata acerca da utilização da técnica de sonda condutiva, apresenta algumas ponderações aos métodos de análise que merecem atenção, como

aqueles relacionados ao cálculo da velocidade da bolha. Nesta análise, são utilizados os sinais obtidos pela sonda, quando da passagem das partes dianteira e traseira das bolhas, e então todos os resultados devem ser tratados estatisticamente, a fim de minimizar os erros ocorridos (SILVA, 2007).

1.1 OBJETIVO GERAL

Obtenção dos principais parâmetros de um escoamento bifásico ar-água pistonado vertical contínuo, como, fração de vazio, velocidade de ascensão e comprimento das bolhas alongadas, e comprimento dos pistões líquidos, com a utilização da técnica da sonda condutiva e da técnica de filmagem de alta velocidade ou câmera de alta velocidade, comparando os resultados obtidos por cada técnica, através de uma análise estatística baseada na incerteza de medição, com o intuito de verificar a intrusividade da sonda condutiva, em relação a um método de análise não intrusivo, no que diz respeito, a obtenção dos parâmetros do escoamento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construção de um aparato experimental, para realização de experimentos em escoamento bifásico;
- Construção e caracterização de sondas condutivas, para medição dos parâmetros do escoamento bifásico.
- Avaliar e comparar, os resultados obtidos para a velocidade de ascensão da bolha alongada e para a fração de vazio média na tubulação, com modelos empíricos existentes na literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância do tema de trabalho corresponde, à necessidade de se obter os parâmetros fundamentais do escoamento pistonado contínuo vertical, que são a fração de vazio, a velocidade, frequência e tamanho das bolhas alongadas, e o tamanho dos pistões líquidos, os quais são de grande importância para a compreensão dos fenômenos físicos, que estão envolvidos em escoamentos deste tipo. O regime pistonado contínuo vertical é uma ocorrência muito comum, em escoamento bifásico gás-líquido em tubulações industriais, e geralmente é um padrão de escoamento indesejável, uma vez que a existência de grandes volumes de pistões líquidos, assim como, a presença de grandes bolhas de gás, se deslocando a velocidades consideráveis, pode ocasionar problemas na operação de plantas industriais, onde o escoamento pistonado ocorre com frequência. Em função disto a previsão dos parâmetros em questão, favorece a prevenção de possíveis acidentes que venham a acontecer, bem como, contribui para as ações que devem ser realizadas na operação da planta com a finalidade de evitá-los.

Como o grande desafio para a modelagem de sistemas multifásicos, está no entendimento da forma de como acontece, a transferência de calor, quantidade de movimento e de massa, entre as fases, a determinação dos parâmetros deste escoamento experimentalmente, os quais por sua vez, estão relacionados a compreensão destes fenômenos, favorece a implementação de modelos analíticos que tentam descrevê-los, através da utilização destes referidos parâmetros, como dados de entrada para tais modelos.

Neste contexto, este trabalho propõe a utilização da sonda condutiva de sensores duplos, que vai ser construída e caracterizada no próprio laboratório de forma artesanal, para a obtenção dos parâmetros do escoamento pistonado contínuo vertical, que será reproduzido em uma seção de teste de um aparato experimental. Como a técnica da sonda condutiva tem caráter intrusivo, se utilizará a técnica da filmagem de alta velocidade, para se avaliar e comparar os resultados obtidos, buscando-se estimar a intrusividade da sonda no escoamento, como forma de procurar a melhoria da aplicação deste instrumento, para o uso em aplicações industriais.

Diferentemente de outras técnicas, que podem fornecer resultados bem melhores, em função da precisão dada pela tecnologia nelas empregadas, porém, com um custo elevado para sua utilização, a técnica da sonda condutiva, que vai ser utilizada neste trabalho, mesmo ao utilizar uma tecnologia, que apesar de não ser tão recente, ainda assim, pode oferecer resultados confiáveis a baixo custo, uma vez que, a sonda que será construída, vai utilizar materiais simples na sua confecção.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, esta introdução é seguida pela revisão bibliográfica, no capítulo 2 com uma exposição acerca da fundamentação teórica relacionada ao escoamento bifásico, e no capítulo 3 com a exposição das duas técnicas de medição utilizadas no trabalho. Depois no capítulo 4 é descrito o desenvolvimento experimental, que foi necessário para se determinar os parâmetros do escoamento pretendidos neste trabalho. Na sequência no capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos e toda a discussão feita sobre os mesmos. E por fim a conclusão do trabalho realizado.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a primeira parte da revisão bibliográfica com a fundamentação teórica do escoamento bifásico, primeiramente mostrando conceitos básicos relativos a este escoamento, passando pelos modelos em que são classificados, definindo os seus padrões de escoamento característicos, fazendo uma abordagem acerca dos mapas que os descrevem e os mecanismos de transição que governam a existência deles, para finalizar com uma abordagem mais detalhada acerca do padrão de escoamento pistonado, para o qual este trabalho se propõe a medir os parâmetros.

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO

Um escoamento composto pela mistura de duas fases, como gás-líquido, por exemplo, é denominado escoamento bifásico. Contudo, a maneira correta de se classificá-lo é quando nos referimos aos componentes da mistura, ou seja, bifásico de uma substância, mas, estando tanto na fase líquida como na fase gasosa (vapor e condensado); ou bifásico de duas substâncias, quando as fases são compostas de substâncias diferentes (água e ar).

O comportamento das fases se mostra sensível a variáveis geométricas (tamanho e orientação do duto: vertical, horizontal e inclinado); operacionais (vazão, pressão e temperatura) e propriedades das fases (massa específica, viscosidade e tensão superficial).

2.2 CONCEITOS BÁSICOS PARA O ESCOAMENTO BIFÁSICO

O estudo do escoamento bifásico traz consigo a necessidade de primeiramente, definir alguns termos básicos referentes ao escoamento. Considerando o escoamento bifásico de líquido e gás no interior de uma tubulação, com determinada área de seção transversal A , com taxa de vazão total em massa (\dot{M}), taxa de vazão total volumétrica (Q) e massa específica (ρ), tem-se:

$$\dot{M} = \dot{M}_l + \dot{M}_g \quad (2.1)$$

$$Q = Q_l + Q_g \quad (2.2)$$

Em que os subscritos (l) e (g), se referem a fase de líquido e gás respectivamente. Lembrando que:

$$Q = \frac{\dot{M}}{\rho} \quad (2.3)$$

Segue então:

$$Q_l = \frac{\dot{M}_l}{\rho_l} \quad (2.4)$$

$$Q_g = \frac{\dot{M}_g}{\rho_g} \quad (2.5)$$

Definindo os termos acima, tem-se que as velocidades superficiais do líquido e do gás, (U_{sl}) e (U_g) respectivamente, serão dadas pela razão entre a vazão volumétrica Q da referida fase e a área total da seção transversal do duto.

$$U_{sl} = \frac{Q_l}{A} = \frac{\dot{M}_l}{\rho_l A} \quad (2.6)$$

$$U_{sg} = \frac{Q_g}{A} = \frac{\dot{M}_g}{\rho_g A} \quad (2.7)$$

Estas velocidades podem ser definidas, como as velocidades que as fases teriam se estivessem escoando sozinhas, através da área total da seção do duto. A velocidade superficial aparece como variável nas coordenadas dos eixos dos mapas de padrão de escoamento, e é usada na modelagem fenomenológica de correlações que expressam a interação entre as fases. Nota-se que, para certo tubo de diâmetro dado, a velocidade superficial representa diretamente, a vazão da fase, mas ela não depende do deslocamento real da fase ao longo do duto.

Com as velocidades superficiais de cada fase a velocidade superficial total, ou velocidade do centro de volume da mistura, ou simplesmente velocidade de mistura (U_m) é definida por:

$$U_m = U_{sg} + U_{sl} = \frac{Q_l}{A} + \frac{Q_g}{A} = \frac{\dot{M}_l}{\rho_l A} + \frac{\dot{M}_g}{\rho_g A} \quad (2.8)$$

A velocidade média de cada fase é definida, pela razão entre a vazão volumétrica de cada fase e a área da fração da seção transversal do tubo ocupado por cada fase, sendo dadas pelas equações abaixo.

$$U_l = \frac{Q_l}{A_l} \quad (2.9)$$

$$U_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad (2.10)$$

A velocidade média da fase é quem traduz verdadeiramente o deslocamento da fase. Em um escoamento, as duas fases diferem uma da outra em massa específica e ou viscosidade, uma delas tende a escoar com velocidade mais elevada que a outra. Isto gera no fluxo uma importante característica de deslizamento de uma fase sobre a outra (CHISHOLM, 1983)

A fração de vazio (α) ou retenção gasosa é definida como a razão entre as áreas transversais ao escoamento ocupadas pelo gás (A_g), e pela área total do tubo (A), como mostra equação 2.11, do ponto de vista da abordagem unidimensional. De uma maneira mais completa, fração de vazio é uma propriedade estatística do escoamento, uma propriedade local, que representa a probabilidade de existência da fase em certo ponto do espaço no campo de escoamento.

$$\alpha = \frac{A_g}{A} = 1 - \frac{A_l}{A} \quad (2.11)$$

A fração volumétrica (H), ocupada pela fase líquida ou também denominada de retenção líquida para um escoamento homogêneo, é definida pela razão entre o volume da fase líquida (V_l), pelo volume total do tubo (V).

$$H = \frac{V_l}{V} = \frac{Q_l A_l}{QA} = (1 - \alpha) \frac{Q_l}{Q} \quad (2.12)$$

A fração de vazio (α) varia de zero, para o caso de se ter apenas líquido escoando, até um, no caso de apenas se ter gás escoando. O método mais comum de se medir a retenção líquida é isolar um segmento do escoamento, entre duas válvulas de fechamento rápido, e medir o líquido retido. Outra forma de determiná-lo é através das correlações consagradas na literatura, as quais definem fração de vazio.

Com a fração de vazio as velocidades superficiais para ambas as fases, podem ser relacionadas com as velocidades reais de cada fase (U_l) e (U_g), respectivamente, pelas seguintes equações:

$$U_l = \frac{U_{sl}}{1 - \alpha} \quad (2.13)$$

$$U_g = \frac{U_{sg}}{\alpha} \quad (2.14)$$

Na literatura referente ao escoamento bifásico um importante termo denominado de velocidade de massa é muito usado, o qual expressa a relação entre a massa da mistura e a área da seção transversal do duto (CHISHOLM, 1983).

$$G = \frac{\dot{M}}{A} \quad (2.15)$$

Segue por definição que:

$$G_g = \frac{\dot{M}_g}{A} \quad (2.16)$$

$$G_l = \frac{\dot{M}_l}{A} \quad (2.17)$$

O título (x) de uma mistura gás-líquido, em um escoamento bifásico é dado por:

$$x = \frac{\dot{M}_g}{M} = \frac{G_g A}{GA} = \frac{G_g}{G} \quad (2.18)$$

A razão entre a velocidade do gás e a velocidade do líquido (S), denominada de razão de deslizamento é dada por:

$$S = \frac{U_g}{U_l} \quad (2.19)$$

A velocidade relativa (U_r) de uma das fases em relação a outra, é denominada de velocidade de deslizamento. No caso a velocidade de deslizamento da fase gasosa, em relação a fase líquida é definida por:

$$U_r = U_g - U_l \quad (2.20)$$

A diferença entre a velocidade da fase e a velocidade homogênea (U_h), denominada de velocidade *drift* (de desvio) (U_d), indica o quanto a velocidade da fase se desviou da velocidade homogênea, no caso da fase gasosa, tem-se:

$$U_d = U_g - U_h \quad (2.21)$$

No caso de um escoamento homogêneo ($S = 1$), então (U_h) passa a ser a velocidade de mistura (U_m) (CHISHOLM, 1983).

A velocidade relativa, velocidade de deslizamento e razão de deslizamento são, algumas vezes confundidas. O deslizamento de uma fase (o gás, por exemplo, em um escoamento gás-líquido, ascendente em uma tubulação vertical) não significa o mesmo que a velocidade relativa entre o gás e o líquido. Novamente, o deslizamento se dá entre a fase e a mistura, cuja velocidade é (U_m), no caso de escoamento homogêneo.

Definidas as variáveis específicas do escoamento bifásico, pode-se deduzir a denominada relação fundamental para este escoamento, que consiste na razão entre os fluxos de massa de líquido e gás.

$$\frac{\dot{M}_l}{\dot{M}_g} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{U_l}{U_g} \frac{A_l}{A_g} \quad (2.22)$$

Dividindo-se o numerador e o denominador de ambos os lados da equação acima por (A), e substituindo o valor da razão de deslizamento (S), resulta em:

$$\frac{(1-x)}{x} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{1}{S} \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad (2.23)$$

A partir da relação acima, fundamental para o escoamento bifásico, tem-se uma ideia acerca da complexidade pertinente aos escoamentos deste tipo. Para um dado escoamento de gás e líquido em uma tubulação, existe uma dependência mútua entre o título (x), a fração de vazio (α), e o movimento relativo entre as fases, expresso pela razão de deslizamento (S).

2.3 MODELOS DE ESCOAMENTO BIFÁSICO

O escoamento bifásico é composto de uma fase contínua (predominante) e uma fase dispersa. Dois modelos em particular têm sido muito utilizados para determinar os parâmetros característicos do escoamento, o modelo homogêneo e o modelo de dois fluidos.

2.3.1 O modelo homogêneo

É um escoamento idealizado gás-líquido, considerado um modelo particular em escoamento multifásico, no qual as duas fases se encontram muito bem misturadas, e deslocam-se juntas com a mesma velocidade. Como por exemplo, o escoamento vertical ascendente de um líquido com uma relativa viscosidade e um gás, de tal maneira que, o líquido é dominante na tubulação e o gás encontra-se uniformemente disperso na forma de pequenas bolhas. Pelo líquido ter uma relativa viscosidade, a velocidade relativa do gás é muito baixa, de tal maneira que se pode considerar ($U_g \approx U_l \approx U$).

2.3.2 O modelo de dois fluidos ou fluxos separados

Neste modelo as duas fases deslocam-se separadamente, cada uma em seu próprio canal de fluxo com velocidades diferentes, sendo que a diferença entre elas se acentua, quando os dois fluidos têm massas específicas bem diferentes, estando na presença de um campo gravitacional, ou sujeitas a um gradiente de pressão elevado. As áreas dos canais de fluxo artificialmente separados são proporcionais a fração de vazio.

2.4 PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO

Este termo padrão de escoamento tem a ver com as configurações geométricas de cada fase em contato com outra fase. Em escoamento bifásico existem diferentes padrões de escoamento, os quais são dependentes das propriedades dos fluidos, da taxa de fluxo das fases e das dimensões da tubulação. De forma geral, os padrões de escoamento são divididos em escoamento disperso, onde uma fase se encontra completamente distribuída na fase contínua; e escoamento separado, em que ambas as fases são contínuas e separadas pela interface entre elas (BAGHAEI, 2009).

Quando dois fluidos em duas fases distintas (líquido/gás) passam a escoar em uma tubulação vertical ascendente, a medida que se aumenta a velocidade superficial do gás, observa-se que o comportamento de cada fase exhibe padrões como os mostrados na figura 2.1, da esquerda para a direita. Cada comportamento deste recebe uma denominação, a qual tem certas características particulares ao que está acontecendo a mistura dos dois fluidos.

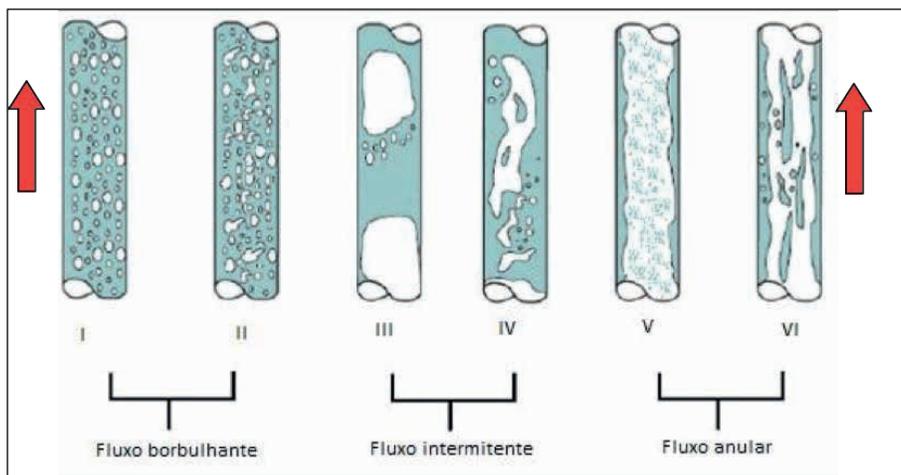
2.4.1 *Bubbly flow* (Escoamento borbulhante)

Neste padrão de fluxo a fase gasosa está completamente dispersa na fase líquida em pequenas bolhas, por todo o diâmetro da tubulação e ainda em qualquer inclinação dela, denominada de escoamento borbulhante disperso (BARNEA, 1987). Ou a fase gasosa está distribuída uniformemente em bolhas maiores de quase mesmo tamanho na fase líquida, com alguma ocorrência de coalescência no centro da tubulação, denominada de escoamento borbulhante não disperso, ou simplesmente borbulhante (TAITEL *et al*, 1980).

2.4.2 *Slug flow* (Escoamento pistonado)

Neste padrão de fluxo a velocidade superficial do gás ao aumentar, provoca o coalescimento das bolhas dispersas, de tal maneira que bolhas alongadas se formam, as quais possuem um formato semelhante ao de uma bala, e que a literatura consagrou pelo nome de bolha de Taylor. A seção transversal destas bolhas é quase equivalente a seção transversal da tubulação, sendo separadas apenas por uma fina espessura de um filme líquido, que se move no sentido oposto ao da bolha alongada.

Figura 2.1 - Padrões de escoamento vertical ascendente I. Borbulhante disperso; II. Borbulhante; III. Pistonado; IV. Agitado; V. *Wispy* (Gotas); VI. *Mist* (Misto).



Fonte: Adaptado de www.thermopedia.com.

O padrão intermitente pistonado é muitas vezes subdividido em escoamento pistonado e escoamento de bolhas alongadas. Quando o fluxo está calmo e o pistão líquido está quase totalmente livre de bolhas de gás, o padrão é denominado como escoamento de bolhas alongadas. Mas, para altas taxas de fluxo, quando o líquido está aerado com bolhas de gás, o fluxo é designado como escoamento pistonado. Apesar desta divisão o termo escoamento pistonado é usado para ambas as condições de escoamento (BARNEA e TAITEL, 1993).

2.4.3 Churn flow (Escoamento agitado)

Ao aumentar-se mais a velocidade superficial do gás, a bolha de Taylor começa a colapsar, distorcendo-se na interface gás-líquido. A bolha distorcida movimentada em agitação passando a ter formas irregulares nas porções de gás e líquido, formando uma região de oscilação altamente desordenada, já não havendo mais fase contínua para líquido e gás. Os pistões de líquido são destruídos pela maior concentração de gás, para formar gotas ao centro da tubulação e o fino filme de líquido não é mais observado (ZHOU, 2013).

2.4.4 Annular flow (Escoamento anular)

Quando a velocidade superficial do gás está acima de 14 m/s, este padrão de escoamento passa a ocorrer, com o gás ocupando o centro e o líquido ocupando a periferia da tubulação como um fino filme, com ambas as fases sendo contínuas e movendo-se para cima (HASAN e KHABIR, 1998). Pode ocorrer que o líquido esteja entranhado no centro da tubulação em grandes gotas e o filme de líquido possua bolhas de gás, esta variação para este padrão é conhecida como *wispy annular flow* (fluxo anular com gotas), ou pode acontecer também, que o gás tenha pequenas gotas de líquido entranhado, esta variação para este padrão é conhecida como *annular mist flow* (fluxo anular misto).

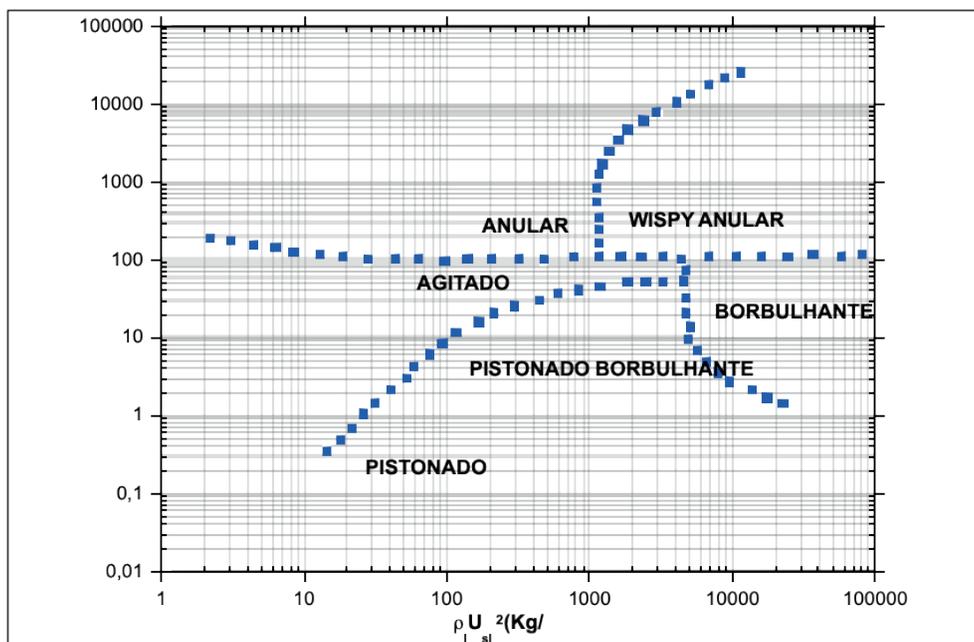
2.5 MAPAS DE PADRÕES DE ESCOAMENTO

Na literatura sobre escoamento bifásico existe uma grande quantidade de diagramas, que propõem regiões para os padrões de escoamento com suas respectivas fronteiras, que são denominados de mapas de padrões de escoamento. A grande maioria deles foi obtida através da observação direta, ou por meio de fotografias, para a identificação de um determinado padrão. Entretanto, em virtude dos padrões de escoamento ocorrerem em condições operacionais definidas, em sistemas com características próprias e cujas propriedades dos fluidos são conhecidas, não são totalmente válidos quando aplicados a outros sistemas. Porém, se o sistema a ser estudado for bem similar ao sistema que permitiu a geração do mapa, tanto mais correta será a identificação do padrão (COLLIER, 1981).

Griffith e Wallis (1961) propuseram a variável adimensional resultante da razão entre a velocidade superficial do gás e a velocidade superficial do líquido, em função de outra variável adimensional, resultante da razão entre a velocidade da mistura e o produto da aceleração da gravidade pelo diâmetro da tubulação, para representar a transição entre os escoamentos, intermitente e anular vertical ascendente.

Hewitt e Roberts (1969) obtiveram um mapa em coordenadas dimensionais, conforme é apresentado na figura 2.2, realizando observações em tubos verticais de diâmetro que variava de dez a trinta milímetros, dentro dos quais escoavam vapor e água. Os eixos cartesianos estão definidos em termos do fluxo do momento superficial do líquido e do gás, respectivamente.

Figura 2.2 - Mapa de padrão de escoamento de Hewitt e Roberts (1969).

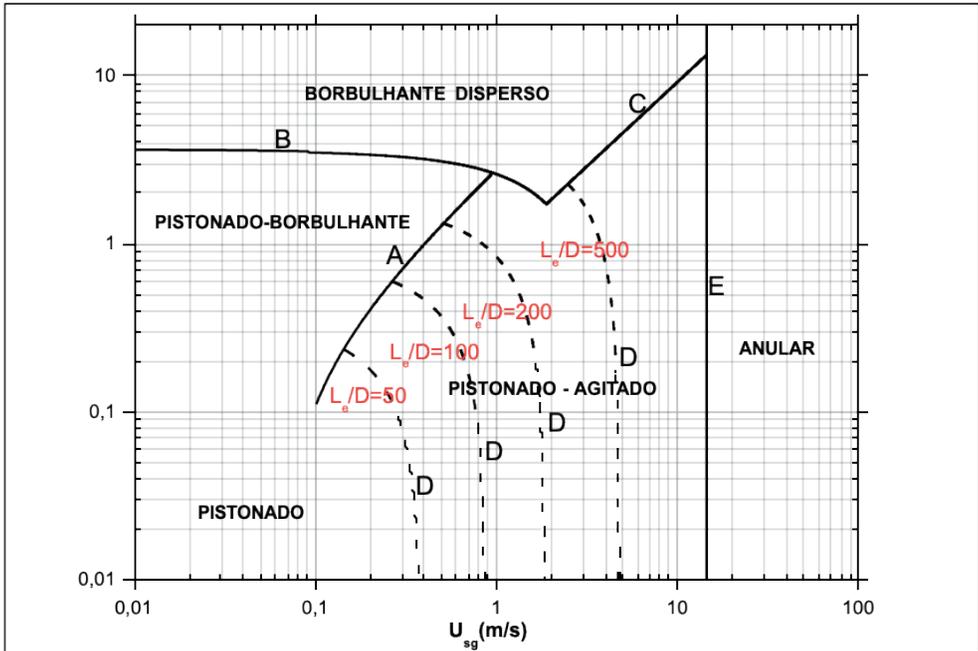


Fonte: Adaptado de Chisholm, 1983.

Oshinowo e Charles (1974) definiram como variáveis adimensionais a razão entre o número de Froude da mistura básica e um parâmetro definido pela razão da viscosidade absoluta, massa específica e tensão superficial das fases líquidas, pela razão entre as vazões de gás e líquido.

Taitel *et al* (1980), propuseram um mapa em coordenadas dimensionais para escoamento vertical, conforme mostra a figura 2.3, que apresentava em sua abordagem do fenômeno uma base teórica bastante fundamentada, embora ainda assim, não representasse adequadamente nas linhas de transição os padrões de escoamento.

Figura 2.3 - Mapa de padrão de escoamento de Taitel *et al* (1980) para tubulação de diâmetro $D = 25$ mm.



Fonte: Adaptado de Taitel *et al* 1980.

2.6 TRANSIÇÕES DOS MAPAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO

Cada padrão de escoamento é o resultado de diferentes características hidrodinâmicas, as quais por sua vez interferem em propriedades do escoamento, como por exemplo, a perda de carga e a capacidade de transferência de calor e quantidade de movimento. As transições entre os regimes de escoamento dependem de diversos fatores, dentre os quais, as velocidades do líquido e do gás, as propriedades dos fluidos, a orientação e o diâmetro do tubo e as condições de operação.

Enquanto a metodologia usada para encontrar os padrões de escoamento bifásico é puramente experimental, as transições entre os tipos de escoamento se utilizam de modelos empíricos e mecanicistas, sendo que estes últimos vêm apresentando bons resultados, para a explicação do mecanismo que governa a transição de um padrão de escoamento para o outro (COLLIER, 1981).

2.6.1 Transição do padrão borbulhante para padrão pistonado

De acordo com McQuillan e Whalley (1985) e Mishima e Ishii (1984), o escoamento borbulhante é observado a baixas velocidades superficiais do gás em relação as velocidades superficiais do líquido. E em geral com o aumento da velocidade superficial do gás, mais bolhas são geradas e a densidade das bolhas aumenta fazendo com que a distância entre elas diminua, e a aglomeração resultante que acaba provocando a coalescência das bolhas, seriam as causas da transição do padrão de escoamento borbulhante para o padrão de escoamento pistonado.

Taitel *et al* (1980) também atribuíram que o aumento gradual da coalescência de uma quantidade de bolhas, suficiente para formar uma bolha alongada (bolha de Taylor) ocorreria em uma fração de vazio crítica de 25% do volume da tubulação, provocando a transição do escoamento borbulhante para o escoamento pistonado, que corresponde a linha A, no diagrama apresentado na figura 2.3, a qual é dada pela seguinte equação.

$$U_{sl} = 3U_{sg} - 1,15 \left(\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{0,25} \quad (2.24)$$

Além disso, Taitel *et al* (1980), também definiram que, para tubulações de pequeno diâmetro, as áreas I e III, no diagrama da figura 2.3, o padrão pistonado existe com a presença de pequenas bolhas no pistão de líquido, o que seria um regime pistonado/borbulhante. O sistema que possui um diâmetro pequeno (D), da tubulação é aquele que satisfaz a seguinte relação definida pelos autores.

$$\left[\frac{\rho_l^2 g D^2}{(\rho_l - \rho_g)\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \leq 4,36 \quad (2.25)$$

Mishima e Ishii (1984) sugeriram que a transição do padrão borbulhante para padrão pistonado, ocorre em função de uma intensa aglomeração de bolhas menores, formando bolhas maiores, produzindo a coalescência na região de esteira. Eles usaram uma fração de vazio crítica de 0,3 para esta transição, que resultou na seguinte equação.

$$U_{sl} = \left(\frac{3,33}{1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}} - 1 \right) U_{sg} - \frac{0,76}{1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}} \left(\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.26)$$

Onde (U_{sl}), (U_{sg}), (ρ_l) e (ρ_g), são as velocidades superficiais e as massas específicas do líquido e do gás respectivamente, (σ) é a tensão superficial do líquido e (g) é a aceleração da gravidade.

Pelos trabalhos realizados acima se chega a conclusão que, a fração de vazio crítica e o tamanho inicial das bolhas são importantes fatores, para se determinar a transição do padrão borbulhante para o padrão pistonado. Todos os estudos acima propõem que esta transição é influenciada pelo tamanho inicial da bolha, resultando em diferentes interações afetando o comportamento do escoamento.

Taitel *et al* (1980), tomou o valor de 0,52 para a máxima fração de vazio (α) para bolhas dispersas, que na figura 2.3 define a linha C do diagrama, que define também a curva B, e estabeleceu a relação abaixo

$$U_{st} = U_{sg} \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (2.27)$$

2.6.2 Transição do padrão pistonado para o padrão agitado

Alguns trabalhos como de Mao e Dukler (1989), tem definido o regime de escoamento agitado, como uma transição entre o regime pistonado e o regime anular, deste modo o definindo como parte do padrão pistonado. Outros trabalhos definem o padrão agitado, como regime de escoamento separado (HEWITT, 1982; JAYANTI e HEWITT, 1992). Este escoamento é caracterizado por um padrão caótico onde os pistões de líquidos originais do escoamento pistonado, são destruídos pela alta velocidade superficial do gás.

Devido a complexa natureza destes padrões de escoamento, vários mecanismos têm sido propostos para modelar esta transição, dentre os quais, os três descritos a seguir com o passar dos anos ganharam sua importância.

Dukler e Taitel (1977) assim como Mao e Dukler (1989), consideraram o regime agitado como sendo um fenômeno de entrada, que leva a um escoamento pistonado estável após alguma distância da entrada da tubulação, desde que o comprimento da tubulação seja grande o suficiente. Assim o que ocorreria é que próximo a entrada da tubulação, os pistões de líquido que separam duas bolhas alongadas consecutivas são tão curtos, que a esteira atrás destas bolhas destruiria a formação destes pistões, e então o escoamento passaria a ser agitado. Na figura 2.3 cada linha D, define esta transição e cada linha corresponde ao comprimento do número de diâmetros da tubulação, que estabelece o comprimento de entrada até aonde o escoamento agitado será observado. Uma expressão para mensurar esta distância requerida para formar pistões líquidos, para uma dada condição de fluxo foi determinada por Taitel *et al* (1980), e é dada pela equação abaixo, que representa cada uma das linhas D na figura 2.3.

$$\frac{L_e}{D} = 40,6 \left(\frac{U_{sg} + U_{st}}{\sqrt{gD}} + 0,22 \right) \quad (2.28)$$

Onde (L_e) é o comprimento de entrada estimado de tal maneira que, se o comprimento da tubulação for menor que ele, o escoamento agitado será observado na entrada da tubulação, caso contrário, o escoamento pistonado se manterá.

Mishima e Ishii (1984) definiram que o padrão agitado é o resultado do colapso de pistões líquidos, devido ao efeito de esteira das bolhas de Taylor, assim, a região de transição dos pistões é tão curta, que a esteira da bolha alongada é suficiente para desestabilizá-los e dissipá-los. Esta transição ocorrerá quando a fração de vazio média da bolha alongada iguala a fração de vazio média na tubulação.

$$\alpha_{med} = \frac{U_{sg}}{(1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}) U_m + 0,35 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}}} \quad (2.29)$$

$$\alpha_{TB} = 1 - 0,813 \frac{\left[(1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} - 1) U_m + 0,35 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}} \right]}{\left[U_m + 0,75 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \left(\frac{(\rho_l - \rho_g) D^3 \rho_l}{\mu_l^2} \right)^{\frac{1}{18}}} \right]} \quad (2.30)$$

Onde (U_m) é a velocidade da mistura, (D) é o diâmetro interno da tubulação, (μ_l) é a viscosidade absoluta do líquido, (α_{med}) é a fração de vazio média na tubulação, (α_{TB}) é a fração de vazio média na bolha de Taylor e, (U_{sl}), (U_{sg}), (ρ_l) e (ρ_g), são respectivamente, as velocidades superficiais e as massas específicas do líquido e do gás.

Brauner e Barnea (1986) propuseram que a transição de escoamento pistonado para escoamento agitado, acontece devido o aumento da aeração dentro dos pistões líquidos. Quando a fração de vazio média dentro dos pistões, chega a quantidade volumétrica máxima de bolhas de 0,52, estas bolhas coalescem dentro dos pistões de líquido, causando a destruição da estrutura do padrão pistonado, ocorrendo a transição para o padrão agitado, e a medida que ela aumenta deste valor este padrão é mantido. A expressão para a fração de vazio no pistão líquido, dada pela equação 2.31, proposta pelos autores para que ocorra esta transição, assume que neste ponto, a fase gasosa dentro dos pistões líquidos, comporta-se como bolhas dispersas como no padrão borbulhante. Esta equação foi desenvolvida por eles para determinar a fração de vazio no pistão de líquido.

$$\alpha_{ls} = 0,058 \left[\left(2 \sqrt{\frac{0,4\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right) \left(\frac{2f_m U_m^3}{D} \right)^{0,4} \left(\frac{\rho_l}{\sigma} \right)^{0,6} - 0,725 \right]^2 \quad (2.31)$$

Onde (α_{ls}), é a fração de vazio no pistão líquido, (f_m) é o fator de fricção, baseado no número de (Re_m) para a velocidade da mistura (U_m), definido por:

$$Re_m = \frac{\rho_l U_m D}{\mu_l} \quad (2.32)$$

Onde (D) é o diâmetro interno da tubulação, (ρ_l) e (μ_l), são respectivamente a massa específica e a viscosidade absoluta do líquido.

Se $Re_m \leq 2100$, então:

$$f_m = \frac{16}{Re_m} \quad (2.33)$$

Se $Re_m \geq 2100$, então:

$$f_m = 0,046Re_m^{-0,2} \quad (2.34)$$

2.7 A HIDRODINÂMICA DO PADRÃO DE ESCOAMENTO PISTONADO VERTICAL ASCENDENTE

A completa descrição da hidrodinâmica do escoamento pistonado inclui os parâmetros médios do escoamento, tais como, as velocidades características de propagação das interfaces gás-líquido, os comprimentos característicos e formas das bolhas alongadas e dos pistões líquidos. A hidrodinâmica deste padrão é caracterizada, por uma quase periódica alteração de pistões líquidos e bolhas alongadas de gás, que ocorre em uma ampla faixa de condições de fluxo em tubulações verticais e horizontais. Em tubulações verticais essas bolhas têm uma frente (topo, nariz) em formato de calota esférica, enquanto a traseira (base, cauda) é geralmente assumida como sendo achatada, dependendo das condições de fluxo.

2.7.1 A Estrutura do escoamento

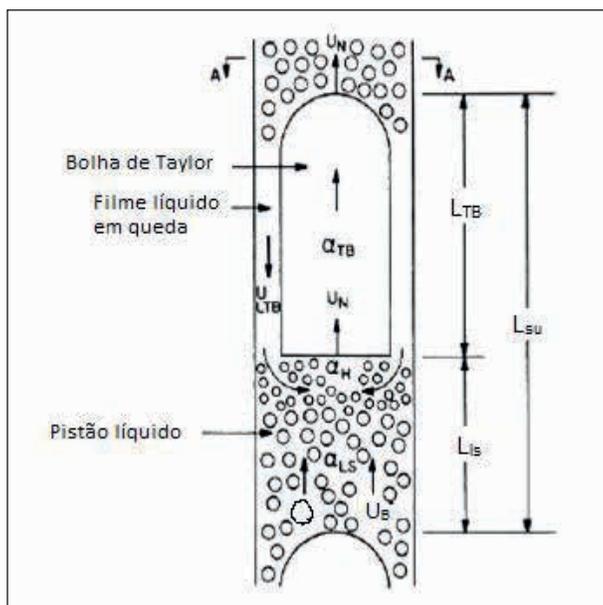
No escoamento pistonado vertical, grande parte do gás encontra-se nas bolhas alongadas (bolhas de Taylor), com comprimento (L_{TB}), que tomam quase toda a seção transversal do tubo, e cuja fração de vazio é (α_{TB}). O pistão líquido com comprimento (L_{LS}), que separa as bolhas alongadas, pode ou não estar aerado com pequenas bolhas de gás (bolhas dispersas), dependendo das condições de fluxo, possui fração de vazio (α_{LS}). A célula unitária se completa com o pistão líquido unitário de comprimento (L_{su}). O líquido confinado entre as bolhas alongadas e a parede da tubulação, flui ao redor da bolha como um filme fino de líquido em queda. Cada pistão verte líquido de sua extremidade para o filme líquido seguinte, o qual é lançado para dentro da esteira da bolha como um jato pela parede circular, produzindo uma zona de mistura na esteira cuja forma se assemelha a de um vórtex toroidal, com isso, pequenas bolhas são entranhadas na região do pistão, conforme pode ser visto na figura 2.4. De maneira geral, o padrão de escoamento pistonado vertical mantém simetria axial, o regime de escoamento da fase líquida é muitas vezes turbulento, e as faixas de vazões de gás e líquido, são apresentadas nos mapas de padrão de escoamento.

2.7.2 O movimento das bolhas

As bolhas alongadas com o seu formato característico se deslocam para cima no meio líquido, com velocidade (U_N), com seu comprimento (L_{TB}), permanecendo inalterado, devido os efeitos de expansão serem pequenos na direção axial do escoamento, para dutos com distâncias curtas ou em sistemas de alta pressão, pois, a densidade do gás não sofre alterações significativas, o que não compromete o tamanho das bolhas. Na maioria dos casos, a massa específica e a viscosidade do gás são bem menores que as do líquido, então a pressão no interior das bolhas de Taylor permanece praticamente constante. Com isso, a região interna permanece constante, as forças interfaciais de atrito são desprezíveis e o filme de líquido descende em torno da bolha alongada com velocidade (U_{LTB}), como se estando em queda livre (FERNANDES *et al*, 1983)

Na região do pistão de líquido são encontradas pequenas bolhas dispersas, semelhantes ao padrão de escoamento borbulhante, que se deslocam com velocidade (U_B). A distribuição da fração de vazio no pistão líquido apresenta-se praticamente constante, todavia, em função do filme líquido que descende para dentro do pistão de líquido, causar o entranhamento e armazenamento de minúsculas bolhas na região próxima a cauda da bolha alongada, a fração de vazio (α_H), nessa região é bem maior que a fração de vazio (α_{L_s}). Em função disto, a fração de vazio de um escoamento pistonado pode variar de 25% a 90%. Entretanto, quando se contabiliza o ar distribuído, na esteira, no pistão líquido e na região que contém as bolhas alongadas, se determina a fração de vazio média na tubulação (α_{med}).

Figura 2.4 - Célula padrão de um escoamento pistonado vertical.



Fonte: Adaptado de Fernandes *et al* 1983.

2.7.3 A velocidade de ascensão das bolhas

É aquela que se refere a velocidade das interfaces gás-líquido, e este conceito se aplica tanto para a bolha de Taylor, quanto para as bolhas dispersas, dentro do pistão líquido em uma tubulação vertical.

Um critério simples para distinguir entre bolhas alongadas e bolhas dispersas, dentro do pistão líquido é o valor característico do diâmetro da tubulação. As bolhas que têm o comprimento maior ou igual ao diâmetro interno da tubulação (D) são consideradas alongadas, enquanto que, as bolhas menores são denominadas dispersas (BARNEA e TAITEL, 1993).

A velocidade das bolhas depende da aceleração da gravidade, do diâmetro e da inclinação do duto, do fluxo volumétrico de ambas as fases e das propriedades dos fluidos, incluindo sua viscosidade, massa específica e tensão superficial.

A velocidade de ascensão de uma bolha alongada (U_N), é afetada por dois fatores: A velocidade do líquido a frente do nariz da bolha (U_l), e a velocidade induzida pela fluuabilidade da bolha, isto é, a velocidade de *drift* (desvio) da bolha (U_d), em um líquido estagnado. Nicklin *et al* (1962), sugeriram que para uma bolha de Taylor ascendendo em um líquido, que também se desloca para cima, a sua velocidade de ascensão é dada por uma superposição dessas duas velocidades, que pode ser expressa por:

$$U_N = C_1 U_l + U_d \quad (2.35)$$

No caso em que a bolha está em uma condição de escoamento pistonado contínuo, a velocidade do líquido é substituída pela velocidade de mistura (U_m).

$$U_N = C_1 U_m + U_d \quad (2.36)$$

A velocidade de desvio é determinada pelo fluxo tridimensional a frente da bolha, e é definida por:

$$U_d = C_2 \sqrt{gD} \quad (2.37)$$

Para o caso de fluxo apenas inercial, e desconsiderando os efeitos interfaciais e viscosos, diversos pesquisadores chegaram a um consenso que a constante (C_2) se encontra na faixa de 0,33 a 0,36, sendo o valor de 0,35 largamente utilizado. As grandezas (g) e (D) são respectivamente, a aceleração da gravidade e o diâmetro interno da tubulação.

A velocidade de desvio, também depende da viscosidade cinemática do líquido e do número de Reynolds (Re). Porém Zukosky (1966) mostrou que, para ($Re > 300$) baseado na velocidade de desvio (U_d), a influência da viscosidade sobre esta mesma velocidade é desprezível.

Em escoamento inteiramente desenvolvido, se supõe que a velocidade de ascensão da bolha alongada está geralmente associada ao valor da velocidade na linha de centro do pistão de líquido, onde esta velocidade atinge o seu valor máximo. Portanto, a velocidade de ascensão da bolha alongada, é igual a máxima velocidade local do líquido em frente ao nariz da bolha. Assim, o valor da constante C_1 , nas equações 2.35 e 2.36, depende do perfil da velocidade do pistão de líquido a frente da bolha, e é definida como a razão entre as velocidades máxima e média do perfil de velocidade ($U_{máx}/U_m$). Com isso, os valores de ($C_1 \approx 1,2$) para fluxo turbulento e ($C_1 \approx 2,0$) para fluxo laminar, são largamente utilizados, e que embora, sendo valores aproximados, têm sido validados por modelos analíticos e experimentais.

Bendiksen (1984) sugeriu que os coeficientes (C_1) e (C_2), dependem em maior escala do número de Froude e do número de Reynolds, e em menor escala da tensão superficial e do ângulo de inclinação da tubulação.

O efeito da tensão superficial é calculado, em termos do parâmetro da tensão superficial (Σ), dado pela equação 2.38. Zukosky (1966) demonstrou que este efeito é particularmente maior para diâmetros menores, e ele se torna substancial sobre a velocidade de desvio, de tal modo que, ela diminui consideravelmente com um aumento da tensão superficial, e eventualmente pode chegar a zero, quando (Σ) é da ordem da unidade.

$$\Sigma = \frac{4\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)D^2} \quad (2.38)$$

Mazza *et al* (2010) analisaram as diferentes condições para a estimativa dos valores de (C_1) e (C_2), e propuseram correlações, que levam em conta a influência de todos os parâmetros relacionados por Bendiksen (1984), os quais devem ser utilizados na equação proposta por Nicklin *et al* (1962), nas seguintes condições:

Se $Re_m \geq 2000$ e $Fr_m \geq 3,5$, então: $C_1 = 1,2$ e,

$$C_2 = \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3,06}}\right)^{0,58}} \text{sen}\beta \quad (2.39)$$

Se $Re_m \geq 2000$ e $Fr_m < 3,5$, então: $C_1 = 1,0$ ou Se $Re_m < 2000$, então: $C_1 = 2,0$ e para ambas as condições, tem-se:

$$C_2 = \left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \text{cos}\beta + \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3,06}}\right)^{0,58}} \text{sen}\beta \quad (2.40)$$

Onde (Fr_m) é o número de Froude definido por:

$$Fr_m = \frac{U_m}{\sqrt{gD}} \quad (2.41)$$

O número de Reynolds da mistura (Re_m) é definido pela equação 2.32, (EO) é o número de Eotvos, (β) o ângulo de inclinação da tubulação com a horizontal, e (g) e (D) são respectivamente, a aceleração da gravidade e o diâmetro interno da tubulação.

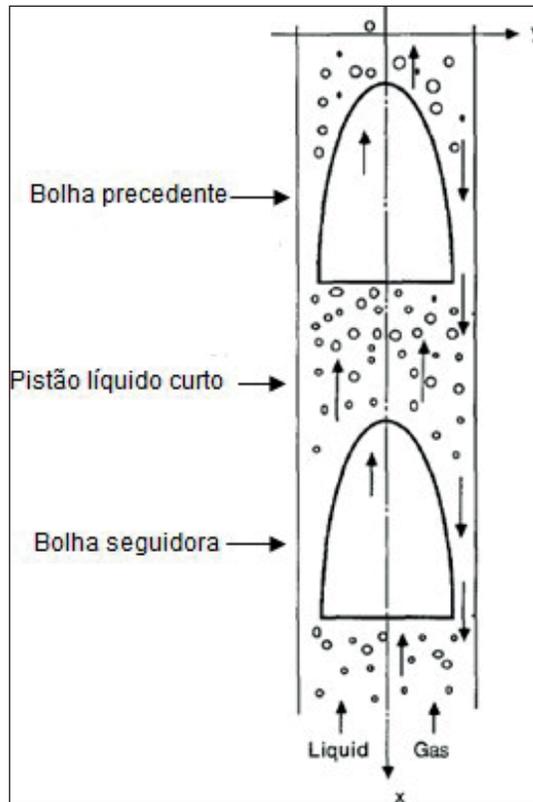
Nas equações 2.35 e 2.36, (C_1) e (U_d), são consideradas constantes para todas as condições de operação dadas. Também é assumido que a velocidade de ascensão da bolha de Taylor é linearmente dependente da velocidade de mistura, no entanto, esta suposição é apenas uma aproximação, a qual é objeto muitas vezes de verificação teórica e experimental.

2.7.4 O movimento de várias bolhas alongadas

Durante o deslocamento de subida das bolhas em um duto vertical, a bolha da frente denominada precedente, e a bolha que vem imediatamente atrás denominada seguidora, estando separadas por um pistão líquido, conforme mostrado pela figura 2.5, apresentam um comportamento característico do escoamento pistonado, resultante da evolução das interfaces gás-líquido presente no escoamento.

Para um escoamento pistonado completamente desenvolvido, a distância entre duas bolhas alongadas quaisquer é grande o bastante, tanto que, a bolha seguidora não é influenciada pela esteira da bolha precedente, neste caso, a informação sobre o movimento da frente da bolha é suficiente para a descrição do escoamento. Todavia, na chamada região de entrada da tubulação, a distância entre as bolhas não é grande o bastante (pistão líquido curto), para evitar que a bolha alongada seguidora sofra influência da esteira da bolha alongada precedente, de tal maneira que, a mistura dessas bolhas é inevitável produzindo a coalescência, e ocasionando a variação da estrutura do escoamento ao longo da tubulação.

Figura 2.5 - Estrutura do padrão de escoamento pistonado vertical.

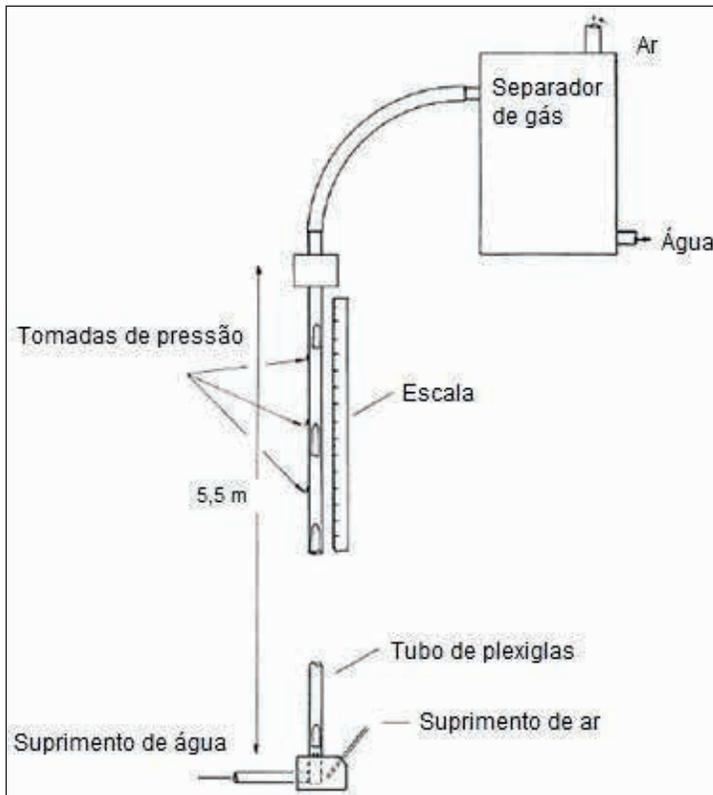


Fonte: Adaptado de Mao e Dukler, 1989.

A região de entrada da tubulação do escoamento pistonado vertical refere-se ao comprimento da coluna acima do qual, as diferenças iniciais das distribuições introduzidas à entrada da coluna tornam-se desprezíveis. Mayor *et al* (2008), definem este parâmetro como altamente relevante para aplicações práticas do escoamento pistonado, uma vez que, ele informa, por exemplo, acerca da extensão da influência da injeção do gás, que afeta as características das distribuições de entrada.

O movimento de translação de várias bolhas alongadas em uma coluna de líquido estagnado, ou se deslocando no mesmo sentido das bolhas em uma tubulação vertical é um fenômeno básico no escoamento pistonado, e tem sido estudado por alguns pesquisadores ao longo dos anos, tanto teoricamente (COLLINS *et al*, 1978; MAO e DUKLER, 1991), quanto experimentalmente (ZUKOSKY, 1966; MAO e DUKLER, 1989). Todos os dados obtidos estão relacionados, ao fluxo ao redor do nariz da bolha, e assim, os cálculos da velocidade translacional da bolha alongada estão baseados sobre o campo de escoamento estimado a frente delas. Na figura 2.6 está ilustrada a disposição da subida das bolhas em uma seção de teste vertical de experimentos assim realizados.

Figura 2.6 - Esboço do aparato experimental de Griffith e Wallis, (1961).



Fonte: Adaptado de Griffith e Wallis, 1961.

A metodologia dos experimentos utilizada nestes trabalhos é realizada com a injeção controlada de bolhas de mesmo tamanho, ou de tamanhos diferentes, em intervalos de tempo de injeções iguais ou diferentes, e em condições de fluxo diferentes variando-se apenas a velocidade do líquido (para o caso do líquido se deslocando para cima), em uma determinada seção de testes de um aparato experimental.

No caso de um escoamento pistonado contínuo, a metodologia experimental se estabelece, através da definição de pares de velocidades superficiais do líquido e do gás, a que estará submetida a seção de teste do aparato experimental, como foi realizado neste trabalho. O escoamento pistonado contínuo é aquele que de fato ocorre no interior de uma tubulação, quando em condições reais de operação de um determinado sistema, em função das bolhas alongadas, percorrerem o comprimento da tubulação, em determinadas condições de fluxo (velocidades superficiais do gás e do líquido) de maneira totalmente aleatória.

Shemer e Barnea (1987) realizaram um estudo visual do perfil de velocidade, atrás de bolhas de Taylor em escoamento pistonado vertical e horizontal usando a técnica de bolhas de hidrogênio, eles demonstraram haver duas zonas no pistão líquido, uma zona

de mistura onde o jato anular entra no pistão, até uma distância de 2 a 3 vezes o diâmetro causando um perfil de velocidade bastante irregular na seção transversal da tubulação; e outra zona, mais afastada da bolha, um decaimento das flutuações ocorre até que um perfil de velocidade completamente desenvolvido é alcançado. Eles então concluíram que a velocidade da bolha alongada está relacionada, ao valor da velocidade instantânea máxima à frente dela, e que a frente da bolha seguidora segue a localização da máxima velocidade instantânea na esteira da bolha precedente.

Nakoryakov *et al* (1986) realizaram um estudo mais extensivo de um campo de velocidade instantâneo em escoamento vertical, e os perfis de velocidade radial e axial foram obtidos através de sonda eletroquímica, e eles mostraram que o anel de vórtex na zona de mistura atrás da bolha de Taylor, afeta significativamente a estrutura do fluxo no pistão líquido.

Geralmente pistões líquidos curtos são formados à entrada da tubulação, e eles têm uma característica de serem instáveis, e o líquido vertido para trás destes pistões são maiores que para os pistões longos, como resultado a bolha alongada atrás de um pistão líquido curto move-se mais rápido. A evolução da distribuição dos comprimentos dos pistões líquidos e das bolhas alongadas ao longo da tubulação é então entendida da seguinte forma, as bolhas atrás de pistões curtos, geralmente por se moverem mais rapidamente do que as bolhas atrás de pistões grandes tendem a ultrapassar as bolhas da frente misturando-se uma com a outra. A bolha e o pistão líquido associado a ela, mesclam-se reduzindo a frequência dos pistões, e o processo de mistura continua até que o pistão líquido é grande o bastante para tornar-se estável, e a bolha seguidora não é mais afetada pela esteira da bolha precedente. Durante o processo de mistura, tanto os pistões líquidos como as bolhas alongadas aumentam de tamanho.

O processo de ultrapassagem e mistura termina, quando o perfil de velocidade em todos os pistões líquidos está completamente desenvolvido, e então todas as bolhas se deslocam com a mesma velocidade translacional. Este processo é aquele que controla o tamanho dos pistões, nele naturalmente pistões líquidos curtos tendem a desaparecer e ele se completa, quando todos os pistões estão grandes o bastante (VAN HOUT *et al*, 2003).

Brauner e Barnea (1986), sugeriram que um comprimento de pistão desenvolvido é igual a distância para a qual, o jato que é lançado para dentro dos pistões é absorvido pelo líquido. Usando esta abordagem, o comprimento de 16 vezes o diâmetro da tubulação foi obtido, como sendo o mínimo comprimento de pistão desenvolvido (estável) para escoamento vertical ascendente.

Shemer e Barnea (1987) encontraram que a forma da bolha na região de esteira, se assemelha ao perfil da velocidade do líquido a frente dela. A distância da bolha precedente determina o mínimo comprimento do pistão líquido estável, onde todas as bolhas têm um nariz de forma quase arredondada, e deslocam-se com velocidade idêntica. Através do campo de velocidade detectado na esteira da bolha, eles estimaram em 20 vezes o diâmetro, como sendo o comprimento mínimo do pistão líquido estável.

Em escoamentos pistonados estáveis, condição de equilíbrio de escoamento, o comprimento médio da região líquida do pistão, permanece inalterado ao longo da direção vertical. Isso é devido ao balanço de massa do pistão líquido, proveniente dos filmes líquidos, entre duas bolhas de Taylor consecutivas que acompanham o líquido, ser praticamente constante. Durante a condição de escoamento completamente desenvolvido, os pistões líquidos e as bolhas alongadas escoam em estado permanente, sem diferenças nas velocidades relativas entre ambos.

AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO UTILIZADAS

Neste capítulo se complementa a revisão bibliográfica, fazendo-se uma abordagem acerca da técnica da sonda condutiva, apresentando, um histórico sobre sua utilização, como estão configuradas para a medição do escoamento, o princípio de funcionamento, as desvantagens da sua utilização, e o critério para a interpretação dos dados obtidos. Em seguida é feita uma abordagem de modo geral, da técnica de medição com filmagem de alta velocidade, na qual se procura explorar as inovações que foram feitas, acerca do tratamento das imagens obtidas por meio desta técnica.

3.1 A TÉCNICA DE MEDIÇÃO POR SONDA CONDUTIVA

Esta técnica de medição foi bastante usada no início da década de sessenta, até o final da década de oitenta, em trabalhos experimentais sobre escoamento bifásico, nos quais se procurava estabelecer principalmente, os tipos de padrões de escoamento e a análise dos principais parâmetros, relativos a estes escoamentos. Com o passar dos anos, a técnica da sonda condutiva, geralmente, ou era usada para detectar detalhes do escoamento bifásico, o qual seu emprego fornecia ótimos resultados (NAKORYAKOV *et al*, 1986; MAO e DUKLER, 1989), ou era comparada com uma outra técnica, mais nova e mais precisa. Com o passar dos anos também, a técnica foi sendo aprimorada, no sentido de se tornar mais apropriada para medir principalmente, parâmetros bem particulares do escoamento bifásico, como a área de concentração interfacial, que esta relacionada com a ocorrência de transferência de energia, quantidade de movimento e massa entre as fases.

3.1.1 Um breve histórico acerca da utilização da sonda condutiva

Fiori e Bergles (1966) usaram uma sonda condutiva para escoamento de vapor e água em tubulações horizontais, com um único sensor, e eles conseguiram detectar as diferenças entre escoamento borbulhante, pistonado e anular.

Hoffer e Resnick (1975) fizeram significantes melhorias na técnica da sonda condutiva; dentre as quais, eles propuseram algumas alterações nos circuitos e no tratamento dos sinais, as quais possibilitaram aos sensores detectarem bolhas com diâmetros pequenos, entre 0,1 e 0,3 mm. Estas modificações foram necessárias, uma vez que, os primeiros sensores não possuíam as dimensões adequadas para a percepção de pequenas bolhas. Eles ainda utilizaram uma tensão de corte, para limitar os pulsos gerados, os quais eram posteriormente amplificados, o que permitiu que as sondas diminuíssem de tamanho, e facilitassem a medição de bolhas com tamanhos médios, tudo isso, com uma sonda de apenas um sensor simples.

Barnea *et al* (1980) realizaram melhorias principalmente na caracterização do sistema de aquisição da sonda condutiva, para detectar as diferenças de todos os padrões

de escoamento bifásico com clareza, a medida que, eles se processavam de acordo com as condições de fluxo em tubulações horizontais, verticais ascendentes e inclinadas. Como resultado, mapas de padrão de escoamento foram construídos nestas disposições da tubulação, usando a informação direta do traço descrito por um osciloscópio, que discriminava a particularidade dos padrões de escoamento, a medida que, os sensores da sonda condutiva detectavam as diferenças entre eles. A sensibilidade do método foi excelente, tanto para identificação particular de cada padrão de escoamento, como para discernir os limites das transições que existem entre eles.

Welle (1984) examinou experimentalmente em um escoamento vertical à pressão atmosférica; os valores de fração de vazio, de velocidade e de tamanho das bolhas obtidos através da técnica de medição condutiva. Os valores de fração de vazio obtidos eram da ordem de 0,25 a 0,75, para velocidades de mistura de 1,3, 1,7 e 2,1 m/s. Os sensores foram devidamente calibrados, e os resultados de fração de vazio, comparados com valores obtidos através da técnica de atenuação de raios gama. A concordância com os modelos disponíveis na literatura foi boa.

Nakoryakov *et al* (1986) Utilizaram uma sonda eletroquímica, que funcionava de acordo com o princípio de funcionamento da diferença entre a condutividade da fase dispersa (gás) e da fase contínua (líquido), para medir a tensão de cisalhamento do filme líquido em escoamento pistonado vertical ascendente. Os resultados foram tão bons, que em função do escoamento pistonado ter como características, uma alta intensidade de flutuação do fluxo do filme líquido próximo a parede, não só os valores de tensão de cisalhamento, mas também, o sentido destas tensões, pôde ser detectado.

Mao e Dukler (1989) utilizaram três técnicas diferentes cada qual, para uma finalidade específica; para detecção das fases e informação da fração de vazio do escoamento, a fim de identificar o padrão de escoamento, eles utilizaram uma sonda de rádio frequência; para medir a magnitude e o sentido da tensão de cisalhamento na parede, eles utilizaram uma sonda dupla de transferência de massa; e para determinar a espessura do filme líquido e fazer a distinção entre as bolhas alongadas e os pistões líquidos, e as suas respectivas velocidades no escoamento pistonado, eles usaram uma sonda condutiva. Os resultados obtidos pela sonda condutiva mostraram-se estar de acordo, com o modelo proposto por Fernandes *et al* (1983), o qual calcula analiticamente (entre outros parâmetros), as velocidades da bolha alongada e do pistão líquido, através de uma série de equações resolvidas numericamente.

Barnea e Shemer (1989) Usaram uma sonda condutiva para detectar, a fração de vazio instantânea na linha central de uma tubulação vertical de 50 mm de diâmetro interno, em fluxo pistonado ascendente ar-água. A informação foi posteriormente processada, para se obter a retenção líquida no pistão líquido, assim como, o seu tamanho. Os valores experimentais da faixa de fração de vazio de ($\alpha_{is} = 0,25$), na transição de escoamento borbulhante para escoamento pistonado e de ($\alpha_{is} = 0,6$), na transição de escoamento pistonado para escoamento agitado foram obtidos.

Keska e Williams (1999) desenvolveram um aparato experimental, que permitiu identificar simultaneamente, os padrões de escoamentos bifásicos com diferentes técnicas de medição em um sistema vertical. Foram usados quatro métodos diferentes para detecção dos parâmetros, e foi possível obter uma comparação direta da eficiência em termos individuais de cada método, e a sensibilidade na detecção dos padrões de escoamento. Os sinais obtidos pelos sensores capacitivos e condutivos demonstraram, um grande potencial na maior parte dos escoamentos. Os obtidos pelos sensores de pressão apresentaram a metade da capacidade de reconhecimento de padrões, quando comparados aos capacitivos e condutivos. Os sensores óticos foram os mais limitados, mostraram-se ser eficientes, apenas para identificar padrões de escoamento com concentrações acima de 70%.

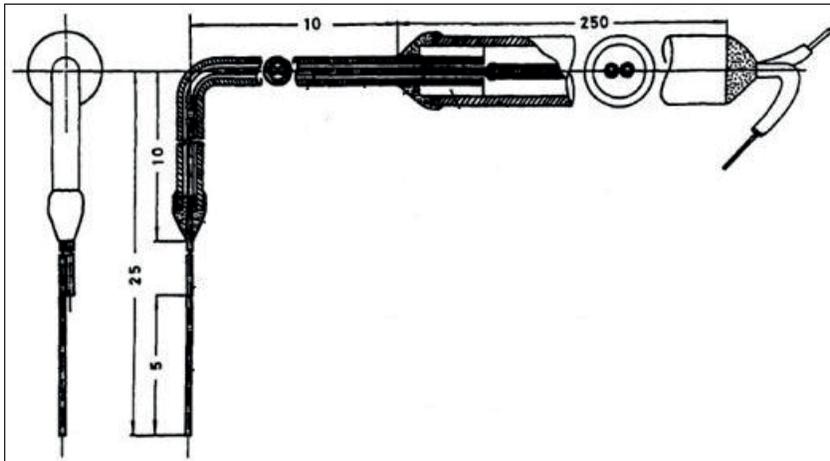
Silva (2007) Utilizou uma sonda condutiva de um canal, para medir o perfil da fração de vazio, para várias velocidades superficiais de uma mistura ar-água, em vários pontos de medição de uma tubulação vertical, que sofre uma expansão abrupta em um escoamento pistonado ascendente. Os resultados obtidos demonstraram que a sonda foi capaz de detectar, a variação dos valores médios da fração de vazio, antes e depois da expansão, e que eles diminuía com o aumento das velocidades superficiais.

3.1.2 A configuração da sonda condutiva

As sondas condutivas podem ser constituídas, por um sensor (um canal) nas quais é possível medir a fração de vazio média do escoamento, como fizeram Neal e Bankoff (1963), para determinar a distribuição da fração de vazio em escoamentos de nitrogênio-mercúrio.

Na configuração das sondas constituídas por dois sensores (dois canais), como ilustrado na figura 3.1, é possível medir, além da fração de vazio, a velocidade média de ascensão e o tamanho médio das bolhas e dos pistões de líquido, como fizeram Sekoguchi *et al* (1974) e Lewis e Davidson (1983), e ainda, a caracterização da estrutura do filme líquido, em escoamentos anulares realizado por Chu e Dukler (1974).

Figura 3.1 - Configuração típica de uma sonda condutiva de sensores duplos.



Fonte: Adaptado de Kataoka *et al* 1994

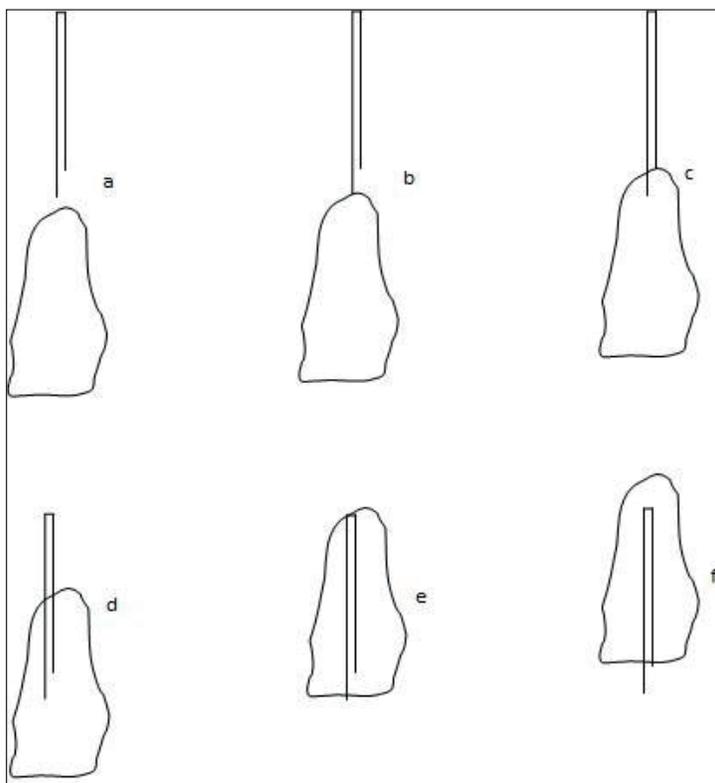
Kataoka *et al* (1994) para melhor estimarem, a área de concentração interfacial em um escoamento bifásico, mostraram que uma sonda de quatro sensores condutivos poderia ser usada, sem ser preciso fazer a suposição que as bolhas têm formato esférico, como geralmente é feito para sondas de dois canais, e em função disto, ela seria mais indicada para a medição deste parâmetro do escoamento.

3.1.3 O princípio de funcionamento da sonda condutiva

É baseado na diferença de condutibilidade elétrica entre as fases líquida e gasosa. A fase líquida apresenta caráter condutor e a fase gasosa tem caráter isolante. A sonda, dessa forma, consegue identificar dois estados diferentes, condução e não condução, gerando um sinal similar ao de uma onda quadrada quando da passagem de uma bolha pela mesma. Quando processados e tratados, os sinais fornecem os valores de retenção gasosa, tamanho, velocidade e frequência das bolhas. A precisão das medidas é limitada pela taxa de aquisição da placa de aquisição de dados (SILVA *et al*, 2007).

Um sistema de medição, baseado neste princípio de funcionamento deve ser capaz de discernir, a fase em que o sensor se encontra, a partir da condutividade elétrica do meio. O sensor comporta-se como um eletrodo, um circuito eletrônico é idealizado de modo a apresentar-se totalmente ligado ou desligado, quando o sensor encontra-se em contato com a água ou com o ar, respectivamente (BARBOSA Jr., 1997).

Figura 3.2 – Ascensão de uma bolha de Taylor em direção a sonda condutiva. a) A bolha se aproxima do sensor; b) A bolha toca o primeiro sensor; c) A bolha toca o segundo sensor; d) Os dois sensores estão imersos completamente na bolha; e) O primeiro sensor deixa a bolha; f) O segundo sensor deixa a bolha.



Fonte: Autoria própria.

A figura 3.2, esquematiza a sequência de aproximação de uma bolha de Taylor, em direção a uma sonda condutiva de dois sensores, a medida que o primeiro sensor adentra a bolha, a tensão aumenta em relação aquela registrada pelo sensor, quando a sonda estava mergulhada na fase líquida, em seguida o segundo sensor também penetra a bolha, e a tensão registrada por este sensor, da mesma forma que o primeiro, aumenta em relação aquela registrada para a fase líquida. Em seguida, o primeiro sensor sai de dentro da bolha, e a tensão registrada por ele diminui, indicando apenas fase líquida, e logo depois, o segundo sensor deixa a bolha, e como aconteceu ao primeiro sensor, o valor da tensão medido por ele também diminui, voltando a indicar apenas a fase líquida.

Todos os valores de tensão registrados pela sonda, durante o tempo de aquisição, são armazenados em um arquivo de dados, para posteriormente serem tratados em um sistema de condicionamento e processamento de sinais, necessário, para transformar o sinal analógico captado pela sonda, representado pela variação da tensão, em sinal digital representado por 0 e 1, conforme pode ser visto na tabela 3.1. O sistema precisa ter bastante acurácia, afim de que, consiga distinguir a fase gasosa da fase líquida.

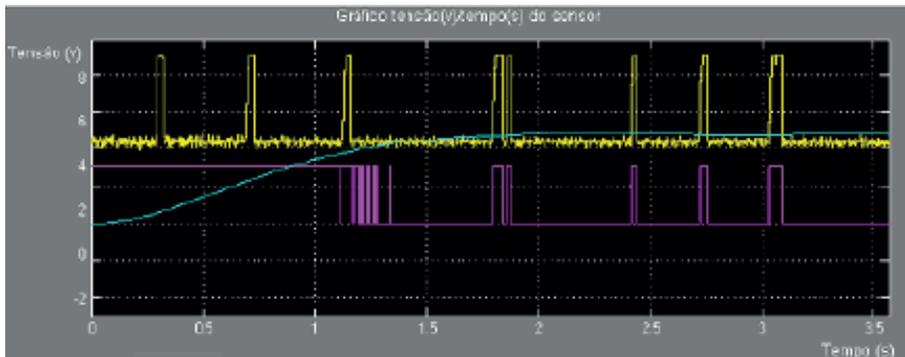
Tabela 3.1 - Fases detectadas pela sonda em sinais analógicos e digitais

Sensor 1			Sensor 2			
Analógico	Digital		Analógico	Digital		
Tensão	Valor	Fase	Tensão	Valor	Fase	Binário
Diminui	1	Água	Diminui	1	Água	1 1
Aumenta	0	Ar	Diminui	1	Água	0 1
Aumenta	0	Ar	Aumenta	0	Ar	0 0
Diminui	1	Água	Aumenta	0	Ar	1 0

Fonte: Autoria própria

Na figura 3.3, podem ser visto os sinais analógicos e os sinais digitais, respectivamente, nas cores amarela e lilás. Um filtro é utilizado devido a constante variação do sinal, para evitar que, o ruído provocado por sinais elétricos, seja interpretado como sendo pequenas bolhas. Sua representação pode ser vista na cor verde, na mesma figura. Esse filtro precisa de um período inicial curto de estabilização, com o sinal analógico.

Figura 3.3 - Estabilização inicial do filtro.



Fonte: Silva *et al* 2007.

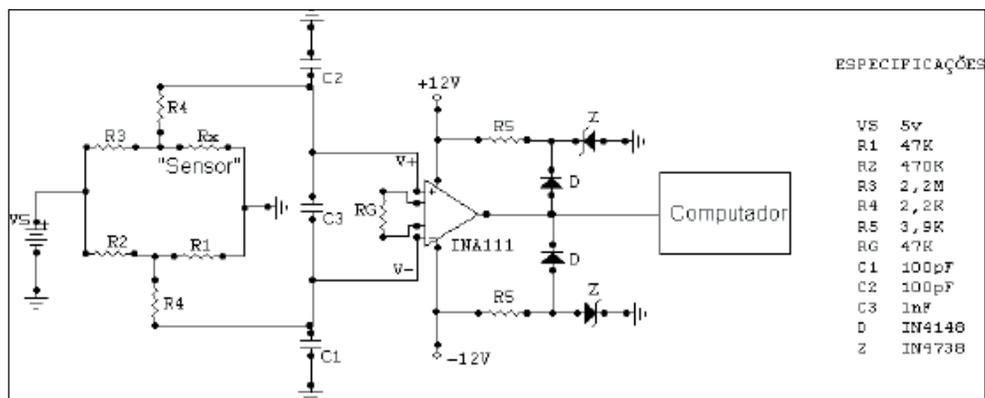
3.1.4 O circuito de aquisição de sinais

Para a aquisição dos sinais detectados pela sonda, um circuito analógico é utilizado, conforme pode ser visto no esquema da figura 3.4. De maneira geral, o circuito é de simples construção, não requisitando muitos componentes. O sensor condutivo, denominado na figura “sensor” é uma resistência designada por (Rx), que faz parte de uma ponte de Wheastone, conectada a um amplificador de instrumentação responsável, por ampliar e condicionar o sinal para uma placa de aquisição de dados. A opção pela ponte é devido, a sua capacidade de rejeitar modo comum, reduzindo ruídos acoplados como a frequência de 60 Hz da rede.

A configuração em ponte é o circuito mais comum, para se determinar o valor de uma resistência desconhecida. Como o amplificador apresenta uma alta impedância de entrada, pode-se desprezar suas correntes de entrada (RESENDE *et al*, 2008).

Quando uma bolha, seja ela alongada ou bolha dispersa, atravessa o sensor, ela causa uma variação significativa da resistência em relação àquela definida pelo líquido. Isto implica em uma variação na corrente elétrica do circuito. Após a passagem da bolha pela sonda, a corrente elétrica retorna ao seu valor anterior, pois a resistência do meio retornou ao seu valor inicial. Esta variação da resistência provoca, uma variação proporcional da tensão que chega ao amplificador.

Figura 3.4 - Circuito analógico do sistema de medição



Fonte: Adaptado de Rezende *et al* 2008.

Por uma entrada do amplificador se tem a queda de tensão na entrada negativa (V-), a resistência (R1), corresponde ao resistor de 47kΩ e a resistência (R2), corresponde ao resistor de 470 kΩ. Como a corrente que passa por esta parte do circuito, não passa pela resistência do meio “sensor”, (V-) é independente da resistividade do fluido, e de suas variações.

Pela outra entrada do amplificador, se tem a queda de tensão na entrada positiva do amplificador (V+), a resistência (R3) é o resistor de 2,2 MΩ, e a resistência (Rx), corresponde a resistência indicada pelo sensor, pela passagem ou não de uma bolha.

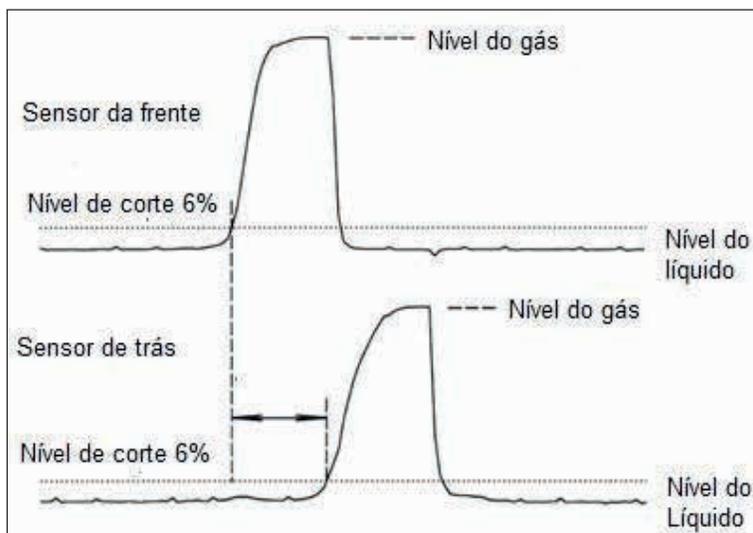
No circuito, nota-se a dependência da tensão diferencial da resistência (Rx), aplicada ao amplificador. Para ambas as entradas de tensão, (Vs) é a tensão de alimentação do circuito, e tem valor de 5V.

3.1.5 Determinação do nível de corte

O circuito é usado para medir a diferença de potencial, entre as pontas expostas dos sensores e o terminal aterrado. Como o circuito é aberto ou fechado dependendo do contato com o líquido ou com o gás, a tensão que atravessa o sensor, flutua entre dois valores de referência. Um gráfico que mostra a evolução dessa flutuação da tensão, para ambos os sensores da sonda, pode ser visto na figura 3.5, no qual a linha base significa a fase líquida. O pulso representa a bolha residente.

Assim, para processar os sinais de tensão efetivamente, torna-se necessário determinar um nível de corte, acima do qual, um pulso pode ser considerado uma bolha. Tal definição para o nível de corte é importante, uma vez que, o ruído comumente corrompe a saída do sinal, e a determinação própria do nível de corte, se torna chave na obtenção do sinal condicionado, para um pulso quadrado que será facilmente reconhecido pela placa de aquisição de dados (HIBIKI *et al*, 1998).

Figura 3.5 - Sinal não condicionado detectado por uma sonda de sensores duplos



Fonte: Adaptado de Hibiki *et al* 1998.

Este nível de corte (tensão de corte) constitui-se, em um dos fatores que ainda gera alguma controvérsia, em relação ao sinal captado pela sonda condutiva. Ele é definido pela relação entre, a tensão, acima da qual se determina a ocorrência do contato do sensor com a fase gasosa, e a máxima amplitude do sinal. A exatidão do valor atribuído a esta tensão vai proporcionar que, o sinal analógico composto por pulsos não uniformes, por apresentar amplitudes ligeiramente diferentes e degraus amortecidos na extremidade, venha a se transformar em sinais digitais, cuja forma é de uma onda quadrada.

Neste aspecto, a ponta do sensor é fundamental na definição do nível de corte, visto que, quanto menos amortecidas estiverem as extremidades dos pulsos, menor vai ser o erro da transformação de um sinal analógico em um sinal digital, o que vai resultar, na redução do erro dos parâmetros do escoamento medidos pela sonda. Assim sendo, geralmente se estipula um valor baixo para o nível de corte, o qual se situa geralmente em 6% do valor da amplitude máxima do sinal.

3.1.6 As desvantagens da utilização da técnica

A técnica de medição por sonda condutiva é restrita apenas a medições dos parâmetros da fase dispersa, por esta razão, a utilização destas sondas é recomendada a sistemas, onde a fase contínua é eletricamente condutiva. Por exemplo, Uma vez que, a condutividade elétrica da água é muito maior que a do ar, supõe-se, para fins práticos, ser somente a água (fase contínua) capaz de conduzir corrente elétrica. Entretanto, sua aplicação não é vedada a escoamentos, onde a fase condutiva seja a dispersa.

Mas a principal adversidade apresentada por este método experimental são suas características intrusivas e destrutivas, ou seja, a presença de uma sonda vai afetar a estrutura do escoamento, em função disto, a principal virtude de uma sonda condutiva é possuir dimensões e formato que a permitam captar as bolhas, com a menor interferência possível na estrutura do escoamento.

Jones Jr. (1981) dividiu as técnicas de medição em três grupos, não intrusivas, intrusivas com sinal de saída mecânico e intrusivas de saída de sinal elétrico, onde se enquadra a técnica de medição com sonda condutiva, neste grupo ainda, estão as técnicas de anemometria, a fio quente e a filme quente, impedância elétrica, microtermopares, e sensores ópticos.

Hoffer e Resnick (1975) comentam ser a intrusividade das sondas de condutividade no escoamento, um importante fator que deve ser analisado, pelo fato do molhamento das pontas dos sensores retardar a detecção da fase gasosa, e depender da tensão superficial, e que em face disso, precisa ser sempre considerado.

Evidências experimentais mostram que, os sinais obtidos com a técnica da sonda condutiva têm erros devido ao seu comportamento intrusivo. A análise dos sinais, baseados nos padrões de reconhecimento lógico e informações estatísticas, tenta eliminar a incerteza associada à natureza estocástica, inerente ao processo de interceptação das bolhas pela sonda (JONES e ZUBER, 1975).

Silva *et al* (2007) fizeram a avaliação das medidas de velocidade e de comprimento de bolhas de Taylor, obtidas por meio de dois sensores duplos de condutividade com dimensões diferentes, comparando aos valores obtidos, por meio da análise das imagens realizadas por filmagem de alta velocidade. Os resultados mostraram que existe um erro associado à intrusividade do sensor, subestimando a velocidade e o tamanho da bolha, e estes erros se mostraram decrescentes com o tamanho da bolha, para o sensor de menor dimensão.

Outros fatores que impedem o conhecimento exato do intervalo de tempo, que o sensor leva para atravessar uma bolha, também devem ser considerados, como a deformação sofrida pelas bolhas, conforme ilustra a figura 3.6, no impacto com a ponta dos sensores, devido a efeitos de tensão superficial; a diminuição da velocidade das bolhas, por efeito também da tensão superficial; e a deflexão de algumas bolhas quando se aproximam da ponta do sensor de um ângulo oblíquo.

Figura 3.6 - Deformação da frente da bolha pelo impacto com a sonda.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

3.1.7 Critério de seleção de bolhas alongadas

Em função das desvantagens apresentadas ao uso da técnica dos sensores condutivos, um tratamento de dados se faz necessário, o qual deve levar em conta as condições impróprias da captação de sinais, quando se tem uma disposição das bolhas em relação a ponta dos sensores, que forneceriam valores errados de velocidade e tamanho para estas bolhas. Para tal condição, a aplicação de critérios de seleção as bolhas alongadas no escoamento pistonado, é para garantir que elas tenham apenas a componente vertical de velocidade paralela as pontas dos sensores.

A primeira tarefa é a identificação da frente da bolha pelo primeiro sensor (a montante), isto é, a constatação de que este sensor deixou a fase líquida e entrou na fase gasosa. Para isto, de acordo com a tabela 3.1, quando o primeiro sensor deixa a fase líquida, entende-se que ele entrou na fase gasosa, o algoritmo que interpreta os dados neste momento, registra todos os valores (0), armazenando-o em uma variável e identifica a frente A. Quando o primeiro sensor deixa a fase gasosa e retorna à fase líquida, o algoritmo neste momento, registra todos os valores (1), também armazenando-os em uma variável,

identificando o final A. O procedimento realizado para o sensor 1 é repetido inteiramente para o sensor 2, o algoritmo identifica a frente B e o final B e registra e armazena todos os valores (0) e (1) para este sensor.

Para reduzir os efeitos de eventuais oscilações da bolha na medição dos parâmetros do escoamento pistonado, é utilizado o critério de Lewis e Davidson (1983). Este critério se baseia no cumprimento de dois requisitos:

Se o nariz da bolha atinge o sensor obliquamente, as diferenças (*final A – frente A*) e (*final B – frente B*), não serão iguais, e então a bolha será rejeitada;

Se a velocidade de uma bolha varia enquanto atravessa o sensor, as diferenças (*frente B – frente A*) e (*final B – final A*), não serão iguais, e neste caso a bolha também será rejeitada.

A figura 3.7 ilustra algumas situações em que o critério de seleção, atua para eliminar os problemas na detecção da bolha quando se aproxima dos sensores. Embora a figura ilustre a interação dos sensores para uma bolha de formato esférico, as condições, porém, são semelhantes ao nariz arredondado de uma bolha alongada oscilando na esteira de outra bolha alongada a frente dela.

Estudos preliminares mostraram que a utilização dos sinais da parte traseira da bolha não é recomendável, devido as informações fornecidas por estes, apresentarem erros elevados. Sendo assim, de maneira diferente das abordagens encontradas na literatura, que utilizaram informações obtidas pelos dois sensores, tanto na entrada quanto na saída da bolha, este trabalho utiliza apenas o sinal relativo da frente da bolha para a determinação da sua velocidade, e apenas o sinal do primeiro sensor para a determinação do tamanho da bolha e tamanho do pistão de líquido.

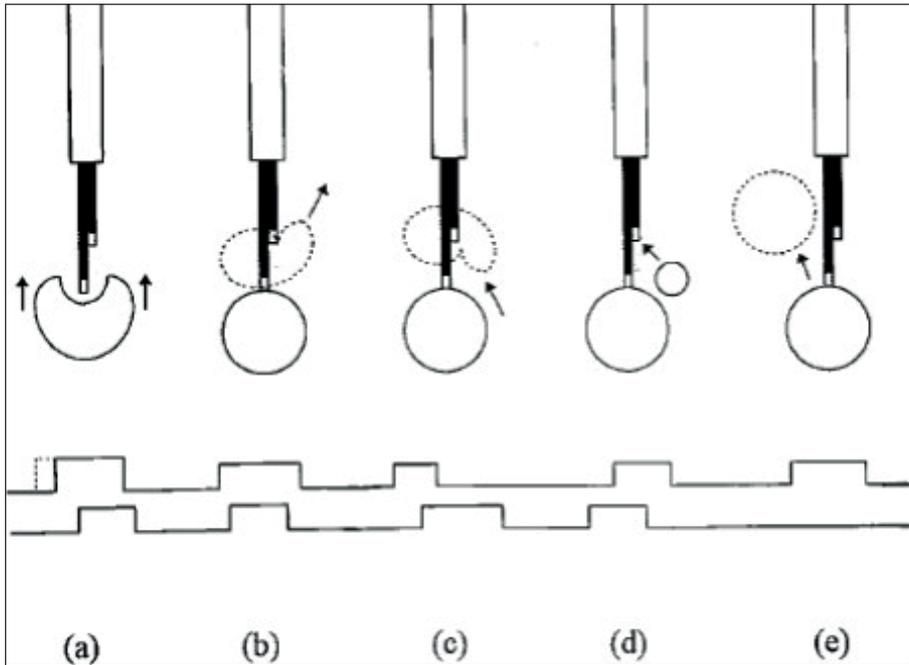
Então, a velocidade e o tamanho médios de uma bolha alongada não rejeitada segundo este critério, neste trabalho, serão dados respectivamente por:

$$U_{TB} = \frac{ES}{(frente\ B - frente\ A)} \quad (3.1)$$

$$L_{TB} = \frac{ES (final\ A - frente\ A)}{(frente\ B - frente\ A)} \quad (3.2)$$

Onde *ES* é a distância entre as pontas dos sensores da sonda condutiva.

Figura 3.7 - Problemas na detecção da bolha ao se aproximar da sonda. a) A bolha se deforma ao se aproximar da ponta do sensor; b) A bolha se rompe quando toca o segundo sensor; c) duas bolhas coalescem próximo as pontas dos sensores; d) duas bolhas diferentes atingem cada uma um sensor diferente; e) a bolha toca o primeiro sensor mais em seguida desvia-se sem tocar o segundo sensor; f) Duas bolhas muito próximas tocam os sensores.



Fonte: Adaptado de Barbosa Jr, 1997.

Este critério foi implementado ao algoritmo utilizado para o tratamento dos dados neste trabalho, a partir dele é possível obter uma quantidade de bolhas denominadas de pareadas, as quais o tratamento estatístico vai levar a valores confiáveis dos parâmetros medidos pela sonda condutiva.

3.2 A TÉCNICA DE MEDIÇÃO POR FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE

O recente avanço tecnológico da filmagem de alta velocidade tem sido amplamente utilizado, para a investigação de escoamentos bifásicos gás-líquido. Trata-se de um método preciso e não intrusivo, que possibilita a observação de detalhes do escoamento em altíssimas taxas de aquisição, conforme a figura 3.8 está ilustrando. A filmagem de alta velocidade, também é muito utilizada para validar resultados obtidos por outras técnicas de medição, como foi realizado no trabalho de Grangeiro (2010).

Figura 3.8 - Ascensão de uma bolha de Taylor em um escoamento pistonado vertical, captada por uma câmera de alta velocidade.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

3.2.1 O princípio de utilização da técnica

Esta técnica de medição é um método essencialmente empírico, que se fundamenta na análise repetitiva da característica que se deseja saber em relação ao escoamento. Nela, foca-se em um determinado padrão de escoamento bifásico, e obtêm-se filmes a altas frequências de aquisição dos quais são extraídas imagens, que em seguida serão trabalhadas em softwares especializados, até que se tenha uma amostragem suficiente para que a incerteza da medição seja mínima, para os parâmetros relativos ao escoamento que se quer avaliar.

Polonsky *et al* (1999) Detalharam os parâmetros hidrodinâmicos da bolha de Taylor, tais como, a sua forma, velocidades da frente e da traseira da bolha, assim como, a alongação sofrida pela bolha devido o gradiente de pressão hidrostática, em uma completa investigação experimental, utilizando a técnica de filmagem em alta velocidade, com o posterior tratamento realizado nas imagens obtidas dos vídeos. Eles encontraram que a cauda da bolha sofre oscilações quase periódicas, e o espectro de frequência destas oscilações são dependentes do tamanho da bolha, apesar da forma da cauda da bolha manter seu aspecto côncavo independente do tamanho dela, do mesmo jeito, que parece ser insensível a velocidade da fase líquida na tubulação.

Aladjem Talvy *et al* (2000) Utilizaram imagens digitalizadas da técnica de filmagem em alta velocidade, para determinar a influência da distância de separação entre duas bolhas consecutivas, sobre o comportamento da bolha seguidora em um escoamento pistonado vertical ascendente. A aplicação da técnica tornou possível, seguir o movimento instantâneo e a variação da forma da bolha seguidora, como resultado da velocidade do campo induzido pelo movimento da bolha precedente. Os detalhes da aceleração da bolha seguidora, e o processo de mistura das bolhas, em condição de escoamento não desenvolvido foram observados. Eles constatarão que a bolha precedente, não é afetada pela bolha seguidora.

3.2.2 As desvantagens na utilização da técnica

Uma grande dificuldade que se apresenta no estudo do escoamento pistonado, através do método de captação de imagens em alta velocidade, é a presença de pequenas bolhas na esteira da bolha de Taylor, em função das velocidades superficiais envolvidas, ocorre algumas vezes o coalescimento dessas bolhas, além do que, a cauda da bolha alongada apresenta um comportamento oscilante, que dificulta a definição da interface da bolha com o pistão de líquido. Para superar estas dificuldades e preencher uma lacuna na análise de escoamento bifásico vertical e horizontal, alguns pesquisadores se propuseram, a melhorar a análise feita pela técnica de filmagem em alta velocidade.

Mayor *et al* (2007) Desenvolveram uma melhoria na técnica de análises de imagens, especialmente para a condição de escoamento pistonado contínuo, em tubulações verticais e aplicáveis a medição de uma grande quantidade de bolhas. A melhoria foi feita através de uma detalhada avaliação da incerteza associada, com os parâmetros medidos por esta técnica, e foi conseguida por meio de um procedimento sequencial em cada quadro da filmagem, que constou dos seguintes passos: Conversão da imagem de RGB para o módulo de escala de cinza; subtração do fundo da imagem para melhorar o contraste; aplicação de um filtro para remover ou atenuar distorções na imagem; conversão de uma imagem em escala de cinza para um modo binário (apenas preto e branco); aplicação de um nivelamento na imagem de tal maneira que, o plano de fundo da imagem fique preto e o primeiro plano da imagem fique branco; e por fim a aplicação de erosão a imagem, que consiste de uma operação morfológica que altera todos os pixels da imagem, de acordo com os valores dos pixels da vizinhança da imagem. Com isso, eles conseguiram representar a imagem em termos de sua dimensão exata, e extrair largura e comprimento da bolha alongada.

Do Amaral *et al* (2013) Propuseram um novo método de processamento de imagem, que automaticamente extrai informações quantitativas dos parâmetros do corpo do pistão de líquido e da bolha alongada das imagens feitas por uma câmera de alta velocidade, por meio de técnicas como, algoritmo watershed, filtragem top hat e transformada H mínima, permitindo a detecção exata dos contornos da bolha. Tais técnicas, realizam o processamento de imagens de maneira não linear, baseada na teoria dos conjuntos e geometria integral, as operações sondam a imagem por meio de um padrão chamado de elemento estruturante, que define o tamanho e a forma da região considerada.

Outra dificuldade que se tem ao emprego desta técnica é dela ser restrita a tubos com parede transparente, além do mais, o líquido envolvido no escoamento, não pode ter o aspecto opaco ou mesmo translúcido, visto que, tal condição dificultará a percepção das fronteiras da interface gás-líquido, mesmo que os filmes sejam feitos em altas frequências de aquisição.

Contudo, a utilização da técnica de filmagem de alta velocidade, está se expandindo para diferentes campos de pesquisa, como uma consequência natural de sua não intrusividade, como também, devido ao desenvolvimento promovido pela evolução exponencial de aplicativos em hardwares e softwares de análise de imagens para o estudo de fenômenos físicos.

O DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os materiais e métodos, utilizados no experimento para a obtenção dos parâmetros multifásicos, iniciando com uma descrição da construção e caracterização da sonda condutiva, para depois apresentar o aparato experimental utilizado e a descrição do experimento, seguindo com os procedimentos de execução de medição para a técnica da sonda condutiva e para a técnica da filmagem de alta velocidade, concluindo em uma breve descrição sobre o tratamento estatístico utilizado para os resultados.

4.1 A CONSTRUÇÃO DA Sonda CONDUTIVA

Como forma de se avaliar as características da sonda condutiva confeccionada, para a medição dos parâmetros do escoamento pistonado no aparato experimental, uma vez que, em função do aspecto artesanal de construção do instrumento, não se ter condições de se obter pelo menos dois, com características iguais, optou-se pela construção de três sondas, as quais depois de construídas e caracterizadas e em condições de efetuar medições, uma delas foi escolhida para a aplicação de interesse.

4.1.1 A preparação dos sensores da sonda

Tem início com a escolha do elemento condutor da corrente elétrica, e após a análise do formato e espessura de diversas agulhas disponíveis no mercado, aquelas destinadas a utilização em terapia de acupuntura, se mostraram mais adequadas para a construção dos sensores, em face da necessidade de rigidez que eles precisam ter, juntamente com o mínimo de interferência que eles venham causar no escoamento. Desta forma, o diâmetro destas agulhas, que são fabricadas em aço inox, e varia entre 0,3 a 0,5 mm, se mostrou ideal para a construção dos sensores, tendo em vista, a melhor associação dos critérios mencionados acima.

Os materiais utilizados para o restante da confecção do sensor são selecionados de acordo com propriedades dos materiais, quanto ao isolamento elétrico, rigidez e dimensões. Os mesmos estão relacionados a seguir:

- Cola de alta aderência;
- Fio condutor de cobre com 0,5 mm de diâmetro;
- Clorofórmio (atua como um solvente para a tinta isolante);
- Resina epóxi (atua como isolante e faz o reforço na rigidez do sensor);
- Tinta isolante (promove uma camada isolante impermeável).

Na agulha é necessário fazer em toda a sua superfície cilíndrica, ranhuras para melhorar a aderência, visto que, posteriormente lhe será aplicadas camadas de tinta isolante que poderiam deslizar e soltar, se a superfície estivesse lisa, para tal, se segura uma das extremidades da agulha com um alicate, e fazem-se ranhuras perpendiculares ao seu comprimento, usando um estilete. Após esta etapa, a parte superior da agulha (mais robusta) é retirada usando um alicate. Dependendo da espessura da agulha, pode-se cortar um pouco mais além da parte mais robusta para aumentar a rigidez.

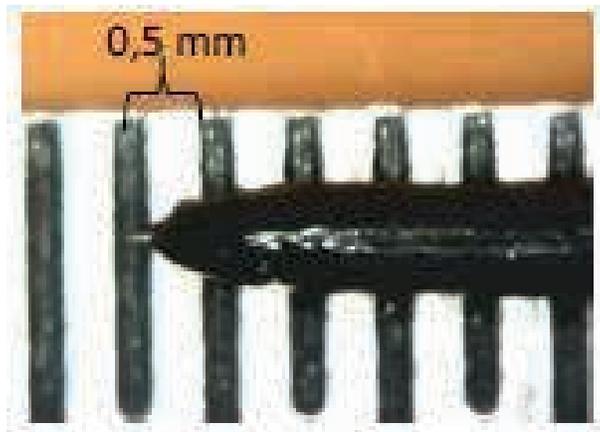
Em seguida, corta-se um pedaço do fio condutor e retira-se parte do seu isolamento, usando um estilete, o suficiente, para enrolar a parte desencapada, na parte superior da agulha. Após envolver o fio na agulha, deve-se usar um alicate de ponta fina, para fixar o fio condutor enrolado na agulha, de modo a garantir o firme contato das superfícies da agulha e do fio.

Em seguida, usando uma luva de borracha, deve-se aplicar uma fina camada de cola de alta aderência, sobre a região onde o fio está enrolado na agulha. Para fixar e prender o fio condutor e a agulha, um pequeno maçarico é usado para soldá-los. Deve-se tomar cuidado, para não queimar a parte do fio que continua encapada. O ponto de solda ocorre, quando se nota pequenas bolhas no metal do fio soldado.

Para o revestimento do sensor, usa-se uma mistura de tinta isolante e clorofórmio preparada em um tubo de ensaio. O revestimento tem por objetivo, isolar o corpo da agulha de forma a deixar só a ponta metálica captando os sinais. O clorofórmio é usado para diluir a tinta e diminuir sua plasticidade, sendo possível revestir melhor o sensor. A proporção entre a tinta e o clorofórmio varia, e deve ser feita de acordo com o estado da tinta, quanto mais viscosa mais clorofórmio é necessário. O sensor é revestido completamente, mergulhando-o na mistura. Esse procedimento deve ser feito rapidamente, pois a volatilidade do clorofórmio faz com que a solução fique viscosa novamente após alguns segundos. Deve-se evitar que pedaços não diluídos de tinta fiquem no revestimento, retirando-os cuidadosamente do sensor antes que a solução seque.

Após secar a solução aplicada no sensor, o processo de revestimento pode ser repetido quantas vezes forem necessárias, até que todo o sensor esteja coberto pela solução. Após secar a última camada de tinta, o sensor deve ser revestido por uma camada final de epóxi (ideal que seja de secagem rápida), usando uma luva de borracha para espalhá-lo sobre todo o comprimento do sensor. Isso tem por finalidade melhorar o isolamento e torná-lo mais rígido. Por fim é preciso esperar por 24 horas, para o sensor secar completamente.

Figura 4.1 - Aspecto final do sensor construído.



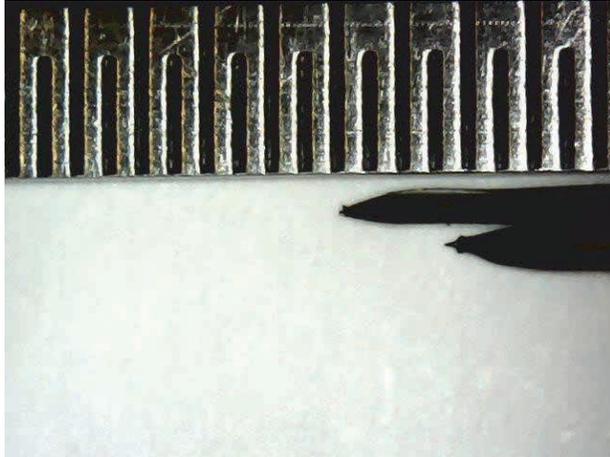
Fonte: Arquivo de imagens do autor.

Após o tempo de secagem final, a ponta do sensor deve ser lixada para gerar o contato necessário para a detecção das bolhas. Para tal, deve-se usar uma lixa fina, lixando suavemente até expor a ponta metálica da agulha. O ideal é remover de modo uniforme o contorno da ponta da agulha. A ponta do sensor fica com o tamanho médio exposto em torno de 0,1 mm, conforme ilustrado na figura 4.1.

4.2 A CARACTERIZAÇÃO DA SONDA CONDUTIVA

Uma vez estando prontos os sensores, a sonda condutiva foi formada pela união de dois sensores posicionados lado a lado, conforme a figura 4.2 apresenta. A união dos sensores é feita, se repetindo o mesmo processo de revestimento de um sensor, de tal maneira que, ao final se obterá uma formação compacta, completamente isolada e com apenas as pontas dos sensores para o contato com as bolhas. A distância entre pontas da sonda (distância entre pontas dos sensores), a área da ponta da sonda, que compreende a soma das áreas de dois sensores, assim como o perímetro, denominadas de características da sonda serão mensuradas, afim de que se definam seus valores médios, que são de grande relevância para esta técnica de medição, em virtude do caráter intrusivo da sonda condutiva sobre o escoamento.

Figura 4.2 – Caracterização da distância entre pontas da sonda.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

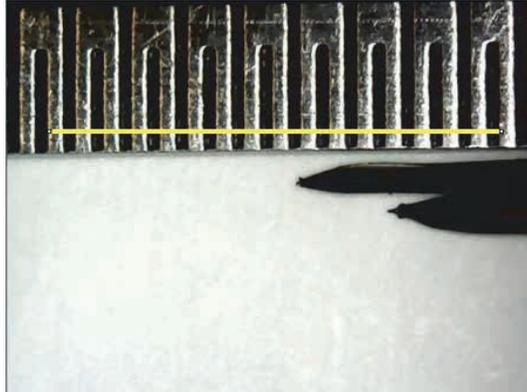
4.2.1 A caracterização da distância entre pontas da sonda

Para caracterizar a distância entre pontas da sonda condutiva, ajustou-se a escala de uma régua milimetrada, com precisão de 0,5 mm e incerteza de $\pm 0,25$ mm, ao foco de um microscópio de tal maneira que uma medida fixa fosse estabelecida. Junto à escala colocou-se a sonda, conforme ilustrado na figura 4.2, fazendo-se coincidir a ponta do primeiro sensor, a um traço definido como marco inicial da escala, e então, retirou-se uma foto. Este procedimento de retirada de fotos prosseguiu, e repetiu-se por dez vezes, todavia, sempre mudando o foco do microscópio a cada foto tirada.

Para se retirar as fotos, utilizou-se um microscópio digital modelo BW 1008 – 5x, de fabricação da digital microscope, que possui uma resolução acima de 2 mega pixels, zoom digital de 4x e uma faixa de ampliação da imagem de 5 x – 500 x.

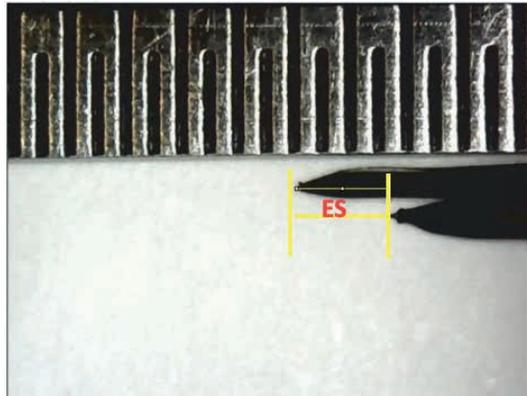
Após serem coletadas as dez fotos da posição da sonda em relação a régua, com o auxílio de um software *open source* denominado Image J, a distância entre pontas da sonda foi determinada.

Figura 4.3a - Definição do comprimento linear de referência E_{Ref} , representado pela linha amarela que o programa converte para pixels denominando de EN_{pixref}



Fonte: Arquivos de imagens do autor.

Figura 4.3b - Definição da distância entre pontas da sonda em pixels denominada EN_{pix} pelo programa, representada pela linha amarela.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

O procedimento para a obtenção da distância entre pontas é iniciado com o uso de uma régua milimetrada, em cuja escala foi definida a distância de referência (E_{ref}) em milímetros, clicando-se com o cursor do mouse em um traço visível da escala; o qual se caracteriza como o ponto inicial, conduzindo-o em linha reta até um número inteiro de traços que apareçam na figura; que se caracteriza como o ponto final, conforme está ilustrado na figura 4.3a. O programa converte a distância da escala para pixels, denominada (EN_{pixref}). Em seguida, toca-se com o cursor do mouse, na ponta do sensor mais a frente e defini-se uma reta, até o cursor do mouse se alinhar com a ponta do segundo sensor, conforme figura 4.3b, esta distância o programa a converte em pixels, denominada de (EN_{pix}). A distância (ES) entre as pontas do sensor, em milímetros, é definida pela equação 4.1.

$$ES = \frac{EN_{pix}}{EN_{pixref}} E_{ref} \quad (4.1)$$

Este procedimento foi realizado nas dez imagens arquivadas, afim de que, uma distância média entre as pontas fosse definida. Na tabela 4.1 encontram-se, as distâncias entre pontas médias, juntamente como o desvio padrão da medida e a incerteza para as três sondas construídas.

Tabela 4.1 - Distância entre pontas das sondas construídas

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
Distância média entre pontas (mm)	1,14	1,59	1,94
Desvio padrão	0,061	0,028	0,021
Erro 95% (mm)	0,040	0,020	0,020

Fonte: Autoria própria

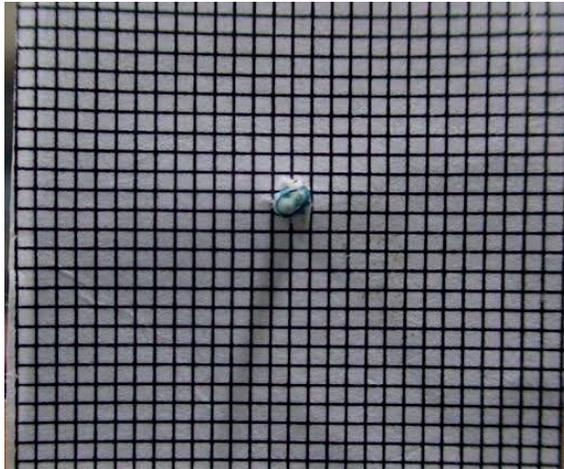
4.2.2 A caracterização da área e do perímetro da ponta da sonda

Para caracterizar a área e o perímetro da sonda condutiva, se estabeleceu com as marcações de um papel milimetrado, uma área definida, na qual a sonda será inserida perpendicularmente ao plano do papel, conforme a figura 4.4 ilustra, de tal maneira que, a mesma ocupe um espaço dentro da área definida. Em seguida, ajustou-se o foco do microscópio, de tal maneira que, se pudesse captar a imagem do papel milimetrado e da sonda, e retirou-se uma foto. Este procedimento foi repetido por dez vezes e sempre para a retirada de uma nova foto o foco do microscópio era novamente ajustado.

Uma vez coletadas a dez fotos da maneira descrita acima, outra vez, utiliza-se o software Imagem J, com o objetivo de se obter a área e o perímetro da ponta da sonda.

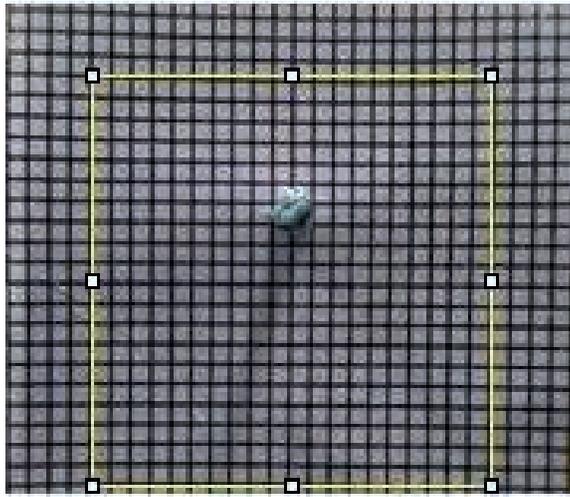
No procedimento para se obter a área da ponta da sonda, defini-se uma área de referência em torno do sensor, denominada (A_{ref}) em milímetros quadrados (de preferência a área de um quadrado), e em seguida, clicando-se com o mouse, delinea-se o quadrado definido. Com a ajuda do programa, a medida da área, será transformada para pixels, denominando-se (AN_{pixRef}), conforme pode ser vista na figura 4.5a. A área da ponta do sensor é obtida pelo mesmo procedimento, com a ajuda do programa, delinea-se o contorno da ponta dos dois sensores, estabelecendo um ponto inicial e terminando a linha e um ponto final, que deve coincidir com o ponto inicial. Com a ajuda do programa, esta distância é dada em pixels definida como (AN_{pix}), conforme mostra a figura 4.5b. A equação 4.2, fornece em milímetros quadrados a área (AS) da ponta da sonda.

Figura 4.4 - Caracterização da área e do perímetro da sonda.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

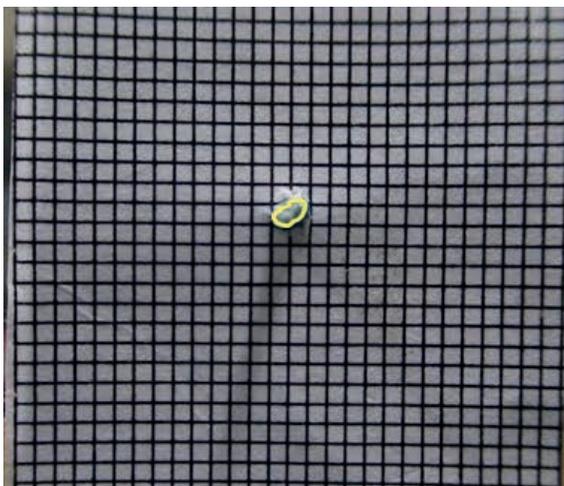
Figura 4.5a - Definição da área de referência A_{ref} , representada pelo quadrado em amarelo que o programa converte para pixels denominando de AN_{pixRef} .



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

$$AS = \frac{AN_{pix}}{AN_{pixRef}} A_{ref} \quad (4.2)$$

Figura 4.5b - Definição da área da ponta da sonda em pixels denominada por ANpix pelo programa, representada pela linha amarela.



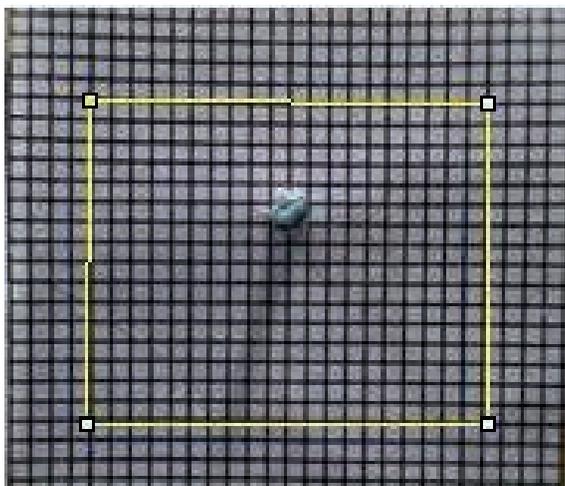
Fonte: Arquivo de fotos do autor.

O procedimento para se obter o perímetro da ponta da sonda é realizado de igual maneira aquele feito para a área, porém, adota-se no quadrado definido anteriormente para a área, a distância em milímetros dos quatro lados desta figura, denominando-a de ($PRef$), que equivale ao perímetro do quadrado. Outra vez, utilizando-se o mouse clica-se em um ponto inicial e até um ponto final, delinea-se o quadrado definido, uma vez mais, fazendo-se concordar o ponto final com o inicial. O programa transformará a distância em milímetros (o perímetro) para pixels denominando-se ($PNpixRef$), conforme figura 4.6a ilustra. O perímetro da ponta do sensor é obtido semelhante a área, clica-se com o mouse em um ponto no contorno da área definida pelos dois sensores, e em seguida encerra-se uma linha, fazendo-se coincidir, o ponto inicial com o ponto final. O programa transformará esta distância para pixels denominando-a ($PNpix$), equivalente ao perímetro do contorno da linha, conforme ilustra a figura 4.6b. A equação 4.3 determina em milímetros o perímetro (PS) da ponta da sonda.

$$PS = \frac{PNpix}{PNpixRef} PRef \quad (4.3)$$

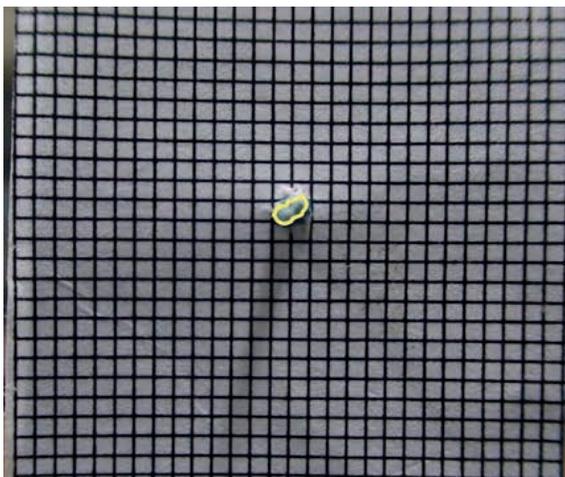
Outra vez este procedimento foi realizado nas dez imagens arquivadas, afim de que, uma área média e um perímetro médio fossem estabelecidos para a ponta da sonda. Nas tabelas 4.2 e 4.3 estão definidos a média, o desvio padrão e a incerteza do valor da área e do perímetro da ponta, para as três sondas construídas.

Figura 4.6a - Definição do perímetro de referência PRef, representado pelo quadrado em amarelo que o programa converte para pixels denominado de PNpixRef.



Fonte: Arquivo de fotos do autor.

Figura 4.6 - Definição do perímetro da ponta da sonda em pixels denominado PNpix pelo programa, representado pela linha amarela.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

Tabela 4.2 - Área das pontas das sondas construídas

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
Área média da ponta(mm ²)	0,75	0,69	5,06
Desvio padrão	0,08	0,10	0,28
Erro 95%(mm ²)	0,06	0,07	0,20

Fonte: Autoria própria

Como foi definido no item 4.1, levando-se em conta o aspecto construtivo da sonda, optou-se por utilizar no experimento a sonda 2. O critério da escolha recaiu por esta sonda, em função da mesma apresentar valores para a distância entre pontas, área e perímetro, compreendidos entre os valores obtidos para estas mesmas características, para as demais sondas. No apêndice A, encontram-se os valores obtidos para a distância entre pontas, área e perímetro das dez medidas realizadas para a sonda 2.

Tabela 4.3 - Perímetro das pontas das sondas construídas

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
Perímetro médio da ponta (mm)	2,47	2,82	10,02
Desvio padrão	0,100	0,228	0,347
Erro 95%(mm)	0,070	0,160	0,250

Fonte: Autoria própria

4.3 O APARATO EXPERIMENTAL

Para as medições da fração de vazio, velocidade, comprimento, frequência de bolhas alongadas e o comprimento do pistão de líquido, foram construídos um aparato experimental em forma de *loop* (um circuito fechado), conforme pode ser visto na figura 4.7. O circuito é formado por tubos em PVC rosqueados, e por conexões (curvas, cotovelos, Tê's, válvulas, luvas, etc.) do mesmo material, e por uma seção de teste tubular em acrílico na vertical, pelos quais circula o gás e o líquido continuamente.

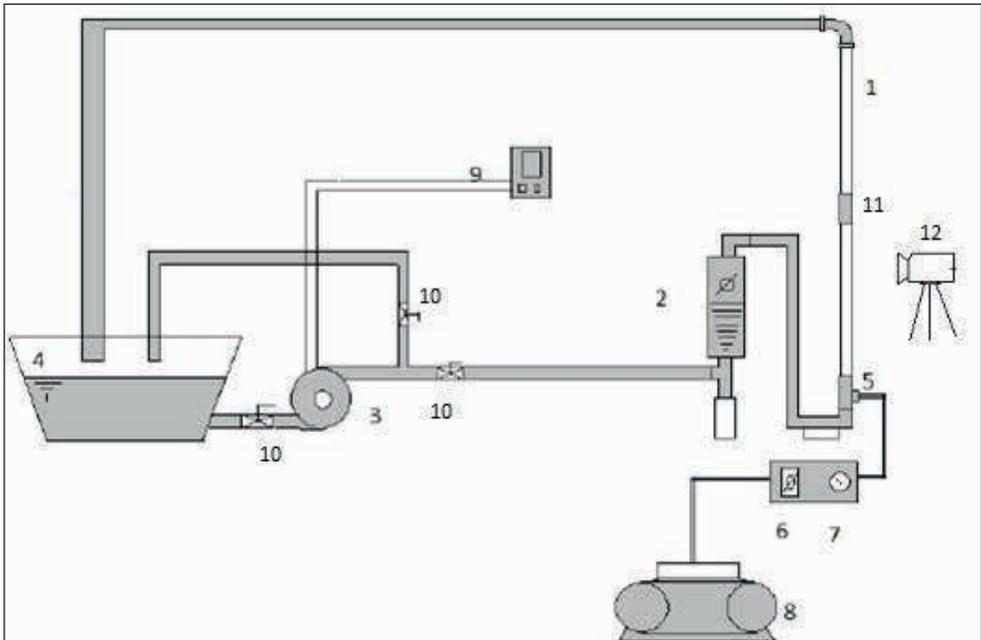
4.3.1 O funcionamento do aparato experimental

O líquido utilizado neste trabalho trata-se de água destilada, a qual é retirada de um tanque por uma bomba, e circula livremente em parte do aparato experimental. Até que, na base da coluna vertical, que compreende a seção de teste, o gás, que nos experimentos realizados neste trabalho, é o ar comprimido, é lançado por meio de um injetor, para o interior do tubo em acrílico, a fim de que, ele se misture a corrente de água. Os dois fluidos atravessam a seção de teste, onde as medidas dos parâmetros do escoamento são realizadas pelas duas técnicas de medição utilizadas neste trabalho, e após percorrem o restante do circuito fechado, retornam ao mesmo tanque de onde a água foi retirada, onde o ar é então liberado para a atmosfera, e a água é novamente armazenada.

4.3.2 Os elementos do aparato experimental

O aparato experimental é constituído ainda pelos equipamentos e instrumentos listados e descritos a seguir de acordo com o esquema da figura 4.7.

Figura 4.7 - Esquema do aparato experimental



Fonte: Adaptado da figura do relatório técnico-científico de Diego Lourenço da Costa Felipe.

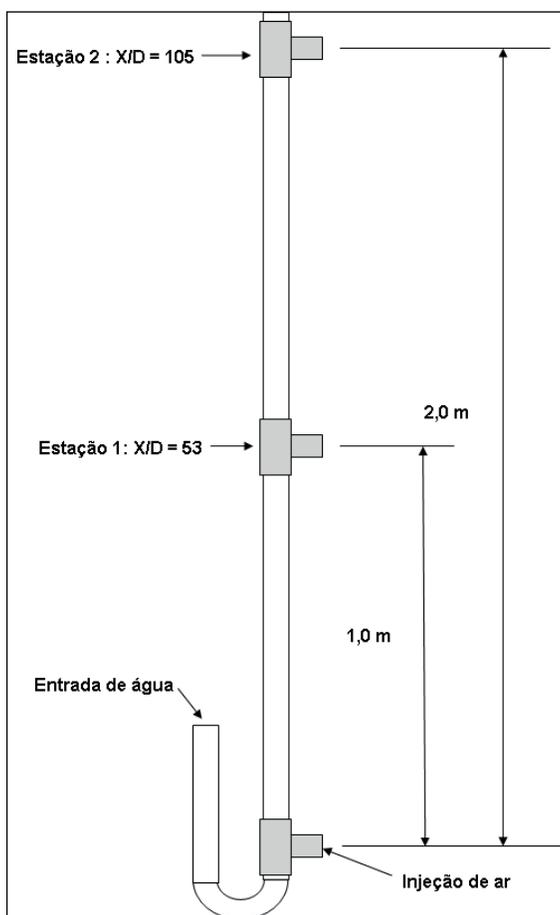
- 1. Seção de teste.** Parte do aparato experimental, onde serão realizadas as medidas para a obtenção dos parâmetros de escoamento, tanto para a aquisição de imagens, quanto para aquisição dos dados da sonda condutiva. A seção é constituída de duas partes em tubos de acrílico, com 19 mm de diâmetro interno e 1 metro de comprimento cada.
- 2. Medidor de vazão de líquido.** É o instrumento que tem por finalidade medir a vazão de água, definida pela condição experimental, que vai ingressar para a seção de teste. Este medidor não tem regulagem própria, e assim, necessita da atuação do operador no inversor de frequência, e/ou nas válvulas de regulagem, para definir a vazão de água, de acordo com a condição de fluxo do experimento. A curva de calibração deste medidor encontra-se no apêndice B.
- 3. Bomba hidráulica.** É o equipamento cuja função é transferir a água desde o tanque a pressão constante, visando a circulação da mesma por todo o aparato experimental. Para isso foi utilizada uma bomba centrífuga, modelo: SHX – hobby, de fabricação da SOMAR, com as seguintes características: Potência de 1 CV; vazão de 11,6 m³/h e pressão máxima de 30 mca.
- 4. Tanque de água.** Elemento responsável pelo armazenamento da água necessária ao experimento. Possui um formato tronco-cônico, e tem capacidade para armazenar 50 litros de água. Neste tanque é introduzido acetato de sódio em uma proporção de 2,0 mg por litro de água, cuja finalidade é de potencializar a condutibilidade da água.

5. **Injetor de ar.** Elemento dotado de geometria própria, que visa a inclusão do ar em forma de pequenas bolhas, que vão misturar-se a água de circulação na seção de teste do aparato experimental. A geometria do injetor permite que as pequenas bolhas formadas, misturem-se e coalesçam, aumentando de tamanho e gerando bolhas de Taylor, antes delas chegarem a tocar a sonda condutiva, promovendo desta forma, o padrão de escoamento pistonado.
6. **Medidor de vazão de ar.** É o instrumento que defini e controla a vazão de ar, que vai ingressar na seção de teste. Possui regulagem própria, o que permite a atuação manual do operador para atingir a vazão de ar, de acordo com a condição de fluxo estabelecida para o experimento. A curva de calibração deste medidor encontra-se no apêndice B.
7. **Regulador de pressão.** É o elemento que tem como objetivo regular a pressão de ar necessária, sob a qual o experimento será realizado, mantém a pressão definida para o experimento, mesmo nos momentos de intermitência do funcionamento do compressor.
8. **Compressor de ar.** É o equipamento que vai produzir ar suficiente para o experimento e armazená-lo em um balão acoplado ao mesmo. Funciona em regime intermitente, ligando e desligando, toda a vez que a pressão atinge, o valor mínimo e o máximo, para o qual está regulado. Para isso foi utilizado um compressor de pistões alternativo modelo MSL 15/80 de fabricação da SCHULZ, com as seguintes características: Potência de 3 HP; Vazão de 15 L/min e pressão máxima de 8,3 BAR.
9. **Inversor de frequência.** É o elemento que permite a regulagem da rotação da bomba hidráulica, de tal maneira que, é possível definir as vazões de líquido que serão necessárias ao experimento de acordo com a condição de fluxo estabelecida. Para isso foi utilizado um inversor modelo CFW 08 de fabricação da WEG, com as seguintes características: Rede (50 - 60 Hz) de 200 a 240 VAC e 3 – 19 A, e saída (de 0 – 300 HZ) de 0 – 240 VAC e 3 – 10 A.
10. **Válvula de regulagem de vazão.** São válvulas instaladas no aparato experimental, que tem a finalidade de desviar o fluxo de água para o tanque, quando não se quer que a mesma circule pela seção de teste, assim como, pelo restante do aparato. Além disso, podem proporcionar um controle alternativo da vazão de água necessário para o experimento de acordo com as condições de fluxo.
11. **Sonda condutiva.** É o instrumento principal do aparato, o qual será o responsável por medir os parâmetros do escoamento bifásico, desejados para o experimento. É montada no interior do tubo da seção de teste e fixada em sua linha central, e tem localização vertical definida, conforme as estações de medição.
12. **Câmera de filmagem.** É o equipamento responsável por captar imagens do escoamento na seção de teste em alta velocidade, capaz de gerar vídeos a 1000 quadros por segundo. Por ocasião da gravação dos filmes, ela fica montada sobre uma estrutura próxima a seção de teste, na localização das estações de medição. Para o experimento, foi utilizada uma câmera modelo EXILIM EX – ZR 1000, de fabricação da CASIO.

4.4 A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em duas etapas, cuja intenção foi a de se tomar os valores dos parâmetros do escoamento, para uma tubulação de diâmetro interno de 19 mm. Cada etapa corresponde a uma estação de medição diferente na mesma tubulação. A primeira localizada a 1,0 m a partir da injeção de ar, denominada estação 1, a qual pode ser também referenciada pela razão entre a altura de medição (X), tomada desde a injeção de ar, e o diâmetro interno da tubulação (D), assim definindo-se, ($X/D = 53$), como comprimento parametrizado para a primeira etapa do experimento (estação inferior). A segunda localizada a 2,0 m da injeção de ar denominada estação 2, definindo-se da mesma maneira como para o anterior ($X/D = 105$), o comprimento parametrizado para a segunda etapa do experimento (estação superior), como mostra o esquema da figura 4.8.

Figura 4.8 - Esquema do posicionamento das estações na seção de teste.



Fonte: Autoria própria

4.4.1 As condições de fluxo do experimento

Para a execução do experimento, pares de vazão volumétrica de ar e de água, para formar a mistura gás-líquido foram escolhidas aleatoriamente, com a intenção de se avaliar o aparato experimental, com relação a sua validade, no que diz respeito a adequação do mesmo aos mapas de padrão de escoamento, bem como, quanto a localização dos pares de vazão escolhidos na faixa do escoamento pistonado.

Desta forma, tomando as vazões volumétricas (Q_l) e (Q_g) escolhidas aleatoriamente, juntamente com o valor do diâmetro interno (D) da tubulação utilizada, e levando-os as equações 2.6 e 2.7, determinam-se as velocidades superficiais do líquido e do gás respectivamente, cujos pares, conforme na tabela 4.4 estão definidos, passam a ser denominados neste trabalho, condições de fluxo do experimento.

4.4.2 As propriedades do ar e da água no experimento

Para se proceder com as medições realizadas pelas duas técnicas experimentais, se definiu as propriedades para os fluídos envolvidos, as quais foram consideradas constantes durante as etapas do experimento. Tais propriedades estão relacionadas na tabela 4.5, sendo que todas foram tomadas, tomando como referência a temperatura da água na faixa de 20° C a 25° C, e a temperatura do ar na faixa de 30°C a 35° C, ambas ao nível do mar e a pressão atmosférica local.

Tabelas 4.4 - Pares de condições de fluxo do experimento

Par	U_{sl} (m/s)	U_{sg} (m/s)	Par	U_{sl} (m/s)	U_{sg} (m/s)	Par	U_{sl} (m/s)	U_{sg} (m/s)
1	0,293	0,070	5	0,585	0,070	9	0,878	0,070
2	0,293	0,105	6	0,585	0,105	10	0,878	0,105
3	0,293	0,176	7	0,585	0,176	11	0,878	0,176
4	0,293	0,263	8	0,585	0,263	12	0,878	0,263

Fonte: Autoria própria

Tabela 4.5 - Propriedades das substâncias utilizadas no experimento.

Massa específica da água	$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$
Viscosidade dinâmica da água	$\mu = 0,00089 \text{ Ns/m}^2$
Viscosidade cinemática da água	$\nu = 0,00000008 \text{ m}^2/\text{s}$
Tensão superficial da água	$\sigma = 0,0727 \text{ N/m}$
Massa específica do ar	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Viscosidade dinâmica do ar	$\mu = 0,0000181 \text{ Ns/m}^2$

Fonte: (COLLIER, 1981)

4.4.3 O procedimento experimental

A rotina estabelecida para a execução do experimento compreendeu, a necessidade de se abranger as medições realizadas pelas duas técnicas concomitantemente. Sob esta perspectiva, o procedimento experimental se desenvolveu da seguinte forma, antes de se começar o procedimento particular de medição das duas técnicas, se ajustava uma determinada condição de fluxo, que se definiu começar pelo par número 1, conforme a tabela 4.4.

Cuidados foram tomados, para garantir a indicação correta das vazões de ar e de água pelos seus respectivos medidores, bem como, o de garantir que a pressão de ar injetado para o interior da tubulação, se preservava no valor de 0,1 MPa, que foi estabelecida e mantida para ambas etapas do experimento.

Em seguida, se deixava por algum tempo a mistura de fluidos circular pelo aparato, até que se constatasse que flutuações decorrentes da interação gás-líquido, já não existiam, de tal forma que, viessem a interferir de algum modo nas aquisições que seriam feitas pelas duas técnicas de medição, só depois dessa verificação é que se dava início aos procedimentos particulares de cada técnica.

Finalmente, quando as aquisições relativas as duas técnicas terminavam, a sequência do procedimento era refeita para o próximo par de condição de fluxo, e assim sucessivamente, conforme mostra a tabela 4.4, até concluir com o último par. Este procedimento foi executado todo de uma vez, para a estação inferior e depois foi inteiramente repetido e executado também, todo de uma vez para a estação superior.

Quando na execução do procedimento de medição pelas duas técnicas, dado a condição estabelecida pelo procedimento experimental, necessitou-se primeiramente, montar a sonda condutiva na estação inferior, realizar todas as medições, para só então retirá-la desta posição, e transferi-la, para a estação superior, para também realizar todas as medições para essa posição. A mesma providência foi tomada para a técnica da filmagem de alta velocidade, primeiro foram realizados os filmes na estação inferior, para em seguida realizá-los na estação superior, dessa maneira, todo o aparato construído para dar suporte a execução dos filmes, foi também transferido da estação inferior para a estação superior.

A câmera de vídeo posicionada para ambas as estações, ficou localizada a uma altura mais baixa que a altura da sonda condutiva, assim, a bolha alongada, primeiramente passa pelo campo de filmagem da câmera, para depois entrar em contato com a sonda condutiva. O objetivo desse procedimento é de evitar que a câmera, filme uma bolha que já recebeu interferência da sonda, e desta maneira dificulte qualquer comparação, que venha ser feita entre as técnicas para os parâmetros do escoamento.

As duas técnicas de medição foram realizadas sempre ao mesmo tempo, ainda que, a técnica de filmagem demorasse menos, em função do tempo estabelecido de gravação dos vídeos ser menor, em relação, ao tempo definido para placa de aquisição de dados na técnica da sonda condutiva. No entanto, se estabeleceu para todas as condições de fluxo a seguinte rotina, o procedimento realizado para a aquisição dos sinais pela sonda era

iniciado, e depois de certo tempo, se iniciava o procedimento de gravação dos filmes pela técnica da filmagem de alta velocidade, de tal maneira que, este último sempre terminava antes do primeiro.

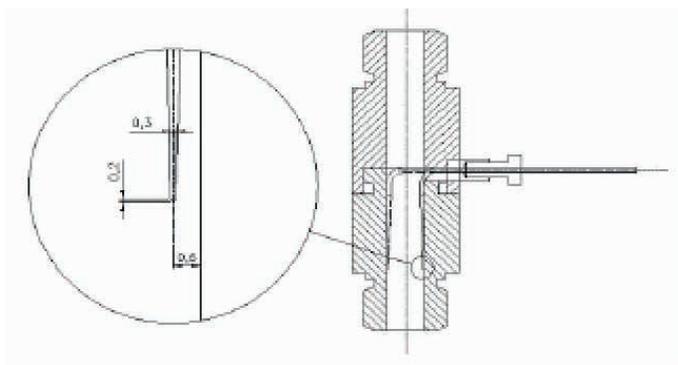
4.5 O PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO COM A SONDA CONDUTIVA

Antes de se iniciar a aquisição dos dados, pertinentes ao escoamento pistonado pela técnica da sonda condutiva, toda uma preparação é necessária, a fim de que, a sonda esteja montada de forma correta e em plenas condições de identificação dos sinais, para de fato, registrar os parâmetros do escoamento de interesse, sem sofrer alguma interferência, devido a natureza do escoamento ao qual vai estar submetida.

4.5.1 A montagem da sonda condutiva ao aparato experimental

A sonda é introduzida no interior do tubo em acrílico da seção de teste, através de uma conexão em Tê, de tal maneira que, as pontas dos sensores tem a possibilidade de se deslocarem na direção radial do tubo, como pode ser visto no esquema da figura 4.9. Porém, neste trabalho, os sensores foram posicionados na linha de centro da tubulação da seção de teste, em ambas as estações de medição.

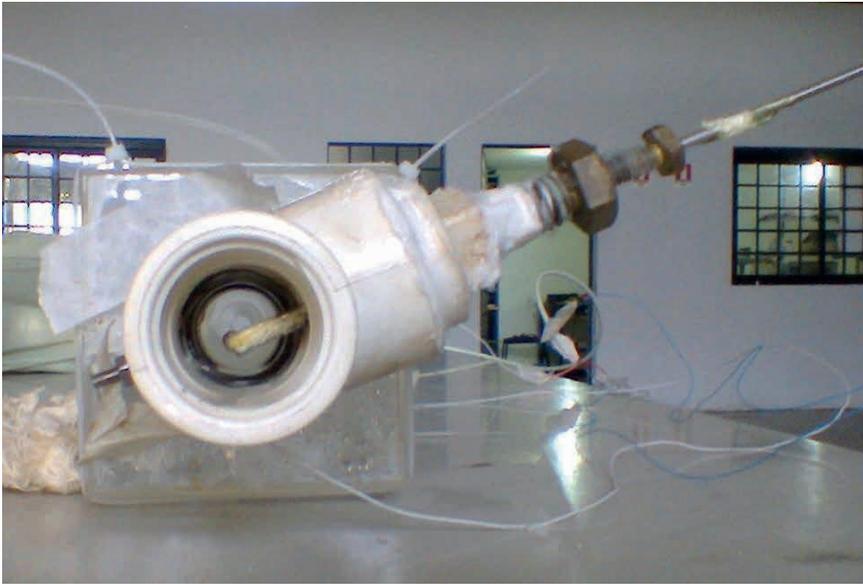
Figura 4.9 - Esquema do posicionamento da sonda condutiva no interior do Tê



Fonte: Silva, 2007

A sonda é montada e fixada a um suporte ôco em aço inox, conforme ilustra a figura 4.10, e este por sua vez é fixado ao Tê, por meio de um parafuso de cabeça sextavada (o maior que aparece na figura), de tal maneira que todo este conjunto formado, pode ser manipulado na direção radial do tubo, para que a sonda seja posicionada bem ao centro da tubulação. Após estabelecer o correto posicionamento da sonda, o conjunto é fixado por meio do outro parafuso sextavado (o menor que aparece na figura), ficando assim, o conjunto pronto para ser montado ao restante do aparato.

Figura 4.10 - Montagem da sonda condutiva ao Tê.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

Na seção circular interna do Tê, foi instalado um anel metálico, ao qual está conectada externamente uma pequena barra fixada por um parafuso, na qual é feita a ligação do fio terra (o fio de cor branca que aparece na figura 4.10). Quando da intermitência da interface gás/líquido o circuito formado, tem condição de funcionar pela passagem da corrente elétrica dos sensores para o anel metálico e deste para o fio terra. As pontas dos sensores da sonda estão localizadas, próximas a posição onde o anel está instalado.

O conjunto mostrado na figura 4.10, é então levado a posição correspondente na estação superior, para ser montado ao restante do aparato experimental, conforme pode ser visto na figura 4.11.

Ao se observar a figura 4.11, se verifica a parte superior do tubo em acrílico da seção de teste, fixada ao Tê, ao qual está internamente montada a sonda condutiva. Uma parte da seção de teste está envolvida pela caixa de acrílico (elemento indispensável para a técnica da filmagem de alta velocidade), e está fixada a extremidade inferior do Tê.

Figura 4.11 - Montagem do Tê a seção de teste.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

Na figura 4.11, podem ser vistos também, saindo do suporte em aço inox, os fios provenientes dos sensores da sonda (os fios da cor azul), que juntamente ao fio terra, (o fio da cor branca) são ligados a placa de aquisição de dados. A placa de aquisição é conectada ao computador, ficando assim o circuito de aquisição de sinal pronto, para iniciar as medições pela técnica da sonda condutiva.

4.5.2 O procedimento para a aquisição de sinais

A placa de aquisição é então ligada, e como está associada a um osciloscópio os sinais captados pelos sensores podem ser vistos, como mostra a figura 4.12. A linha azul corresponde ao sinal do primeiro sensor, e a linha amarela corresponde ao sinal do segundo sensor. A placa possui uma taxa de aquisição máxima de 20 kHz, de maneira que, ela tem condição de ler e registrar os valores de tensão do circuito, à medida que o ar e a água escoam pela tubulação de teste a cada 0,05 milissegundos.

Figura 4.12 - Sinais digitalizados captados pelos sensores da sonda condutiva quando da passagem de uma bolha de Taylor.



Fonte: Arquivos de imagens do autor.

Uma vez se constatando que, os sensores estão registrando os sinais referentes a passagem das bolhas, no computador, utiliza-se o programa que tem como função, registrar alguns dados de entrada, necessários a aquisição da sonda como; o número de canais para aquisição dos sinais, que neste trabalho são dois em função da sonda possuir dois sensores; a frequência de aquisição de 20 kilohertz por sensor; e o tempo estabelecido de aquisição pela placa, definido neste trabalho em 10 minutos. Após esta etapa, só então, se inicia a coleta dos dados pela técnica da sonda condutiva.

Após os dez minutos de aquisição, o programa encerra a coleta dos dados e gera um arquivo com os valores de tensão registrados. Este mesmo procedimento foi realizado para os demais pares de vazão da tabela 4.4, gerando um total de doze arquivos, tanto para estação 1 quanto para a estação 2, que serão tratados separadamente por um algoritmo, para a obtenção da velocidade média e tamanho médio da bolha alongada, a fração de vazão média na tubulação e o tamanho do pistão de líquido, correspondente a cada uma das condições de fluxo.

4.5.3 O processamento dos dados experimentais

Em função das bolhas alongadas apresentarem geometrias, nem sempre de acordo com aquela clássica definida para a bolha de Taylor, ou em virtude de fenômenos naturais ao escoamento bifásico como coalescência e quebra de bolhas, o algoritmo que realiza o processamento dos dados adquiridos (as tensões registradas), estabelece um padrão, que identifica a região onde se encontra uma bolha alongada e a região onde se encontra um pistão líquido, baseado nas considerações feitas do critério adotado no capítulo 3 (critério de Lewis e Davidson), em função das condições relativas a frente e a traseira da bolha alongada.

Figura 4.13 - Sinais detectados pelos sensores da sonda condutiva, onde estão caracterizadas as regiões da bolha alongada e do pistão líquido.



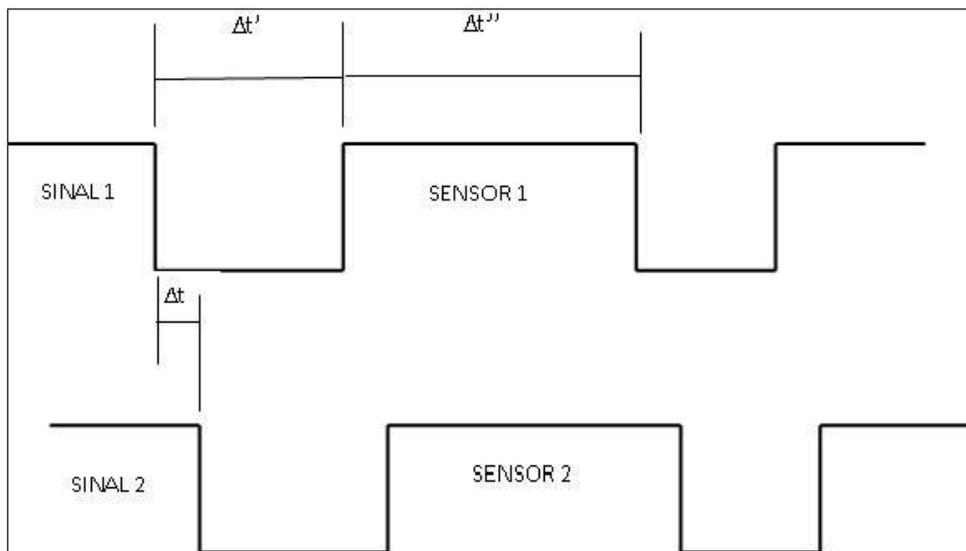
Fonte: Arquivos de imagens do autor.

Na figura 4.13 pode ser visto, o sinal típico obtido pelo osciloscópio, quando a sonda identifica as regiões da bolha alongada e do pistão líquido. A altura dos pulsos representa a tensão, assim, o valor de tensão mais alto corresponde ao ar e o valor de tensão mais baixo corresponde a água, tanto para a linha azul, o sensor 1, quanto para a linha amarela, o sensor 2, da sonda. A largura dos pulsos representa o intervalo de permanência de cada sensor dentro da bolha, os quais apresentam tamanhos diferentes. A alternância intensa das linhas na região do pistão líquido, representa a interferência sofrida pelo sinal dos dois sensores na fase líquida.

A duração de uma bolha alongada e de um pistão líquido pode ser determinada, por meio dos tempos de transição entre uma detecção da interface líquido/gás e uma interface gás/líquido sucessivas.

Devido às diferentes escalas de tempo, que existem entre as bolhas alongadas e as pequenas bolhas dispersas no pistão líquido, um limite foi estabelecido para filtrar as bolhas pequenas nele presente. Um exemplo deste filtro pode ser visto no esquema da figura 4.14. Este limite é determinado pelo algoritmo, como sendo equivalente ao comprimento mínimo, que deve ter uma bolha alongada, neste trabalho, definido como sendo igual ao diâmetro interno (D) da tubulação da seção de teste.

Figura 4.14 - Esquema revelando o intervalo de tempo entre o sinal do primeiro e do segundo sensor Δt , o intervalo de permanência do primeiro sensor na bolha $\Delta t'$, e o intervalo de permanência do primeiro sensor no pistão líquido $\Delta t''$.



Fonte: Autoria própria.

A esta caracterização mínima para o tamanho da bolha alongada, denominou-se de bolha pareada, ou seja, a bolha que apresenta um padrão definido de forma similar ao que aparece na tabela 4.6, onde (0) representa a fase gasosa e (1) a fase líquida, e a transição das interfaces acontece exatamente, quando ocorre a mudança entre estes valores. O tempo de transição é então definido, como o intervalo de permanência em uma mesma fase. Quando for (0) se tem apenas a fase gasosa, então se tem uma bolha alongada, e quando for (1) se tem apenas a fase líquida, então se tem um pistão líquido.

Dessa forma, o intervalo de tempo (Δt) decorrido, entre a detecção da frente da bolha pelo sensor 1, e a detecção da frente da bolha pelo sensor 2, é aquele quando o primeiro zero aparece na linha azul referente ao sensor 1, e quando o primeiro zero aparece na linha amarela referente ao sensor 2, como pode ser observado na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Padrão identificado pelo algoritmo para parear uma bolha alongada.

SENSOR 1																																		
líquido			Bolha alongada																		Pistão líquido													
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Pistão líquido			Bolha alongada																		Pistão													
SENSOR 2																																		

Fonte: Autoria própria

A linha de zeros em azul na tabela 4.6, define o comprimento de uma bolha de Taylor detectada pelo sensor 1, relativo ao intervalo de permanência ($\Delta t'$), cujo tamanho mínimo, será sempre igual ao diâmetro (D) interno da tubulação, o mesmo se tem para a linha de zeros em amarelo na mesma tabela, correspondente ao sensor 2.

As linhas de números (1), em vermelho na tabela 4.6, correspondem ao comprimento do pistão líquido, relativo ao intervalo de permanência ($\Delta t''$), tanto para o primeiro, quanto para o segundo sensor. Porém, para o tamanho do pistão líquido não se tem um comprimento mínimo estabelecido.

O algoritmo avalia os padrões de sinais coletados pela sonda, e descarta todos aqueles que não têm qualquer similaridade ao padrão estabelecido na tabela 4.6. A velocidade média e o tamanho médio da bolha, a fração de vazio média na tubulação e o tamanho do pistão líquido, por fim, são calculados através dos padrões das bolhas com sinal pareado. O esboço do algoritmo desenvolvido em MATLAB/SIMULINK, encontra-se no anexo A.

4.5.4 A determinação da velocidade da bolha de Taylor

A velocidade média (U_{TBS}) de ascensão da bolha, captada pela sonda condutiva e definida pela equação 4.4, é determinada da seguinte maneira, a diferença entre as pontas da sonda (ES), favorece que o primeiro sensor a frente, toque o nariz da bolha por primeiro (apesar disto não acontecer toda vez), e logo em seguida, após um intervalo de tempo (Δt) o sensor número 2 de trás, também toca a frente da mesma bolha. A razão entre a diferença entre pontas da sonda (ES) e o intervalo de tempo decorrido (Δt), determina a velocidade média de ascensão da bolha alongada.

$$U_{TBS} = \frac{ES}{\Delta t} \quad (4.4)$$

4.5.5 A determinação do comprimento da bolha de Taylor

O tamanho médio da bolha (L_{TBS}) detectado pela sonda condutiva, dado pela equação 4.5, é definido tomando como base a velocidade média, calculada pela equação 4.4, mas agora, levando-se em conta, apenas a informação do intervalo de tempo ($\Delta t'$), decorrido de permanência do primeiro sensor dentro da bolha. O produto entre a velocidade média e o intervalo de tempo, determina o comprimento da bolha alongada.

$$L_{TBS} = U_{TBS} \Delta t' \quad (4.5)$$

4.5.6 A determinação do comprimento do pistão de líquido

O tamanho médio do pistão líquido (L_{ss}) captado pela sonda condutiva, dado pela equação 4.6, é definido como o produto da velocidade média, calculada pela equação 4.4, pelo intervalo de tempo ($\Delta t''$), decorrido de permanência do primeiro sensor dentro do pistão líquido. Para a determinação do comprimento do pistão líquido, se admite que a sua velocidade, seja igual a velocidade da bolha alongada imediatamente a frente dele.

$$L_{ss} = U_{TBS} \Delta t'' \quad (4.6)$$

4.5.7 A determinação da fração de vazio média na tubulação

A fração de vazio (α_{med}) média da tubulação, dada pela equação 4.7, é definida como a razão, entre a somatória de todos os intervalos de permanência ($\Delta t'$) do primeiro sensor dentro da bolha, mais a somatória de todos os intervalos de permanência ($\Delta t'''$) do primeiro sensor dentro das bolhas dispersas presentes no pistão líquido, pelo tempo de aquisição T total.

$$\alpha_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t'_i + \sum_{j=1}^K \Delta t'''_j}{T} \quad (4.7)$$

Onde (N) é o número de bolhas alongadas pareadas, e (K) é o número de bolhas dispersas pareadas no pistão líquido.

Acerca da fração de vazio média na tubulação, deve ser feita a seguinte ressalva com relação a sua obtenção, que está relacionada ao tempo de permanência ($\Delta t'''$) do sensor dentro das bolhas dispersas, uma vez que, o algoritmo não faz uso do filtro usado para descartá-las, como ocorre para a determinação do pistão de líquido, e assim desta vez, são levados em consideração, todos os valores relativos as pequenas bolhas no pistão líquido que entram em contato com o sensor, de acordo com o critério de Lewis e Davidson (1983), conforme descrito no capítulo 3.

4.6 O PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO COM FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE

Uma câmera que tem a possibilidade de filmagem em até 1000 quadros por segundo, foi utilizada para produzir filmes, que em média duraram dois minutos, os quais por sua vez foram tratados em softwares comerciais, visando a determinação dos seguintes parâmetros do escoamento, velocidade de ascensão e tamanho da bolha de Taylor e tamanho do pistão líquido.

As figuras 4.15a e 4.15b, mostram a comparação da qualidade do vídeo obtido pela câmera a 1000 quadros por segundo, em relação a uma câmera a 30 quadros por segundo. Os detalhes do escoamento tornam-se mais visíveis, no que tange, a percepção dos contornos da interface gás/líquido da bolha. Essa é uma condição ideal para a análise que se quer realizar, para a obtenção dos parâmetros do escoamento de interesse, através do procedimento realizado para esta técnica.

4.6.1 O procedimento para a gravação dos vídeos

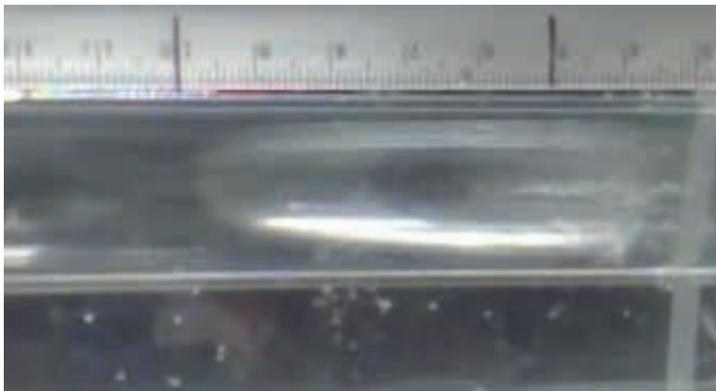
Antes da realização dos filmes pela câmera, foram necessárias algumas providências para que os vídeos tivessem uma boa qualidade, de tal modo suficiente para garantir a análise que se faria aos mesmos em seguida.

Figura 4.15a - Visualização da bolha de Taylor com câmera a 1000 quadros por segundo.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

Figura 4.15b - Visualização da bolha de Taylor com câmera a 30 quadros por segundo.



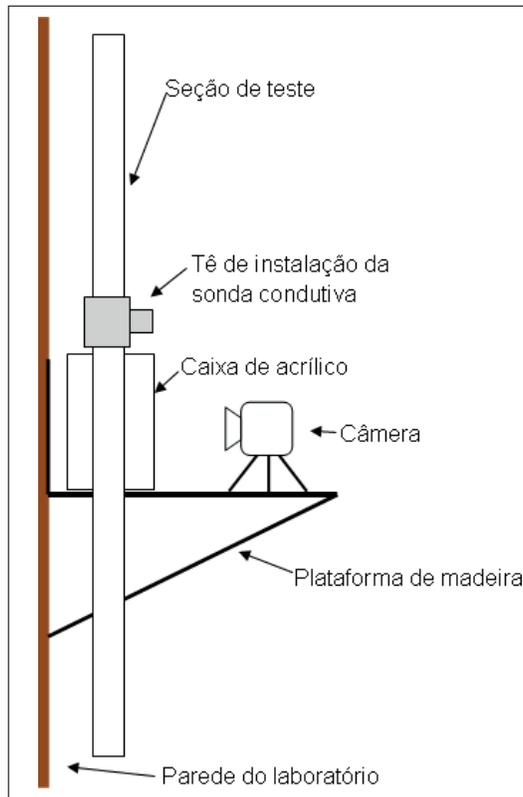
Fonte: arquivo de imagens do autor.

Para neutralizar o efeito de curvatura proporcionado pela tubulação transparente da seção de teste que causa distorção nas imagens, foi providenciada uma caixa de acrílico de dimensões 200 x 100 x 100 milímetros, confeccionada em duas partes iguais, que se encaixam e se fixam na direção longitudinal, se ajustando ao tubo em acrílico da seção de teste. Para se conseguir a neutralização da curvatura do tubo, a caixa foi completamente cheia de água. Como resultado se tem a imagem da bolha como de uma figura plana.

Uma pequena plataforma de madeira foi fixada a cantoneiras, e estas presas a parede, para a colocação da câmera e sustentação da caixa de acrílico, como mostrado no esquema da figura 4.16.

Uma régua de metal, com uma escala em milímetros, foi fixada ao lado do tubo de acrílico no interior da caixa, com o objetivo de verificar, o deslocamento da bolha alongada entre as suas marcações, servindo como referência para as medidas de velocidade e tamanho do pistão de líquido.

Figura 4.16 - Esquema mostrando o posicionamento da câmera com a caixa de acrílico.



Fonte: Autoria própria.

Uma tela de cor preta foi colocada por trás da caixa em acrílico, presa a parede do laboratório, para que as imagens de vídeo, sendo feitas contra um fundo escuro, propiciassem as bolhas aparecerem com um contorno destacado.

Para a obtenção dos vídeos, foi necessária a instalação de refletores especiais com lâmpadas halógenas de 150 W cada, cuja utilização tem por objetivo, o ganho de nitidez, devido a velocidade em que está operando a câmera. Os dois refletores foram instalados a 0,5 metros da caixa de acrílico, um em cada lado, em ambas as estações de medição. Uma iluminação uniforme sobre toda a caixa foi alcançada, por meio de superfícies difusas, instaladas entre os refletores e a caixa que direcionavam a luz.

A câmera foi posicionada sobre a pequena plataforma, e ajustada por um pequeno tripé, para que permanecesse na vertical e aproximadamente ao centro da face da caixa de acrílico, durante todas as tomadas dos filmes. A distância da câmera para a face da caixa de acrílico ficou em torno de 150 mm, e foi determinada de acordo com o campo de filmagem permitido pelo modo de operação a 1000 quadros por segundo, de tal maneira que, ficasse isenta da ação do operador, que antes de realizar cada uma das filmagens, tomou o cuidado de ajustar o foco, conforme ilustrado na figura 4.17.

Após todo este procedimento, a câmera é acionada e um filme é gravado. Este procedimento repetiu-se por doze vezes de acordo com os pares de vazão estabelecidos, para as duas estações, e depois os filmes foram descarregados para um computador, afim de que, a sua análise fosse realizada por softwares especializados.

Figura 4.17 - Posicionamento da câmera pelo operador sobre a plataforma.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

Em função da alta taxa de aquisição do filme, o campo de filmagem se tornou reduzido, proporcionando que os vídeos fossem realizados em apenas uma estreita faixa, na qual se pode observar apenas a passagem da bolha, por uma distância medida na escala da régua de aproximadamente 120 mm, e o contorno da tubulação para este mesmo comprimento.

4.6.2 O tratamento dos vídeos realizados

Os vídeos obtidos pela câmera de filmagem no modo de alta velocidade, foram tratados, utilizando-se o software VirtualDub, disponível gratuitamente na internet. Os vídeos foram convertidos em arquivos de imagens, usando recursos disponíveis no software, denominados de filtros de ajuste de imagens.

Para o processamento e para melhorar a qualidade das imagens, foram utilizados os seguintes filtros: *Deinterlace*, (desentrelaçador) cuja função é de separar todas as imagens do vídeo, gerando um arquivo de centenas de imagens; *Grayscale* (escala de cinza) que transforma a imagem para a escala de cinza, melhorando o contraste; *Levels* (Níveis) cuja função é de ajustar o brilho e o contraste; e *resize* (redimensionar) que permite o redimensionamento das imagens. A aplicação destes filtros aos vídeos tem por finalidade determinar o tamanho da bolha alongada.

4.6.3 A determinação da velocidade da bolha alongada

A análise é realizada utilizando-se outra vez o software comercial VirtualDub, com o qual tem-se a possibilidade de avançar ou voltar quadro a quadro o filme obtido. Este recurso é ideal para a obtenção da velocidade da bolha, conforme está ilustrado nas figuras 4.18a e 4.18b.

À medida que a frente da bolha avança da direita para a esquerda nas figuras, e ela coincide com a referência inicial (a primeira linha vertical amarela) definida na escala da régua milimetrada, o quadro referente a este ponto é anotado. Então por meio dos recursos do programa o filme é lentamente avançado, até que novamente a frente da bolha coincida com a outra referência (a segunda linha vertical amarela), que determina uma distância conhecida em milímetros na régua, e outra vez, o quadro referente a este ponto é também anotado. A bolha alongada ascende pelo tubo da seção de teste, e a equação 4.8, determina a sua velocidade média (U_{TBf}), através da técnica da filmagem de alta velocidade.

$$U_{TBf} = \frac{EL}{\Delta Q_1} f_2 \quad (4.8)$$

Onde (EL) é a distância definida neste trabalho igual a 100 milímetros, delimitada pelas duas linhas amarelas nas figuras 4.18a e 4.18b, igual para todas as condições de fluxo para as duas etapas do experimento, (ΔQ_1) é a diferença entre os quadros de filmagem da câmera, registrados pelo programa quando a bolha passa pela primeira e depois pela segunda linha amarela, e (f_2) é a frequência de aquisição em quadros da câmera (1000 quadros por segundo).

Figura 4.18a - A frente da bolha coincide com a primeira linha amarela, o percurso da distância definida se inicia.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

Figura 4.18b - A frente da bolha coincide com a segunda linha amarela, o percurso da distância definida termina.



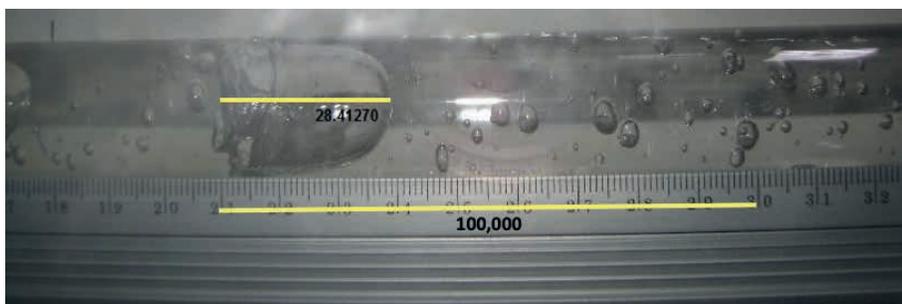
(Fonte: arquivo de imagens do autor).

4.6.4 A determinação do tamanho da bolha alongada

No procedimento para encontrar o tamanho médio das bolhas, após os recursos adotados no VirtualDub de transformar o filme gravado pela câmera em um arquivo de imagens, recorreu-se a um outro software comercial, denominado ImagePro Plus, com o qual em um conjunto dessas imagens em particular, é possível visualizar a evolução de uma bolha, e observar o seu comportamento durante todo o percurso que ela faz, na distância de referência (EL) estabelecida na régua milimetrada.

O tamanho da bolha é obtido então, capturando-se uma dessas imagens com o auxílio dos recursos do programa, e medindo desde a frente até a cauda da bolha em uma linha reta, como pode ser visto na figura 4.19. Antes, porém, é preciso fornecer uma medida linear, definida na escala da régua em milímetros, que foi igual para todas as condições de fluxo em todo o experimento, como dado de entrada ao programa, para que a conversão desta medida seja feita para pixels. A medida adotada foi de 100 milímetros, que é a mesma distância (EL) tomada, entre as referências (linhas amarelas) na figura 4.18a e 4.18b, para a determinação da velocidade da bolha. No final, o programa retorna a medida do tamanho da bolha em milímetros, como a figura 4.19 está demonstrando.

Figura 4.19 - Obtenção do tamanho da bolha com o recurso do programa ImagePro Plus.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

O critério para seleção do tamanho das bolhas alongadas para esta técnica, seguiu aquele que fora determinado para a sonda condutiva, ou seja, que o comprimento mínimo da bolha, deve ser igual ao diâmetro interno (D) da tubulação. Assim, ao se proceder a medição de uma bolha alongada, como descrito acima e ilustrado na figura 4.19, se o seu comprimento, quando determinado pelo programa, fosse menor que o diâmetro interno da tubulação, esta bolha era descartada.

4.6.5 A determinação do tamanho do pistão de líquido

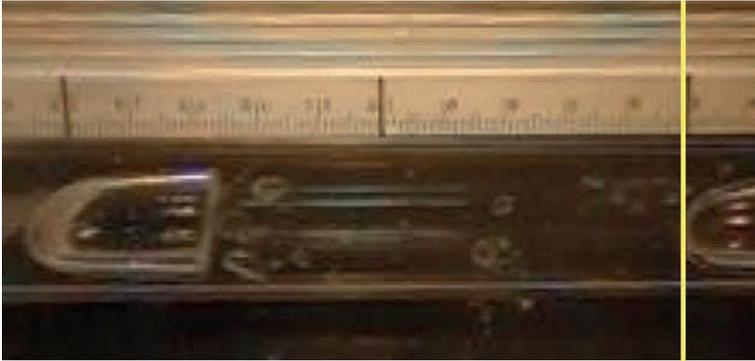
Em função do campo de filmagem não ser maior que 120 mm de comprimento, e de acordo com a condição de fluxo, em que se estava filmando o escoamento, o comprimento do pistão líquido era muitas das vezes maior que o campo de filmagem, tornou-se inviável, que o procedimento realizado para o tamanho da bolha alongada, fosse repetido para este parâmetro, como também pode ser observado na figura 4.19. Sendo assim, foi preciso adotar um método de obtenção para o tamanho do pistão de líquido, para o qual se utilizou outra vez o software VirtualDub.

Figura 4.20a - A cauda da bolha precedente coincide com a segunda linha amarela.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

Figura 4.20b - A frente da bolha seguidora coincide com a primeira linha amarela.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

O método definido neste trabalho, para a determinação do comprimento de pistão líquido (L_{sf}) pela técnica da filmagem de alta velocidade, é definido pela equação 4.9, como sendo, a distância (EL) definida na escala para a determinação da velocidade média da bolha alongada, subtraída do produto da velocidade média da bolha alongada precedente (U_{TBf}), dada pela equação 4.8, que se encontra a frente do pistão de líquido, pela diferença entre o número de quadros (ΔQ_2), que é determinada quando a cauda da bolha alongada precedente, coincide com a segunda linha amarela, como ilustrado pela figura 4.20a, e do número de quadros de quando a frente da bolha alongada seguidora, que venha imediatamente atrás dela, coincida com a primeira linha amarela, como ilustrado pela figura 4.20b.

$$L_{sf} = EL - U_{TBf} \Delta Q_2 \quad (4.9)$$

A equação 4.9 leva em consideração que a velocidade do pistão líquido, é igual a velocidade da bolha alongada que esteja imediatamente a sua frente, de forma semelhante, ao que se considerou, para a determinação do comprimento do pistão líquido pela sonda condutiva. De um modo geral, essa hipótese só poderá ser devidamente avaliada, por ocasião da análise dos resultados obtidos, em função dela estar associada a condição de escoamento inteiramente desenvolvido.

4.7 A ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como forma de assegurar, que os resultados obtidos pelas duas técnicas de medição demonstrem alguma confiabilidade, uma vez que, qualquer trabalho experimental possui erros associados oriundos do processo de medição, uma análise estatística é realizada aos resultados obtidos experimentalmente, para os parâmetros do escoamento que se quer avaliar na qual se procura investigar, o grau de confiabilidade na forma da incerteza de medição. Assim cada um dos valores obtidos para os parâmetros do escoamento, para ambas as técnicas, vem acompanhados das suas respectivas incertezas de medição, bem como, os valores médios obtidos para cada um deles. Os resultados serão devidamente analisados e discutidos no próximo capítulo.

4.7.1 O valor medido e o valor verdadeiro

Uma medição tem como objetivo obter o valor de uma grandeza a ser medida, mas, na maioria das vezes, o valor da grandeza medida é apenas estimado ou aproximado do real valor, de tal forma que, ela deve sempre vir acompanhada do valor da incerteza para ser completa. A definição para erro de uma medição, é dada pela diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. Uma medição seria perfeita, se este último fosse conhecido, ou se não houvesse condições imperfeitas, instrumentos imperfeitos e operadores imperfeitos. Os erros associados a medição de uma grandeza são aleatórios e sistemáticos.

O erro aleatório é observado em medições repetidas, as quais não são, e nem se esperam que sejam exatamente iguais, devido às numerosas fontes que influenciam no valor medido. O erro sistemático é aquele que ocorre quando em medições repetidas, os valores medidos apresentam o mesmo erro, usando as mesmas condições ambientes e técnicas experimentais.

4.7.2 A incerteza de medição

É definida como sendo uma faixa centrada em torno de um valor medido, que indica o grau de precisão e confiabilidade para a grandeza medida. Portanto, o resultado da medição de uma grandeza arbitrária w , resultado de uma série de observações, é dado pela equação 4.10. Como na maioria das vezes, o valor verdadeiro não pode ser obtido, não tem sentido referir-se a erro, mas sim, a uma faixa em torno do valor medido, onde se supõe que o valor verdadeiro esteja.

$$w = \bar{w} + u \quad (4.10)$$

Onde (\bar{w}) e (u) , são respectivamente, a média aritmética e a incerteza das medições da grandeza (w) .

Pelo fato de haver sempre uma dispersão dos valores, que ocorre devido a erros aleatórios, e que, portanto, foge do controle, constata-se que aproximadamente 68,27% dos resultados encontrados, estariam no intervalo $[\bar{w} \pm 1S(\bar{w})]$. O desvio-padrão experimental da média $[S(\bar{w})]$ vem a ser, a primeira estimativa de incerteza (u) do resultado de uma medição, com aproximadamente 68% de nível de confiança.

Ao se multiplicar o desvio-padrão experimental da média, por um certo valor k , o intervalo $[\bar{w} \pm kS(\bar{w})]$, vai conter uma certa percentagem dos resultados obtidos. Essa percentagem é chamada de nível de confiança, enquanto que, o intervalo a ela associada é chamado de intervalo de confiança. Estes intervalos de incerteza indicam a frequência na qual, o valor verdadeiro estará contido na faixa estimada.

A interpretação do intervalo de confiança pode ser feita da seguinte maneira, se um grande número desses intervalos fosse construído, a partir de diversas amostras aleatórias, então, em 95% desses intervalos, estaria incluído o verdadeiro valor da média populacional, ou seja, 5% dos intervalos de confiança estimados, baseados nas médias de cada amostra, não conteriam o verdadeiro parâmetro populacional.

Para grandes amostras, se pode admitir que, a variação dos valores derivados na amostra, seja semelhante a variação da população. Porém, para pequenas amostras, isso pode não ser verdadeiro, neste caso, a distribuição adequada é a distribuição t-student.

A distribuição t-student é muito parecida com a distribuição normal, sendo simétrica em torno da média zero, porém tem mais dispersão comparada com a normal. A forma de distribuição t-student depende do tamanho da amostra, quanto menor o tamanho da amostra, menor serão os graus de liberdade e mais dispersa (achatada) a curva.

A incerteza de medição (u) de acordo com a distribuição t de Student, que foi usada neste trabalho, é dada por:

$$u = \frac{t S(\bar{w})}{\sqrt{N}} \quad (4.11)$$

O valor de t para um intervalo de confiança de 95% para um número infinito de medições vale 1,96, $[S(\bar{w})]$ é o desvio padrão experimental da média e (N) é o número de bolhas alongadas, pareadas pelas duas técnicas de medição neste trabalho.

Neste trabalho foi atribuído em toda a análise estatística realizada, para os dados obtidos experimentalmente dos parâmetros do escoamento, para as duas técnicas de medição, o intervalo de confiança de 95% para a distribuição t-student. Como o número médio de bolhas pareadas pela sonda condutiva foi de 600 bolhas, e o número médio de bolhas captadas pela câmera de alta velocidade, nas imagens obtidas a partir dos filmes gravados foi de 150 bolhas, para cada condição de fluxo utilizada no experimento nas duas estações de medição, o valor de t , sempre se situou em 1,96, o que se alinha com o intervalo de confiança tomado para análise da incerteza.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados, obtidos pelas duas técnicas de medição para os parâmetros do escoamento pistonado. A discussão é feita sobre as diferenças entre os valores obtidos pelas duas técnicas, sobre o ponto de vista do procedimento experimental de cada método, bem como, sobre as características hidrodinâmicas inerentes ao escoamento pistonado. Comparações são feitas com modelos existentes na literatura para a fração de vazio e para a velocidade de translação da bolha, e as ponderações são feitas acerca da limitação das técnicas diante dos resultados que são avaliados e discutidos.

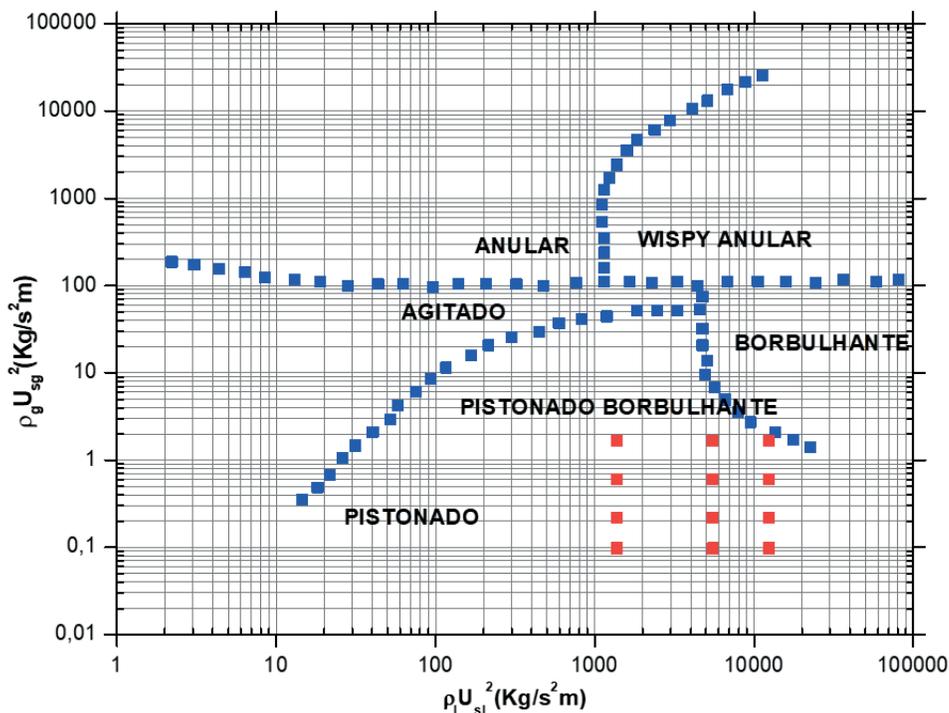
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL AOS MAPAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO

Inicialmente para se realizar medições no aparato experimental, é necessário avaliar qual a sua faixa de utilização, tendo como referência os mapas existentes na literatura que trata do assunto. Com base nesta condição, foram escolhidos dois mapas de padrão de escoamento em coordenadas dimensionais para se fazer essa avaliação; o mapa de Hewitt e Roberts (1969); cujas coordenadas foram obtidas de maneira empírica; e o mapa de Taitel et. al, (1980), no qual as coordenadas foram obtidas com alguma base teórica fundamentada.

Adotando a massa específica da água e a massa específica do ar da tabela 4.4, e as velocidades superficiais da água e do ar da tabela 4.3, conforme utilizadas no desenvolvimento experimental, as quais geraram ao todo doze combinações diferentes de condições de fluxo, a análise é então realizada, com a intenção de investigar se os pontos correspondentes a cada uma destas condições, vão estar dentro destes referidos mapas, na faixa do padrão de escoamento, no qual os parâmetros estão sendo medidos a fim de que o aparato seja validado.

Os valores para o fluxo do momento superficial do gás e do líquido, quando colocados no mapa de Hewitt e Roberts (1969), se ajustam conforme é mostrado na figura 5.1, pelos pontos em vermelho. Os pontos em azul são os que o mapa descreve, como sendo as fronteiras de cada padrão de escoamento. Como pode ser visto, a maioria dos pontos característicos de vazão para a água e para o ar utilizados no experimento, encontram-se dentro da região padrão pistonado borbulhante, para a qual se quer obter os parâmetros de escoamento.

Figura 5.1. Mapa de padrão de escoamento de Hewitt e Roberts (1969), com os valores dos pares de vazão utilizados no experimento em vermelho.

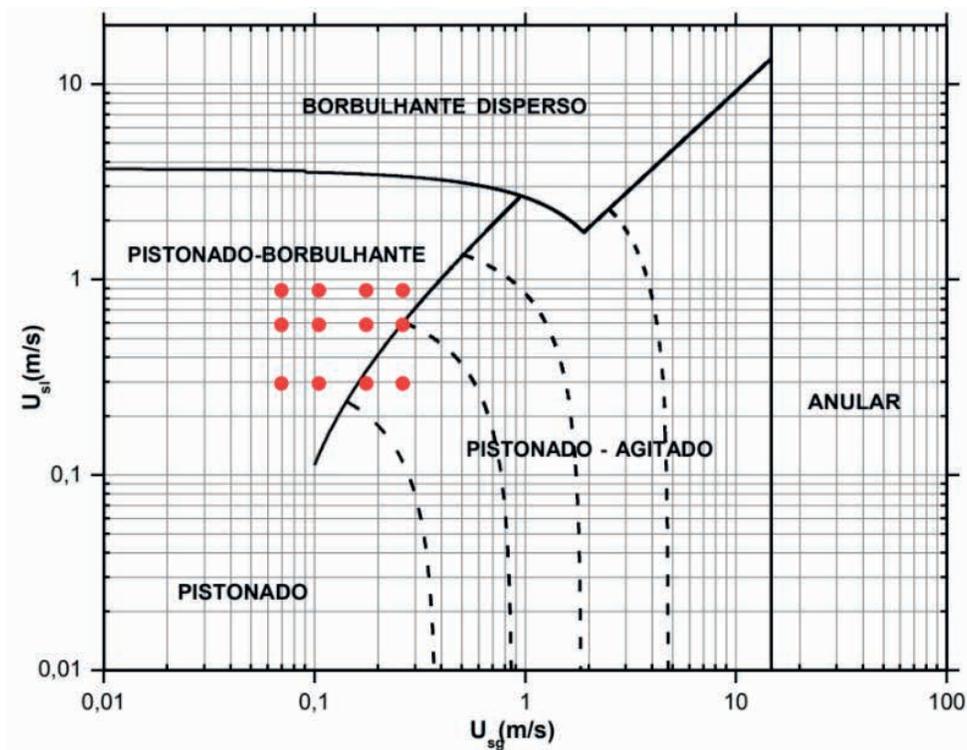


Fonte: Autoria própria

Na figura 5.2, pode ser visto como os pontos em vermelho, referentes a cada condição de fluxo de líquido e gás utilizadas no experimento, se ajustam ao mapa de Taitel *et. al.*, (1980). Da mesma forma que o mapa anterior, é notável a presença de quase todos os pares de vazão utilizados na região de escoamento pistonado borbulhante. Apenas para dois pares, que apesar de se encontrarem na região de pistonado agitado, porém, vale lembrar, que para esta região em particular, as linhas tracejadas revelam a condição prevista por Taitel *et. al.*, (1980), que estabelece o comprimento da tubulação necessário para que o padrão pistonado ocorra.

A correta adequação das condições de fluxo nas regiões definidas por estes mapas, indica que o aparato experimental está muito bem caracterizado, na faixa de padrão de escoamento na qual se está avaliando os valores dos parâmetros do escoamento. Dessa forma, o desenvolvimento experimental proposto está correto, visto que, as velocidades superficiais do gás e do líquido escolhidas atendem a este requisito.

Figura 5.2. Mapa de padrão de escoamento de Taitel *et al* (1980), com os valores dos pares de vazão utilizados no experimento em vermelho.



Fonte: Autoria própria

RESULTADOS PARA A FRAÇÃO DE VAZIO MÉDIA NA TUBULAÇÃO

Nos gráficos das figuras 5.3, 5.4 e 5.5, se pode observar os resultados obtidos para fração de vazio média na tubulação (α_{med}), medida pela técnica da sonda condutiva, em função da velocidade superficial do gás, para as velocidades superficiais do líquido de 0,293 m/s, 0,585 m/s e 0,878 m/s respectivamente. Os valores deste parâmetro bem como a faixa de erro, encontram-se nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, juntamente com os valores obtidos para a fração de vazio, obtidas pelas correlações desenvolvidas por Taitel *et al* (1980) dada pela equação 2.27, Mishima *et al* (1984) dada pela equação 2.29, e Barnea *et al* (1985) dada pela equação 2.31.

Há de se ressaltar que, com este parâmetro em particular, não foi possível a comparação dos valores com a técnica da filmagem rápida, em função deste procedimento, exigir uma abordagem bem mais precisa do ponto de vista de se determinar, todos os espaços nas imagens produzidas pelos vídeos, do que seriam de fato os vazios na massa de líquido ocupados pelo gás.

De um modo geral, se observa que a medida que se aumenta a velocidade superficial do gás, a fração de vazio média aumenta tanto na estação 1, como na estação 2, como se era esperado. Porém, se constata que este aumento, tende a tornar-se menor, com o aumento da velocidade superficial do líquido, quando se observa um gráfico após o outro, de tal maneira que em alguns pares de vazão os valores quase se sobrepõem, sendo quase praticamente os mesmos nas duas estações.

Figura. 5.3. Frações de vazio obtidas pela sonda condutiva para a estação 1 e para a estação 2, comparadas com os modelos da literatura ($U_{sl} = 0,293$ m/s).

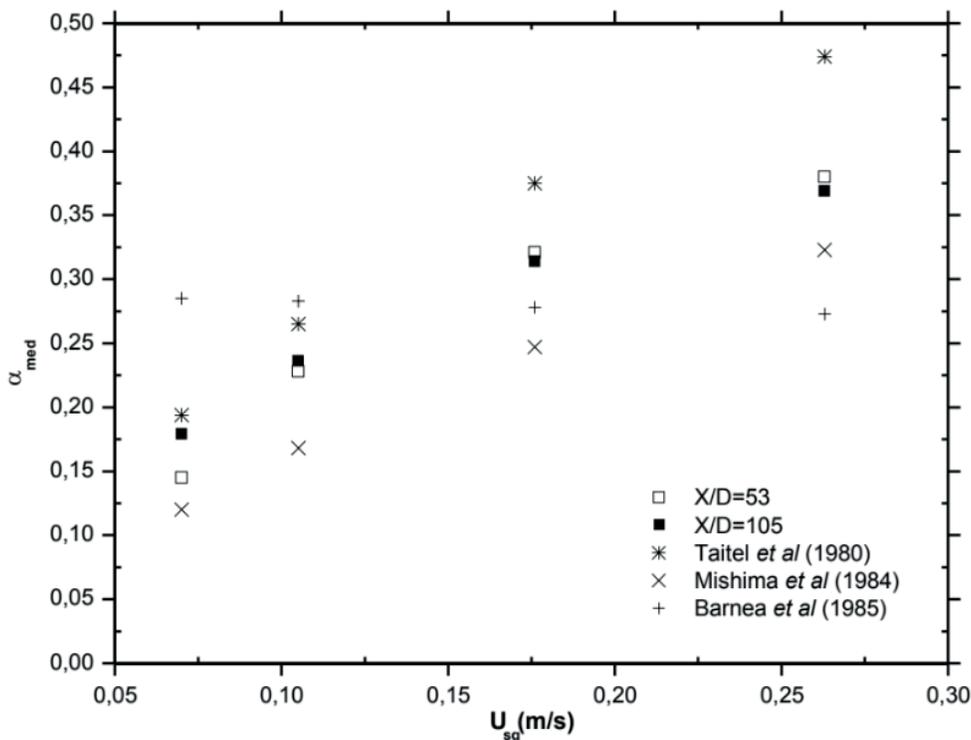
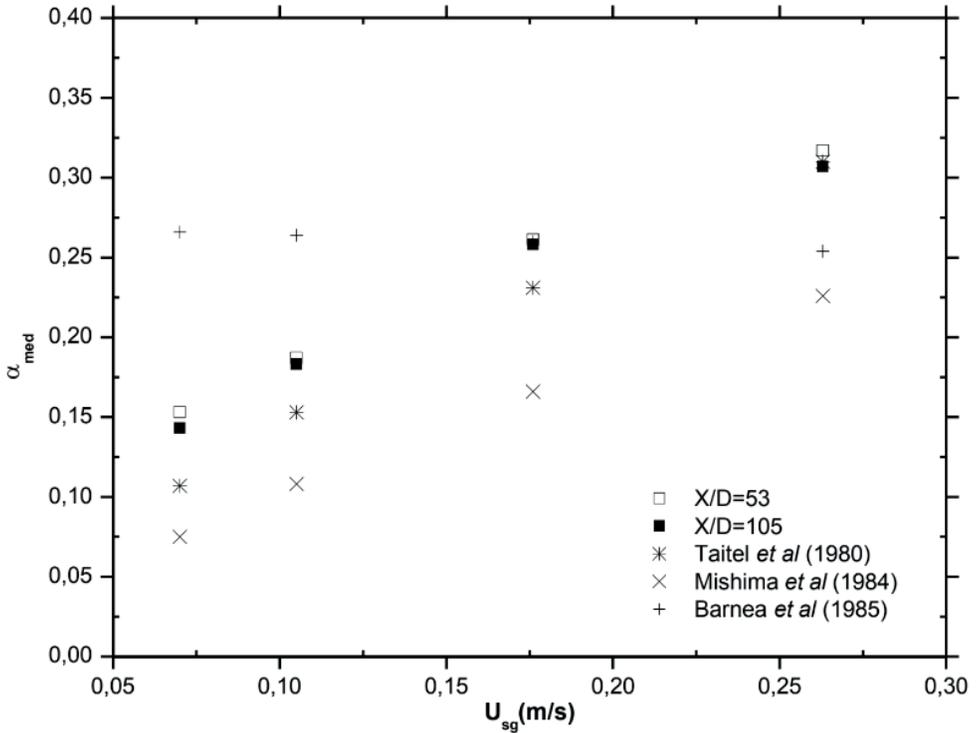


Tabela 5.1. Valores para as frações de vazio obtidas pela sonda condutiva e pelos modelos da literatura ($U_{sl} = 0,293$ m/s).

U_{sg} (m/s)	Estação 1	Estação 2	Modelos da literatura		
	Sonda condutiva	Sonda condutiva	Taitel	Mishima	Barnea
	α_{med}	α_{med}	α_s	α_{med}	α_s
0,07	0,145±0,003	0,179±0,001	0,194	0,120	0,285
0,105	0,228±0,005	0,236±0,003	0,265	0,168	0,283
0,156	0,321±0,003	0,314±0,007	0,375	0,247	0,278
0,263	0,380±0,006	0,339±0,006	0,474	0,323	0,273

Fonte: Autoria própria

Figura. 5.4. Frações de vazio obtidas pela sonda condutiva para a estação 1 e para a estação 2, comparadas com os modelos da literatura ($U_{sl} = 0,585 \text{ m/s}$).



Fonte: Autoria própria

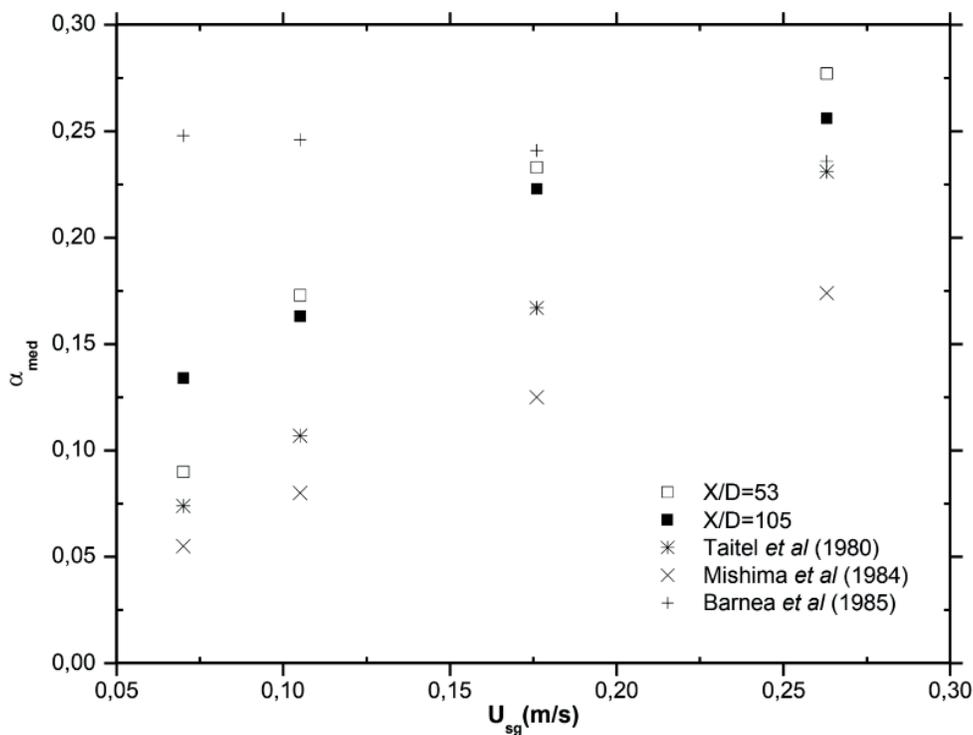
Tabela 5.2. Valores para as frações de vazio obtidas pela sonda condutiva e pelos modelos da literatura ($U_{sl} = 0,585 \text{ m/s}$).

$U_{sg} \text{ (m/s)}$	Estação 1	Estação 2	Modelos da literatura		
	Sonda condutiva	Sonda condutiva	Taitel	Mishima	Barnea
	α_{med}	α_{med}	α_s	α_{med}	α_s
0,07	$0,153 \pm 0,003$	$0,143 \pm 0,001$	0,107	0,075	0,266
0,105	$0,187 \pm 0,001$	$0,183 \pm 0,001$	0,153	0,108	0,264
0,156	$0,261 \pm 0,001$	$0,258 \pm 0,002$	0,231	0,166	0,260
0,263	$0,317 \pm 0,003$	$0,307 \pm 0,002$	0,310	0,226	0,254

Fonte: Autoria própria

Esta característica se deve ao fato que, os pistões de líquido, com o aumento da velocidade superficial do gás, tendem a absorver o gás mantendo-o em pequenas bolhas, as quais em função das condições de escoamento, misturam-se e coalescem, resultando em bolhas maiores, e assim, a fração de vazio média na tubulação tende sempre a aumentar. Mas com o aumento da velocidade superficial do líquido, a turbulência gerada inibe a aglomeração das pequenas bolhas, fazendo com que os níveis de coalescência diminuam, favorecendo a redução da fração de vazio média na tubulação, e mantendo-a em valores abaixo do crítico, fato este, já comprovado pela adequação das condições de fluxo ao padrão de escoamento pistonado borbulhante.

Figura. 5.5. Frações de vazio obtidas pela sonda condutiva para a estação 1 e para a estação 2, comparadas com os modelos da literatura ($U_{sl} = 0,878$ m/s).



Fonte: Autoria própria

Tabela 5.3. Valores para as frações de vazio obtidas pela sonda condutiva e pelos modelos da literatura ($U_{sl} = 0,878$ m/s).

	Estação 1	Estação 2	Modelos da literatura		
	Sonda condutiva	Sonda condutiva	Taitel	Mishima	Barnea
U_{sg} (m/s)	α_{med}	α_{med}	α_s	α_{med}	α_s
0,07	0,09±0,006	0,134±0,001	0,074	0,055	0,248
0,105	0,173±0,001	0,163±0,002	0,107	0,080	0,246
0,156	0,233±0,002	0,223±0,001	0,167	0,125	0,241
0,263	0,277±0,002	0,256±0,002	0,231	0,174	0,236

Fonte: Autoria própria

Como pode ser visto nos gráficos das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 também, a previsão para a fração de vazio média na tubulação, dada por Mishima *et al* (1984), através da equação 2.29, é sempre menor, que os valores da fração de vazio medidos pela sonda para as condições de fluxo estabelecidas, mesmo quando esta tende a diminuir, assim sendo, comprova-se que o escoamento pistonado, esta bem caracterizado e a sonda condutiva foi capaz de perceber tal condição, uma vez que, este padrão se mantém até que o valor da fração de vazio média na tubulação, se iguale a fração de vazio das bolhas de Taylor, condição crítica, conforme prevê Mishima *et al* (1984), quando se dá início a transição do padrão pistonado para padrão agitado.

A previsão da fração de vazio de Barnea *et al* (1985), aponta para um tendência de queda, como pode ser visto nos gráficos da figura 5.3, 5.4 e 5.5, porém, pouco acentuada para as condições de fluxo relacionadas, de tal maneira que pode ser considerada praticamente constante. Deve ser levado em consideração, que esta é a fração de vazio do pistão líquido, muito embora, com o aumento da velocidade superficial do gás, este valor devesse indicar algum aumento em função do aumento da aeração dos pistões. Todavia, essa constância da fração de vazio, obtida pela correlação de Barnea *et al* (1985) dada pela equação 2.31, pode ser em função da combinação dos valores das velocidades superficiais do gás e do líquido, ainda não estarem na condição crítica, que passa a indicar o aumento do valor para este parâmetro, como indício da mudança do padrão de escoamento pistonado para o padrão de escoamento agitado.

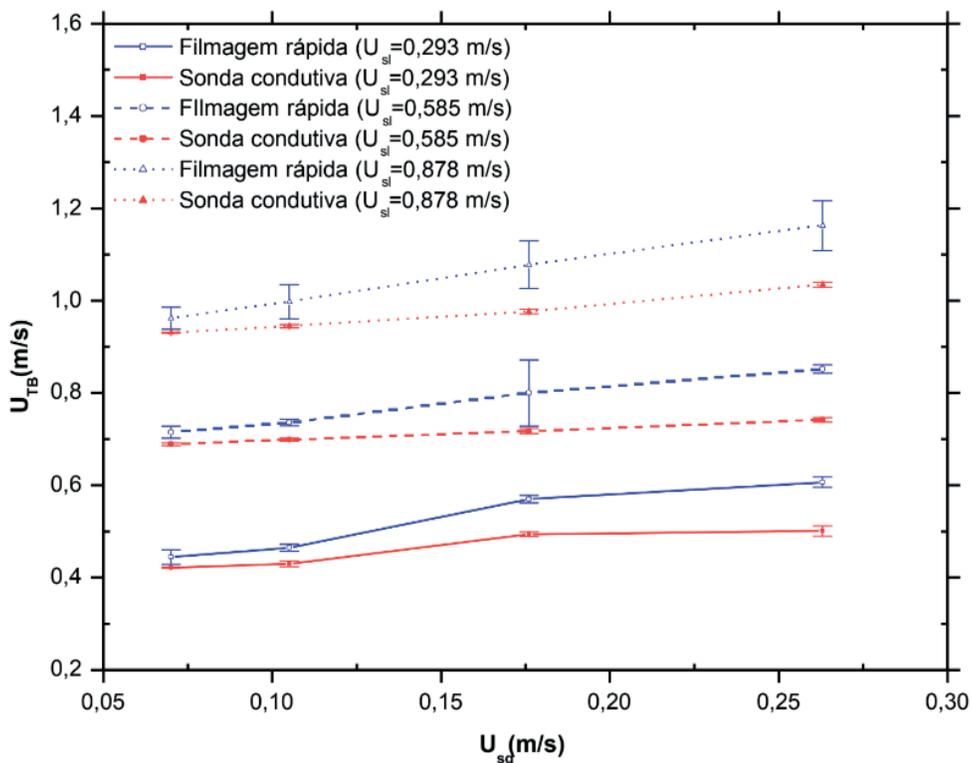
Já a fração de vazio definida por Taitel *et al* (1980), apesar também de ser para o pistão de líquido, contudo, tem uma tendência de crescimento, como pode ser visto nos gráficos das figuras 5.3, 5.4 e 5.5, que acompanha os valores obtidos pela sonda condutiva, chegando mesmo em alguns pares de vazão de líquido e gás, ter valores quase iguais a estes, e em alguns pontos, até mesmo ser maior. Tal condição conforme aponta a equação 2.27, se deve ao fato desta fração de vazio, ser função apenas das velocidades superficiais do líquido e do gás, e a mesma ser adotada para pistões líquidos pouco aerados, ou seja, com fração de vazio baixa. Por causa disto, pode ser que os valores de fração de vazio dados pela correlação de Taitel *et al* (1980), são os que mais se aproximaram dos valores da fração de vazio média da tubulação, obtidos pela sonda condutiva para velocidades superficiais do líquido menores.

5.3 RESULTADOS PARA A VELOCIDADE DAS BOLHAS ALONGADAS

Nos gráficos das figuras 5.6, 5.7, estão plotados os resultados obtidos para a velocidade de translação da bolha alongada versus a velocidade superficial do gás, para as três velocidades superficiais do líquido, pelas duas técnicas de medição utilizadas, nas estações 1 e 2 do aparato experimental, respectivamente. Cada ponto dos gráficos estabelece um par, o qual representa as condições de fluxo definidas no desenvolvimento experimental para análise de todos os parâmetros do escoamento.

Como pode ser observado, a medida que se aumenta a velocidade superficial do gás, se tem a tendência das medidas registradas pela filmagem rápida e pela sonda condutiva, para a velocidade de translação da bolha alongada afastarem-se, de tal modo que é perceptível, que para o primeiro par de vazões, em ambas estações, por exemplo, as barras de erros quase se tocam, mas, para os pares seguintes elas tendem a se distanciar. Porém, esta tendência demonstra uma diferença menos acentuada, para as velocidades superficiais do líquido de 0,585 m/s e 0,878 m/s.

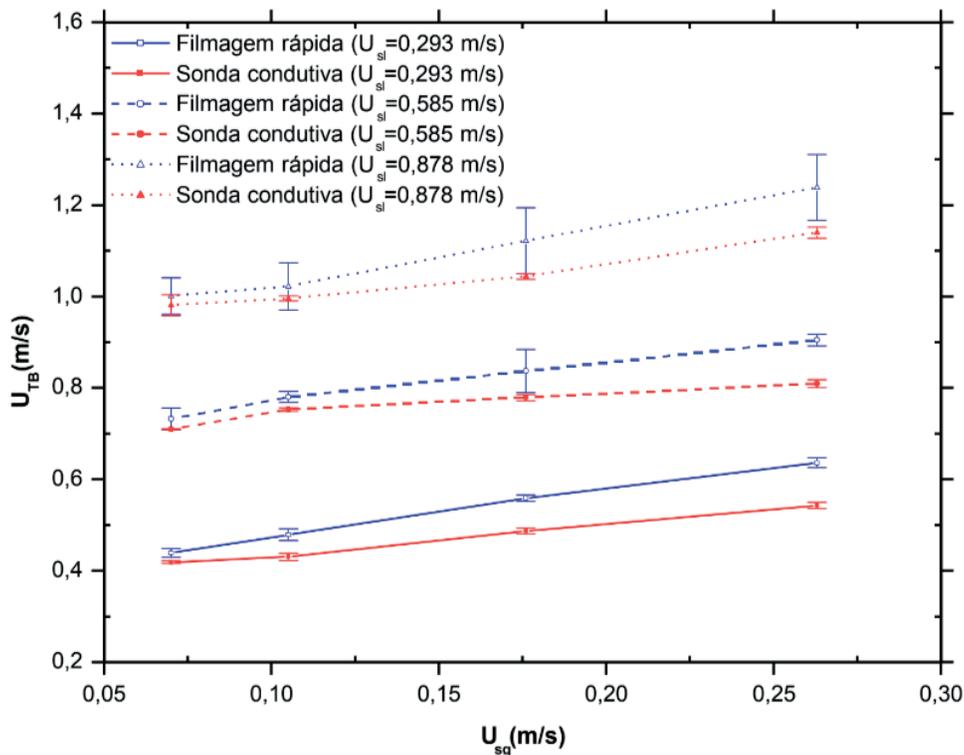
Figura 5.6. Comparação das técnicas de medição para as velocidades da bolha alongada na estação 1.



Fonte: Autoria própria

Ainda sob o ponto de vista da velocidade superficial do líquido, constata-se que esse afastamento, mesmo que persista, porém, demonstra uma relativa tendência em diminuir, a medida que esta velocidade aumenta, sendo esta redução um pouco mais acentuada na estação superior.

Figura 5.7. Comparação das técnicas de medição para as velocidades da bolha alongada na estação 2



Fonte: Autoria própria

Do ponto de vista da caracterização da sonda, essa diferença indicaria indiretamente a intrusividade do instrumento, revelando então, que a velocidade superficial do gás contribuiu para o aumento da influência das características da sonda na medida, ocasionando o afastamento dos valores obtidos pelas duas técnicas para a velocidade da bolha, ao passo que, com o aumento da velocidade superficial do líquido, esta influência provocada pela característica da sonda é menor na obtenção da medida da velocidade da bolha, visto que, o escoamento se torna mais estável, então, a bolha não teria um comportamento tão agitado, com uma intensa variação do contorno do seu nariz, que interfere na captação do sinal pela sonda, quando a frente da bolha toca os sensores, e assim a indicação da medida tende a se tornar melhor.

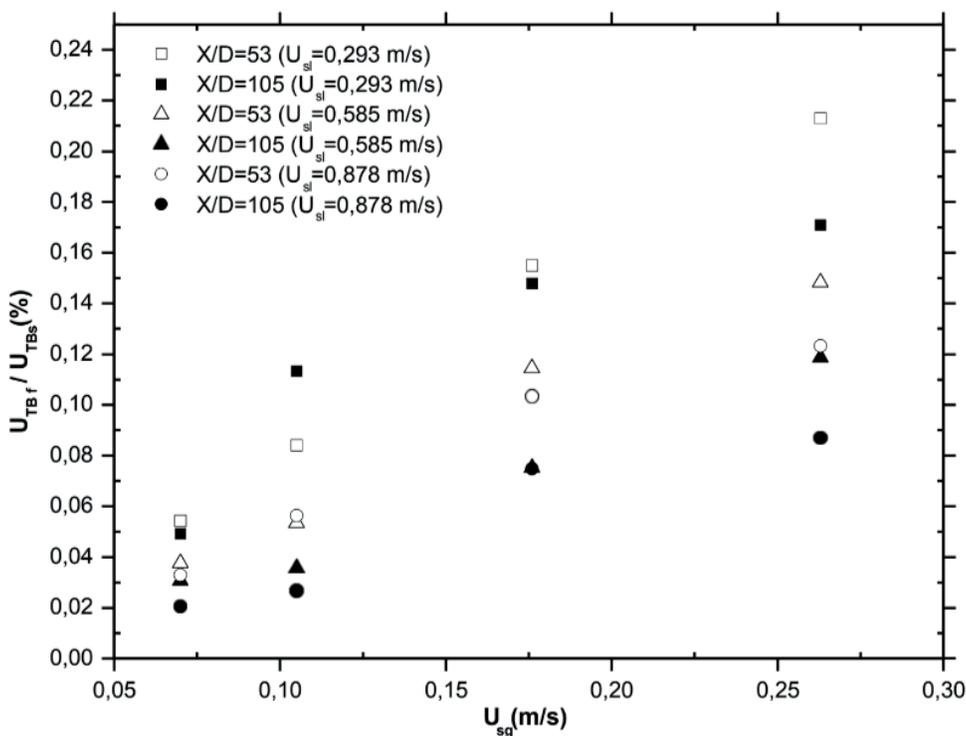
Observando-se os gráficos das figuras 5.6 e 5.7, ainda, percebe-se que os valores obtidos para a velocidade na estação 1, são menores que os valores medidos para a estação

2, ainda que esta diferença muita das vezes seja mínima, indicando que a distância entre as estações de medição pouco está influenciando a velocidade de ascensão da bolha alongada, para as condições de fluxo do experimento, e até a localização da estação superior. Mayor *et al* (2008), também comprovou esta mesma tendência, para tubos de diâmetros maiores e em pontos de medição de distâncias maiores a partir da injeção do gás.

Assim, diferença entre os valores medidos pelas duas técnicas, aumenta com a velocidade superficial do gás, mas, diminui a medida que a velocidade superficial do líquido aumenta, sendo que na estação 1, as diferenças são maiores que na estação 2, e a redução das diferenças na estação 2 é maior que na estação 1.

A figura 5.8 ilustra melhor, as diferenças percentuais para a velocidade da bolha alongada nas duas estações, através da razão entre as medições fornecidas, pela filmagem de alta velocidade e da sonda condutiva (U_{TBf}/U_{TBS}) versus a velocidade superficial do gás, onde se constata que tal tendência de queda, parece ser mesmo maior na estação superior e como ela decresce com o aumento da velocidade superficial do líquido.

Figura 5.8. Razão percentual entre as velocidades de ascensão da bolha alongada, obtidas pelas duas técnicas de medição para as duas estações do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria

Na mesma figura, se observa que em alguns pares de vazão, a diferença entre a medida da velocidade obtida pela técnica da sonda condutiva, não chega a 6%, do que a obtida pela técnica da filmagem de alta velocidade, e que para a grande maioria dos pares utilizados no experimento, a diferença é menor que 15% em ambas as estações.

Os valores obtidos pelas duas técnicas de medição, para a velocidade de ascensão da bolha alongada, podem ser vistos nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, com os respectivos erros, para as condições de fluxo de padrão pistonado nas duas estações de medição, como também, as diferenças absolutas e percentuais entre as medidas.

Tabela 5.4. Velocidades da bolha de Taylor obtidas pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,293$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,422±0,002	0,445±0,016	0,023	5,45
0,105	0,430±0,006	0,465±0,007	0,035	8,14
0,176	0,494±0,005	0,570±0,008	0,076	15,38
0,263	0,501±0,011	0,607±0,011	0,106	21,16
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença Abs.	Diferença Perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,419±0,003	0,439±0,003	0,020	4,77
0,105	0,431±0,008	0,479±0,008	0,048	11,14
0,176	0,487±0,006	0,559±0,006	0,072	14,78
0,263	0,543±0,007	0,636±0,007	0,093	17,13

Fonte: Autoria própria

Os erros obtidos nas medidas de velocidade em ambas as técnicas, demonstram em geral alguma equivalência, sendo que, a técnica de filmagem de alta velocidade, foi a que apresentou, as maiores oscilações no valor dos erros da estação 1 para a estação 2. Contudo, apenas para a velocidade superficial do líquido de 0,878 m/s, tanto na estação superior, quanto na estação inferior, os erros desta técnica, foram bem maiores que os obtidos pela técnica da sonda condutiva.

Tabela 5.5. Velocidades da bolha de Taylor obtidas pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,585$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença Abs.	Diferença Perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,689±0,003	0,715±0,013	0,026	3,77
0,105	0,699±0,003	0,736±0,007	0,037	5,29
0,176	0,718±0,005	0,800±0,072	0,082	11,42
0,263	0,742±0,005	0,852±0,009	0,110	14,82
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença Abs.	Diferença Perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,710±0,001	0,732±0,024	0,022	3,09
0,105	0,753±0,004	0,780±0,012	0,027	3,58
0,176	0,779±0,007	0,837±0,047	0,058	7,45
0,263	0,809±0,009	0,905±0,013	0,096	11,87

Fonte: Autoria própria

Tabela 5.6. Velocidades da bolha de Taylor obtidas pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,878$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença Abs.	Diferença Perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,931±0,001	0,962±0,024	0,031	3,33
0,105	0,945±0,004	0,998±0,037	0,053	5,61
0,176	0,977±0,005	1,078±0,052	0,101	10,34
0,263	1,035±0,005	1,163±0,054	0,128	12,37
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença Abs.	Diferença Perc.
U_{sg} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (m/s)	U_{TB} (%)
0,07	0,981±0,023	1,001±0,040	0,020	2,04
0,105	0,994±0,005	1,022±0,052	0,028	2,82
0,176	1,044±0,006	1,122±0,072	0,078	7,47
0,263	1,140±0,012	1,239±0,072	0,099	8,68

Fonte: Autoria própria

Estes valores maiores para os erros para a técnica de filmagem, podem estar relacionados ao fato que, quando se aumenta a velocidade superficial do líquido, se tem maior dificuldade em determinar o contorno da frente da bolha alongada por esta técnica, e no caso, com o aumento também da velocidade superficial do gás, a instabilidade do contorno da bolha, torna esta tarefa ainda mais difícil.

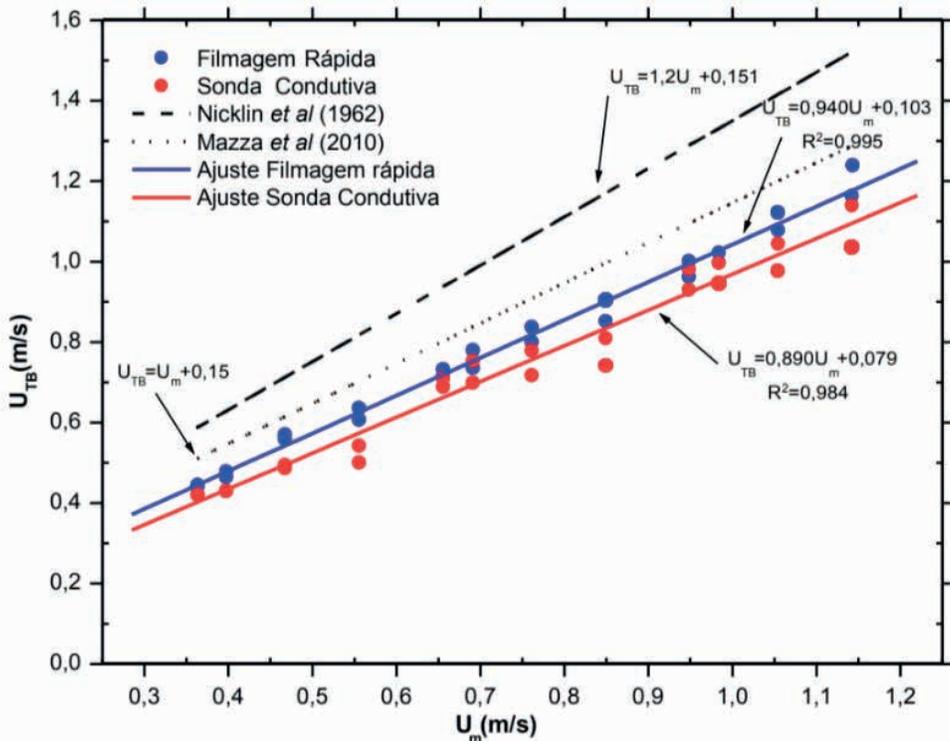
5.3.1 Os valores experimentais de C_1 e da velocidade de desvio U_d

No gráfico da figura 5.9, estão plotados os valores obtidos experimentalmente, para a velocidade de ascensão da bolha alongada pelas duas técnicas de medição versus a velocidade da mistura, para as duas estações de medição e para todas as condições de fluxo utilizadas no experimento, como forma de compará-los, aos valores fornecidos por correlações empíricas para este mesmo parâmetro, no tocante principalmente, aos valores obtidos para os termos (C_1) , e (U_d) da equação 2.36, os quais são muito representativos para a caracterização do escoamento.

Os valores experimentais estão plotados, com seus respectivos ajustes lineares, realizados através do método dos mínimos quadrados, juntamente com as correlações de Nicklin *et al* (1962) dada pela equação 2.36 e de Mazza *et al* (2010), que apresenta correções para o valores de (C_1) e de (C_2) desta equação. O valor de (C_2) é dado pela equação 2.39, de acordo com o número de Reynolds (Re_m) e o número de Froude (Fr_m), ambos obtidos em função da velocidade de mistura (U_m).

Para a correlação de Nicklin *et. al*, (1962) foi assumido que $(C_1 = 1,2)$ que denota o regime como turbulento, e $(C_2 = 0,35)$, que considera apenas os efeitos inerciais do escoamento, o qual nada mais é do que o número de Froude, obtido sobre a velocidade de desvio (U_d). O valor de $(U_d = 0,151 \text{ m/s})$ dado pela equação 2.37, se encontra acima dos valores obtidos para esta velocidade experimentalmente; igual a $0,103 \text{ m/s}$ para a filmagem de alta velocidade e igual a $0,079 \text{ m/s}$ para a sonda condutiva. O valor de (C_1) experimental, tanto para a sonda condutiva igual a $0,890$, quanto para a filmagem de alta velocidade igual a $0,940$, também são menores do que o valor de (C_1) assumido. Os valores de (U_d) e (C_1) experimentais são obtidos, através do ajuste linear dos pontos que representam as medidas da velocidade da bolha alongada por cada técnica.

Figura 5.9. Comparação das velocidades experimentais de ascensão da bolha alongada, obtidas pelas duas técnicas de medição, com as obtidas pelas correlações empíricas da literatura.



Na tabela 5.7, encontra-se os valores para o número de Reynolds, dados pela equação 2.32, bem como, os valores do numero de Froude, dados pela equação 2.40, ambos baseados na velocidade de mistura (U_m), para todas as condições de fluxo do experimento.

O termo (C_1) representa a razão das velocidades máxima e média do perfil de velocidade, e este valor cresce de 1,2, quando o regime é turbulento até 2,0, quando o regime é laminar. Portanto, se o valor é menor que 1,2 atribuído ao regime turbulento, significa que, os valores obtidos experimentalmente para (C_1) pelas duas técnicas, apesar de serem menores, contudo, esta condição só confirmaria o fato do regime ser turbulento, que se traduziria na velocidade média do perfil, ser maior que a sua velocidade máxima, e assim, a razão entre as duas ser menor que 1,0. O nível de turbulência no pistão líquido, pode estar gerando valores de velocidades instantâneas, consideravelmente diferentes dos médios. Desta forma, talvez seja esta a explicação, para os valores de (C_1) experimentais, serem menores que o da correlação de Nicklin.

Mayor *et al* (2008) chegaram a uma conclusão similar, acerca desta condição, que estabelece a relação entre as velocidades no pistão de líquido em escoamento pistonado, com injeção controlada de bolhas.

Tabela 5.7. Valores dos N° de Reynolds e dos N° de Froude do experimento.

$U_{sl} = 0,293 \text{ m/s}$		
$U_{sg} \text{ (m/s)}$	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr
0,07	7726	0,841
0,105	8474	0,922
0,176	9969	1,085
0,263	11838	1,288
$U_{sl} = 0,585 \text{ m/s}$		
$U_{sg} \text{ (m/s)}$	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr
0,07	13957	1,519
0,105	14705	1,600
0,176	16200	1,763
0,263	18069	1,966
$U_{sl} = 0,878 \text{ m/s}$		
$U_{sg} \text{ (m/s)}$	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr
0,07	20188	2,197
0,105	20935	2,278
0,176	22431	2,441
0,263	24300	2,644

Fonte: Autoria própria

Com relação a velocidade de desvio (U_d), e em particular ao termo (C_2), adotado com o valor de 0,35 na correlação de Nicklin, apenas quando os efeitos inerciais são levados em consideração, talvez necessite de uma análise mais criteriosa, pelo fato do aumento da tensão superficial, para tubulações de menor diâmetro, ser substancial para a redução da velocidade de desvio, como aponta Zukosky (1966).

Para a correlação de Mazza *et al* (2010), se verifica que os ajustes definidos para os dados experimentais, melhor se aproximam da reta que a representa. Os valores obtidos experimentalmente para (C_1), para as duas técnicas são 0,940, filmagem de alta velocidade e 0,890, sonda condutiva, que desta vez, estão mais próximos para o obtido, por esta correlação que é igual a 1,0. Este valor é obtido devido o numero de Froude ser menor que 3,5 e o número de Reynolds ser maior do que 2000, que são parâmetros inter-relacionados para esta correlação, como descrito no capítulo 2, e que se comprova pelos valores da tabela 5.7 para todas as condições de fluxo. Entretanto, os valores obtidos experimentalmente para a velocidade de desvio (U_d) pelas as duas técnicas de 0,079 e 0,103 para sonda condutiva e filmagem rápida, respectivamente, ainda estão distantes, daquele obtido por esta correlação, que é igual a 0,15 m/s.

A melhor adequação da correlação de Mazza *et al* (2010), ao valor experimental de (C_1), pode se dever ao fato que, para todas as condições de fluxo do experimento,

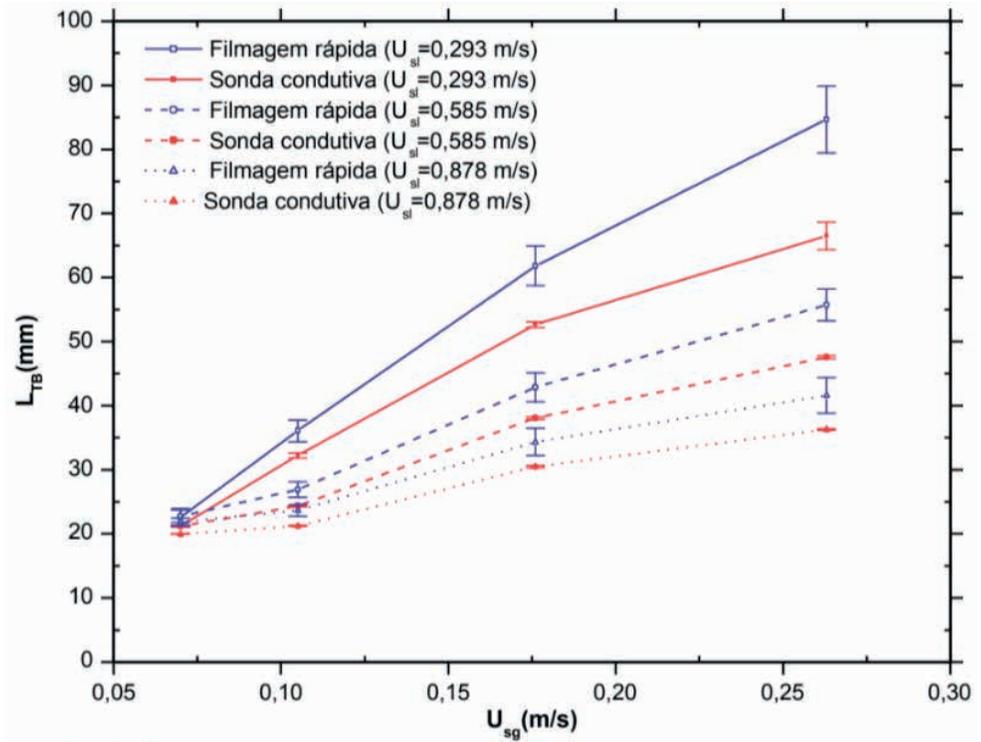
os efeitos interfaciais, em função da alta velocidade superficial do líquido, comparada a velocidade superficial do gás, influenciam o valor deste termo da correlação, fazendo com que o mesmo, seja menor do que aquele dado pela correlação de Nicklin *et al* (1962), que não leva em consideração tal efeito. Ao se observar os valores para o número de Froude, na tabela 5.7, para todas as condições de fluxo, verifica-se que são muito maiores, que o valor atribuído na correlação de Nicklin, que o considera igual a 0,35 e é calculado sobre a velocidade de desvio. Uma vez que, para a correlação de Mazza *et al* (2010), o número de Froude é calculado sobre a velocidade da mistura (U_m), sugere que, a sua influência deve ser levada em consideração, visto que, para valores acima de 1,0 para este número, o regime é tido como supercrítico.

5.4 RESULTADOS PARA O COMPRIMENTO DAS BOLHAS ALONGADAS

Os gráficos das figuras 5.10 e 5.11 apresentam o comportamento do comprimento da bolha, para as condições de fluxo realizadas no experimento, captadas pela sonda condutiva e pela filmagem de alta velocidade, nas duas estações de medição do aparato experimental para as três velocidades superficiais do líquido.

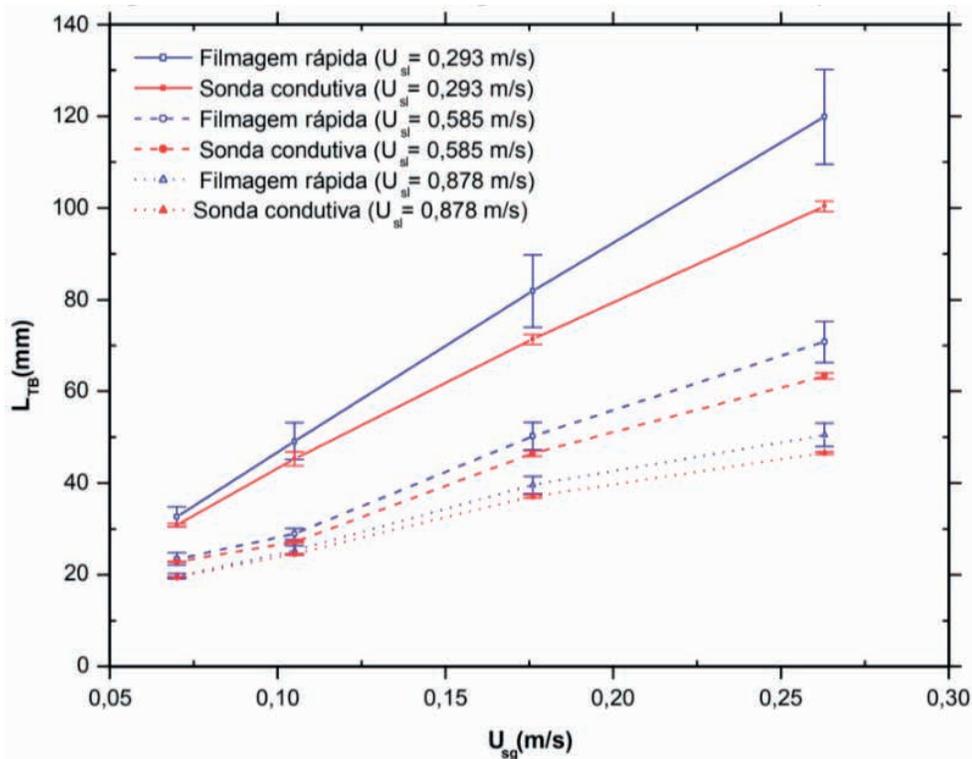
Neles se observa, que as barras de erros para quase todos os pares, estão muito próximas, a exceção é para os últimos pares para as três velocidades superficiais do líquido nas duas estações, mostrando uma boa indicação da medida do parâmetro de escoamento, pelo instrumento que se quer avaliar. Embora, nos gráficos seja evidente também, assim como aconteceu com a velocidade de translação da bolha alongada, o afastamento das medidas fornecidas pelas duas técnicas, a medida que se aumenta a velocidade superficial do gás. Mas, do mesmo jeito também, como ocorreu com a velocidade da bolha alongada, quando se compara através da velocidade superficial do líquido, percebe-se que a diferença das duas técnicas é menor, quando esta velocidade aumenta, e esta diferença parece menos acentuada na estação superior do que na estação inferior.

Figura 5.10. Comparação das técnicas de medição para os tamanhos da bolha alongada na estação 1.



Fonte: Autoria própria

Figura 5.11. Comparação das técnicas de medição para os tamanhos da bolha alongada na estação 2.



Fonte: Autoria própria

Este comportamento obtido, pelas duas técnicas de medição para o tamanho da bolha, apesar de ter as mesmas características daqueles verificados para a velocidade, porém, as medidas obtidas de par a par das condições de fluxo do experimento, apresentam um crescimento bem mais íngreme, do que aquele observado para a velocidade, quando se examina as figuras 5.10 e 5.11, de tal forma que, a diferença entre a medida obtida em um par de condição de fluxo, para o outro par logo em seguida, para o tamanho da bolha alongada, é bem maior, que a mesma condição obtida para a velocidade, e este aspecto aparenta ser maior para a estação 2 do que para a estação 1. E ainda é perceptível que, a medida que se aumenta a velocidade superficial do líquido, o comprimento da bolha decresce, de tal maneira que, as diferenças entre medidas tendem a ser menores, porém, desta vez, ao contrário do que ocorreu para a velocidade, a estação 2 é a que apresenta diferenças menores do que a estação 1.

Esta condição do tamanho da bolha ser fortemente dependente das condições de fluxo, está bem de acordo com o que concluiu Van Hout *et al* (2003), com experimentos realizados em escoamento pistonado contínuo em tubulações de diâmetros maiores.

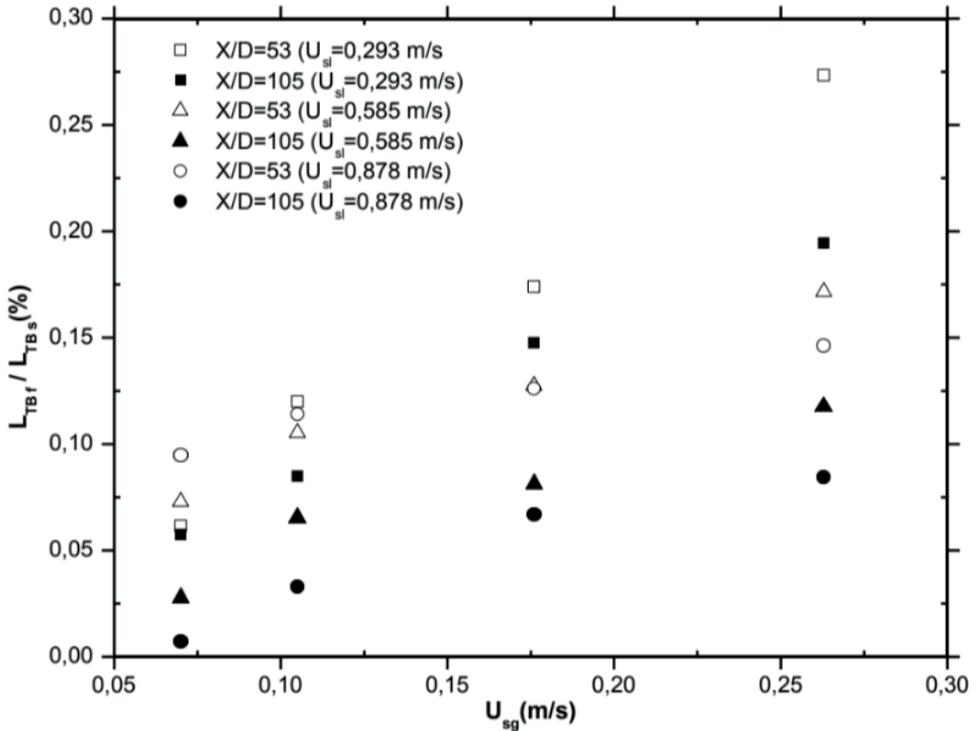
A diferença do tamanho da bolha entre a estação 1 e a estação 2, demonstra uma característica do escoamento pistonado contínuo em desenvolvimento, no qual a interação bolha a bolha, produz a mistura de bolhas de tamanhos diversos, estabelecendo um estado de coalescimento, até que, se atinja uma condição de equilíbrio, refletida pelo perfil de velocidade atrás de cada bolha, que se torna constante, como previsto por Shemer (2003).

Com isso, mais uma vez o comportamento da sonda na detecção desta medida, pode ser considerado bom, porque, ela conseguiu revelar a coalescência inerente ao escoamento pistonado, entre as duas estações de medição na forma do aumento do tamanho das bolhas, e o resultado obtido está muito bem aferido pelas medidas obtidas pela filmagem de alta velocidade.

No gráfico exibido na figura 5.12, se consegue avaliar melhor o tamanho percentual, destas diferenças de medidas entre as técnicas empregadas nas duas estações de medição, onde (L_{TBf}/L_{TBS}) , representa a razão entre o comprimento medido pela filmagem e pela sonda, em relação a velocidade superficial do gás. Assim como para a velocidade, se observa também, um decréscimo nas diferenças das medições apresentadas pelas duas técnicas, a medida que se aumenta a velocidade superficial do líquido, e um acréscimo nas diferenças quando se aumenta a velocidade superficial do gás, sendo que este aumento é tanto menor, quanto maior é a velocidade do líquido.

A proximidade das medições chama a atenção, visto que, para o par 0,878 m/s e 0,07 m/s de velocidades superficiais do líquido e do gás, respectivamente, a diferença da medição dada pela sonda, chega a ser menor que 1%, do que a obtida pela filmagem de alta velocidade, e para quase todas as condições de fluxo, a diferença entre as técnicas não passa de 15% para este parâmetro nas duas estações de medição.

Figura 5.12. Razão percentual entre os comprimentos da bolha alongada, obtidos pelas duas técnicas de medição para as duas estações do aparato experimental.



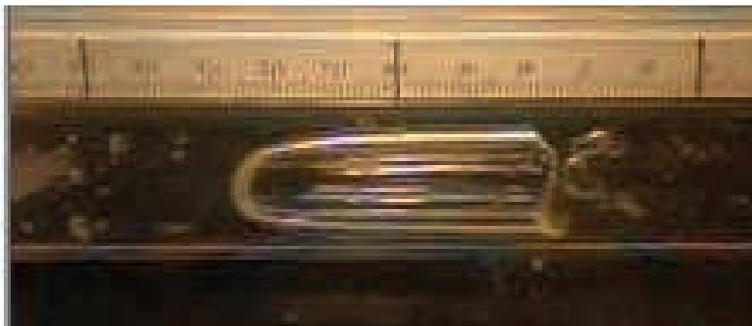
Fonte: Autoria própria

A discussão que se pode fazer acerca da influência da sonda, sobre os resultados obtidos, para as diversas condições de fluxo para o comprimento da bolha, deve estar relacionada a entrada e a saída do sensor da bolha alongada, uma vez que, foi considerado para a obtenção do tamanho da bolha, como também do tamanho do pistão de líquido, que apenas, a indicação de entrada e saída da bolha pelo primeiro sensor (sensor da frente da sonda), seria levada em consideração. Assim sendo, mais uma vez a velocidade superficial do gás ao introduzir uma maior instabilidade da bolha em relação a massa de líquido, produz a deformação dos seus contornos, propiciando principalmente a interferência na medida do tamanho, devido a esta condição, exatamente nos contornos em que o sensor entra e sai, a frente e a traseira da bolha respectivamente. Por causa disto, a indicação da medida do tamanho da bolha pela sonda, sofra uma diminuição, justificando a diferença para a medida determinada pela filmagem de alta velocidade.

Da mesma forma como para a velocidade da bolha, o aumento da velocidade superficial do líquido, inibe as flutuações do formato da bolha, permitindo que os contornos, tenham menos variação, como a frente e especialmente a traseira da bolha, resultando com que as medidas das duas técnicas se aproximem.

O formato da traseira da bolha de Taylor exibe notável oscilação, resultado da variação que ela sofre quando a mesma se desloca, e esta oscilação é fortemente dependente do tamanho da bolha, como concluiu Polonsky *et al* (1999). Então, talvez seja esta a razão, pela qual exatamente para tamanhos de bolhas maiores as diferenças entre as medidas das duas técnicas sejam maiores.

Figura 5.13a. Oscilação da cauda da bolha: Posição 1.



Fonte: arquivo de imagens do autor.

Figura 5.13b. Oscilação da cauda da bolha: Posição 2.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

As figuras 5.13a e 5.13b, ilustram o comportamento da oscilação da cauda de uma mesma bolha, entre duas posições em sequência para a mesma estação de medição.

Nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10, os valores obtidos pelas duas técnicas de medição para o tamanho da bolha podem ser vistos, com os respectivos erros, para as condições de fluxo de padrão pistonado nas duas estações de medição. Nas mesmas tabelas estão as diferenças absolutas e a diferença percentual dos valores obtidos.

Tabela 5.8. Tamanhos da bolha de Taylor obtidos pelas duas técnicas de medição. ($U_{si} = 0,293$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	21,249±0,105	22,555±1,428	1,306	6,15
0,105	32,227±0,401	36,089±1,729	3,862	11,98
0,176	52,646±0,433	61,809±3,094	9,163	17,40
0,263	66,493±2,134	84,663±5,184	18,170	27,33
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	30,887±0,316	32,661±2,182	1,774	5,74
0,105	45,288±1,543	49,135±4,031	3,847	8,49
0,176	71,353±1,094	81,780±7,873	10,427	14,61
0,263	100,373±1,142	119,891±10,331	19,518	19,45

Fonte: Autoria própria

Ao se observar os erros relacionados a medida do tamanho da bolha pelas duas técnicas, outra vez se nota que, a técnica de filmagem de alta velocidade, apresenta os valores maiores que os da sonda condutiva, comparados para cada estação de medição, e se nota que com o aumento da velocidade superficial do líquido, os mesmos tendem a diminuir, o que acontece também com os erros relacionados a medição com a sonda, todavia, com aumento da velocidade superficial do gás, ambos os erros tendem a aumentar.

Tabela 5.9. Tamanhos da bolha de Taylor pelas duas técnicas de medição. ($U_{si} = 0,585$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	21,198±0,062	22,745±0,974	1,547	7,30
0,105	24,345±0,079	26,907±1,209	2,562	10,52
0,176	38,050±0,138	42,896±2,268	4,846	12,74
0,263	47,567±0,245	55,725±2,508	8,158	17,15
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	22,810±0,080	23,443±1,332	0,633	2,78
0,105	27,140±0,160	28,918±1,188	1,778	3,90
0,176	46,457±0,640	50,242±2,983	3,785	8,15
0,263	63,340±0,630	70,784±4,480	7,444	11,75

Fonte: Autoria própria

Tabela 5.10. Tamanhos da bolha de Taylor pelas duas técnicas de medição. ($U_{si} = 0,878$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	19,978±0,023	21,870±0,589	1,892	9,47
0,105	21,223±0,050	23,645±0,876	2,422	11,41
0,176	30,496±0,157	34,342±2,095	3,846	12,61
0,263	36,283±0,140	41,586±2,780	5,303	14,62
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (mm)	L_{TB} (%)
0,07	19,533±0,022	19,671±0,555	0,138	0,60
0,105	24,512±0,109	25,318±1,026	0,806	3,29
0,176	37,106±0,321	39,588±1,908	2,482	6,69
0,263	46,566±0,296	50,493±2,567	3,927	8,43

Fonte: Autoria própria

Embora, o comportamento dos erros para as duas técnicas para a medida do tamanho da bolha, ser bem diferente para aquele obtido para a velocidade, ou seja, o de não apresentar alguma equivalência, o que ocorre para que isto aconteça, pode estar relacionado, bem mais, a questão da deformidade que a bolha apresenta em seus contornos.

No caso da técnica da sonda condutiva, quando a bolha alongada na iminência de ser tocada pelo primeiro sensor, uma vez que, o tamanho que se irá medir é o resultado da entrada e saída do sensor da mesma, se as superfícies da frente e principalmente a da cauda da bolha, apresentarem grande variação dos seus contornos, tal condição aparentemente vai se traduzir em um erro maior.

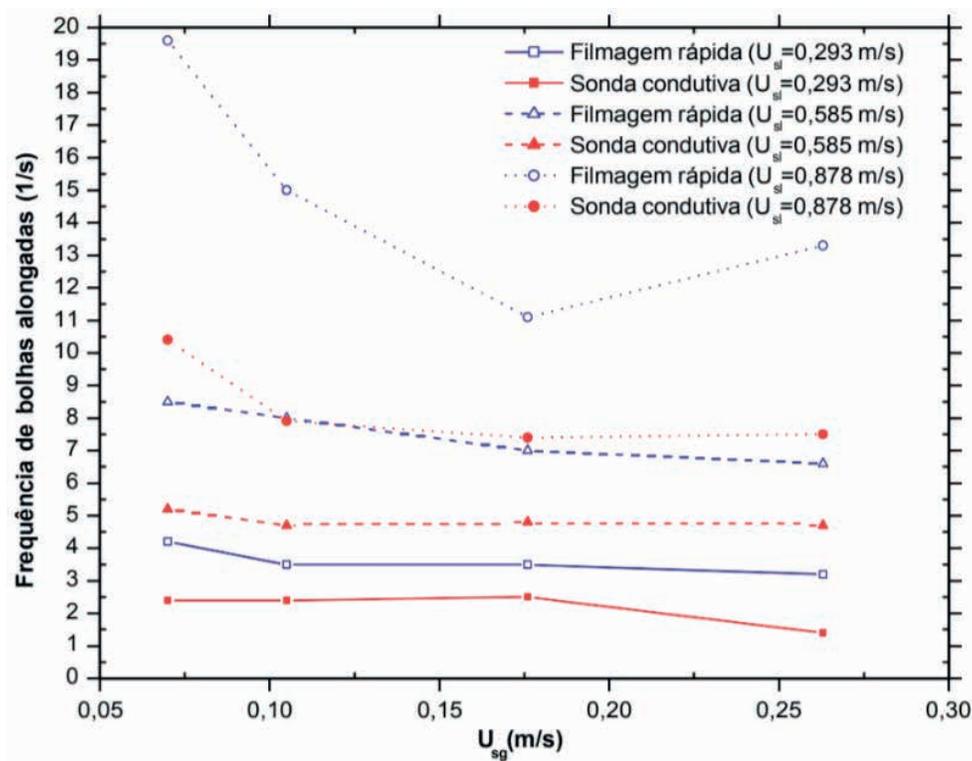
No caso da técnica da filmagem de alta velocidade, esta condição de deformidade das bordas da bolha, ainda mais, torna difícil a tarefa de saber corretamente o contorno da mesma, tanto da frente como principalmente da traseira da bolha, como confirmados pelas figuras 5.13a e 5.13b, para se definir o seu verdadeiro comprimento. Então, poderia ser esta, a causa mais provável para os erros se apresentarem maiores, para a técnica de filmagem de alta velocidade, do que para a técnica da sonda condutiva.

5.5 RESULTADOS PARA A FREQUÊNCIA DE BOLHAS ALONGADAS

Nos gráficos das figuras 5.14 e 5.15, estão plotados para a estação 1 e para a estação 2, respectivamente, os resultados dos valores relativos as duas técnicas de medição para a frequência de bolhas alongadas, em relação a velocidade superficial do gás, para as condições de fluxo do experimento.

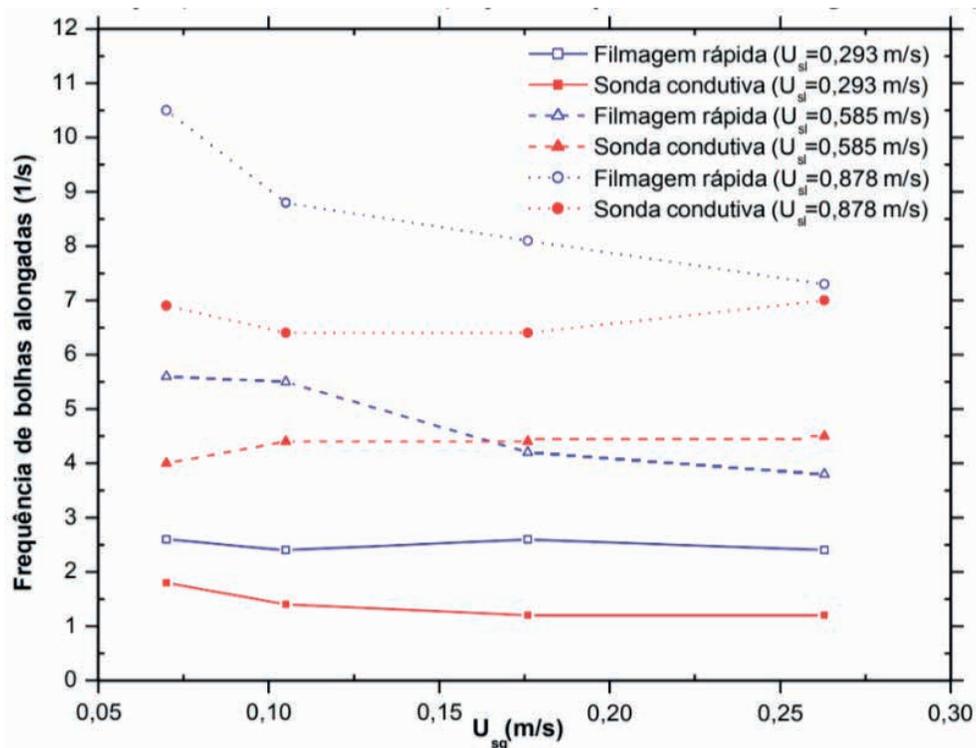
A frequência de bolhas é dada como sendo, a razão entre o número de bolhas de uma amostra conhecida e o tempo de aquisição, levado para detectar esta amostra. Desta forma, para este parâmetro do escoamento, não será possível comparar os resultados das duas técnicas de medição, em virtude de tanto o tamanho da amostra, quanto o tempo de aquisição das duas técnicas, serem bem diferentes. Assim sendo, os gráficos servem apenas para discutir, o comportamento deste parâmetro e a sua tendência, mediante as condições de fluxo do experimento.

Figura 5.14. Comparação das técnicas de medição para a frequência de bolhas alongadas na estação 1.



Fonte: Autoria própria

Figura 5.15. Comparação das técnicas de medição para a frequência de bolhas alongadas na estação 2



Fonte: Autoria própria

Pode-se notar que para as velocidades superficiais do líquido de 0,878 m/s e do gás de 0,070 m/s, existe uma tendência de queda acentuada, que logo se mantém para as velocidades superficiais do gás na sequência, tanto na estação 1 quanto na estação 2, e as duas técnicas se acompanham neste comportamento razoavelmente. Para as demais velocidades superficiais do líquido, permanece uma tendência dos valores para a frequência, se manterem para todas as demais velocidades superficiais do gás, tanto na estação 1, quanto na estação 2, e da mesma forma, as duas técnicas tendo um comportamento muito similar na indicação desta condição.

A variação da frequência de bolhas é um parâmetro que serve para estimar, a taxa de coalescência ao longo da tubulação. Sendo assim, outra observação que se pode fazer, sobre o comportamento das frequências das bolhas para as condições de fluxo, ao se observar os gráficos das figuras 5.14 e 5.15, é que estas tendem a diminuir da estação 1 para estação 2, indicando portanto, que entre as estações, alguma coalescência de fato exista, o que explica então, o aumento dos tamanhos das bolhas da estação 1 para a estação 2, como verificado acima para este parâmetro pelas duas técnicas de medição, e comprovando que, a interação bolha a bolha, seja consequência do escoamento pistonado que ainda não está completamente desenvolvido.

As figuras 5.16a e 5.16b, ilustram a evolução de uma bolha alongada, que vem perseguindo a bolha que esta a sua frente, sendo atraída pela esteira desta, até o momento em que ela a alcança, quando então ocorre a mistura e o coalescimento das bolhas. Dessa forma o que antes eram duas bolhas tornou-se agora apenas uma, a qual passa a ter um tamanho maior.

Figura 5.16a. A bolha seguidora é atraída pela esteira da bolha precedente e se projeta em relação a sua cauda.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

Figura 5.16b. A bolha seguidora é inteiramente absorvida pela esteira da bolha precedente dando origem a uma nova bolha.



Fonte: Arquivo de imagens do autor.

5.6 RESULTADOS PARA O COMPRIMENTO DOS PISTÕES DE LÍQUIDO

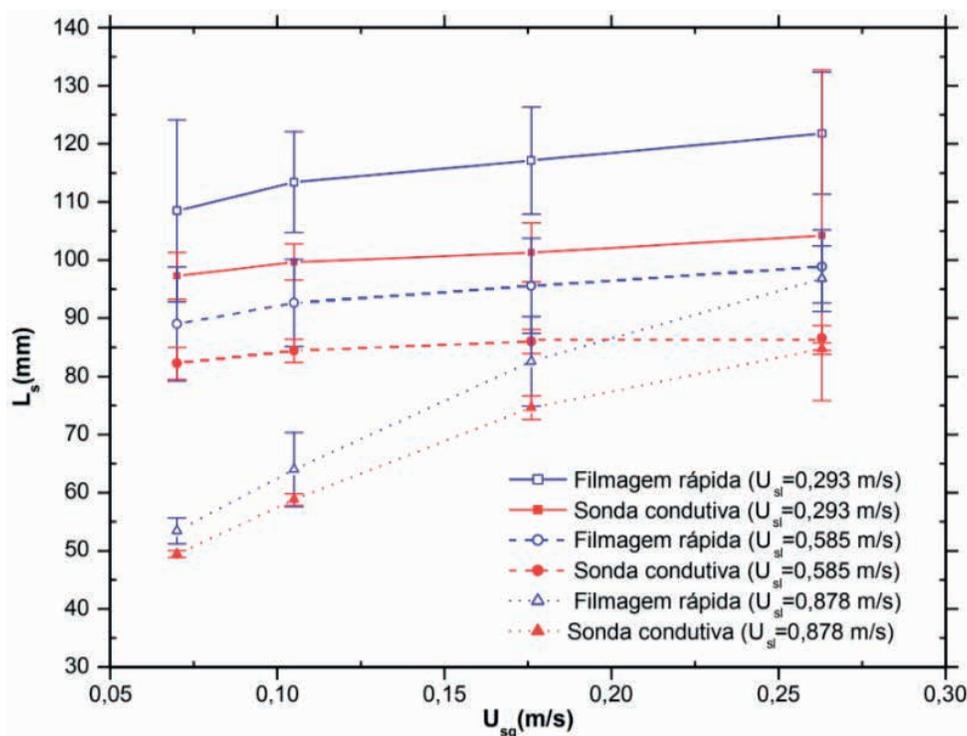
Os resultados obtidos pelas técnicas da sonda condutiva e da filmagem de alta velocidade, para o tamanho dos pistões líquidos, podem ser vistos graficamente nas figuras 5.17 e 5.18, para as três velocidades superficiais do líquido, tomadas nas estações 1 e 2 de medição para todas as condições de fluxo.

Os gráficos exibem um comportamento quase uniforme para as medidas do comprimento do pistão líquido, sendo diferenciado apenas para a velocidade superficial

do líquido de 0,878 m/s, com as velocidades superficiais do gás de 0,176 m/s e 0,263 m/s na estação 1, e para a velocidade superficial do líquido de 0,585 m/s, com as velocidades superficiais do gás de 0,176 m/s e 0,263 m/s na estação 2, que apresentam uma elevação repentina para os valores da medida do tamanho do pistão de líquido, que impede aos gráficos de terem um certo padrão como apresentado pelos anteriores. Apesar disto, se consegue verificar que a diferença entre a medida obtida pelas duas técnicas, é menor na estação superior do que na estação inferior, bem como, se pode inferir que a velocidade superficial do gás, pouco influencia o comprimento do pistão de líquido. A essa mesma conclusão chegaram Van Hout et. al, (2003) para escoamento pistonado contínuo para tubulações de diâmetros maiores.

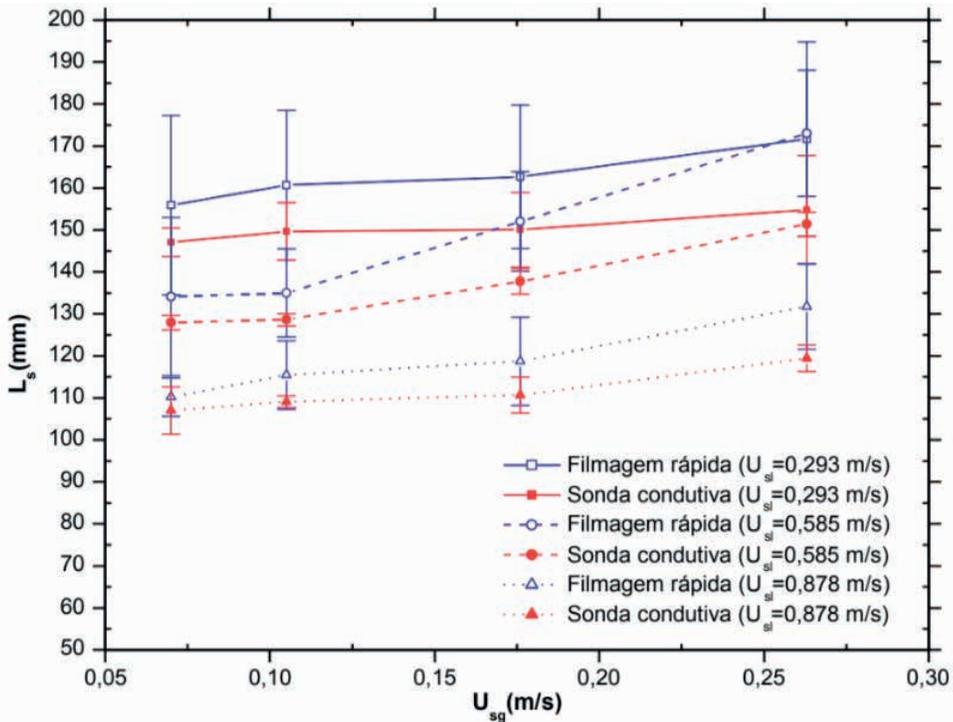
Entretanto, a despeito do fato dos gráficos não apresentarem certo padrão, mesmo assim, se consegue fazer uma discussão, acerca das peculiaridades inerentes ao comportamento das medidas obtidas pelas duas técnicas. Assim como, o tamanho da bolha alongada, o comprimento dos pistões líquidos diminui, quando a velocidade superficial do líquido aumenta nas duas estações, porém, diferentemente que ocorre para o tamanho da bolha, a redução desta vez, é menor na estação 1 do que na estação 2.

Figura 5.17. Comparação das duas técnicas de medição para os tamanhos do pistão líquido na estação 1



Fonte: Autoria própria

Figura 5.18. Comparação das técnicas de medição para os tamanhos do pistão de líquido na estação 2.



Fonte: Autoria própria

Este comportamento das medidas pelas duas técnicas está relacionado, ao aumento natural do tamanho dos pistões de líquido, como resultado da interação bolha a bolha, cujo resultado é de alcançar o denominado comprimento estável do pistão de líquido, no qual os perfis de velocidade, não apresentam mais variação, e o escoamento é considerado inteiramente desenvolvido.

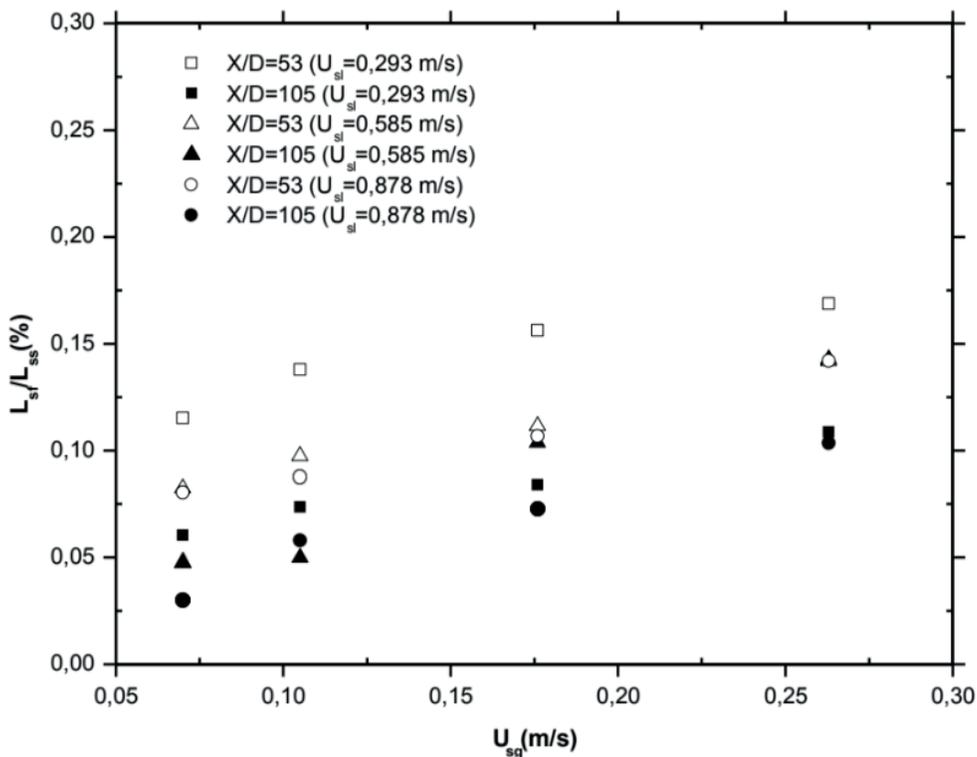
Mais uma vez, as medidas obtidas para este parâmetro pela sonda condutiva, retratam o que realmente acontece em função dela registrar, o aumento natural e gradual que ocorre no tamanho do pistão líquido, devido a condição hidrodinâmica da mistura gás-líquido, ao longo da extensão da seção de teste, fato este, que está de acordo com o previsto em trabalhos de outros pesquisadores, dentre eles o de Aladjem Talvy *et al* (2000).

Pelos resultados obtidos pela técnica da sonda condutiva, se observa que o tamanho do pistão líquido, também sofre influência devido ao aspecto característico de medição da sonda, por causa do aspecto irregular dos contornos da bolha, o tamanho do pistão líquido, sofre a mesma influência que o tamanho da bolha, uma vez que, a entrada e saída da sonda do pistão ficam comprometidas. Deste modo, a mesma discussão que se fez, acerca das diferenças de valores obtidos pelas duas técnicas para o tamanho da bolha, cabe também para o comprimento do pistão líquido, ou seja, o fato da bolha, se mostrar mais ou menos instável, e tal condição comprometer a sua forma, implicaria, diretamente na diferença entre as medidas obtidas pelas duas técnicas para este parâmetro.

Todavia, é oportuno se considerar que, o procedimento experimental para a obtenção da medida do comprimento do pistão pela técnica da filmagem de alta velocidade, foi realizado sob outra metodologia, que está descrita no desenvolvimento experimental na seção 4.6.5, a qual é bem diferente daquela realizada para o comprimento da bolha por esta mesma técnica. Assim sendo, deve-se ressaltar que as diferenças entre as medidas obtidas pelas duas técnicas, tenham mesmo muito mais a ver, com as considerações que foram feitas no procedimento experimental, para se obter o tamanho do pistão líquido pela técnica da filmagem de alta velocidade.

O gráfico da figura 5.19, ilustra a diferença entre as medidas obtidas pelas duas técnicas de medição, para o tamanho do pistão líquido, por meio da razão percentual (L_{TBf}/L_{TBS}), em relação a velocidade superficial do gás. Nota-se pela disposição dos pontos no gráfico, que a diferença aumenta com esta velocidade, apesar de diminuir com o aumento da velocidade superficial do líquido. Mais uma vez, a diferença chega a ter valores mínimos como 3%, a maioria dos pontos do gráfico tem diferença abaixo de 15%, e mais uma vez as diferenças entre os valores medidos pelas técnicas na estação superior apresentam-se menores que os da estação inferior.

Figura 5.19. Razão percentual entre os comprimentos do pistão de líquido obtidos pelas duas técnicas de medição para as duas estações do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria

Os valores do tamanho dos pistões de líquido para cada condição de fluxo, com os respectivos erros associados, se encontram nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, para as duas estações de medição. Nas mesmas tabelas encontram-se também, o valor absoluto e o valor percentual das diferenças entre as medidas obtidas pelas duas técnicas.

Como se pode notar pelos valores obtidos para os erros nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, desta vez, para a técnica da filmagem de alta velocidade são bem maiores, que para a técnica da sonda condutiva, muito em função também da metodologia empregada, para obtenção do tamanho dos pistões de líquido.

Tabela 5.11. Tamanhos dos pistões líquidos obtidos pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,293$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	97,924±4,022	108,512±15,669	10,588	10,81
0,105	99,671±3,069	113,408±8,694	13,737	13,78
0,176	101,319±5,041	117,153±9,249	15,834	15,63
0,263	104,235±28,419	121,819±10,487	17,584	16,87
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	147,042±3,362	155,919±21,333	8,877	6,04
0,105	149,638±6,885	160,648±17,819	11,010	7,25
0,176	150,066±8,896	162,679±17,115	12,613	8,40
0,263	154,813±12,929	171,644±23,105	16,831	10,87

Fonte: Autoria própria

Tabela 5.12. Tamanhos dos pistões líquidos obtidos pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,585$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	82,240±2,789	89,011±9,826	6,771	8,23
0,105	84,408±2,024	92,628±7,525	8,220	9,74
0,176	86,005±2,059	95,587±8,184	9,582	11,14
0,263	86,599±2,131	98,889±6,265	12,290	14,19
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	127,985±1,737	134,087±18,849	6,102	4,77
0,105	128,612±1,426	135,020±10,435	6,408	4,98
0,176	137,749±3,046	152,020±11,867	14,271	10,65
0,263	151,386±2,885	172,982±14,996	21,596	14,27

Fonte: Autoria própria

Tabela 5.13. Tamanhos dos pistões líquidos obtidos pelas duas técnicas de medição. ($U_{sl} = 0,878$ m/s)

Estação 1				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	49,443±0,605	53,420±2,220	3,977	8,04
0,105	58,815±0,973	63,963±6,412	5,148	8,75
0,176	74,609±2,042	82,570±7,692	7,961	10,67
0,263	84,772±0,989	96,819±5,620	12,047	14,21
Estação 2				
	Sonda condutiva	Filmagem rápida	Diferença abs.	Diferença perc.
U_{sg} (m/s)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (mm)	L_s (%)
0,07	106,992±5,584	110,217±4,557	3,225	3,01
0,105	109,124±1,371	115,450±8,118	6,326	5,79
0,176	110,705±4,264	118,759±10,522	8,054	7,28
0,263	119,421±3,139	131,771±10,150	12,350	10,34

Fonte: Autoria própria

Entretanto, mesmo com os erros relacionados à filmagem de alta velocidade terem sido maiores, quando comparados aos erros advindos da sonda condutiva, percebe-se que para algumas condições de fluxo nos gráficos das figuras 5.12 e 5.13, as barras de erros das duas técnicas se interceptam, indicando que de algum modo, o procedimento adotado para a obtenção do tamanho dos pistões líquidos, possui alguma validade. Contudo, os erros sendo maiores, são relacionados a desvios padrões maiores, que se traduzem pela dispersão dos valores medidos em torno da média. Então, muito provavelmente, a metodologia empregada favoreça a maior dispersão dos valores para o tamanho do pistão. Entretanto, deve-se levar em conta ainda, a mesma condição sugerida para o tamanho da bolha, de nas duas regiões de medição, haver uma intensa interação bolha a bolha, a qual promove uma grande variação de tamanhos para o pistão de líquido. Sem contar que, como o tamanho da amostra para as duas técnicas é bem diferente, de certa forma, pode estar influenciando bem mais os valores obtidos para este parâmetro.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas na seção vertical de um aparato experimental medições para a obtenção dos parâmetros de escoamento bifásico, através das técnicas da sonda condutiva e da filmagem de alta velocidade em uma mistura ar-água sob diversas condições de fluxo em escoamento intermitente pistonado contínuo. A fim de se estabelecer conclusões, os resultados alcançados pelas duas técnicas de medição foram comparados, e se verificou os aspectos pertinentes a condição de medição de cada técnica na obtenção de cada parâmetro do escoamento, bem como, aqueles relacionados a influência das condições do escoamento na obtenção destes mesmos parâmetros por cada técnica experimental.

No aspecto construtivo do aparato experimental construído, a reprodução do escoamento intermitente pistonado contínuo foi verificada, para todas as condições de fluxo estabelecidas no experimento e comprovadas pelos mapas de padrão de escoamento. Convém ressaltar, no entanto, que para a total adequação do aparato a investigação de parâmetros em escoamento bifásico se faz necessário realizar experimentos que estejam compreendidos nas faixas dos outros padrões de escoamento.

Acerca do aspecto da construção e caracterização da sonda condutiva, é oportuno se observar que, para um instrumento que foi construído sob uma forma inteiramente artesanal, os resultados obtidos para os parâmetros do escoamento, foram em média, 15% menores que os obtidos pela filmagem de alta velocidade, apesar do fato da intrusividade da sonda, ser um dos elementos de maior preocupação na obtenção de resultados confiáveis, visto que, as dimensões da sonda têm muito a ver com uma maior ou menor interferência nas medidas. Portanto, a forma final apresentada pela sonda, no que diz respeito ao comprimento entre pontas dos seus sensores e a sua área e perímetro, se revelou em condições de propiciar uma interferência, menor até que a esperada, quando se leva em conta o efeito da intrusividade da sonda, sobre a diferença entre os resultados obtidos pelas duas técnicas de medição.

Com relação ao aspecto da condição da imagem obtida pela técnica da filmagem de alta velocidade, o que se adotou como o procedimento relacionado a sua análise, se mostrou de acordo, em função dos resultados dos parâmetros do escoamento obtidos por esta técnica, servirem como um balizador para os resultados da técnica da sonda condutiva. Entretanto, deve se levar em conta que a movimentação do nariz, mas, principalmente a oscilação da cauda da bolha alongada, torna a medição do seu comprimento de difícil definição, para se estabelecer o começo e o fim para o mesmo. Esta constatação revela a necessidade de se melhorar a definição para os contornos da bolha alongada, utilizando filtros que proporcionem esta condição às imagens.

Com relação ao aspecto da condição do escoamento, em função da primeira e da segunda estações de instalação da sonda condutiva para a aquisição de sinal, estarem

localizadas em uma região da tubulação da seção de teste, onde o escoamento propicia um intenso coalescimento de bolhas, em função dele ainda não estar inteiramente desenvolvido, os resultados obtidos para os parâmetros do escoamento pelas duas técnicas de medição, mostraram-se sempre com uma diferença, que apenas ratifica o fato da estação inferior, por estar mais próxima da injeção de ar do que a estação superior, sofra mais a interferência da condição do escoamento. Assim, se conclui que, se a medição fosse realizada mais acima da posição da estação 2, os resultados obtidos pelas duas técnicas poderiam estar mais próximos, devido a influência do escoamento ser menor, sobre os resultados obtidos pela sonda, em função da tendência do escoamento se tornar inteiramente desenvolvido.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das características marcantes que se pode concluir sobre a avaliação entre as duas técnicas é que, embora os valores obtidos para os parâmetros do escoamento, serem diferentes, contudo, ao se observar os gráficos obtidos, se conclui que a técnica da sonda condutiva, mantém o mesmo comportamento, daqueles obtidos pela técnica da filmagem rápida. Assim, levando-se em conta que, o objetivo principal deste trabalho foi o de realizar medições dos parâmetros do escoamento bifásico intermitente pistonado contínuo, em uma tubulação vertical ascendente por meio de uma técnica identificada como intrusiva, e comparar com os resultados obtidos por meio de outra que não possui este caráter, e se verifica que a diferença em termos percentuais entre as duas técnicas de medição é satisfatória, mesmo na condição clara, em que o escoamento não se mostra favorável a obtenção dos parâmetros de interesse, chega-se a conclusão que este objetivo foi alcançado, se definindo, portanto, como a principal contribuição deste trabalho, ainda mais, quando se leva em consideração a forma totalmente artesanal, como foi construída e caracterizada a sonda condutiva.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nas conclusões expostas acima, se pode enumerar os seguintes pontos como indicação para trabalhos futuros.

1. Realizar experimentos com o aparato experimental em outras condições de fluxo, para que possa ser validado também para outros padrões de escoamento.
2. Construir e caracterizar novas sondas com diferentes medidas geométricas, visando a avaliação da melhoria dos resultados obtidos por este trabalho, através da alteração dessas características a fim de se buscar uma interferência ainda menor sobre o escoamento.
3. Considerar a captação da cauda da bolha pelos dois sensores, para a determinação da velocidade, e também a captação do tamanho da bolha e do tamanho do pistão líquido pelo sensor 2, para também comparar os resultados obtidos com os resultados deste trabalho.

4. Implementar na análise das imagens obtidas dos filmes em alta velocidade, um tratamento por meio de filtros mais específicos, que possa evidenciar melhor o nariz e principalmente a cauda da bolha alongada.
5. Aumentar o tamanho da seção de testes da tubulação vertical, e analisar para mais uma, ou mesmo duas estações acima da estação 2, a condição de se alcançar o escoamento inteiramente desenvolvido, e verificar também os resultados obtidos pelas duas técnicas, comparando-os com os resultados deste trabalho.
6. Reproduzir as mesmas medições realizadas pelas duas técnicas utilizadas neste trabalho, usando outras técnicas mais recentes, como a técnica da sonda ótica, por exemplo, afim de que se avaliem os resultados obtidos, tomando como perspectiva o uso de uma tecnologia mais recente e mais eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADJEM TALVY, C. SHEMER, L. and BARNEA, D. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v.26, p. 1905 – 1923, 2000.

BAGHAEI, Pouria. **Drag reduction with the aid of air bubbles and additives**. 2009. 147 f. Dissertation (Mastered of Applied Science in Chemical Engineering) – University of Waterloo, Ontário, 2009.

BARBOSA, Jr. Jáder Riso. **O método dos sensores eletro-resistivos aplicado à pluma de bolhas**. 1997. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 1997.

BARNEA, D. A unified model for predicting flow pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 13(1), p. 1- 12, 1987.

BARNEA, D. and SHEMER, L. Void fraction measurements in vertical slug flow: Applications to slug characteristics and transition. **International Journal of Multiphase Flow**, v15, p. 495 – 504, 1989.

BARNEA, D., SHOHAM, O., and TAITEL, Y. Flow pattern characterization for two phase flow by electrical conductance probe. **International Journal of Multiphase Flow**, v 6, p 387 – 397, 1980.

BARNEA, D., TAITEL, Y. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v 19, p 829 – 838, 1983.

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v 10, p 467 – 483, 1984.

BRAUNER, N. and BARNEA, D. Slug/Churn transition upward gas-liquid flow. **Chemical Engineering Science**, v 41, p 159-163, 1986.

CHU, K. J. and DUKLER, A.E. Statistical Characteristics of Thin, Wavy Films. **AIChE Journal**, v 20, p. 695-706, 1974.

COLLIER, J. G. Introduction, In: **Convective Boiling and Condensation**. McGraw- Hill Book Company, 1981. p. 1-25.

COLLINS, R., DE MORAES, F. F., DAVIDSON, J. F., and HARRISON, D. The motion of a large gas bubble rising through liquid flowing in a tube. **Journal of Fluids Mechanics**, v 89, Part 3, p 497-514, 1978.

CHISHOLM, D. Chapter 1, In: **Two phase flow in pipelines and heat exchangers**. 1ª edition. New York, 1983: Glasgow College of Technology.

DO AMARAL, C.E.F. ALVES, R.F. DA SILVA, M.J. ARRUDA, L.V.R. DORINI, L. MORALES, R.E.M. e PIPA, D.R. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flow. **Flow measurement and instrumentation**, v. 33, p. 257-264, 2013.

DUKLER, A. E and TAITEL, Y. Flow regime transitions for vertical upward gas-liquid flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v7, p 271-291, 1977.

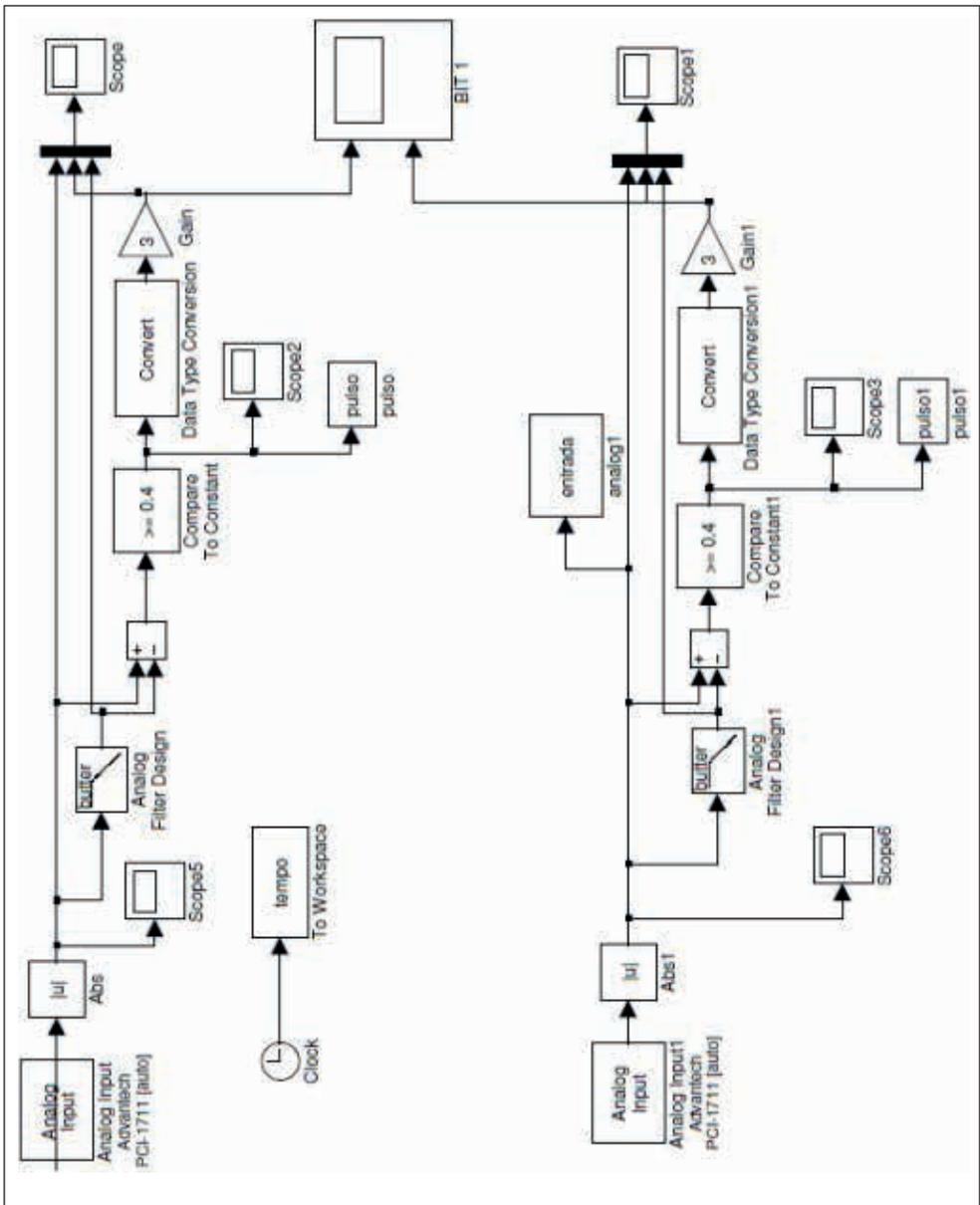
- FERNANDES, R. C., SEMIAT, R., DUKLER, A. E. Hydrodynamic model for gas- liquid slug flow in vertical tubes. **AICHE Journal**, v 29, p 981 – 989, 1983.
- FIORI, M. P. and BERGLES, A. E. A study of boiling water flow regimes at low pressure. **Rep. 5382-40, Dept. of Mechanical Engineering, MIT**, 1966.
- GRANGEIRO, Francisco. **Caracterização do escoamento intermitente horizontal** água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- GRIFFITH, P. and WALLIS, G. B. Two-phase slug flow. **Journal of Heat Transfer**, v.83, p. 307-320, 1961.
- HARMATHY, T. Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent. **AICHE Journal**, v 6, p 281-288, 1960.
- HASAN, A., and KABIR, C. A study of multiphase flow behavior in vertical wells. **SPE Production Engineering**, 263-272, 1998.
- HERRINGE, R. A. and DAVIS, M. R. Detection of Instantaneous Phase Changes in Gas-Liquid Mixtures. **J. Phys. E: Sci. Instrum**, v. 7, p. 807-812, 1974.
- HEWITT, G. F. and ROBERTS, D. N. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography. **AERE-M 2159. HMSO**. Harwell England, 1969.
- HEWITT, G. F. Chapter 2: Flow regimes and chapter 10: Measurement of two-phase flow parameters. In: **Handbook of Multiphase systems**. Washington: 1982: Hemisphere/McGraw Hill, edited by Hestroni, G.
- HIBIKI, T., HOGSETT, S. and ISHII, M. Local measurement of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow. **Nuclear Engineering and Design**, v. 184, p. 287 – 304, 1998.
- HOFFER, M.S. and RESNICK, W. A modified electroresistivity probe technique for steady and unsteady-state measurements in fine dispersions – I. **Chemical Engineering Science**, v. 30, p. 473-480, 1975.
- JAVIER DIAS. **Física de reatores nucleares**. Disponível em <www.fisicadoreatoresnucleares.com> Acesso em: 12/11/2014.
- JAYANTI, S. and HEWITT, G. F. Prediction of the slug to churn flow transition in vertical two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v 18, p 847-860, 1992.
- JONES Jr., O. C. and ZUBER, N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 2, p 273-306, 1975.
- JONES Jr., O. C. Two phase flow measurement techniques in gas-liquid systems. U. S. Nuclear regulatory commission, Office of nuclear regulatory research, under contract **DE-AC02-76H00016, NRC FIN no. A-3045**, 1981.
- KATAOKA, I., ISHII, M. and SERIZAWA, A. Sensitivity Analysis of bubble size and probe geometry on the measurements of interfacial area concentration in gas-liquid two- phase flow. **Nuclear Engineering and Design**, v. 146, p. 53-70, 1994.

- KESKA, J. K. and WILLIAMS, B. E. Experimental comparison of flow pattern techniques for air-water mixture flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 19, p. 1 – 12, 1999.
- LEWIS, D. A. and DAVIDSON, J. F. Bubble sizes produced by shear and turbulence in a bubble column. **Chemical Engineering Science**, v. 38, p. 161-167, 1983.
- MAO, Z. S. and DUKLER, A. E. An experimental study of gas-liquid slug flow. **Experiments in Fluids**, v. 8, p. 169 – 182, 1989.
- MAO, Z. S. and DUKLER, A. E. The motion of Taylor bubbles in vertical tubes: II. Experimental data and simulations for laminar and turbulent flow. **Chemical Engineering Science**, v. 19, p. 377-383, 1991.
- MAYOR, T.S., PINTO, A.M.F.R. and CAMPOS, J.B.L.M. An image analysis technique for the study of gas-liquid slug flow along vertical pipes – associated uncertainty. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 18, p. 139 – 147, 2007.
- MAYOR, T.S., PINTO, A.M.F.R. and CAMPOS, J.B.L.M. On the gas expansion and gas hold up in vertical slugging columns – A simulation study. **Chemical Engineering and Process**, v. 47, p. 799 – 815, 2008.
- MAZZA, R. A., ROSA, E. S. and YOSHIZAWA, C. J. Analyses of liquid film models applied to horizontal and near horizontal gas-liquid slug flow. **Chemical Engineering Science**, v. 65, p. 3876 – 3892, 2010.
- MEDINA, César Daniel Perea. **Numerical simulation of two-phase liquid-gas slug flow with heat transfer in horizontal ducts**. 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós- graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2011.
- McQUILLAN, K. W. and WHALLEY, P. B. Flow patterns in vertical two phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 11, p. 161-175, 1985.
- MISHIMA K, and ISHII, M. Flow regime transitions criteria for upward two phase flow in vertical tubes. **International Journal of Heat Transfer**, v. 27, p. 723-737, 1984.
- NAKORYAKOV, V. E., KASHINSKY, O. N., PETHUKOV, A. V. and GORELIK, R. S. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, p. 337 – 355, 1986.
- NEAL, L. G AND BANKOFF, S. G. **A High resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow**. **AIChE Journal**, v. 9, p. 49-54, 1963.
- NICKLIN, D. J., WILKES, J. O., and DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in a vertical tubes. **Trans. Inst. Chem. Eng**, v. 40, p. 61-68, 1962.
- OSHINOWO, T. and CHARLES, M. E. Vertical two-phase flow Part 1. Flow pattern correlations. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 52, p. 25-35, 1974.
- OFFSHORE TECHNOLOGY. **The website for the offshore gas and oil industry**. Disponível em: <www.offshore-technology.com/projects/balder/balder2.html>. Acesso em: 02/11/2014

- POLONSKY, S., BARNEA, D. and SHEMER, L. Averaged and time-dependent characteristics of the motion of an elongated bubble in a vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, p. 795 – 812, 1999.
- REZENDE S. S., SILVA, M. O., EMERENCIANO, J. R. e NETO, J. L. S. **Desenvolvimento de um sistema de medição de fase utilizando sensores eletrorresistivos**. 12th Brazilian Congress of Thermal and Sciences - ENCIT, Belo Horizonte, Brasil, 2008.
- SEKOGUSHI, K., FUKUI, H., MATSUOKA, T. and NISHIKAWA, K. Investigation into the statistical characteristics of bubbles in two-phase flow. **Trans. JSME**, v. 40, p. 2295-2310, 1974.
- SHEMER, L. and BARNEA, D. Visualization of the instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow. **Psychochem. Hydrodyn**, v. 8, p. 243-253, 1987.
- SHEMER, L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. **Heat and Fluid Flow**, v. 24, p. 334 – 344, 2003.
- SILVA, M. O., BARROS, F .P. A., SILVA, M. V. L. R., LAGE, P. L. C. **Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade e tamanho de bolhas usando filmagem de alta velocidade**. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS- ENEMP, Aracaju, Brasil, 2007.
- SILVA, Marcelo Oliveira e. **Caracterização experimental de um escoamento bifásico vertical sujeito aos efeitos de uma expansão abrupta**. 2007. 219 f .Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro, 2007
- TAITEL, Y., BARNEA, D., and DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 26, p. 345-354, 1980.
- THERMOPÉDIA. **Guia A a Z para termodinâmica, transferência de calor e massa, e engenharia de fluidos**. Disponível em: <www.thermopedia.com/indiceA-Z>. Acesso em: 27/11/2014.
- VAN HOUT, R., SHEMER, L. and BARNEA, D. Evolution of hydrodynamic and statistical parameters of gas-liquid slug flow along inclined pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 58, p. 115 – 133, 2003.
- WELLE, R. V. D. Void fraction, bubble velocity and bubble size in two-phase flow. **International Journal of Multiphase flow**, v. 11, p. 317 – 345, 1985.
- ZUKOSKY, E. E. Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 25, p. 821-837, 1966.
- ZHOU, Jing. **Patterns in vertical air/water flow with and without surfactant**. 2013. 58 f. Dissertation (Mastered of Applied Science in Chemical Engineering) – University of Dayton, Ohio, 2013.

ANEXOS

ANEXO A – ESBOÇO DO ALGORÍTMO DESENVOLVIDO EM MATLAB / SIMULINK



Fonte: Rezende *et al*, 2008

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DA SONDA 2

1. Distância entre pontas da sonda

Imagens	Dref	ErrRef	Npi	ErrPix	NPixRef	ErrPixRef	X	Erro
1	9	0,25	101	2	562,004	4	1,62	0,09
2	9	0,25	108	2	619	4	1,57	0,08
3	9	0,25	103	2	585	4	1,58	0,09
4	9	0,25	99	2	568	4	1,57	0,09
5	10	0,25	95	2	595	4	1,60	0,08
6	9	0,25	99	2	572	4	1,56	0,09
7	10	0,25	89	2	561	4	1,59	0,09
8	10	0,25	92	2	581	4	1,58	0,08
9	10	0,25	98	2	596	4	1,64	0,09
10	9	0,25	102	2	565	4	1,62	0,09

Fonte : Autoria própria

2. Área da ponta da sonda

Imagens	Aref	ErrRef	ANpi	DNpi	ANPixRef	DNpixRef	XA	ErroA
1	90	5	1610	142	231099	1704	0,63	0,09
2	90	5	1504	137	236493	1724	0,57	0,09
3	80	5	2009	159	233569	1713	0,69	0,10
4	80	5	2295	170	243600	1750	0,75	0,11
5	90	5	1615	142	230337	1701	0,63	0,10
6	80	5	1830	152	222261	1671	0,66	0,10
7	80	5	1917	155	240006	1737	0,64	0,10
8	70	5	2171	165	221259	1667	0,69	0,11
9	70	5	2211	167	210372	1626	0,74	0,11
10	80	5	2819	188	243040	1748	0,93	0,13

Fonte: Autoria própria

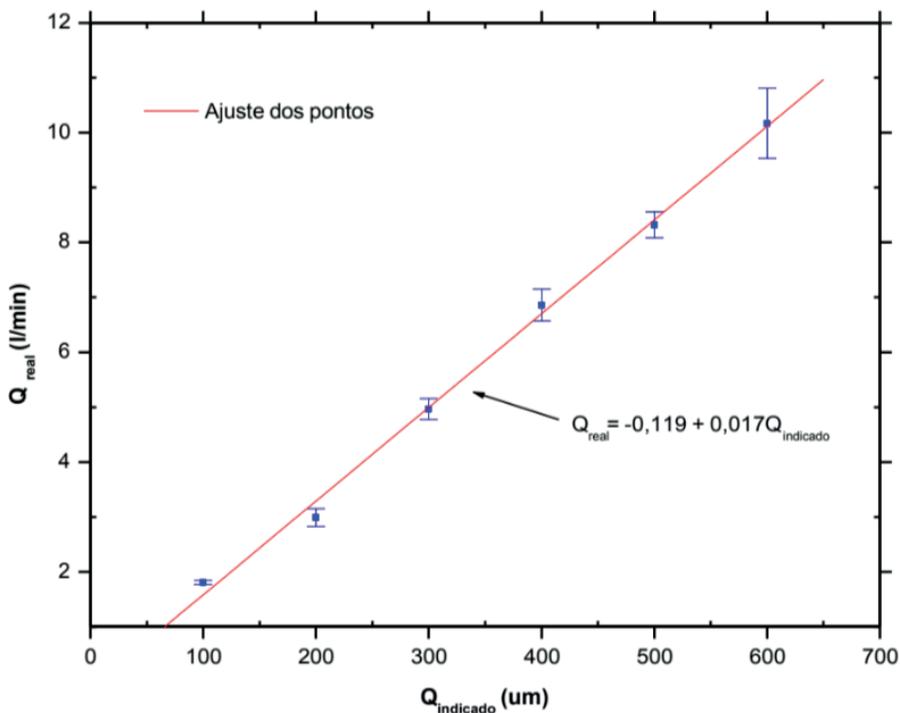
3. Perímetro da ponta da sonda

Imagens	Pref	ErrRef	PNpi	ErrPix	PNpixRef	ErrPixRef	XP	ErroP
1	10	0,5	511,01	1	1633,10	2	3,13	0,17
2	10	0,5	516,0,24	1	1681,36	2	3,07	0,16
3	10	0,5	536,113	1	1954,58	2	2,74	0,15
4	10	0,5	558	1	2179,94	2	2,56	0,13
5	10	0,5	510,001	1	1742,29	2	2,93	0,16
6	10	0,5	536	1	1800,90	2	2,98	0,16
7	10	0,5	551,232	1	1882,89	2	2,93	0,15
8	10	0,5	566,286	1	2121,09	2	2,67	0,14
9	10	0,5	558,001	1	1978,68	2	2,82	0,15
10	10	0,5	559,032	1	2320,02	2	2,41	0,13

Fonte: Autoria própria

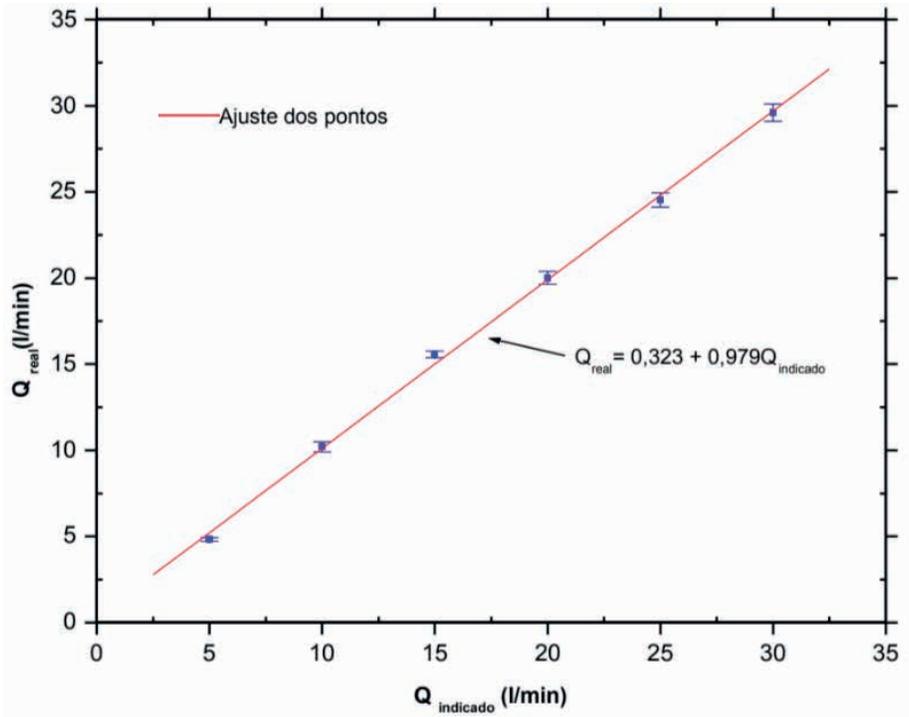
APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO

1. Medidor de vazão de ar



Fonte: Autoria própria

2. Medidor de vazão de água



Fonte: Autoria própria

RAIMUNDO VALÉRIO FÉLIX LIMA

É Professor de Mecânica do Ensino Básico Técnico e Tecnológico do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará.

É Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará, com título de Mestre na área de concentração Térmica e Fluidos pela mesma universidade.

Atuou como Engenheiro Mecânico, na indústria de cimento, alimentos e beneficiamento de minérios, na rotina da engenharia de manutenção industrial, no planejamento e execução de projetos de melhoria contínua e de grandes paradas em sistemas e equipamentos industriais, e na implantação e expansão de novos projetos.

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA VERTICAL PISTONADO

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA VERTICAL PISTONADO

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br