

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE MATERIAIS**

ROMULO LUIS DE PAIVA RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE
GÁS-LÍQUIDO DESCENDENTE EM GOLFADAS EM TUBULAÇÕES
LEVEMENTE INCLINADAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA 2015

ROMULO LUIS DE PAIVA RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE
GÁS-LÍQUIDO DESCENDENTE EM GOLFADAS EM TUBULAÇÕES
LEVEMENTE INCLINADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Térmicas.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

Coorientador: Prof. Dr. Fabio A. Schneider

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R696c Rodrigues, Romulo Luis de Paiva
2015 Caracterização experimental do escoamento bifásico de
 gás-líquido descendente em golfadas em tubulações levemente
 inclinadas / Romulo Luis de Paiva Rodrigues.-- 2015.
 95 f.: il.; 30 cm

 Texto em português, com resumo em inglês.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
 Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2015.
 Bibliografia: f. 75-80.

 1. Escoamento bifásico. 2. Escoamento em golfadas. 3.
 Tubulação - Dinâmica dos fluidos. 4. Modelos matemáticos.
 5. Malha de eletrodos. 6. Processamento de sinais. 7.
 Métodos de simulação. 8. Engenharia mecânica - Dissertações.
 I. Morales, Rigoberto Eleazar Melgarejo, orient. II.
 Schneider, Fábio Alencar, coorient. III. Universidade
 Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Mecânica e de Materiais. IV. Título.

CDD 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

ROMULO LUIS DE PAIVA RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE GÁS-LÍQUIDO DESCENDENTE EM GOLFADAS EM TUBULAÇÕES LEVEMENTE INCLINADAS

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Ciências Térmicas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo C. Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Rigoberto E. M. Morales, Dr.
PPGEM/UTFPR

Prof. Jader Riso Barbosa Junior, Dr.
POSMEC/UFSC

Prof. Amadeu Kum Wan Sum, PhD.
Colorado School of Mines(CSM)

Prof. Paulo H. Dos Santos, Dr.
PPGEM/UTFPR

Curitiba, 06 de março de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a toda minha família, em especial aos meus pais Rogério e Angela, que desde muito cedo incentivaram, auxiliaram e inspiraram nesta jornada.

Aos meus orientadores Rigoberto E. M. Morales e Fábio A. Schneider pelo apoio e confiança durante toda a execução do projeto. Agradeço ao Reinaldo G. Justiniano, Fernando E. Castillo Vicencio por todo auxílio e paciência empregados durante as medições experimentais e processamento dos dados.

Agradeço também ao Fausto Arinos Barbuto pelas correções e sugestões que contribuíram grandemente para o formato final do texto.

Aos meus colegas pelas discussões e sugestões proveitosas durante todo o percurso do trabalho: Marcos V. Barbosa, Luís Gustavo de M. Chagas, Jairo V. Lavarda, Rafael F. Alves e Marco G. Conte.

Agradeço especialmente à minha namorada Vanessa Mazzio Gorri que tanto me compreendeu e incentivou, mesmo à distância, durante esta fase importante de minha vida e é a quem dedico o presente trabalho.

Por fim, agradeço ao auxílio financeiro da CAPES e da PETROBRAS.

RESUMO

RODRIGUES, Romulo Luis de Paiva. Caracterização experimental do escoamento bifásico de gás-líquido descendente em golfadas em tubulações levemente inclinadas. 2015. 95 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O escoamento de gás-líquido descendente, no padrão golfadas é frequentemente encontrado em linhas de produção de petróleo provocado pela topografia do terreno. Assim, é necessário entender a dinâmica deste tipo de escoamento para o projeto de linhas de produção de óleo e gás, assim como para o dimensionamento de separadores e equipamentos. Neste cenário, no presente trabalho é caracterizado experimentalmente o escoamento bifásico de líquido-gás no padrão intermitente na direção descendente, em tubulações com inclinações de 0° , -4° , -7° , -10° e -13° . O estudo foi realizado utilizando o circuito experimental instalado no NUEM/UTFPR. Os experimentos foram conduzidos para diferentes condições de vazão de líquido e gás que garantam o padrão intermitente em golfadas, e para a monitoração das estruturas (fases) do escoamento foi utilizado um par de sensores de malha de eletrodos. A partir dos sinais temporais da fração de vazio adquiridos, foram extraídas as distribuições estatísticas dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas, sendo estes: a velocidade de translação da bolha alongada, a frequência de passagem da célula unitária, o comprimento do pistão de líquido, o comprimento da bolha alongada e a fração de vazio na região da bolha alongada. Em posse dos dados experimentais processados, estes foram analisados com a finalidade de identificar a relação entre os parâmetros do escoamento em golfadas, tanto para suas distribuições estatísticas como para seu valor médio, com as vazões e propriedade dos fluidos. Foram elaboradas correlações, com intervalo de confiança de 95%, para calcular a frequência, velocidade da bolha alongada, comprimentos do pistão e da bolha, fração do líquido e de vazio; que certamente servirão de referência para o desenvolvimento de modelos matemáticos e desenvolvimento de projetos de engenharia.

Palavras-chave: escoamento bifásico, escoamento em golfadas, caracterização experimental.

ABSTRACT

RODRIGUES, Romulo Luis de Paiva. Experimental characterization of downward slug two-phase flow in slightly inclined pipes. 2015. 95 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Downward slug flow in ducts of circular cross section is a frequently observed flow regime in oil and gas transportation lines. The onset of this kind of flow is due to instabilities generated by irregular pipe topography. Therefore, to understand the hydrodynamics of the slug flow is paramount in the design of crude oil production lines as well as in the project of equipment involved in oil and gas operations. The goal of this work is to experimentally analyze and characterize the two-phase gas-liquid intermittent downward flow in ducts with inclination angles of 0° , -4° , -7° , -10° and -13° . The analysis was performed at different gas-liquid volumetric flow rates for which the slug flow regime was observed. An existing experimental rig in the NUEM/UTFPR labs was used to collect data. A pair of wire-mesh sensors to evaluate the flow structure, thus obtaining void fraction temporal series was employed. From those series, statistical distributions for the characteristic parameters of such slug flows – namely the elongated bubble translational velocity, the unit cell frequency, the liquid slug and the elongated bubble lengths and the void fraction in the elongated bubble region – were obtained. The processed signals were analyzed so as to identify the relationship between the slug flow parameters, their statistical distributions and averaged values alike as functions of the flow rates and fluid properties. Correlations for slug frequency, elongated bubble velocity, liquid slug and bubble lengths as well as empirical expressions for the void and liquid fractions were developed, all within a confidence interval of 95%. It is expected that such correlations may contribute to the betterment of future engineering endeavours, and used in the development of similar mathematical models.

Key-words: two-phase flow, slug flow, experimental characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais e verticais (adaptado de Shoham (2006)).	15
Figura 2.1 – Célula unitária com parâmetros característicos.	20
Figura 2.2 – Velocidade de deslizamento em relação ao número de Eötvos.	24
Figura 3.1 – Esquema da bancada experimental.	32
Figura 3.2 – Esquema representativo do WMS.	35
Figura 3.3 – Circuito elétrico do WMS.	35
Figura 3.4 – Câmera e lente utilizadas.	36
Figura 3.5 – Diagrama esquemático da seção de testes.	37
Figura 3.6 – Série temporal para o escoamento em golfadas.	37
Figura 3.7 – Série temporal para o escoamento em golfadas.	39
Figura 3.8 – Pontos experimentais.	40
Figura 3.9 – Exemplo de um diagrama de caixa.	41
Figura 3.10 – Características e classificação de distribuições estatísticas.	43
Figura 4.1 – Grade de testes experimentais.	45
Figura 4.2 – Mapas de escoamento de Taitel e Dukler (1976). $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	46
Figura 4.3 – Diagramas de caixa da fração de vazio na região da bolha. $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	48
Figura 4.4 – Médias das velocidades obtidas pela câmera e pelo WMS. Legenda: $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	49
Figura 4.5 – Aeração de alguns pontos não processados.	50
Figura 4.6 – Gráficos da velocidade adimensional em relação ao número de Froude da mistura. Legenda: $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	51
Figura 4.7 – Comparação dos pontos experimentais com as correlações de Bendiksen (1984) e Weber (1981). Legenda: $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	53
Figura 4.8 – Comparação entre as velocidades da frente e da traseira da bolha alongada. Legenda: $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	54
Figura 4.9 – Gráficos da frequência adimensional comparados com as correlações de Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003), Wang, Guo e Zhang (2007) e Vicencio (2013). Legenda: $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$	56
Figura 4.10 – Gráfico da frequência adimensional para os pontos com mesmas velocidades superficiais J_L e J_G	57
Figura 4.11 – Gráfico do comprimento da bolha adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.	59

Figura 4.12–Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.	59
Figura 4.13–Gráfico para fração de vazio na região da bolha.	60
Figura 4.14–Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.	61
Figura 4.15–Histogramas e distribuições da velocidade de translação da bolha alongada V_{TB} para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	62
Figura 4.16–Histogramas e distribuições da velocidade da traseira da bolha alongada V_R para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	63
Figura 4.17–Histogramas e distribuições da frequência f para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	65
Figura 4.18–Histogramas e distribuições do comprimento da bolha alongada L_B para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	66
Figura 4.19–Histogramas e distribuições do comprimento do pistão L_S para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	67
Figura 4.20–Histogramas e distribuições da fração de vazio na região da bolha α_B para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	68
Figura 4.21–Histogramas e distribuições da fração de vazio na região do pistão α_S para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0°	69
Figura 4.22–PDFs comparativas da frequência, comprimento da bolha e do pistão com $J_L=2,00$ m/s e $J_G=2,00$ m/s. Legenda: a=frequência, b=comprimento da bolha, c=comprimento do pistão.	70
Figura 4.23–Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.	72
Figura A.1 – Esquema das linhas de líquido, gás e seção de teste.	82
Figura A.2 – Esquema das linhas de líquido, gás e seção de teste.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Números adimensionais relacionados ao escoamento bifásico	21
Tabela 2.2 – Resultados comparativos de Davies e Taylor (1950)	24
Tabela 2.3 – Resumo dos parâmetros C_0 e C_∞	26
Tabela 2.4 – Condições do experimento de Greskovich e Shrier (1972)	28
Tabela 3.1 – Faixa de vazões e identificação dos rotâmetros	33
Tabela 3.2 – Combinação de rotâmetros e placas de orifício	34
Tabela 4.1 – Coeficientes da velocidade de translação da bolha alongada	50
Tabela 4.2 – Relação entre a velocidade translacional e a da traseira da bolha alongada	52
Tabela 4.3 – Frequência e velocidades superficiais	57
Tabela 4.4 – Valores da frequência para o ponto 28.	58
Tabela 4.5 – Faixa de valores para o comprimento do pistão.	60
Tabela 4.6 – Assimetria, curtose e desvio padrão da frequência.	71
Tabela 4.7 – Assimetria, curtose e desvio padrão do comprimento da bolha.	71
Tabela 4.8 – Assimetria, curtose e desvio padrão do comprimento do pistão.	71
Tabela 4.9 – Assimetria, curtose e desvio padrão da velocidade de translação.	71
Tabela 4.10–Parâmetros do escoamento em golfadas e suas distribuições.	73
Tabela 4.11–Correlações propostas para os parâmetros do escoamento bifásico de líquido e gás no escoamento descendente em golfadas.	73
Tabela B.1 – Incertezas relativas das variáveis da bancada experimental.	87
Tabela B.2 – Incertezas relativas das variáveis da bancada experimental.	87
Tabela C.1 – Parâmetros médios para a inclinação de -13°	88
Tabela C.2 – Parâmetros médios para a inclinação de -10°	89
Tabela C.3 – Parâmetros médios para a inclinação de -7°	90
Tabela C.4 – Parâmetros médios para a inclinação de -4°	91
Tabela C.5 – Parâmetros médios para a inclinação de 0°	92
Tabela C.6 – Desvio padrão para a inclinação de -13°	93
Tabela C.7 – Desvios padrão para a inclinação de -10°	93
Tabela C.8 – Desvios padrão para a inclinação de -7°	94
Tabela C.9 – Desvios padrão para a inclinação de -4°	95
Tabela C.10–Desvios padrão para a inclinação de 0°	96

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de seção transversal do tubo	$[m^2]$
A_{LB}	área de líquido na região da bolha	$[m^2]$
C	coeficiente de descarga	$[-]$
C_0	coeficiente médio do movimento da bolha	$[m/s]$
C_∞	coeficiente da velocidade de deslizamento	$[m/s]$
D	diâmetro interno do tubo	$[m]$
d_A	distância de alcance da câmara	$[m]$
Eu	número de Eötvös	$[-]$
f	frequência de passagem da célula unitária	$[1/s]$
F_B	força de empuxo	$[N]$
F_D	força de arrasto	$[N]$
F_W	força peso	$[N]$
Fr_J	número de Froude da mistura	$[-]$
g	aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
h_g	altura de equilíbrio do gás	$[m]$
H_L	fração de líquido	$[-]$
H_{LB}	fração de líquido na região da bolha	$[-]$
H_{LS}	fração de líquido na região do pistão	$[-]$
J	velocidade superficial da mistura	$[m/s]$
J_G	velocidade superficial do gás	$[m/s]$
J_L	velocidade superficial do líquido	$[m/s]$
L	comprimento do tubo	$[m]$
L_B	comprimento da bolha	$[m]$
L_S	comprimento do pistão	$[m]$
$\dot{m}_{G,po}$	vazão mássica do gás na placa de orifício	$[kg/s]$
$\dot{m}_{G,rot}$	vazão mássica do gás no rotâmetro	$[kg/s]$
$\dot{m}_{G,st}$	vazão mássica do gás na seção de teste	$[kg/s]$
$\dot{m}_{L,st}$	vazão mássica de líquido na seção de teste	$[kg/s]$
$\dot{m}_{L,svm}$	vazão mássica de líquido no sensor	$[kg/s]$
Q	vazão volumétrica	$[kg/m^3]$
Q_G	vazão volumétrica de gás	$[kg/m^3]$
Q_L	vazão volumétrica de líquido	$[kg/m^3]$
R^2	coeficiente de correlação	$[-]$

Re	número de Reynolds	[-]
St	número de Strouhal	[-]
s	curtose	[-]
u	função indicadora de fase	[-]
V_G	velocidade do gás	[m/s]
V_{TB}	velocidade de translação da bolha alongada	[m/s]

Letras Gregas

α	fração de vazio	[-]
α_B	fração de vazio na bolha alongada	[-]
α_S	fração de vazio no pistão	[-]
γ	coeficiente de expansão	[-]
ϵ	permissividade elétrica	[F/m]
μ_L	viscosidade dinâmica do líquido	[kg/ms]
ρ_G	massa específica do gás	[kg/m ³]
$\rho_{G,rot}$	massa específica do gás no rotâmetro	[kg/m ³]
$\rho_{G,st}$	massa específica do gás na seção de teste	[kg/m ³]
ρ_L	massa específica do líquido	[kg/m ³]
$\rho_{L,st}$	massa específica do líquido na seção de teste	[kg/m ³]
θ	ângulo de inclinação do tubo	[]
Ξ	taxa de aquisição da câmeta de alta velocidade	[1/s]
σ_{LG}	tensão superficial	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Revisão do escoamento de líquido-gás descendente em golfadas .	18
2.2	Parâmetros do escoamento de líquido-gás em golfadas	20
2.2.1	Frações de líquido e de gás	21
2.2.2	Velocidades superficiais	22
2.2.3	Velocidade de translação da bolha alongada	23
2.2.3.1	Velocidade de deslizamento	23
2.2.3.2	Coeficiente médio do movimento da bolha	25
2.2.4	Frequência de passagem da célula unitária	27
2.2.5	Comprimento do pistão	29
2.3	Síntese do capítulo	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Circuito experimental	32
3.1.1	Linha de líquido	33
3.1.2	Linha de gás	33
3.1.3	Linha bifásica	34
3.1.4	Sensor de malha de eletrodos (WMS)	34
3.1.5	Câmera de alta velocidade	36
3.1.6	Seção de testes	37
3.2	Processamento dos sinais	37
3.2.1	Frequência de passagem da célula unitária	38
3.2.2	Fração de vazio da bolha e do pistão	38
3.2.3	Velocidade da bolha alongada	39
3.2.4	Comprimentos da bolha e do pistão	39
3.3	Definição da grade de testes	40
3.4	Análises estatísticas	41
3.4.1	Diagrama de caixa	41
3.4.2	Histogramas, PDFs e distribuições	41
3.4.3	Assimetria e curtose	43
3.5	Síntese do capítulo	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Mapa de escoamento	45
4.2	Repetitividade das medidas	45
4.3	Valores médios	47
4.4	Velocidade da bolha alongada	47
4.5	Frequência	55
4.6	Comprimento da bolha e do pistão	58
4.7	Frações de vazio e de líquido	59
4.8	Distribuições estatísticas	61
4.8.1	PDFs e histogramas dos parâmetros do escoamento em golfadas	61
4.8.2	PDFs comparativas da frequência, comprimentos e velocidade	64
4.9	Síntese do capítulo	72
5	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS . . .	82
A.1	Velocidade superficial de líquido	82
A.2	Velocidade superficial de gás	83
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS	86
	APÊNDICE C – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS RESULTADOS . . .	88
C.1	Valores médios dos parâmetros do escoamento em golfadas	88
C.2	Desvio padrão dos parâmetros do escoamento em golfadas	88

1 INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico se faz presente na natureza em diversas circunstâncias, como por exemplo nas atividades vulcânicas, no fluxo sanguíneo no corpo humano, nos deslizamentos de terra nas encostas de rios, nos tornados, assim como em outros fenômenos. Além disso, o escoamento multifásico é encontrado frequentemente em uma ampla gama de processos industriais, entre eles podem-se citar: sistemas de propulsão, processamento de polímeros, reatores nucleares, motores automotivos, sistemas de refrigeração.

Um caso particular de escoamento multifásico é o escoamento bifásico de líquido e gás, a maneira pela qual as fases se distribuem em uma tubulação ocasiona as diferentes configurações, denominadas padrões ou regimes de escoamento. Para lidar com os diversos padrões de escoamento bifásico tanto na natureza quanto em processos industriais, modelos físicos e matemáticos vêm sendo desenvolvidos.

Os padrões de escoamento são determinados por um grande número de fatores, tais como as vazões dos fluidos, propriedades físico-químicas, dimensões do canal de escoamento, pressão e temperatura (JULIA et al., 2013). Na Figura 1.1 são apresentados alguns padrões comumente encontrados no escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais.

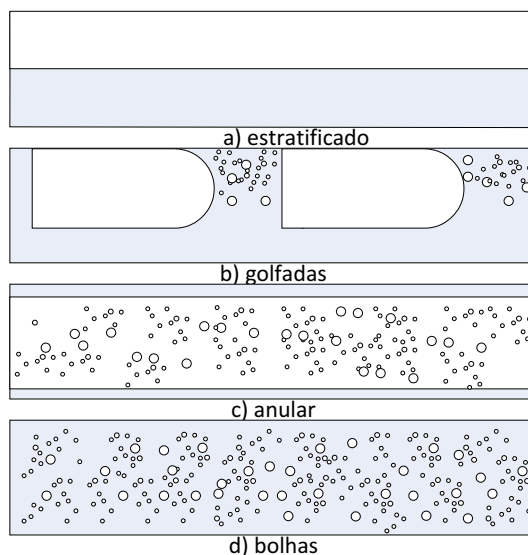


Figura 1.1 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais e verticais (adaptado de Shoham (2006)).

Para vazões relativamente baixas de gás e de líquido observa-se o escoamento estratificado (Figura 1.1-a), que devido à ação da gravidade, mantém o líquido na parte inferior e a fase gasosa na parte superior do tubo. Conforme se aumentam as vazões, pode haver transição deste escoamento para o padrão em golfadas (*slug flow*), caracterizado pelo fluxo

alternado de bolhas de gás e pistão de líquido como visto na Figura 1.1-b. Aumentando-se a vazão de gás, há a transição para o escoamento anular (Figura 1.1-c) com a fase gasosa ocupando o centro do tubo e o líquido escoando como filme na região da parede do tubo e na forma de pequenas gotículas no núcleo gasoso.

Ainda no caso horizontal, para altas vazões de gás, a fase gasosa pode se dispersar no líquido dando origem ao escoamento de bolhas discretas, movendo-se na direção do líquido, porém com velocidades diferentes. Essas bolhas podem ter formato esférico ou elipsoidal para altas vazões e são hemisféricas para baixas vazões de acordo com Crawford, Weinberger e Weisman (1985) e esquematizado na Figura 1.1-d.

Dos padrões apresentados, o escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas tem concentrado especial interesse, devido a sua complexidade e grande ocorrência em indústrias petroquímicas, mais especificamente na produção e transporte de óleo e gás conforme relatam Shemer (2003) e Al-Safran (2009).

Do ponto de vista acadêmico, estudar o escoamento em golfadas é um desafio, tanto matematicamente quanto experimentalmente, devido à dificuldade em caracterizar as estruturas do escoamento. Existem diversos estudos, numéricos e experimentais, sobre o escoamento bifásico em golfadas em dutos horizontais, verticais e com inclinação ascendente. Uma revisão sobre estes estudos pode ser encontrada em Omgba-Essama (2004) , Perez (2008) , Santos (2012) e Vicencio (2013).

Dos estudos encontrados na literatura para escoamento bifásico em golfadas, pouca atenção tem sido dada para o escoamento em dutos inclinados descendentes (JULIA et al., 2013). As inclinações dos dutos são encontradas na produção de petróleo e gás ocasionadas pela topografia do terreno. Os fenômenos físicos envolvidos neste padrão de escoamento ainda não são totalmente compreendidos, dada a complexidade envolvida na modelagem e caracterização.

1.1 Objetivos

No presente trabalho, o escoamento bifásico líquido-gás em golfadas em dutos inclinados foi caracterizado experimentalmente para diferentes combinações de vazões de líquido e gás. O estudo foi desenvolvido para o escoamento intermitente descendente em tubulações com angulações de 0° , -4° , -7° , -10° e -13° .

Os parâmetros característicos do escoamento bifásico intermitente, no padrão em golfadas, foram monitorados utilizando o sensor de malha de eletrodos (*wire mesh sensor*) sendo eles: a velocidade de translação da bolha alongada (V_{TB}), a frequência de passagem da célula unitária (f), o comprimento do pistão (L_S), o comprimento da bolha alongada (L_B) e a fração de vazio na região da bolha alongada (α_B).

De posse dos dados experimentais, os resultados foram analisados tanto para valores médios quanto para suas distribuições estatísticas, e a partir destas informações pode-se

associar o comportamento do escoamento e fenômenos físicos envolvidos buscando com isto a caracterização do escoamento.

1.2 Justificativa

O transporte de petróleo geralmente envolve o escoamento simultâneo de água-óleo-gás em tubulações, que na maioria dos projetos de engenharia são aproximados como o escoamento bifásico de líquido-gás (onde a fase líquida é composta por água e óleo). Assim, a compreensão da dinâmica deste tipo de escoamento é determinante para o projeto e construção de linhas de produção, principalmente em operações em águas profundas (BAKER, 1998).

O escoamento de óleo e gás ao longo das linhas de produção, em geral, ocorre no padrão em golfadas (Spedding et al. (1998), Lioumbas, Kolimenos e Paras (2009), Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003)). Neste tipo de escoamento, entender a dinâmica da passagem das golfadas é determinante para o desenvolvimento de modelos matemáticos, assim como para o dimensionamento de dutos e equipamentos utilizados em operações de produção de petróleo (Prasser, Scholz e Zippe (2001)).

Devido à alta intermitência do escoamento em golfadas, grandes quedas de pressão e elevadas vazões estão presentes, o que pode comprometer toda a estrutura física envolvida nas instalações típicas da produção de óleo e gás em águas profundas. Ainda, segundo Gopal, Kaul e Jepson (1995), o escoamento em golfadas aumenta os efeitos de corrosão-erosão no ambiente interno da tubulação.

Portanto, a compreensão da evolução das estruturas deste tipo de escoamento visa projetar sistemas com maior eficiência e segurança. Pothof e Clemens (2011) relatam que em uma tubulação para transporte de líquido a presença de ar pode trazer muitos problemas como vibração nos equipamentos, elevação súbita de pressão e diminuição da capacidade de transporte de líquido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados ao escoamento em golfadas em tubulações, além de abordar estudos existentes na literatura.

2.1 Revisão do escoamento de líquido-gás descendente em golfadas

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos existentes encontrados na literatura sobre o tema do escoamento bifásico em golfadas, com foco nos estudos experimentais de escoamentos descendentes.

Para medição da fração de vazio e queda de pressão, Yamazaki e Yamaguchi (1979) realizaram experimentos em um tubo vertical de 2 m de comprimento e diâmetro interno de 25 mm com escoamento descendente de ar e água. Eles observaram que para o caso do escoamento descendente, a faixa de vazões de líquido e gás, onde ocorre os padrões de escoamento em golfadas e em bolhas dispersas diminuiu. Já a faixa de vazões para o padrão de escoamento descendente anular aumentou, quando comparada à ocorrência deste padrão no caso do escoamento ascendente.

Barnea, Shoham e Taitel (1982) desenvolveram um estudo experimental do escoamento bifásico (água-ar) descendente em tubulações com inclinação de -90° . O objetivo do estudo desenvolvido foi a identificação visual dos padrões de escoamento e a análise da presença das fases, a partir dos sinais obtidos por sensores resistivos. Os autores afirmaram que a mudança na inclinação do escoamento na direção descendente, aumentou a faixa de vazões de líquido e gás para a qual ocorre o padrão estratificado. Este aumento, segundo os autores, foi devido ao efeito da gravidade que acelera o líquido e gera escoamentos com altura do filme menor no tubo. Como consequência, foram necessárias maiores vazões de gás e líquido para ocorrer a transição do escoamento estratificado para outros padrões. Os autores ainda indicaram que, diferentemente dos casos horizontal e inclinado ascendente (onde ondas se formam na interface devido à ação do gás), no caso do escoamento em golfadas em duto descendente, a geração dessas ondas ocorreu puramente devido à ação da gravidade e concluíram que a região onde ocorre o escoamento intermitente em golfadas diminuiu, conforme a inclinação na direção descendente do tubo aumentou.

Crawford, Weinberger e Weisman (1985) realizaram um estudo experimental do escoamento bifásico descendente utilizando refrigerante 113 e seu vapor, para dutos com inclinações de -15° a -30° com relação à horizontal. Os autores observaram que a região com escoamento estratificado é ampliada para uma maior faixa de vazões, e o escoamento

intermitente tem sua região diminuída. Por fim, eles apontam que há pequena variação na transição do padrão de escoamento estratificado para intermitente para os casos estudados.

Kokal e Stanislav (Kokal e Stanislav (1989a),Kokal e Stanislav (1989b)) estudaram experimentalmente o escoamento de óleo e ar em dutos com diâmetros internos de 25,8 mm, 51,2 mm e 76,3 mm; e comprimento da seção de teste igual a 25 m. Os experimentos foram realizados para ângulos de 0° , $+1^\circ$, -1° , $+5^\circ$, -5° , $+9^\circ$ e -9° . Os autores apontaram que a fração de líquido (H_L), a queda de pressão e o padrão do escoamento são variáveis importantes de se conhecer para o desenvolvimento de modelos matemáticos. Os autores afirmaram que, devido ao efeito da gravidade, no escoamento ascendente o líquido move-se com velocidades menores que no caso descendente. Observou-se que para uma mesma faixa de vazões, em alguns casos, o escoamento intermitente na direção ascendente se torna estratificado quando o escoamento ocorre na direção descendente.

Woods, Hurlburt e Hanratty (2000) estudaram o efeito de pequenas inclinações (-0.2° , -0.5° e -0.8°) no mecanismo de formação das golfadas. Os autores observaram que com o aumento da inclinação são necessárias maiores vazões de líquido para gerar o escoamento em golfadas e conforme houve o aumento da vazão de gás, em condições fixas de vazão de líquido, menor era o efeito da inclinação sobre a transição para outros padrões de escoamento. Este fenômeno ocorreu, segundo os autores, devido ao efeito da inércia ser maior que o efeito gravitacional.

Roitberg, Shemer e Barnea (2006) desenvolveram um estudo experimental para o escoamento de água e ar em um duto transparente de 10 m de comprimento e diâmetro interno de 24 mm. Os experimentos foram realizados para o escoamento em dutos com inclinações de -1° , -5° , -10° , -30° e -50° . A velocidade superficial de líquido (J_L) variou entre 0,01 e 0,5 m/s, e a velocidade superficial de gás (J_G) entre 0,1 e 5 m/s. Eles utilizaram um boroscópio conectado a uma câmera para a visualização do escoamento. Os autores observaram que quando se trabalha com vazões baixas, tanto para o gás quanto para o líquido, o escoamento bifásico é estratificado nos casos horizontal e inclinado descendente. A transição do padrão de escoamento depende fortemente da espessura e forma do filme de líquido.

Para analisar a transição do escoamento bifásico estratificado suave para ondulado, Lioumbas, Mouza e Paras (2006) utilizou aditivos surfactantes na estrutura interfacial para o escoamento em golfadas com inclinações de -1° e -8° . A técnica de anemometria laser Doppler(LDA) foi utilizada para investigar a estrutura do escoamento e a altura da camada de líquido. Os autores afirmaram que, em uma região próxima à interface, a tensão de cisalhamento do gás influencia pouco no campo de velocidades do líquido, tendo como resultado a velocidade média axial do líquido menor do que se esperava. Lioumbas, Kolimenos e Paras (2009) verificaram que a presença dos aditivos no escoamento afeta uma gama de fenômenos como estabilidade, transição para turbulência, coalescência de bolhas e redução da queda de pressão e do arrasto.

O escoamento descendente de líquido e gás em tubos inclinados (-1° , -2.5° , -5° e -7.5°), com diâmetro interno de 24 mm e 10 m de comprimento, foi estudado por Roitberg, Shemer e Barnea (2008) utilizando o sensor de malha de eletrodos (WMS). Eles observaram uma região onde a distribuição das fases é caracterizada pela presença de líquido na parte superior do tubo, indicando que o nariz da bolha alongada está ‘descolada’ da parte superior do tubo. Afirmaram ainda que o ângulo de inclinação afeta principalmente o comprimento da bolha, enquanto o comprimento do pistão permanece insensível à variação do ângulo de inclinação. Os autores concluem que os comprimentos da bolha e do pistão aumentam quando há o aumento da vazão de gás.

Recentemente, Tzotzi et al. (2010) investigaram os efeitos da massa específica do gás e tensão superficial na transição do padrão de escoamento. Os experimentos foram realizados em tubo horizontal e inclinado (0° , -0.25° e -1°) com escoamento descendente. Foram utilizados hélio e gás carbônico para a fase gasosa e butanol em solução aquosa para a fase líquida. O tubo utilizado era de 12,75 m de comprimento e diâmetro interno de 24 mm. Os autores apontaram que a dependência das transições com a massa específica do gás confirma que o transporte de quantidade de movimento da fase gasosa para a líquida é o principal mecanismo de desestabilização na interface líquido-gás. Assim, os autores observaram que para o caso do escoamento descendente: a) com vazões baixas de gás, o efeito da gravidade diminui a altura do filme de líquido e aumenta a velocidade do líquido, enquanto que b) em altas vazões de gás, o filme líquido é acelerado pelas tensões de cisalhamento que aumentam na interface líquido-gás.

2.2 Parâmetros do escoamento de liquido-gás em golfadas

A célula unitária é um conceito introduzido por Wallis (1969) para analisar o escoamento em golfadas. Na Figura 2.1 é apresentado um desenho esquemático da célula unitária e alguns parâmetros que caracterizam a golfada. Nesta figura, L_S é o comprimento do pistão, L_B o comprimento da bolha, V_{TB} é a velocidade de translação da bolha alongada e H_{LS} e H_{LB} são respectivamente as frações de líquido na região do pistão e da bolha.

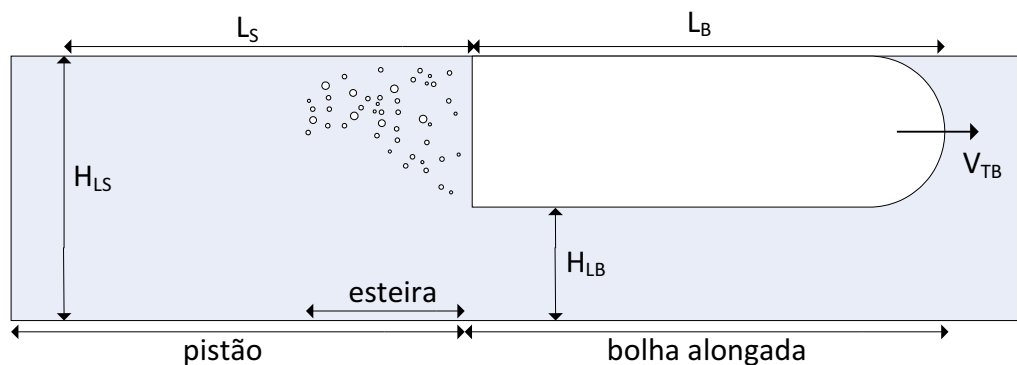


Figura 2.1 – Célula unitária com parâmetros característicos.

O conceito de célula unitária foi utilizado também por Dukler e Hubbard (1975), baseados na hipótese de que o escoamento pode ser descrito como uma sequência de células unitárias escoando à velocidade de translação constante. Nota-se duas regiões características, a saber: a) a bolha alongada e b) o pistão, como pode ser visto na Figura 2.1.

O pistão é composto em sua maior parte por líquido, podendo ou não conter bolhas de gás dispersas formando a chamada região de esteira. Já na região da bolha alongada, observa-se uma separação de fases completa, com a bolha escoando sobre um filme de líquido que, em muitos modelos, é considerado livre de gás disperso.

O mecanismo responsável pela presença de pequenas bolhas dispersas no pistão não está totalmente compreendido. O que geralmente é aceito na literatura é que há troca de gás entre a bolha alongada e o pistão, isto é, bolhas se desprendem da traseira da bolha de Taylor e se dispersam no pistão (Andreussi e Bendiksen (1989) , Hout, Shemer e Barnea (1992)).

Estudos encontrados na literatura relacionam os parâmetros da célula unitária no escoamento em golfadas com números adimensionais no intuito de caracterizá-los e associá-los a fenômenos conhecidos. Os números adimensionais mais utilizados são: número de Reynolds, Froude e Eötvös que estão definidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Números adimensionais relacionados ao escoamento bifásico

Número adimensional	Símbolo	Definição	Representação
Reynolds	Re	$\text{Re}_J = \frac{\rho_L J D}{\mu_L}$	Razão entre forças de inércia e forças viscosas
Froude	Fr	$\text{Fr}_J = \frac{J}{\sqrt{gD}}$	Razão entre forças de inércia e forças gravitacionais
Eötvös	Eo	$\text{Re}_J = \frac{\rho_L J D}{\mu_L}$	Razão entre forças de empuxo e tensão superficial

2.2.1 Frações de líquido e de gás

A fração de líquido H_L é dada pela fração de área ocupada pela fase líquida, da mesma maneira a fração de vazio α corresponde à fração de área ocupado pela fase gasosa. Definem-se então as frações de líquido como a razão entre a área do líquido e a área A da seção transversal da tubulação. A fração de líquido na região da bolha H_{LB} é então escrita como:

$$H_{LB} = 1 - \alpha_B = \frac{A_{LB}}{A} \quad (2.1)$$

onde α_B e A_{LB} são, respectivamente, a fração de vazio e a área do líquido na região da bolha. De maneira similar, a fração de líquido na região do pistão H_{LS} é dada por:

$$H_{LS} = 1 - \alpha_S = \frac{A_{LS}}{A} \quad (2.2)$$

onde α_B e A_{LB} são, respectivamente, a fração de vazio e a área do líquido na região do pistão

Barnea e Brauner (1985) propuseram um modelo para estimar a fração de líquido, considerando haver gás disperso no pistão na mesma quantidade que o escoamento no padrão de bolhas dispersas. Esta hipótese para estimar a fração de líquido está adequada, segundo os autores, no limite da transição de bolhas dispersas para golfadas no escoamento horizontal.

Andreussi, Bendiksen e Nydal (1993) realizaram experimentos com escoamento de água e ar em dutos horizontais com diâmetros internos de 31 mm e 53 mm respectivamente. Utilizando um sensor capacitivo para medição da fração de líquido e um sensor óptico para a medição da fração de vazio, dois tipos de pistões foram observados: a) os regulares, onde é possível distinguir uma região de mistura com fração de vazio praticamente constante; b) os aerados e mais curtos, classificados por Nydal, Pintus e Andreussi (1992) como pistões em desenvolvimento, onde não é possível detectar região com fração de vazio constante. Observou-se ainda que nesses experimentos as bolhas alongadas aparecem centradas e não na parte superior do tubo, assemelhando-se ao escoamento anular.

2.2.2 Velocidades superficiais

A definição dos padrões de escoamento é um problema central na análise de escoamento bifásico. As velocidades superficiais de gás e de líquido podem ser utilizadas como coordenadas dos eixos de mapas de escoamento que classificam os diversos padrões existentes.

Caso cada fase escoasse individualmente em uma tubulação, as velocidades superficiais de líquido e de gás seriam as velocidades médias que cada fase teria. Assim, podem-se definir as velocidades superficiais como a razão entre a vazão volumétrica Q de cada fase e a área de seção transversal A da tubulação. Dessa forma, para o líquido pode-se escrever

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.3)$$

e da mesma forma para o gás

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.4)$$

Ainda, pode-se definir uma velocidade superficial de mistura, em que esta é a soma das velocidades superficiais de líquido (Equação (2.3)) e de gás (Equação (2.4)).

$$J = J_L + J_G \quad (2.5)$$

2.2.3 Velocidade de translação da bolha alongada

A bolha alongada do escoamento em golfadas transporta a maior parte do gás na célula unitária, logo um estudo preciso requer informações sobre a hidrodinâmica dessas bolhas, e em particular, a sua velocidade de translação. Muitos pesquisadores realizaram investigações teóricas e experimentais para obter dados sobre a velocidade de translação para diferentes configurações de escoamento. Uma referência bastante utilizada na literatura para calcular a velocidade translacional da bolha alongada foi desenvolvida por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) como mostra a Equação (2.6)

$$V_{TB} = C_0 J + V_D \quad (2.6)$$

Nesta equação, C_0 é o coeficiente médio do movimento da bolha e V_D é a velocidade de deslizamento. Os valores de C_0 e V_D dependem das condições do escoamento. A conservação da massa impõe a relação linear na Equação (2.6) segundo Weber (1981). A velocidade, como pode-se observar, é composta de dois termos, o primeiro representando o escoamento de líquido à frente da bolha alongada, e o segundo a velocidade induzida pelo empuxo que resulta na propagação das bolhas (Alves, Shoham e Taitel (1993))

Nas seções subsequentes serão descritos os métodos teóricos e experimentais encontrados na literatura para determinar os termos da Equação (2.6).

2.2.3.1 Velocidade de deslizamento

Davies e Taylor (1950) realizaram testes para o escoamento vertical ascendente utilizando como fluidos nitrobenzeno e água. O objetivo era determinar a velocidade de propagação da bolha que se forma quando líquido é drenado em um tubo cheio e fechado no topo. Considerando que escoamento é potencial ao redor do nariz da bolha, os autores estabeleceram uma expressão para a velocidade de deslizamento dada por:

$$V_D = C_\infty \sqrt{gD} \quad (2.7)$$

Para determinar C_∞ foi utilizada uma solução em série para o potencial de velocidade. Nesta análise, os autores mantiveram apenas o primeiro termo da expansão em série, resultando no valor de 0,328 para o coeficiente C_∞ . Nos experimentos foram determinadas faixas de valores para C_∞ de acordo com os diâmetros utilizados, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados comparativos de Davies e Taylor (1950)

D (mm)	C_∞	Erro relativo(%)
0,0123	0,283-0,290	12,5
0,0216	0,316-0,330	1,5
0,0794	0,330-0,346	3

Verifica-se que, nos experimentos de Davies e Taylor (1950), os resultados com diâmetros maiores estão mais próximos da análise teórica (potencial de velocidade). Ainda assim, de acordo com Fabre e Liné (1992), o valor teórico calculado está subestimado porque foi utilizado apenas o primeiro termo da expansão em série da análise do escoamento potencial.

Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) analisaram o escoamento em golfadas em uma tubulação vertical de 5,79 m de comprimento e 25,9 mm de diâmetro interno. Foram discutidas duas situações de escoamento: a) tubo aberto e b) tubo fechado no topo. Com o tubo aberto, a bolha se expande devido à mudança de pressão hidrostática e conforme há essa expansão, o líquido à frente tem acréscimo de velocidade, e a bolha então se desloca segundo a Equação (2.6). Quando o tubo está fechado, a bolha se desloca de acordo com a Equação (2.7). Com estas considerações e a partir de dados experimentais, os autores chegaram a um valor de 0,35 para C_∞ .

Zukoski (1966) desenvolveu um estudo experimental com a finalidade de avaliar a influência do ângulo de inclinação, da tensão superficial e da viscosidade na velocidade de deslizamento. O resultado é mostrado na Figura 2.2, onde pode ser observada a relação entre a velocidade de deslizamento normalizada e o número de Eötvös para o escoamento em dutos horizontais, inclinados (45°) e verticais. Zukoski (1966) observou que a velocidade de deslizamento aumenta, para o escoamento horizontal e inclinado, com a diminuição de $4/Eo$, enquanto que no caso vertical ela tende a um valor constante para baixos $4/Eo$.

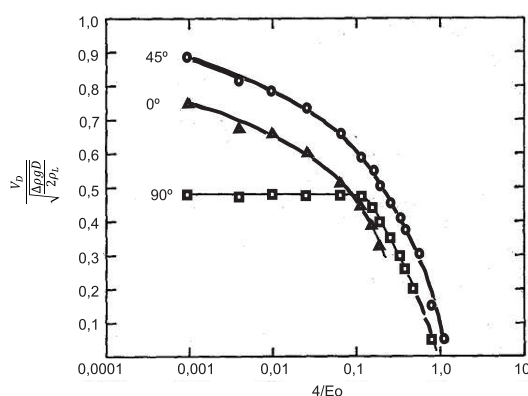


Figura 2.2 – Velocidade de deslizamento em relação ao número de Eötvös.

Uma possível explicação para o comportamento da velocidade de deslizamento observado por Zukoski (1966), segundo Shoham (2006), é devido a relação do efeito gravitacional

e o escoamento de líquido no entorno da bolha alongada. O efeito gravitacional primeiro aumenta e depois diminui conforme o ângulo de inclinação muda da posição vertical para a horizontal, atingindo um máximo entre 30° e 50° Alves, Shoham e Taitel (1993). Então a velocidade de deslizamento possui maior valor no caso horizontal do que no caso vertical.

Benjamin (1968) em uma análise teórica do escoamento potencial para determinar a velocidade de deslizamento da bolha em uma cavidade horizontal cheia de líquido, aberta em uma extremidade, encontrou um coeficiente C_∞ igual a 0,54. Este valor encontrado por Benjamin (1968) está de acordo com os dados experimentais de Zukoski (1966) e Bendiksen (1984).

Weber (1981) desenvolveu um critério para ausência do movimento da bolha em tubos horizontais em função do ângulo de contato e do número de Eötvös. Para atender a este critério, o nariz da bolha deve estar localizado próximo à parede superior do tubo, e a parede acima da interface líquido-gás não é molhada, com o ângulo de contato atingindo 90°. Neste estudo, ficou estabelecido o valor crítico do número de Eötvös igual a 12, isto é, abaixo deste valor não há drenagem no tubo. Em sua análise, o autor comparou os dados experimentais de Zukoski (1966) e propôs uma relação de C_∞ como se segue:

$$C_\infty = 0,54 - 1,76Eo^{-0,56} \quad (2.8)$$

Bendiksen (1984) desenvolveu um estudo experimental para monitorar a velocidade da bolha alongada em tubulações inclinadas (−90° a 90°) utilizando sensores ópticos. O autor propôs um modelo para quantificar a relação entre o movimento da bolha e a inclinação do tubo, assim como a relação com os números de Reynolds e Froude. Utilizando o número de Froude baseado na velocidade superficial da mistura Fr_J , verificou que a transição ocorre a um valor crítico de 3,5. Este fato indicou, segundo o autor, que a mudança do coeficiente C_∞ para Fr_J maior ou igual a 3,5 refletiu no comportamento do nariz da bolha, que se moveu da parte superior do tubo para um ponto próximo a linha de centro, indicando que o efeito inercial superou o efeito do empuxo.

$$C_\infty = \begin{cases} 0,54\cos\theta + 0,35\sin\theta & \text{para } Fr_J < 3,5 \\ 0,35\sin\theta & \text{para } Fr_J \geq 3,5 \end{cases} \quad (2.9)$$

2.2.3.2 Coeficiente médio do movimento da bolha

O parâmetro C_0 na Equação (2.6) representa a distribuição do perfil de velocidades do líquido e pode ser aproximado como a razão entre a velocidade máxima e média do líquido escoando à frente da bolha.

Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) sugerem um valor para C_0 de 1,2 considerando escoamento turbulento completamente desenvolvido, porém este valor pode variar para baixos números de Reynolds de mistura ($Re < 8000$).

Dukler, Maron e Brauner (1985), utilizando uma análise de camada limite no escoamento em golfadas, assumem que a hidrodinâmica à frente do pistão se assemelha ao escoamento turbulento em um duto com expansão abrupta. A partir dessa análise eles chegam a uma expressão para o coeficiente médio apresentada na Equação (2.10)

$$C_0 = \frac{(2n + 1)(n + 1)}{2n^2} \quad (2.10)$$

e admitindo um perfil de potência um sétimo ($n=7$) para escoamento turbulento, chega-se a um valor de 1,225 para C_0 .

Posteriormente, Bendiksen (1984) estabeleceu experimentalmente valores para o coeficiente médio:

$$C_0 = \left\{ \begin{array}{ll} 1,05 + 0,15 \operatorname{sen}^2 \theta & \text{para } Fr_J < 3,5 \\ 1,2 & \text{para } Fr_J \geq 3,5 \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

A distribuição dos parâmetros característicos do escoamento bifásico em golfadas foi estudada para diferentes diâmetros de tubulações e condições de entrada no estudo experimental desenvolvido por Nydal, Pintus e Andreussi (1992). As faixas de velocidades superficiais estudadas foram de $J_L = 0,6$ a $3,5$ m/s e $J_G = 0,5$ a 20 m/s. Eles encontraram valores de C_0 variando entre 1,2 e 1,3. Possíveis explicações para as divergências entre os valores encontrados podem ocorrer devido ao perfil de velocidades na região da cauda e nariz do pistão ser modificado pela presença de bolhas dispersas.

Na Tabela 2.3 apresenta-se um resumo dos valores ou relações para C_0 e C_∞ dos principais resultados na literatura.

Tabela 2.3 – Resumo dos parâmetros C_0 e C_∞

Autor	D (mm)	C_0	C_∞
Davies e Taylor (1950)	-	-	0,35
Benjamin (1968)	-	-	0,54
Gregory e Scott (1969)	19	1,35	-
Nicholson, Aziz e Gregory (1978)	25 e 51	1,196 e 1,128	0,538 e 0,396
Weber (1981)	5 e 178	-	$0,54 - 1,76 Eo^{-0,56}$
Bendiksen (1984)	50	$1,05 + 0,15 \operatorname{sen}^2 \theta$ 1,2	$0,54 \cos \theta + 0,35 \operatorname{sen} \theta$ $0,35 \operatorname{sen} \theta$

2.2.4 Frequência de passagem da célula unitária

Determinar a frequência da célula unitária é de fundamental importância tanto para fornecer dados de entrada em modelos matemáticos quanto para aplicações práticas, dado que as golfadas provocam vibrações que podem vir a causar danos nas instalações (tubulações, bombas, separadores, etc.). Greskovich e Shrier (1972) mostraram que o modelo de Dukler e Hubbard (1975) pode ser utilizado com boa aproximação para estimar a queda de pressão no escoamento em golfadas; neste modelo a queda de pressão é diretamente proporcional à frequência de passagem das células unitárias. Portanto, possíveis erros na determinação da frequência são refletidos diretamente nos cálculos da queda de pressão.

Como a natureza do escoamento em golfadas é instável, no espaço e no tempo, os primeiros modelos para estimar a frequência são de origem empírica (Gregory e Scott (1969); Greskovich e Shrier (1972); Heywood e Richardson (1979); Zabaras (2000), entre outros). Porém, existem também modelos para determinar a frequência a partir de análises teóricas aproximadas (Taitel e Dukler (1977); Tronconi (1990)).

Gregory e Scott (1969) estudaram experimentalmente o escoamento de água e dióxido de carbono em uma tubulação de 19 mm de diâmetro interno e a seção de teste localizada a 5,7 m do misturador. A partir dos resultados obtidos, eles identificaram que a frequência de passagem das golfadas está relacionada à velocidade superficial das fases e ao diâmetro da tubulação. Os autores propuseram uma expressão para calcular a frequência dada pela Equação (2.12):

$$f = 0,0226 \left[\left(\frac{J_L}{gD} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} \quad (2.12)$$

Greskovich e Shrier (1972) observaram discrepâncias nos valores da frequência de Gregory e Scott (1969) para grandes diâmetros. Os autores realizaram experimentos em tubulações horizontais, para o escoamento de líquido e gás em golfadas, com os diâmetros e fluidos de acordo com a Tabela 2.4. Para melhorar a previsão dos dados para a frequência para diâmetros maiores, sugeriram o uso de um gráfico apresentado em seu trabalho. Então, os autores rearranjaram a expressão proposta por Gregory e Scott (1969) em função do número de Froude da mistura e propuseram a Equação (2.13):

$$f = 0,0226 \left[\left(\frac{J_L}{J} \right) \frac{2,02}{D} + Fr_J^2 \right]^{1,2} \quad (2.13)$$

Taitel e Dukler (1977) apresentaram um modelo preditivo para frequência, considerando a formação da golfada por ondas instáveis que crescem sobre um filme estratificado que bloqueia a passagem de gás e gera a golfada. Os autores consideram que a frequência da golfada é o inverso do tempo necessário para reconstruir o nível de equilíbrio do filme. Para isso, desenvolveram uma análise para o escoamento transiente unidimensional em canal

Tabela 2.4 – Condições do experimento de Greskovich e Shrier (1972)

Fluidos	D (mm)
água e ar	38,1 e 152,4
querosene e nitrogênio	152,4

aberto, de modo a calcular o tempo característico nesse processo. Segundo Tronconi (1990) há uma contradição neste modelo, pois na equação da conservação da quantidade de movimento para o gás, os autores desconsideraram o termo devido ao efeito Bernoulli que descreve a formação das ondas instáveis, sendo justamente as precursoras das golfadas.

Utilizando a técnica de absorção de raios γ para a detecção das fases do escoamento de água e ar em um tubo de 42 mm de diâmetro interno e seção de teste com 6,57 m de comprimento, Heywood e Richardson (1979) determinaram a função densidade espectral de potência (PSD) da fração de vazio. Assim, eles puderam estimar a frequência média como o valor máximo da função PSD e propuseram duas relações similares à de Gregory e Scott (1969):

$$f = 0,0434 \left[\left(\frac{J_L}{J} \right) \frac{2,02}{D} + Fr_J^2 \right]^{1,02} \quad (2.14)$$

$$f = 0,0364 \left[\left(\frac{J_L}{J} \right) \frac{2,02}{D} + Fr_J^2 \right]^{1,08} . \quad (2.15)$$

As duas correlações apresentadas nas Equação (2.14) e Equação (2.15) por Heywood e Richardson (1979) tem coeficiente de correlação de 0,958 e 0,967 respectivamente.

Tronconi (1990) fez uma análise teórica do escoamento invíscido bidimensional não linear em um canal retangular para determinar a frequência da golfada, relacionando-a às propriedades da evolução das ondas instáveis na região de entrada do escoamento. Assim, o autor propôs a seguinte relação para o cálculo da frequência:

$$f = 0,61 \left(\frac{\rho_G V_G}{\rho_L h_G} \right) \quad (2.16)$$

onde V_G é a velocidade do gás h_G é a altura de equilíbrio do gás, parâmetros que na análise de Tronconi (1990) estão relacionados.

Zabaras (2000) desenvolveu um estudo experimental para o escoamento de água - ar e água - óleo em tubulações com ângulo variando de 0° a 11° e de diâmetros internos de 25,4 e 203,2 mm. Após a análise dos dados experimentais, o autor propôs a seguinte relação para a frequência da célula unitária:

$$f = 0,0226 \left[\left(\frac{J_L}{gD} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} 0,836 + 2,75 \sin^{0,25} \theta \quad (2.17)$$

Recentemente, Antunes et al. (2014) mostraram uma grande discrepância entre os diversos modelos existentes na literatura para o cálculo da frequência. Estes erros mostram que os modelos são adequados apenas para as condições nas quais foram desenvolvidos, tornando difícil a extensão e comparação com outros dados para estimar a frequência. Então, a determinação da frequência do escoamento em golfadas é um assunto que está em aberto na literatura especializada.

2.2.5 Comprimento do pistão

Vicencio (2013) afirma que o valor máximo do comprimento do pistão é uma informação essencial para o projeto dos separadores de gás-líquido. Devido à complexidade do escoamento na traseira das bolhas alongadas, é difícil determinar o comprimento do pistão líquido, havendo pouca informação disponível para determinar esse comprimento. Há, porém, modelos que estimam o comprimento do pistão em função da coalescência das bolhas alongadas.

No modelo de Dukler e Hubbard (1975), o comprimento do pistão do escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas em uma tubulação horizontal está entre 12 e 20 vezes o diâmetro do tubo. Valores que independem, segundo os autores, das vazões e das propriedades dos fluidos.

Maron, Yacoub e Brauner (1982) estabeleceram um modelo para estimar o comprimento e a fração de líquido do pistão, para uma frequência conhecida, que se baseia no conceito de distorção periódica da camada limite na parede à frente do pistão. Ainda neste modelo, consideram um processo de recuperação da camada limite na traseira do pistão. No caso de pistões aerados, os autores assumiram que há separação das bolhas de gás devido ao empuxo na traseira do pistão. Maron, Yacoub e Brauner (1982) apontaram que o comprimento do pistão tende a se estabilizar em condições de fração de líquido tendendo a 1 e baixa queda de pressão.

Dukler, Maron e Brauner (1985) propuseram um modelo para explicar os mecanismos físicos associados à estabilização do comprimento do pistão, definindo que o menor comprimento estável do pistão é aquele requerido para o estabelecimento do perfil de velocidades completamente desenvolvido na região da traseira do pistão. Os autores identificaram, a partir do modelo desenvolvido e comparado contra dados experimentais, que o comprimento do pistão está entre 18 e 30 D (escoamento vertical) e entre 12 e 24 D (escoamento horizontal).

Hout, Shemer e Barnea (1992) realizaram experimentos utilizando sensores ópticos para medição da fração de vazio, que é baseada na diferença do coeficiente de refração de água e ar. Os sinais binários dos dois sensores ópticos foram processados para extrair:

- distribuição espacial da fração de vazio,
- comprimento médio do pistão e da bolha,

- distribuição estatística dos comprimentos, e
- forma da bolha de Taylor.

Neste estudo, apenas bolhas maiores que o diâmetro da tubulação foram consideradas bolhas de Taylor. Hout, Shemer e Barnea (1992) observaram que o comprimento médio do pistão varia entre 15 e 19 vezes o diâmetro da tubulação com desvio padrão de 30%; e para altas velocidades de mistura o histograma da distribuição é mais achatado com desvio padrão de 40%.

Um modelo que possibilita o cálculo da distribuição do comprimento do pistão em várias posições da tubulação foi desenvolvido por Barnea e Taitel (1993). Como o comprimento do pistão e a frequência são propriedades relacionadas, pistões com baixa frequência são longos e se propagam pelo duto, enquanto pistões de alta frequência são curtos e tendem a ser instáveis. Estes pistões mais curtos são instáveis devido ao derramamento maior de líquido. No modelo é considerado que o processo de coalescência termina quando o pistão é suficientemente grande para que o perfil de velocidades esteja estabelecido na traseira, havendo assim um comprimento mínimo para estabilidade dos pistões, valor este que está entre 1,5 e 3 vezes o diâmetro do tubo, segundo os autores.

Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003) realizaram experimentos do escoamento em golfadas de líquido-gás em um tubo horizontal com 12 m de comprimento e diâmetros de 40 e 60 mm respectivamente. A faixa de velocidades superficiais foi de 0,3-4,0 m/s para o gás e 0,6-3,0 m/s para o líquido. A dificuldade da medição e da previsão do comprimento do pistão é apontada pelos autores, que encontraram um desvio padrão de 60% para este comprimento.

2.3 Síntese do capítulo

Nesta revisão observou-se que existem relativamente poucos trabalhos sobre escoamentos descendentes de líquido-gás em dutos inclinados. Dos trabalhos existentes, foi verificado que se concentram na análise do comportamento e na transição de alguns padrões, e focam na análise de um ou outro parâmetro do escoamento em golfadas.

Algumas observações foram recorrentes na literatura sobre o escoamento bifásico de líquido-gás descendente:

- há expansão das condições de vazão dos fluidos onde ocorre o padrão de escoamento estratificado,
- não se observa escoamento estratificado suave, apenas o ondulado,
- são necessárias maiores vazões de gás e de líquido para haver transição para o escoamento em golfadas,

- a fase líquida se move mais rapidamente devido à gravidade,
- o nariz da bolha descola da parte superior do tubo.

Assim, pretende-se obter resultados que permitam comparação com correlações, modelos teóricos e experimentais encontrados na literatura com o intuito de avaliar e estender a compreensão do escoamento descendente de líquido-gás em golfadas.

3 METODOLOGIA

A metodologia experimental é apresentada neste capítulo. Na primeira parte podem ser vistos detalhes do circuito experimental do NUEM/UTFPR. Na segunda parte é descrita a metodologia para obtenção de parâmetros do escoamento em golfadas utilizando o sensor de malha de eletrodos. Por fim, na terceira parte, é abordada de forma sucinta a análise estatística utilizada.

3.1 Circuito experimental

A bancada experimental possui linhas de alimentação para o líquido e para o gás, e uma linha bifásica (seção de teste) com nove metros de comprimento. O circuito possui também um sistema de monitoramento do escoamento bifásico, onde as variáveis na entrada de cada linha monofásica podem ser controladas. Um diagrama esquemático do circuito experimental é apresentado na Figura 3.1.

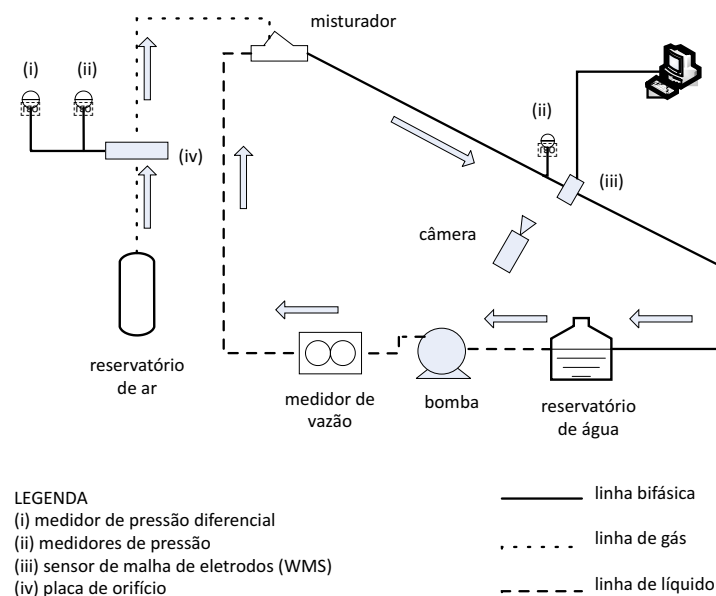


Figura 3.1 – Esquema da bancada experimental.

O funcionamento da bancada é brevemente descrito como se segue: o gás sai do reservatório de ar passando pela placa de orifício e por uma válvula agulha, onde a quantidade de gás é controlada, até chegar ao misturador. Paralelamente, o líquido é bombeado do reservatório de água passando por um medidor de vazão tipo Coriolis chegando também ao misturador. Na linha bifásica, onde são realizados os testes experimentais, os fluidos escoam passando pela caixa de visualização e pelos dois sensores de malha de eletro-

dos. Após este percurso os fluidos retornam ao reservatório de água, onde há separação gravitacional.

3.1.1 Linha de líquido

A linha de líquido possui um reservatório com capacidade de 350 litros, fornecendo o volume necessário de líquido durante o experimento. A linha dispõe também de uma bomba centrífuga da marca *Fabo* e modelo BCIE602/7822 com vazão máxima de 15000 L/h. A bomba é controlada por um inversor de frequência da marca *WEG* e modelo CFW08. Para a medição da vazão foi utilizado um sensor tipo Coriolis da marca *Micromotion* e modelo F050S11.

3.1.2 Linha de gás

Um compressor alternativo da marca *PEG* e dois vasos de pressão com capacidade de 500 e 100 litros, respectivamente, foram utilizados com o intuito de minimizar oscilações na pressão, garantindo um escoamento estável.

Na linha de gás foram instaladas três placas de orifício, com diâmetros de orifício de 1, 2 e 3,5 mm, para medir a queda de pressão. Rotâmetros da marca *Rheotest Haake* GMBH com conexões pneumáticas de engate rápido foram montados para a calibração das placas de orifício.

Os rotâmetros são especificados mediante um código correspondente a uma faixa de vazões determinada, a qual é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Faixa de vazões e identificação dos rotâmetros

Código	Identificação	Faixa de vazões (L/h)
96039	R039	272-947
96044	R044	879-3179
96049	R049	2178-8125
96057	R057	8009-29652

Como os rotâmetros usam uma escala graduada, que vai de 0 a 100 em cada um deles, a vazão medida é dada em função da calibração de fábrica e, para calcular a vazão real do gás foi utilizado um sensor de pressão e temperatura na saída dos rotâmetros.

O critério de seleção dos rotâmetros com as placas de orifício foi feito levando em consideração a faixa do sensor de pressão. Na Tabela 3.2, encontra-se a combinação das placas com os respectivos rotâmetros.

Tabela 3.2 – Combinação de rotâmetros e placas de orifício

D(mm)	Rotâmetros
1	R039
2	R044
3,5	R049

3.1.3 Linha bifásica

Um misturador une as linhas de líquido e de gás, e tem por objetivos impedir a presença de água na linha de gás e manter a vazão estável. A linha bifásica consiste de um tubo de acrílico com 25,8 mm de diâmetro interno (D) e 357 D de comprimento. O par de sensores de malha de eletrodos (WMS), utilizado para a monitoração da passagem das fases, foi instalado a 291 D. Há ainda, suportes de altura ajustável e a maior inclinação de -13° foi determinada devido à limitação física da bancada experimental.

Os medidores de vazão, pressão e temperatura são conectados a um sistema de supervisão por meio de uma rede industrial do tipo *Fieldbus Foundation* onde são controladas e monitoradas as medidas experimentais. O procedimento para a determinação das velocidades superficiais de gás e líquido está apresentado em detalhes no Apêndice A.

3.1.4 Sensor de malha de eletrodos (WMS)

Diferentes técnicas para medição e caracterização de escoamentos bifásicos vêm sendo desenvolvidas, baseadas em tomografia de raios X, absorção de raios gama, emissão de pósitrons, ressonância magnética, ultrassom, entre outras. Essas técnicas têm características variadas e diferentes focos de investigação, como mostra o estudo de Silva (2008) que aborda e compara sensores de medição no escoamento bifásico. Dentre as diversas técnicas analisadas, o autor afirma que o sensor de malha de eletrodos possui alta resolução temporal, baixo custo e simplicidade quando comparado com outros sistemas.

O sensor de malha de eletrodos é uma técnica de tomografia intrusiva que mede a distribuição da fração de vazio na seção transversal da tubulação. Os métodos intrusivos têm a vantagem de fornecer informações diretas da distribuição de fase e estão livres dos problemas de inversão (reconstrução do escoamento). Entretanto, podem introduzir perturbações no escoamento. Não obstante, a técnica provou ser uma ferramenta efetiva para fornecer dados hidrodinâmicos confiáveis (Vicencio (2013)).

O WMS utilizado no presente trabalho está esquematizado na Figura 3.2. O sensor possui dois arranjos paralelos de 12 eletrodos, onde cada eletrodo tem um diâmetro de 0,012 mm e estão separados por 2,1 mm de distância. Cada arranjo está disposto perpendicularmente entre si e distam 1,5 mm, formando assim uma grade de 12x12 eletrodos.

O funcionamento do WMS baseia-se na diferença de impedância elétrica entre as fases líquida e gasosa. Um dos arranjos é excitado eletricamente enquanto o outro funciona como

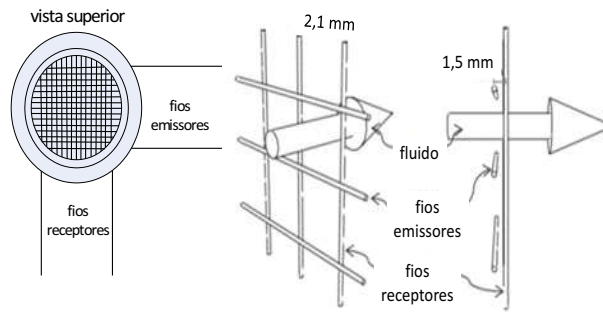


Figura 3.2 – Esquema representativo do WMS.

receptor. O sinal emitido como resposta depende então da impedância elétrica do fluido quando passa através do WMS (Roitberg, Shemer e Barnea (2008)).

A partir da medição da capacitância elétrica em cada ponto de cruzamento do WMS, pode ser aplicado o algoritmo proposto por Silva (2008) e modificado por Vicencio (2013) visando obter a série temporal dos dados. O esquema elétrico do cruzamento entre dois nós é mostrado na Figura 3.3.

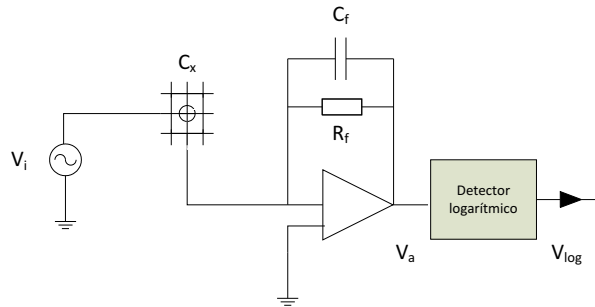


Figura 3.3 – Circuito elétrico do WMS.

Na Figura 3.3 V_i é a tensão elétrica alternada de excitação e C_x é a capacitância elétrica no cruzamento. Em sequência tem-se um amplificador, onde C_f e R_f são respectivamente a capacitância e resistência no amplificador.

Sabe-se ainda que a capacitância pode ser expressa como uma função linear da permissividade elétrica no ponto de medição (Prasser, Böttger e Zschau (1998)). Então pode-se escrever

$$V_{log} = a \ln(\epsilon_x) + b \quad (3.1)$$

onde a e b são constantes que dependem do circuito e da geometria do sensor, as quais foram determinadas para valores de referência com medições de tensão feitas com o tubo vazio V_L e com o tubo cheio de líquido V_H . Com os valores de referência, puderam ser calculadas as constantes a e b .

Assim, para um nó da malha e instante determinado, foi possível calcular a fração de vazio α_x em função das permissividades elétricas medidas e calculadas,

$$\alpha_x = \frac{\epsilon_H - \epsilon_x}{\epsilon_H - \epsilon_L} \quad (3.2)$$

Uma vez determinada a fração de vazio em um ponto da malha de eletrodos, foi necessário obter os valores para cada região correspondente aos nós do WMS. Isso foi feito aplicando-se o valor de um nó determinado a uma área contígua A_x na seção de medição. A fração de vazio média na seção de medição então é dada por:

$$\alpha(x, t) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_x A_x \quad (3.3)$$

onde n é o número de nós em uma determinada fileira.

3.1.5 Câmera de alta velocidade

A câmera utilizada (Figura 3.4) é da marca *La Vision*, modelo *Fastcam SA4*, que possui resolução de 1024x1024 *pixels*, 3600 *frames* por segundo e 32 GB de memória para armazenamento. Acoplada à câmera, uma lente AF *Micro-Nikkor* com 28 mm de distância focal também foi utilizada.



Figura 3.4 – Câmera e lente utilizadas.

A visualização da interface líquido-gás determina o ajuste do foco e domínio na câmera, e para obter o processamento das imagens utilizando o algoritmo de Amaral et al. (2013) é necessário que a frente de uma mesma bolha alongada possa ser registrada pelo menos quatro vezes na seção de filmagem da câmera.

Para estimar a velocidade da bolha alongada foi utilizada a correlação de Bendiksen (1984). Então, conhecendo-se a velocidade de translação da bolha (V_{TB}) e a distância de alcance da câmera (d_A), a taxa de aquisição (Ξ) pode ser calculada :

$$\Xi = 4 \frac{V_{TB}}{d_A} \quad (3.4)$$

3.1.6 Seção de testes

Os testes foram realizados utilizando o WMS e a câmera de alta velocidade como meio de verificação dos dados obtidos. A seção de testes foi determinada com o par de WMS a 20 cm depois da câmera. Para obter-se a velocidade da bolha alongada, apenas um WMS não é suficiente, sendo necessários dois sensores como mostrado na Figura 3.5, onde pode-se observar um esquema representativo da seção de testes.

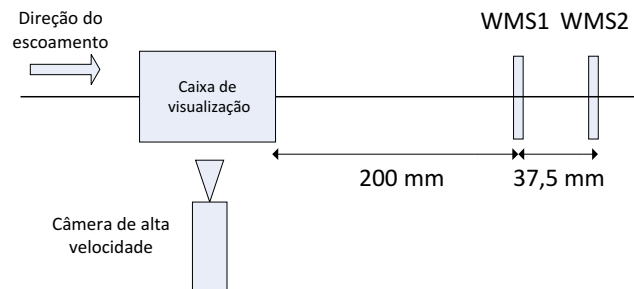


Figura 3.5 – Diagrama esquemático da seção de testes.

3.2 Processamento dos sinais

Vicencio (2013) elaborou um algoritmo para o processamento da série temporal entre os sinais de cada sensor. Com este algoritmo, os parâmetros como velocidade da bolha, frequência da célula unitária e comprimentos da bolha e do pistão podem então ser determinados. No programa *Matlab* transformou-se o sinal da fração de vazio em um sinal binário, que é influenciado pelas características do escoamento, por exemplo, a presença ou não de um pistão aerado. Na Figura 3.6, pode-se observar uma série temporal da fração de vazio já convertida do WMS para o valor médio.

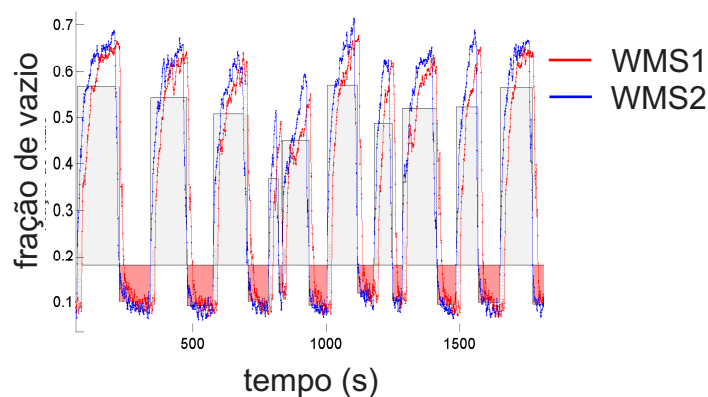


Figura 3.6 – Série temporal para o escoamento em golfadas.

Uma função binária pode ser associada a um fator de corte (FC) para identificar se um ponto da série temporal pertence à região da bolha alongada ou à região do pistão. A

função binária é análoga à função indicadora de fase proposta por Bertola (2003):

$$u(\alpha, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } \alpha > FC \\ 1 & \text{se } \alpha < FC \end{cases} \quad (3.5)$$

O fator de corte varia entre a mínima e a máxima fração de vazio de uma série temporal. Esse fator foi determinado especificamente para cada série temporal dependendo das condições de escoamento em função da aeração encontrada para cada combinação de velocidades superficiais de gás e líquido.

3.2.1 Frequência de passagem da célula unitária

Para definir a frequência de passagem da célula unitária, primeiro foi necessário determinar o período de passagem da bolha e do pistão. Conforme recomendado em Vicencio (2013), a taxa de aquisição do WMS foi fixada em 1000 e 2000 *frames* por segundo. Os períodos da bolha T_B e do pistão T_S foram então definidos assim:

$$T_B = \frac{\text{número de frames durante a passagem da bolha}}{\text{taxa de aquisição (Hz)}} \quad (3.6)$$

$$T_S = \frac{\text{número de frames durante a passagem do pistão}}{\text{taxa de aquisição (Hz)}} \quad (3.7)$$

A frequência da célula unitária pode ser escrita como o inverso do seu tempo de passagem, como expresso na Equação (3.8)

$$f = \frac{1}{T_B + T_S} \quad (3.8)$$

3.2.2 Fração de vazio da bolha e do pistão

Com o processamento da série temporal da fração de vazio são identificados as bolhas alongadas e os pistões. Então, as frações de vazio podem ser obtidas em cada região, calculando a média em função do seu período:

$$\alpha(x, t) = \frac{1}{T_B} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (3.9)$$

$$\alpha(x, t) = \frac{1}{T_S} \sum_{i=1}^m \alpha_i \quad (3.10)$$

onde n e m são os números de *frames* da passagem da bolha e do pistão, respectivamente.

3.2.3 Velocidade da bolha alongada

Como já mencionado na subseção 3.1.4, dois WMS foram utilizados com o intuito de se obter a velocidade da bolha alongada. Na Figura 3.7 tem-se um esquema para determinar a velocidade da i -ésima bolha alongada, a qual é representada por B_i , enquanto P_i representa o i -ésimo pistão.

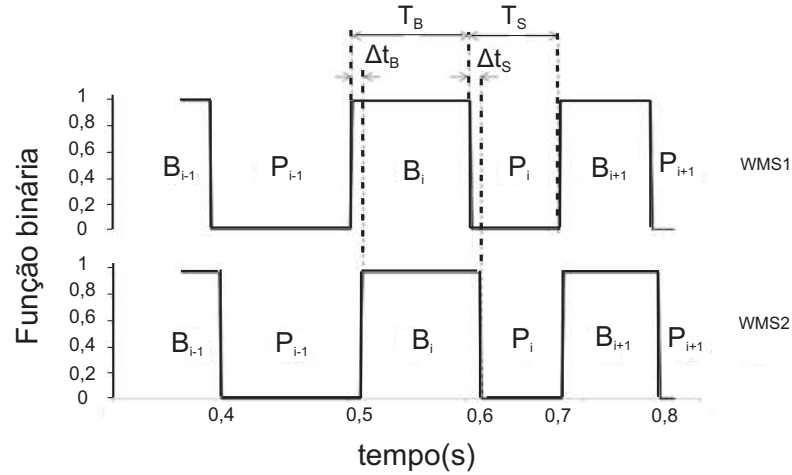


Figura 3.7 – Série temporal para o escoamento em golfadas.

Existe uma defasagem nos sinais de identificação de uma bolha e do pistão, que é medida na diferença de tempo na frente da bolha Δt_B e no começo do pistão Δt_S . É assumida a hipótese de que a célula unitária escoar com a velocidade da frente da bolha (Fabre (2003)), que é utilizada para determinação dos outros parâmetros. Calcula-se a velocidade da bolha alongada segundo a equação abaixo:

$$V_{TB} = \frac{d_{WMS}}{\Delta t_B} \quad (3.11)$$

onde d_{WMS} é a distância entre os dois sensores de malha de eletrodos.

3.2.4 Comprimentos da bolha e do pistão

Estando definida a a velocidade da bolha alongada, calcula-se então os comprimentos característicos do escoamento em golfadas. Assim, o comprimento da bolha alongada é expresso por:

$$L_B = V_{TB} T_B \quad (3.12)$$

e o comprimento do pistão:

$$L_S = V_{TB} T_S \quad (3.13)$$

3.3 Definição da grade de testes

Para estabelecer a grade de testes, começou-se pela inclinação mais elevada (-13°), testou-se as combinações de velocidades superficiais onde formavam-se as golfadas. Essa mesma metodologia foi estendida para as demais inclinações (-10° , -7° , -4° e 0°). Considerando o mapa de escoamento horizontal proposto por Vicencio (2013) foram definidas as velocidades superficiais de líquido (J_L) variando de 0,5 m/s a 2,50 m/s e as velocidades superficiais de gás (J_G) entre 0,25 m/s e 4 m/s. A grade de testes pode ser vista na Figura 3.8, onde a numeração dos pontos é apresentada da seguinte maneira: os primeiros dois dígitos identificam o ponto e os últimos dois dígitos a inclinação do tubo. Por exemplo, o ponto 13-04 corresponde ao ponto 13 na inclinação de -4° . Os traços na tabela representam pontos onde as golfadas não foram observadas experimentalmente. Pode ser verificado na Figura 3.8, que as medidas experimentais realizadas foram em um total de 130 pontos.

-13°			-10°			-7°			-4°			0°		
Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	01-00	0,5	3,00
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	02-00	0,5	4,00
--	--	--	--	--	--	--	--	--	03-04	0,75	1,75	03-00	0,75	1,75
--	--	--	--	--	--	04-07	0,75	2,25	04-04	0,75	2,25	04-00	0,75	2,25
--	--	--	--	--	--	--	--	--	05-04	0,75	2,75	05-00	0,75	2,75
--	--	--	--	--	--	06-07	1,00	1,50	06-04	1,00	1,50	06-00	1,00	1,50
--	--	--	--	--	--	07-07	1,00	2,00	07-04	1,00	2,00	07-00	1,00	2,00
--	--	--	--	--	--	08-07	1,00	2,50	08-04	1,00	2,50	08-00	1,00	2,50
--	--	--	--	--	--	--	--	--	09-04	1,00	3,00	09-00	1,00	3,00
--	--	--	--	--	--	--	--	--	10-04	1,25	0,75	10-00	1,25	0,75
--	--	--	--	--	--	11-07	1,25	1,25	11-04	1,25	1,25	11-00	1,25	1,25
12-13	1,25	1,75	12-10	1,25	1,75	12-07	1,25	1,75	12-04	1,25	1,75	12-00	1,25	1,75
--	--	--	--	--	--	13-07	1,25	2,25	13-04	1,25	2,25	13-00	1,25	2,25
--	--	--	--	--	--	--	--	--	14-04	1,25	2,75	14-00	1,25	2,75
--	--	--	--	--	--	15-07	1,50	0,50	15-04	1,50	0,50	15-00	1,50	0,50
--	--	--	--	--	--	16-07	1,50	1,00	16-04	1,50	1,00	16-00	1,50	1,00
17-13	1,50	1,50	17-10	1,50	1,50	17-07	1,50	1,50	17-04	1,50	1,50	17-00	1,50	1,50
18-13	1,50	2,00	18-10	1,50	2,00	18-07	1,50	2,00	18-04	1,50	2,00	18-00	1,50	2,00
--	--	--	19-10	1,50	2,50	19-07	1,50	2,50	19-04	1,50	2,50	19-00	1,50	2,50
--	--	--	--	--	--	--	--	--	20-04	1,50	3,00	20-00	1,50	3,00
--	--	--	--	--	--	21-07	1,75	0,25	21-04	1,75	0,25	21-00	1,75	0,25
--	--	--	22-10	1,75	0,75	22-07	1,75	0,75	22-04	1,75	0,75	22-00	1,75	0,75
23-13	1,75	1,25	23-10	1,75	1,25	23-07	1,75	1,25	23-04	1,75	1,25	23-00	1,75	1,25
24-13	1,75	1,75	24-10	1,75	1,75	24-07	1,75	1,75	24-04	1,75	1,75	24-00	1,75	1,75
--	--	--	25-10	1,75	2,25	25-07	1,75	2,25	25-04	1,75	2,25	25-00	1,75	2,25
--	--	--	--	--	--	--	--	--	26-04	1,75	2,75	26-00	1,75	2,75
--	--	--	27-10	2,00	0,50	27-07	2,00	0,50	27-04	2,00	0,50	27-00	2,00	0,50
28-13	2,00	1,00	28-10	2,00	1,00	28-07	2,00	1,00	28-04	2,00	1,00	28-00	2,00	1,00
29-13	2,00	1,50	29-10	2,00	1,50	29-07	2,00	1,50	29-04	2,00	1,50	29-00	2,00	1,50
30-13	2,00	2,00	30-10	2,00	2,00	30-07	2,00	2,00	30-04	2,00	2,00	30-00	2,00	2,00
--	--	--	--	--	--	31-07	2,25	0,25	31-04	2,25	0,25	31-00	2,25	0,25
28-13	2,25	0,75	32-10	2,25	0,75	32-07	2,25	0,75	32-04	2,25	0,75	32-00	2,25	0,75
29-13	2,25	1,25	33-10	2,25	1,25	33-07	2,25	1,25	33-04	2,25	1,25	33-00	2,25	1,25
30-13	2,25	1,75	34-10	2,25	1,75	34-07	2,25	1,75	34-04	2,25	1,75	34-00	2,25	1,75
--	--	--	--	--	--	35-07	2,50	0,50	35-04	2,50	0,50	35-00	2,50	0,50
36-13	2,50	1,00	36-10	2,50	1,00	36-07	2,50	1,00	36-04	2,50	1,00	36-00	2,50	1,00
37-13	2,50	1,50	37-10	2,50	1,50	37-07	2,50	1,50	37-04	2,50	1,50	37-00	2,50	1,50

Figura 3.8 – Pontos experimentais.

3.4 Análises estatísticas

3.4.1 Diagrama de caixa

Um diagrama de caixa (em inglês *box plot*) é utilizado para caracterizar um conjunto de dados a partir de cinco parâmetros estatísticos. Este diagrama é comumente utilizado devido à sua simplicidade e foi introduzido por Tukey (1977). As informações necessárias para construção do diagrama de caixa são:

- a) mediana (Md),
- b) quantis superior (Q_s) e inferior (Q_i),
- c) valores máximo (max) e mínimo (min).

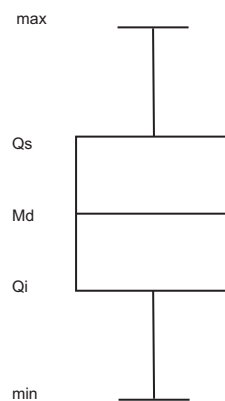


Figura 3.9 – Exemplo de um diagrama de caixa.

Os limites superior e inferior da caixa representam o percentil de 75% e 25% dos dados, portanto a caixa contém 50% do conjunto de dados. Pode existir ainda nestes diagramas, os chamados pontos discrepantes (*outliers*, em inglês), definidos por Tukey (1977) como pontos fora do intervalo:

$$[Q_s - 1,5(Q_s - Q_i); Q_s + 1,5(Q_s - Q_i)] \quad (3.14)$$

Não serão apresentados os pontos discrepantes em razão de diversos autores (Schwertman, Owens e Adnan (2004), Schwertman e Silva (2007) e Hubert e Vandervieren (2008)) utilizarem diferentes intervalos e critérios para identificá-los. Além disso, conforme Hoaglin, Iglewicz e Tukey (1986) os pontos discrepantes não são necessariamente ‘reais’, sendo pontos que diferem da maioria do conjunto, ocorrendo em distribuições estatísticas assimétricas e muito esparsas, como é o caso de algumas das distribuições aqui encontradas.

3.4.2 Histogramas, PDFs e distribuições

A elaboração de um histograma tem por finalidade representar a frequência de ocorrências dentro de categorias de dados, já a PDF mostra o comportamento probabilístico

da variável, ou seja, a probabilidade de que a variável assumia valores possíveis em uma determinada faixa.

Cada parâmetro do escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas, pode ser então generalizado por uma função $\phi(t)$, e a PDF como uma função $p(\phi)$ definida como:

$$p(\phi) = Pr(a \leq \phi(t) \leq b) = \int \phi(t) dt \quad (3.15)$$

onde Pr é a probabilidade, a e b os extremos do intervalo.

Pode-se também definir a média de dados agrupados de uma variável $\phi(t)$ como

$$\mu = \sum_{i=1}^n \phi_i p(\phi_i) \quad (3.16)$$

onde n é o número do intervalo de classes utilizados e $p(\phi_i)$ é a probabilidade de ocorrência de ϕ_i . O desvio padrão que quantifica a dispersão ou espalhamento dos dados, pode ser definido como

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \mu)^2} \quad (3.17)$$

Dos estudos experimentais encontrados na literatura, muitos deles utilizam distribuições estatísticas para representar os parâmetros do escoamento em golfadas (Andreussi e Bendiksen (1989); Nydal, Pintus e Andreussi (1992); Hout, Shemer e Barnea (1992); Yu, Liu e Li (2005); entre outros).

Nas equações Equação (3.18), Equação (3.19) e Equação (3.20) estão definidas as distribuições normal, lognormal e de Weibull utilizadas na caracterização de funções de densidade de probabilidade.

$$\psi_{normal}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\phi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.18)$$

$$\psi_{lognormal}(\phi) = \frac{1}{\phi\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln \phi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.19)$$

$$\psi_{Weibull}(\phi) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\phi}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[\left(-\frac{\phi}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (3.20)$$

onde α e β são parâmetros de forma e de escala da distribuição.

As distribuições lognormal e de Weibull são comumente utilizadas devido à sua maior flexibilidade em ajuste de modelos estatísticos em comparação com a distribuição normal (Montgomery e Runger (2010)).

3.4.3 Assimetria e curtose

Define-se o momento estatístico como o somatório do produto de variáveis correlacionadas. Para uma distribuição de probabilidade o momento de ordem r é expresso pela seguinte equação:

$$m_r = \int x^r p(x) dx \quad (3.21)$$

onde $p(x)$ é a probabilidade.

Para avaliar as distribuições são utilizados conceitos de assimetria (s) e curtose (k) definidos nas equações 4.14 e 4.15. Esses parâmetros dizem respeito à forma, arranjo e posição de uma distribuição

$$s = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (3.22)$$

$$k = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (3.23)$$

onde m_2 , m_3 e m_4 são respectivamente os momentos estatísticos de segunda, terceira e quarta ordem.

Na Figura 3.10 vê-se critérios de classificação das distribuições estatísticas quanto à assimetria e curtose. O sinal de assimetria indica o deslocamento horizontal da distribuição (à direita ou à esquerda) enquanto que a curtose representa o deslocamento vertical da distribuição.

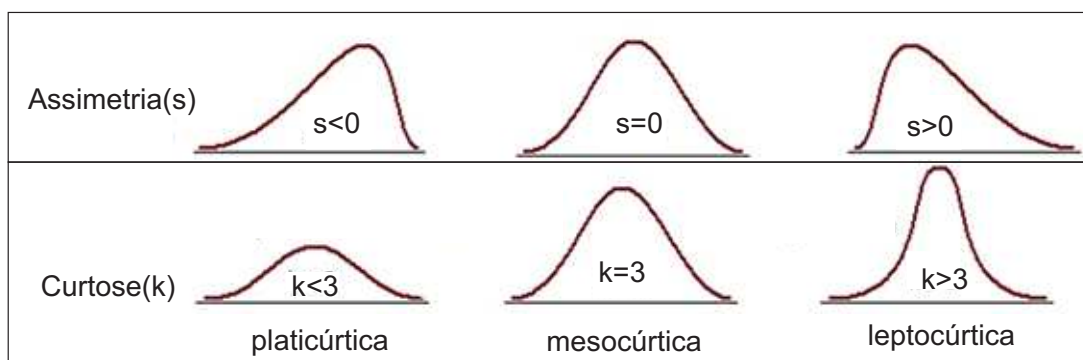


Figura 3.10 – Características e classificação de distribuições estatísticas.

3.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma descrição da bancada experimental, assim como os instrumentos de medição utilizados, os princípios operacionais e arranjo físico do sensor de malha de eletrodos.

O processo de obtenção da fração de vazio e como se dá o processamento dos dados obtidos experimentalmente também foi descrito. Os parâmetros característicos do escoamento em golfadas foram obtidos através do processamento dos sinais da série temporal e assim é possível caracterizar o escoamento para os valores médios e suas distribuições estatísticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados e discussões acerca dos parâmetros obtidos experimentalmente para o escoamento descendente bifásico de líquido e gás. As incertezas experimentais para os dados obtidos são apresentadas no Apêndice B.

4.1 Mapa de escoamento

Uma outra maneira de visualizar a grade de testes é na Figura 4.1, onde estão dispostos os pontos experimentais de maneira que se possa observar a diminuição da região do escoamento em golfadas com o aumento do ângulo de inclinação.

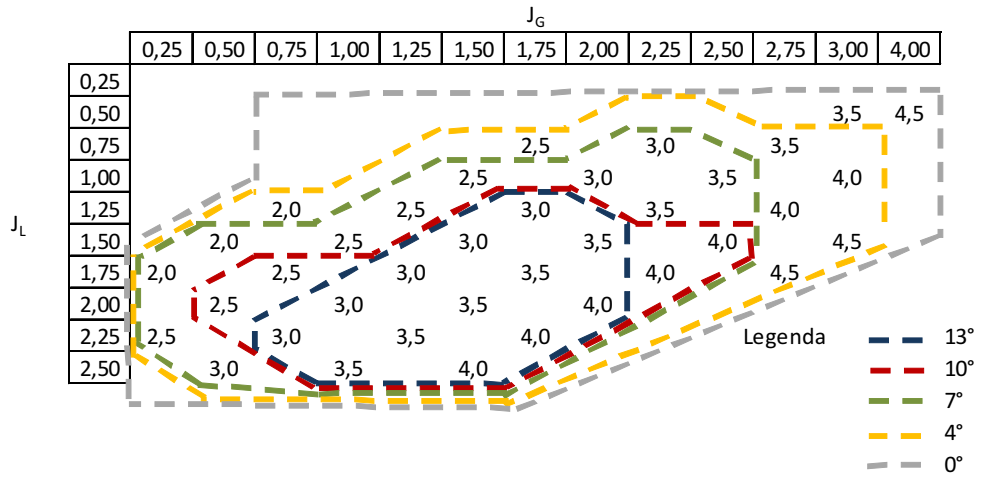


Figura 4.1 – Grade de testes experimentais.

Foi desenvolvido no NUEM/UTFPR o mapa de escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) com modificações sugeridas por Shoham (2006). Isto foi feito para comparar os pontos experimentais medidos com a predição do escoamento em golfadas. Os mapas podem ser observados na Figura 4.2 em função de J_L e J_G .

Os mapas de escoamento de Taitel e Dukler (1976) apresentados na Figura 4.2 corresponderam bem à predição do escoamento em golfadas para os pontos experimentais realizados, tendo em vista que na literatura o uso desse mapa é recomendado para inclinações de $\pm 10^\circ$.

4.2 Repetitividade das medidas

Visando obter repetitividade das medidas, os testes experimentais foram realizados três vezes em datas diferentes. A repetitividade é então mostrada através de diagramas de caixa

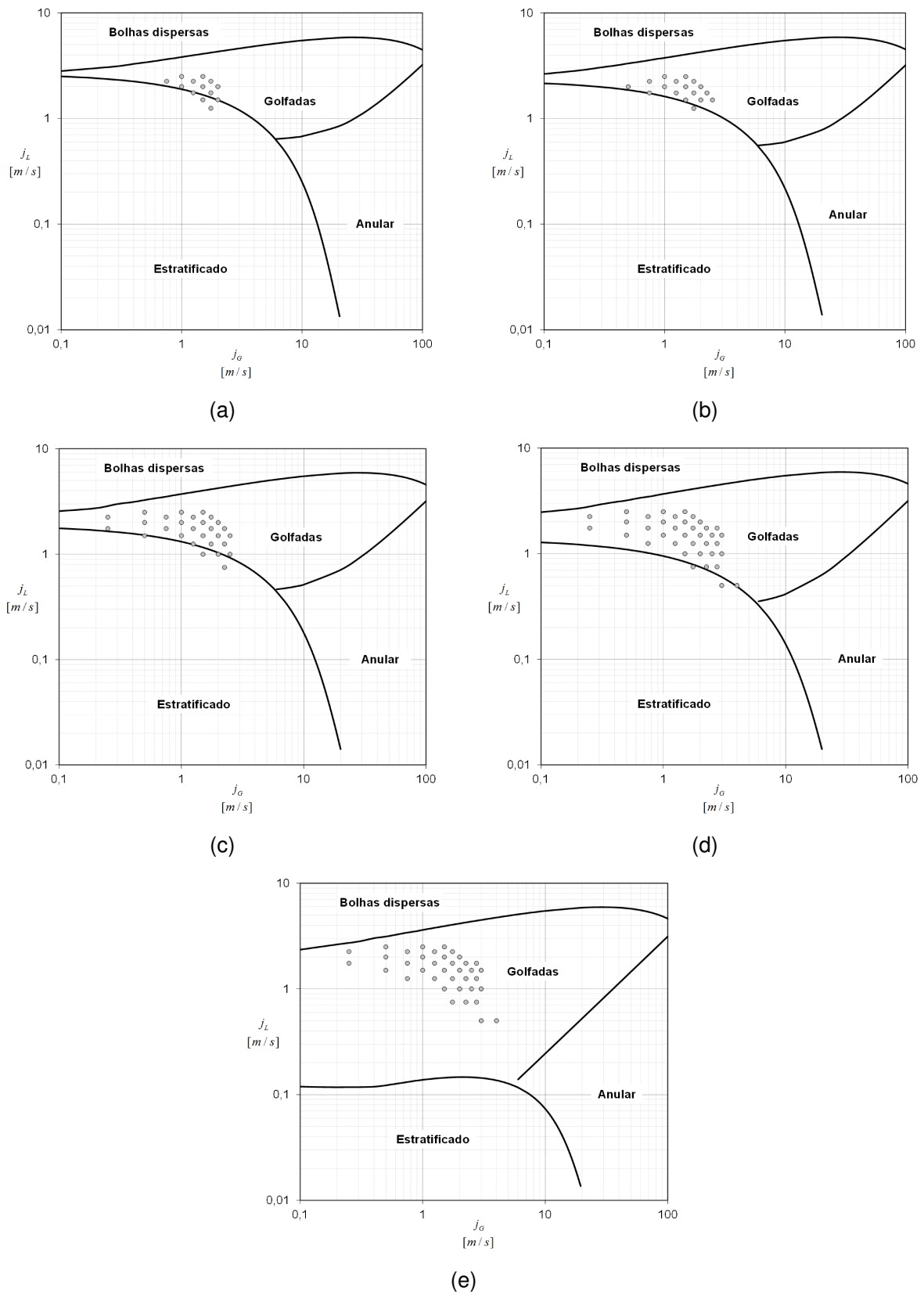


Figura 4.2 – Mapas de escoamento de Taitel e Dukler (1976). $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$.

da fração de vazio na Figura 4.3 correspondente às velocidades superficiais de gás e líquido de 1,75 m/s (ponto 24 da grade de testes). Percebe-se que em todas as inclinações e nas três medições do ponto 24, as caixas do diagrama estão próximas de uma mesma faixa, o que indica boa repetitividade.

4.3 Valores médios

Com o objetivo de verificar a consistência e coerência das medidas experimentais obtidas com o sensor de malha de eletrodos, foi utilizada como referência as imagens da câmera. Na Figura 4.4 são apresentados os resultados das medidas para a velocidade da bolha alongada obtidas com o sensor de malha de eletrodos (WMS) e a partir do processamento das imagens. No Apêndice C estão listados os valores médios e desvios padrão para as medições realizadas em todas as inclinações.

Observa-se que os valores médios comparados, para todas as condições estudadas, tem discrepâncias menores que 15%, o que pode ser considerado satisfatório (Vicencio (2013)). Em algumas medidas experimentais foi observado uma discrepância maior, como por exemplo o mostrado na Figura 4.4d, que é devido ao escoamento apresentar uma forte aeração do pistão de líquido, cenário no qual a definição das fronteiras a partir das imagens ou sinais fica comprometida (Amaral et al. (2013)).

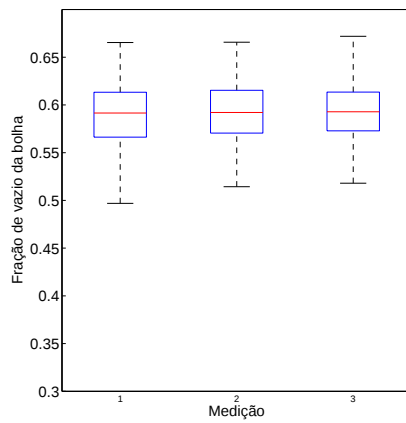
Conforme mencionado no parágrafo anterior, alguns pontos apresentam uma alta aeração do pistão de líquido e no filme de líquido na região da bolha alongada. Na Figura 4.5 são mostradas três imagens com a presença da frente da bolha indicada por uma linha branca vertical, onde pode ser observada a dificuldade visual para detectar a frente da bolha, o que dificulta o processamento das imagens.

Mesmo com alguns pontos (seis no total) com imagens não processadas, o processamento respondeu bem comparativamente ao sensor de malha de eletrodos, pois segundo Hout, Shemer e Barnea (2003) o uso de processamento de imagens no escoamento em golfadas é limitado dado que as interfaces da bolha alongada são difíceis de detectar devido à alta aeração, o que pode ser confirmado visualizando a Figura 4.5.

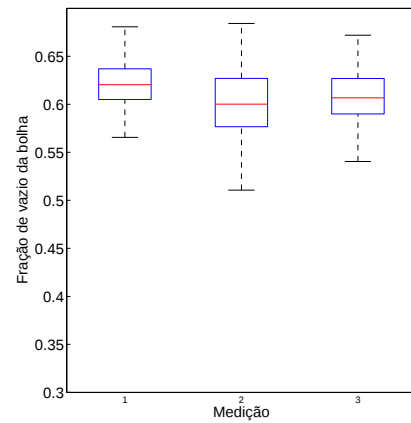
4.4 Velocidade da bolha alongada

Para analisar a velocidade translacional da bolha alongada, segue-se a metodologia proposta por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962). Porém, uma melhor maneira de apresentar os resultados é a forma adimensional deste parâmetro, conforme Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003) e Vicencio (2013). Reescrevendo a equação proposta por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) na forma adimensional chega-se a Equação (4.1):

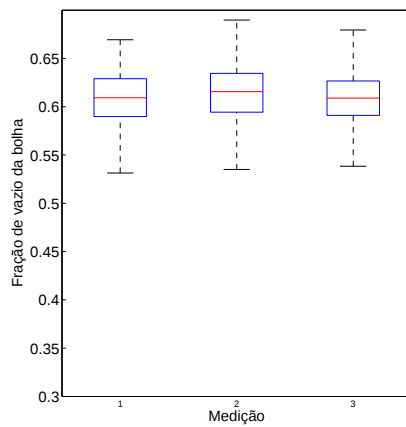
$$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = C_0 Fr_J + C_\infty \quad (4.1)$$



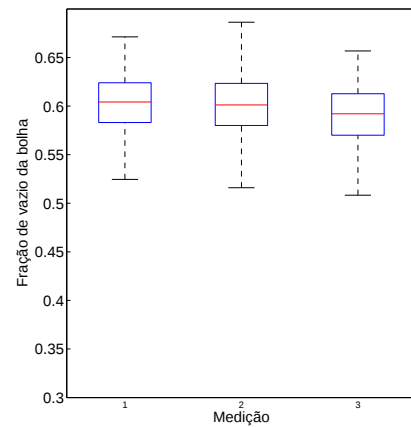
(a)



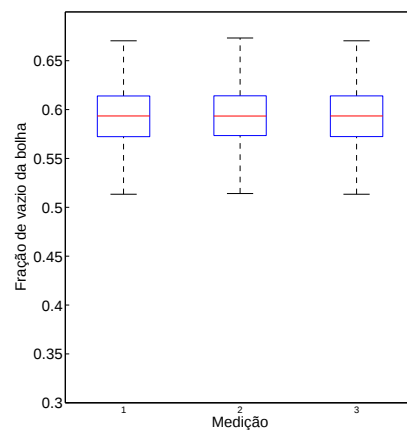
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3 – Diagramas de caixa da fração de vazio na região da bolha. $a=-13^\circ$, $b=-10^\circ$, $c=-7^\circ$, $d=-4^\circ$, $e=0^\circ$.

Na Figura 4.6 visualizam-se os gráficos relacionando a velocidade adimensional com o número de Froude da mistura dos pontos experimentais conforme a Equação (4.1). Os

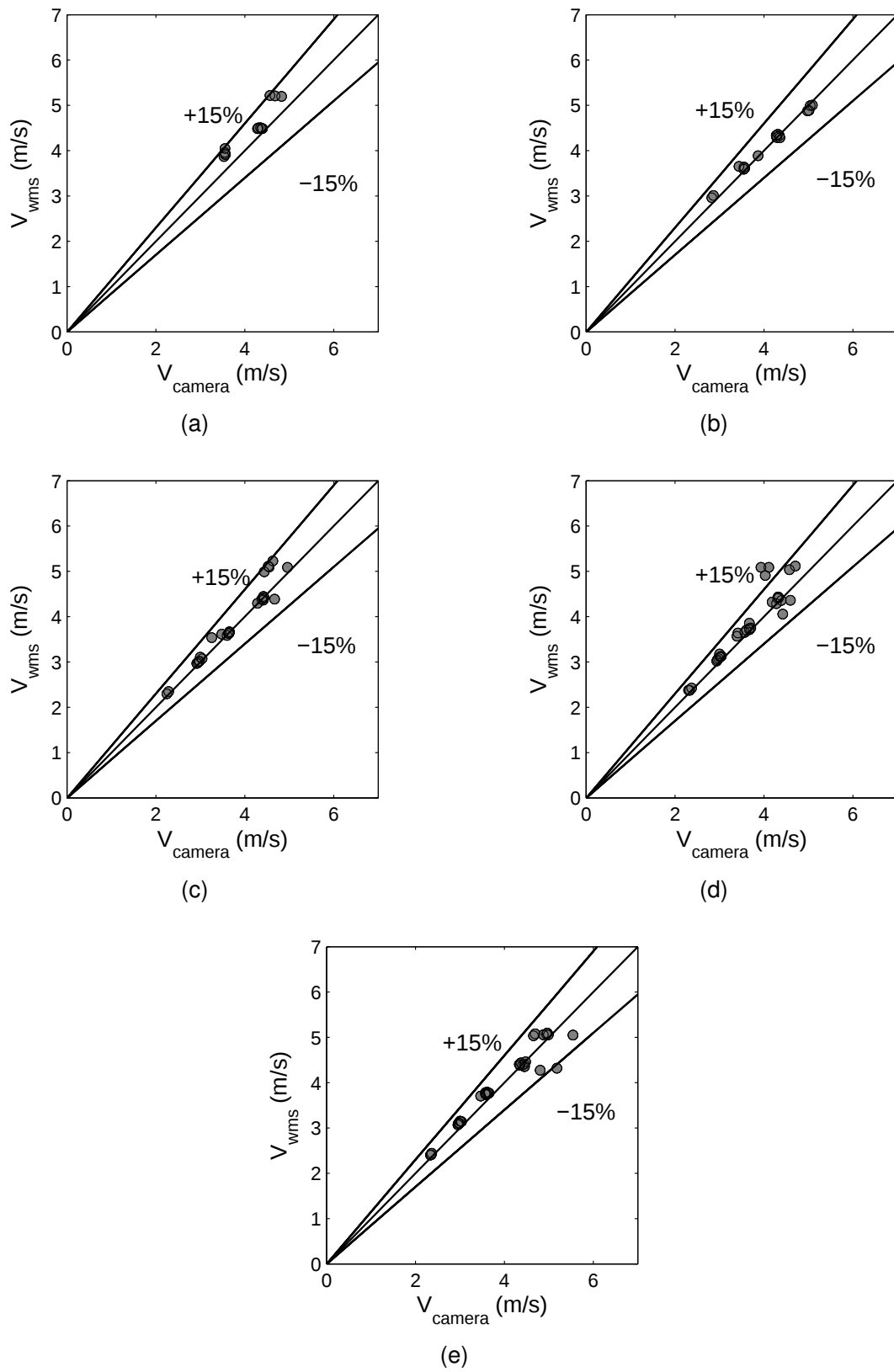


Figura 4.4 – Médias das velocidades obtidas pela câmera e pelo WMS. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

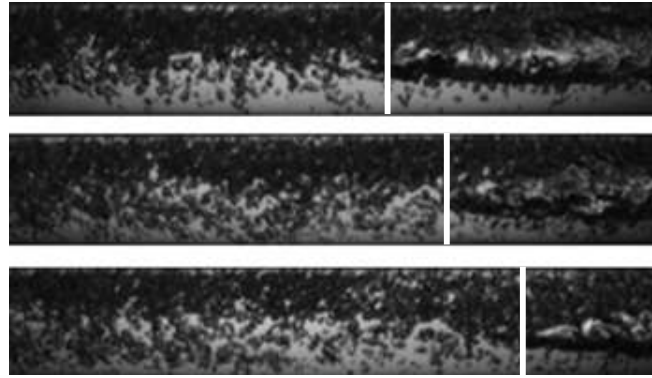


Figura 4.5 – Aeração de alguns pontos não processados.

valores dos parâmetros C_0 e C_∞ estão listados na Tabela 4.1, assim como os coeficientes de correlação.

Tabela 4.1 – Coeficientes da velocidade de translação da bolha alongada

Ângulo(°)	C_0	C_∞	R^2
-13	1,20	0,70	0,97
-10	1,30	-0,52	0,99
-7	1,29	-0,40	0,99
-4	1,38	-0,79	0,98
0	1,26	-0,08	0,99

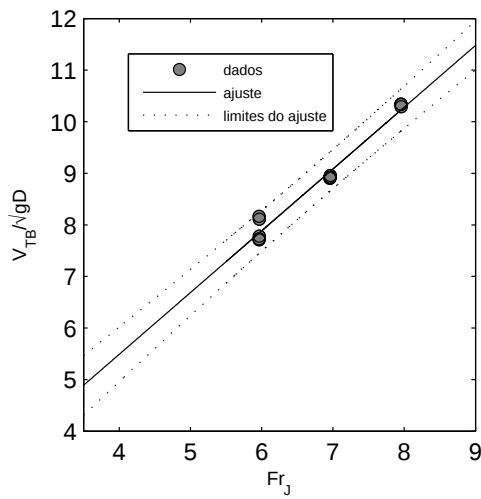
A obtenção dos coeficientes de correlação segue o método dos mínimos quadrados descrito em Holman (2001) e tratado com maiores detalhes nas metodologias de Vicencio (2013) e Conte (2014). Em suma, para dois conjuntos de valores x e y que se deseja correlacionar, o coeficiente de correlação R^2 é definido como:

$$R^2 = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \quad (4.2)$$

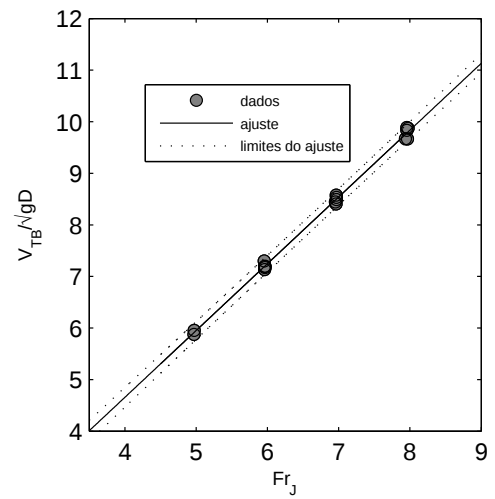
O coeficiente de correlação (R^2), igual ou superior a 0,97 observado na Tabela 4.1 indica boa concordância entre os pontos experimentais e a aproximação linear da Equação (4.1). Os limites do ajuste (linha pontilhada) apresentados nos gráficos da Figura 4.6 expressam um intervalo de confiança de 95%.

Os valores do coeficiente médio do movimento da bolha (C_0) obtidos são apresentados na (Tabela 4.1), estes valores estão em concordância com a faixa encontrada na literatura (entre 1,19 e 2,00). Segundo Nydal, Pintus e Andreussi (1992), pode haver discrepância entre os valores obtidos devido a um apreciável deslizamento entre as fases e mudança no perfil de velocidades na traseira da bolha alongada, o que ocorre devido à presença de bolhas dispersas.

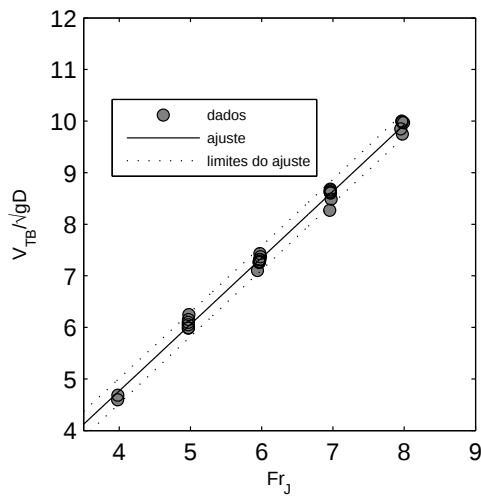
Lembrando que a velocidade da bolha alongada é composta por dois coeficientes (C_0 e C_∞), o primeiro foi então fixado em $C_0 = 1,2$ conforme recomendado em Bendiksen (1984).



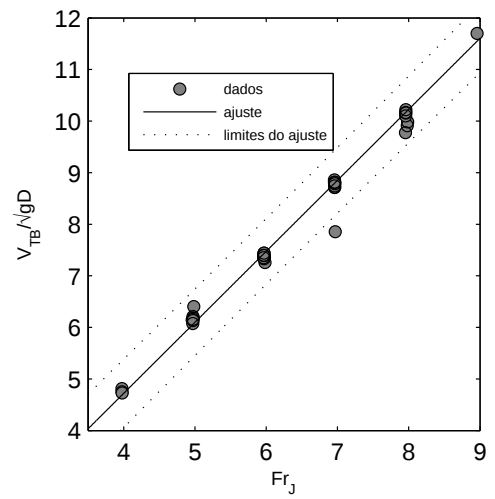
(a)



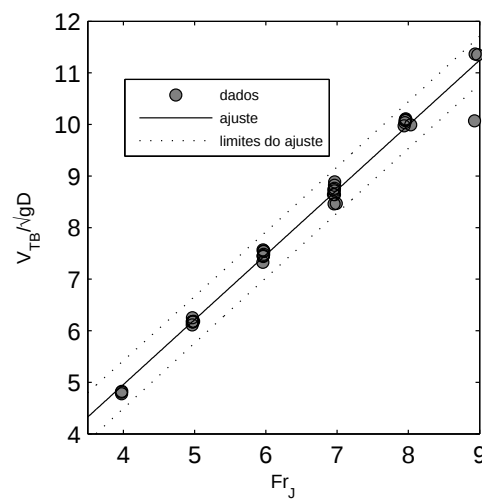
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.6 – Gráficos da velocidade adimensional em relação ao número de Froude da mistura. Legenda: a= -13° ; b= -10° ; c= -7° ; d= -4° ; e= 0° .

O segundo componente da equação (C_∞) é apresentado nas equações Equação (4.3) e Equação (4.4), que correspondem aos termos propostos por Bendiksen (1984) e por Weber (1981) respectivamente.

$$C_{\infty, Bendiksen} = 0,35 \sin \theta \quad (4.3)$$

$$C_{\infty, Weber} = 0,54 - 1,76 E_o^{-0,56} \quad (4.4)$$

Assim, pode-se observar na Figura 4.7 as comparações feitas entre as velocidades de translação da bolha alongada obtidas experimentalmente e as correlações. Os círculos representam a correlação de Bendiksen (1984) e os quadrados a modificação do coeficiente C_∞ proposto por Weber (1981). Duas retas representam comparações numa faixa de 8%.

Segundo os principais modelos para o escoamento bifásico horizontal em golfadas, a velocidade da frente da bolha V_{TB} é a maior velocidade na estrutura da célula unitária (Fabre (2003)). Então, os gráficos da Figura 4.8 mostram uma comparação entre a razão da velocidade de translação (V_{TB}) e a velocidade da traseira da bolha (V_R), onde no eixo das abscissas obtém-se a razão entre a velocidade superficial de gás e a velocidade da mistura. Valores acima da reta horizontal indicam velocidade da traseira superior à da frente da bolha. Nota-se na Figura 4.8 que para o caso de escoamento bifásico descendente no padrão em golfadas a velocidade da traseira excede a velocidade translacional.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores mínimos, máximos e médios para a relação entre a velocidade de translação e a velocidade da traseira da bolha para cada inclinação. Assim como já observado na Figura 4.8, confirma-se na Tabela 4.2 que nas inclinações descendentes, o valor da velocidade da traseira (V_R) é ligeiramente maior do que a velocidade da frente da bolha (V_{TB}). Para as inclinações de -7° , -10° e -13° . (Figura 4.7a, Figura 4.7b e Figura 4.7c respectivamente), a velocidade da traseira é maior que a de translação; já nas inclinações 0° , -4° . (Figura 4.7d e Figura 4.7e) começa a haver uma inversão deste comportamento, com a velocidade de translação maior que a da traseira.

Tabela 4.2 – Relação entre a velocidade translacional e a da traseira da bolha alongada

Ângulo	$\left(\frac{V_{TB}}{V_R}\right)_{faixa}$	$\left(\frac{V_{TB}}{V_R}\right)_{medio}$
-13	0,76 a 1,01	0,96
-10	0,69 a 1,01	0,96
-7	0,52 a 1,00	0,91
-4	0,92 a 1,24	0,99
0	0,95 a 1,15	1,02

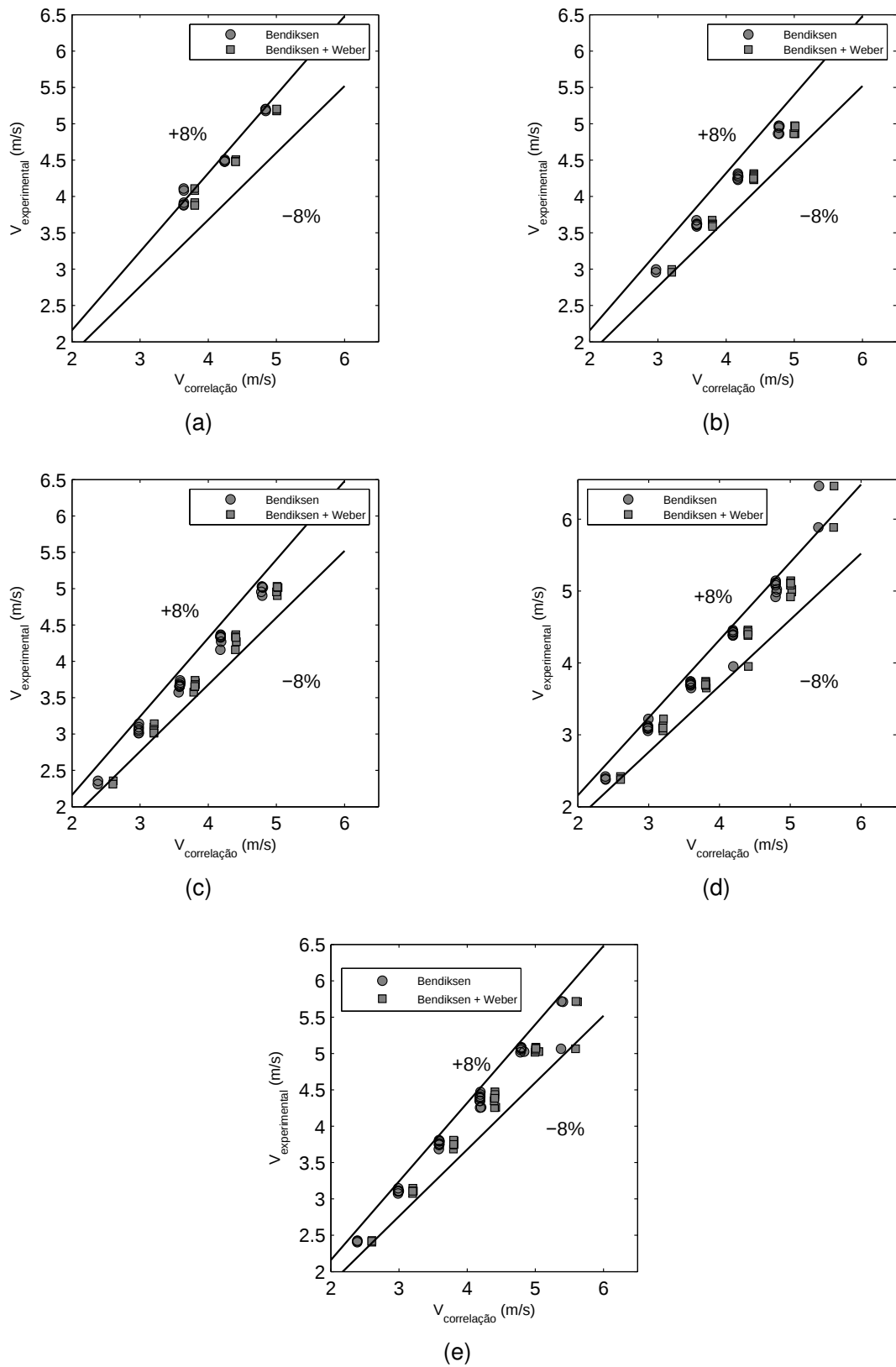


Figura 4.7 – Comparação dos pontos experimentais com as correlações de Bendiksen (1984) e Weber (1981). Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

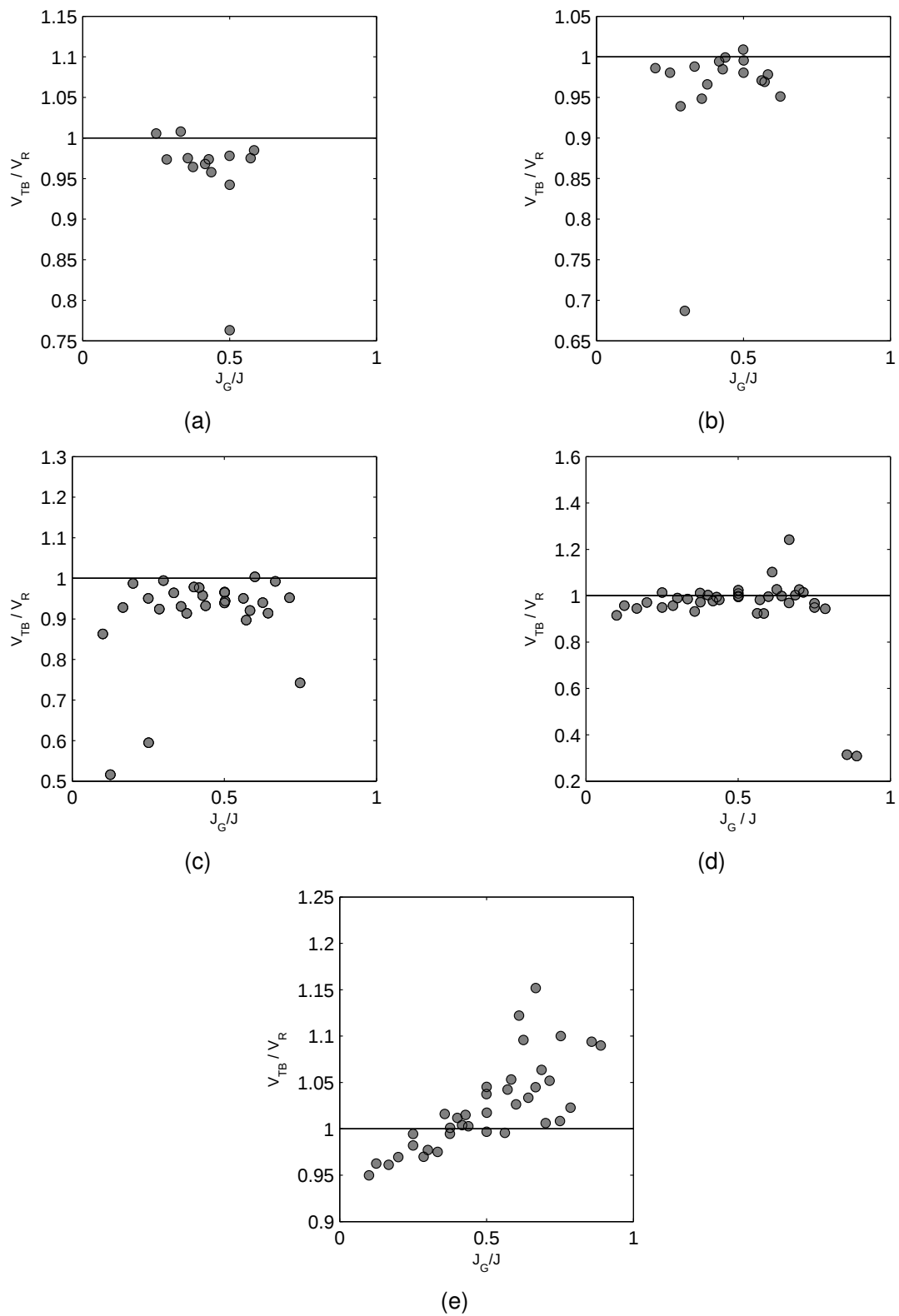


Figura 4.8 – Comparação entre as velocidades da frente e da traseira da bolha alongada.
 Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

4.5 Frequência

A frequência de passagem da célula unitária pode ser mostrada na forma adimensional segundo o número de Strouhal (St), definido da seguinte maneira:

$$St = \frac{fD}{J_G} \quad (4.5)$$

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados das medidas experimentais da frequência de passagem da célula unitária obtidos no presente trabalho. Os gráficos são mostrados como uma relação entre número de Strouhal e J_L/J (relação entre a velocidade superficial de líquido e da mistura). As medidas experimentais são comparadas com três correlações propostas por Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003), Wang, Guo e Zhang (2007) e Vicencio (2013).

As curvas contínuas da Figura 4.9 são relativas ao ajuste exponencial com coeficientes de correlação (R^2) de 0,83 (Figura 4.9e), 0,88 (Figura 4.9a e Figura 4.9b) e 0,94 (Figura 4.9c e Figura 4.9d), o que indica boa concordância entre as medidas experimentais e o ajuste exponencial utilizado.

Observa-se nas Figura 4.9a e Figura 4.9b, referentes ao escoamento em dutos com inclinações de -13° e -10° respectivamente, que a correlação de Wang, Guo e Zhang (2007) foi a que melhor se aproximou dos pontos experimentais. Já para o escoamento em dutos com inclinações de -7° , -4° e 0° (mostrados nas Figura 4.9c, Figura 4.9d e Figura 4.9e) a correlação de Vicencio (2013) foi a que teve melhor resultado comparativo.

Na Tabela 4.3 e Figura 4.10, são apresentados os valores da frequência medidos, com as mesmas condições de velocidade superficial de gás e líquido, para todas as inclinações. Observa-se na Figura 4.10, que conforme diminui-se o ângulo de inclinação, o valor de número de Strouhal aumenta (consequentemente da frequência). Além disso, aumentando a quantidade de líquido na célula unitária o valor de número de Strouhal também aumenta.

Analisando os pontos 24 e 29, 17 e 23, 30 e 34 da Tabela 4.3, onde a velocidade superficial da mistura é fixa, verifica-se que o aumento da velocidade superficial de líquido provoca um aumento na frequência.

Assim, foi verificado a partir dos dados experimentais, que para as mesmas condições de vazão de líquido e gás (J_L e J_G), a frequência diminui com o aumento do ângulo da inclinação. Isto é mostrado na Tabela 4.4, para o ponto 28 da grade de testes ($J_L=2\text{m/s}$ e $J_G=1\text{m/s}$) onde pode ser verificado que os valores da frequência aumentam conforme diminui-se o ângulo de inclinação. Por exemplo, quando o ângulo de inclinação é de -13° valor da frequência é de 3,77 Hz, enquanto que para o escoamento em uma tubulação horizontal a frequência é igual a 8,64 Hz.

Este comportamento ocorre porque os comprimentos da célula unitária (L_B e L_S) diminuem com o ângulo de inclinação, e por conseguinte observa-se o aumento da frequência e do número de Strouhal.

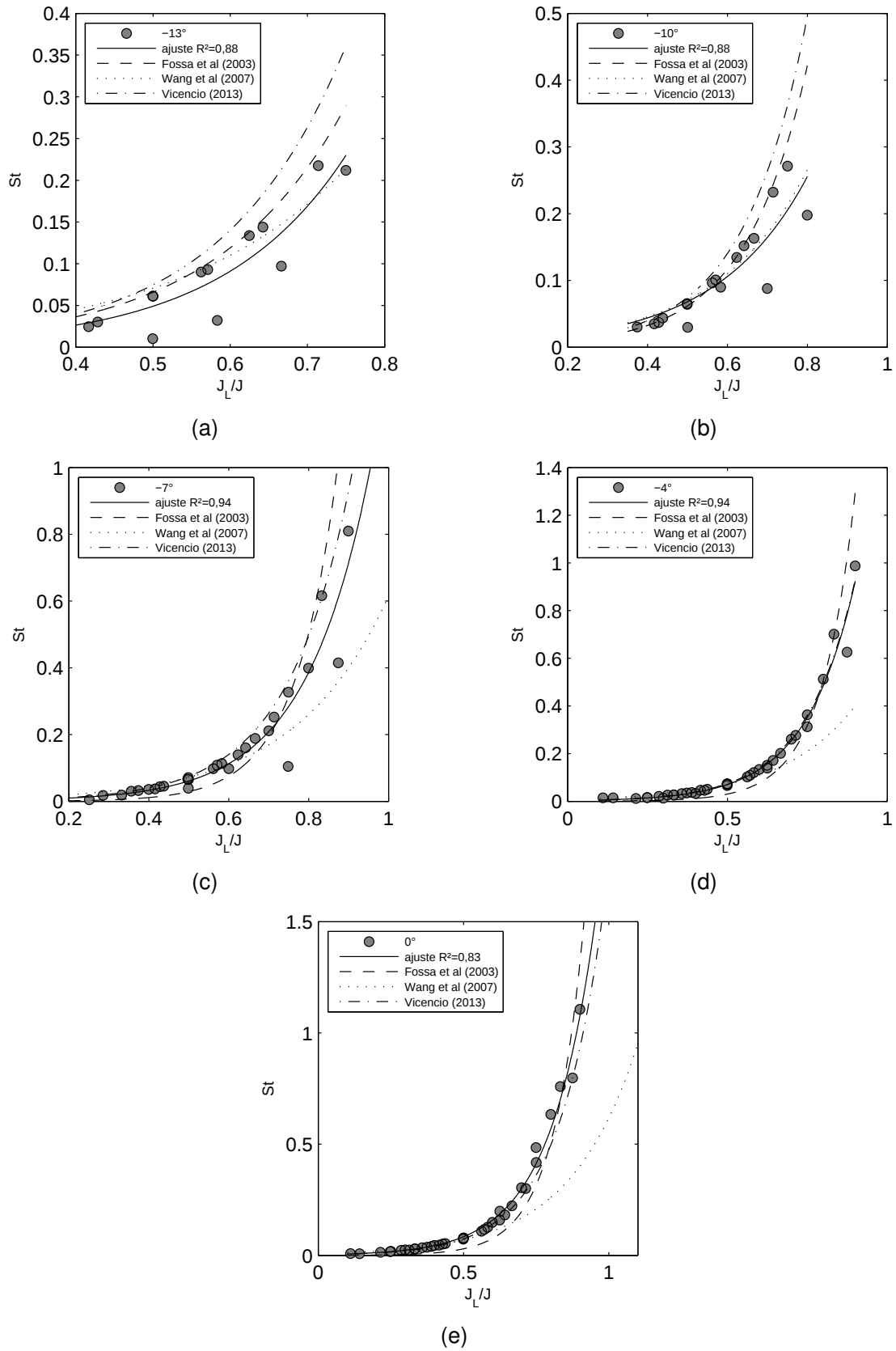


Figura 4.9 – Gráficos da frequência adimensional comparados com as correlações de Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003), Wang, Guo e Zhang (2007) e Vicencio (2013). Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

Tabela 4.3 – Frequência e velocidades superficiais

Ponto	Velocidades superficiais (m/s)			Frequência (m/s)				
	J	J_L	J_G	-13°	-10°	-7°	-4°	0°
12	3,00	1,25	1,75	1,67	2,37	2,53	3,16	3,16
17	3,00	1,50	1,50	0,59	1,72	4,14	3,86	4,49
18	3,50	1,50	2,00	2,35	2,88	3,41	3,55	3,97
23	3,00	1,75	1,25	1,55	4,36	5,49	5,85	6,16
24	3,50	1,75	1,75	4,14	4,37	4,43	4,96	4,97
28	3,00	2,00	1,00	3,77	6,32	7,32	7,82	8,64
29	3,50	2,00	1,50	5,41	5,87	6,32	6,34	6,76
30	4,00	2,00	2,00	4,75	5,08	5,17	5,54	5,94
32	3,00	2,25	0,75	6,17	7,88	9,53	10,56	12,13
33	3,50	2,25	1,25	6,98	7,40	7,77	8,31	8,85
34	4,00	2,25	1,75	6,11	6,56	6,64	6,95	7,37
36	3,50	2,50	1,00	8,44	9,00	9,82	10,74	11,68
37	4,00	2,50	1,50	7,79	7,88	8,16	8,80	9,29

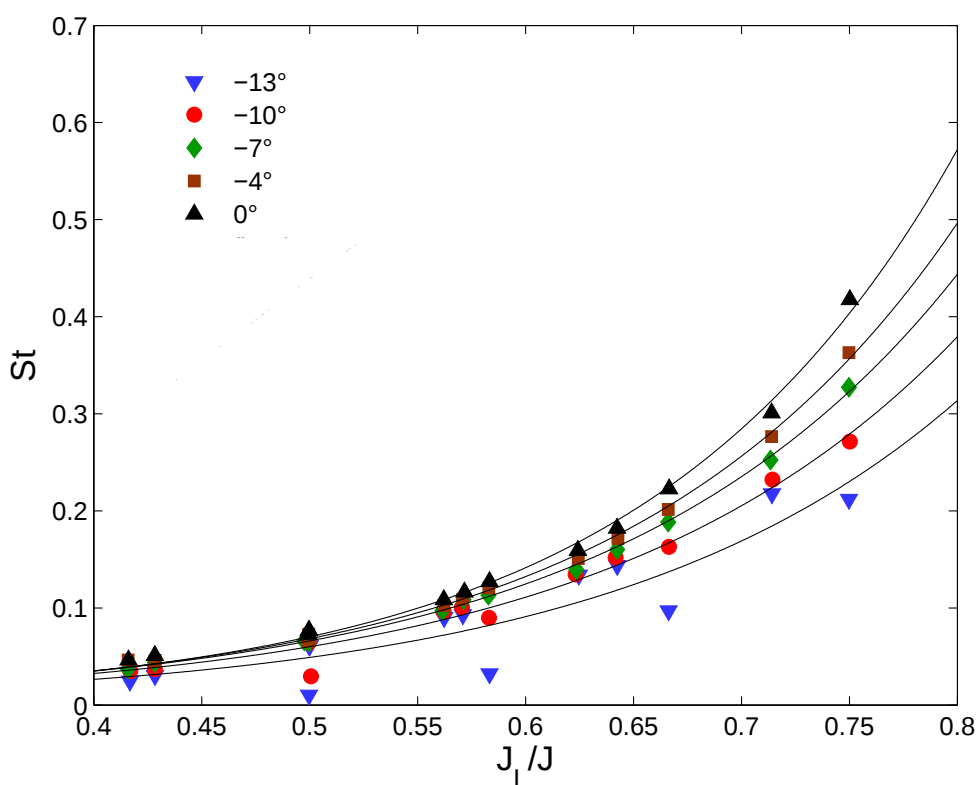
Figura 4.10 – Gráfico da frequência adimensional para os pontos com mesmas velocidades superficiais J_L e J_G .

Tabela 4.4 – Valores da frequência para o ponto 28.

Ângulo	$f(Hz)$	Aumento relativo(%)
-13	3,77	-
-10	6,32	68
-7	7,32	16
-4	7,82	7
0	8,64	10

4.6 Comprimento da bolha e do pistão

Na Figura 4.11 são mostrados os comprimentos adimensionais das bolhas alongadas em relação a $(J_G/J)\cos\theta$ (razão de velocidades superficiais de gás e de mistura e ângulo de inclinação). O coeficiente de correlação (R^2) obtido para os dados experimentais com o ajuste exponencial foi de 0,83. Então para os dados experimentais correspondentes à Figura 4.11, é possível estabelecer uma expressão para o comprimento da bolha com intervalo de confiança de 95% que é dado pela seguinte relação:

$$\frac{L_B}{D} = 3,05 \exp \left[4,71 \left(\frac{J_G}{J} \right) \cos\theta \right] \quad (4.6)$$

O comprimento da bolha alongada aumenta com a relação (J_G/J) , o que é coerente, uma vez que ao adicionar gás o comprimento da bolha tende a aumentar. Além do que, com o aumento da vazão do gás a velocidade da bolha alongada aumenta, assim provocando a coalescência das bolhas subsequentes.

Na Figura 4.12, conforme recomendado em Vicencio (2013), é mostrado o comprimento dos pistões adimensionais obtidos experimentalmente em relação aos números de Reynolds da mistura e de Strouhal. Neste caso, uma modificação foi feita, contemplando o ângulo de inclinação, e encontrada uma relação funcional para calcular o comprimento do pistão com intervalo de confiança de 95%. Esta relação é dada por:

$$\frac{L_S}{D} = 425,8 \exp (Re_J St \cos\theta)^{-0,38} \quad (4.7)$$

Na Tabela 4.5 estão os valores do comprimento do pistão adimensional obtidos por alguns autores para os casos horizontal e vertical com diâmetros diferentes. Dukler, Maron e Brauner (1985) obteve valores de L_S/D entre 12 e 24 para o escoamento horizontal e entre 18 e 30 para o caso vertical. Hout, Shemer e Barnea (1992) encontrou para o caso vertical um valor entre 15 e 19 L_S/D .

Para os dados da Figura 4.12, 97% dos pontos experimentais estão na faixa entre 5 e 40 L_S/D . Apesar das diversas condições, observa-se que os comprimentos dos pistões obtidos no escoamento em golfadas descendente são maiores que no caso horizontal e vertical. Além disso, observa-se a tendência, para algumas condições, que o comprimento do

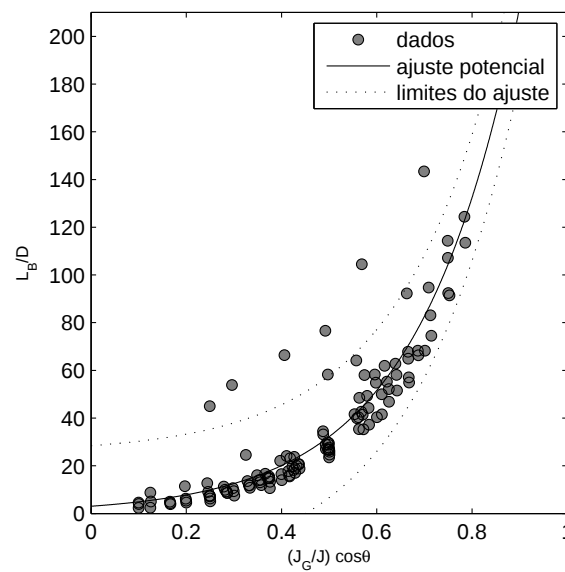


Figura 4.11 – Gráfico do comprimento da bolha adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.

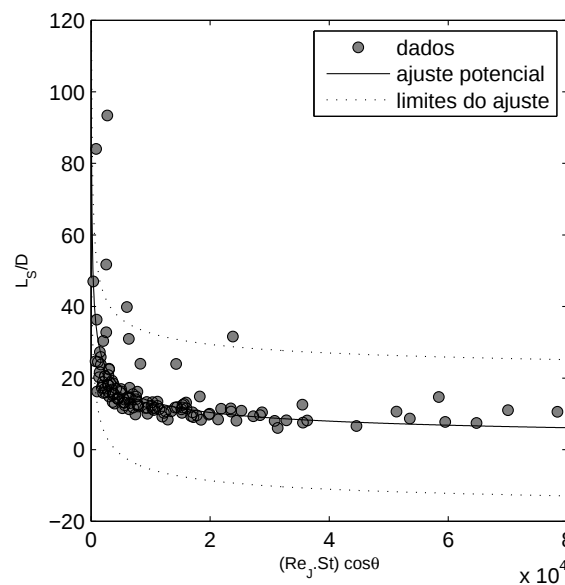


Figura 4.12 – Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.

pistão tende a estabilizar dentro de uma faixa de comprimentos, o que seria o denominado escoamento em golfadas estabelecido.

4.7 Frações de vazio e de líquido

Na Figura 4.13, mostra-se o comportamento da fração de vazio na região da bolha alongada em relação à razão de velocidades superficiais e ângulo de inclinação. Observa-se que conforme aumenta-se a quantidade de gás na célula unitária, o valor da fração de vazio

Tabela 4.5 – Faixa de valores para o comprimento do pistão.

L_S/D	Condições	Autores
12-20	Horizontal, D= 38,1 mm	Dukler e Hubbard (1975)
12-24	Horizontal, D= 38 mm	Dukler, Maron e Brauner (1985)
18-30	Vertical, D = 50,8 mm	Dukler, Maron e Brauner (1985)
15-19	Vertical, D = 50 mm	Hout, Shemer e Barnea (1992)

também aumenta. Esta tendência é coerente e foi verificado visualmente com a câmera de alta taxa de aquisição de imagens. Uma vez identificada a tendência, foi aplicado um ajuste linear com coeficiente de correlação $R^2 = 0,97$ para todos os pontos experimentais, que resulta na expressão para a fração de vazio:

$$\alpha_B = 0,09 + 0,72 \left(\frac{J_G}{J} \right) (\cos\theta)^{0,2} \quad (4.8)$$

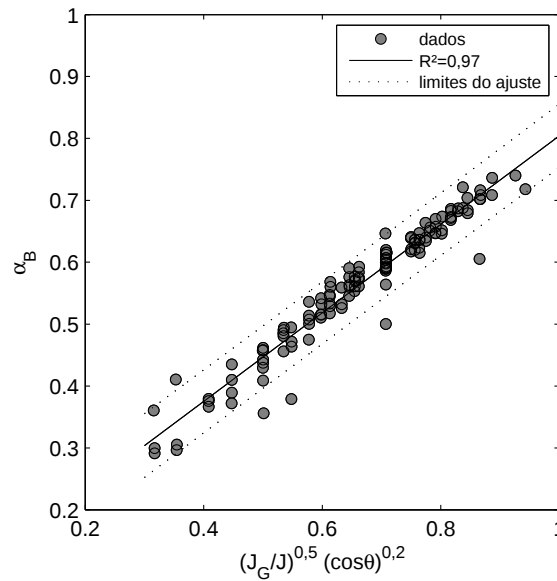


Figura 4.13 – Gráfico para fração de vazio na região da bolha.

De maneira similar, na Figura 4.14, é apresentada a fração de líquido na região do pistão em relação à inclinação e razão de velocidades superficiais de líquido e da mistura. Observa-se uma tendência linear com o aumento da relação da vazão de líquido com relação à vazão de gás. O pistão de líquido tende a ser não aerado com esse aumento, ou seja, a fração de líquido na região do pistão (H_{LS}) tende à unidade.

$$H_{LS} = 1,64 \left(\frac{J_L}{J} \right) (\cos\theta) - 0,18 \quad (4.9)$$

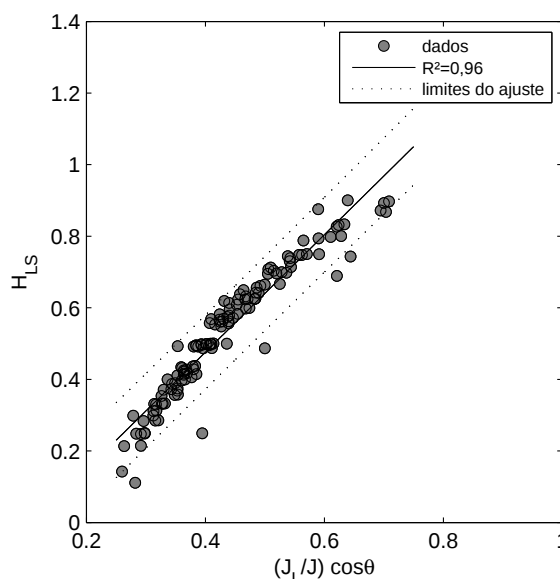


Figura 4.14 – Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.

4.8 Distribuições estatísticas

O escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas é intermitente no espaço e no tempo, o que provoca significativas variações nas dimensões características do escoamento bifásico em golfadas. Assim, o tratamento estatístico a partir dos dados adquiridos, se faz necessário para entender o comportamento do escoamento.

4.8.1 PDFs e histogramas dos parâmetros do escoamento em golfadas

Nas figuras a seguir, serão apresentados os histogramas correspondentes aos parâmetros obtidos experimentalmente do ponto 24 da grade de testes ($J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s). As distribuições apresentadas foram testadas para todos os pontos experimentais, tendo respondido de maneira adequada com as distribuições propostas.

Na Figura 4.15 são apresentados os histogramas e distribuições da velocidade translacional da bolha alongada (V_{TB}) nas inclinações medidas. A linha contínua representa o ajuste realizado utilizando uma distribuição do tipo normal. Observa-se que a distribuição normal, nestes casos, representa a distribuição obtida a partir dos dados experimentais (histogramas). A aproximação para a velocidade da bolha, seguindo a distribuição normal, também foi realizada com sucesso por Nydal, Pintus e Andreussi (1992) e Vicencio (2013).

As distribuições das velocidades da traseira da bolha alongada são apresentadas na Figura 4.16. De maneira similar à metodologia utilizada para a velocidade translacional da bolha alongada, a distribuição normal foi ajustada ao histograma. Observa-se que este ajuste representa de maneira satisfatória quando comparado com o histograma gerado a partir dos dados experimentais.

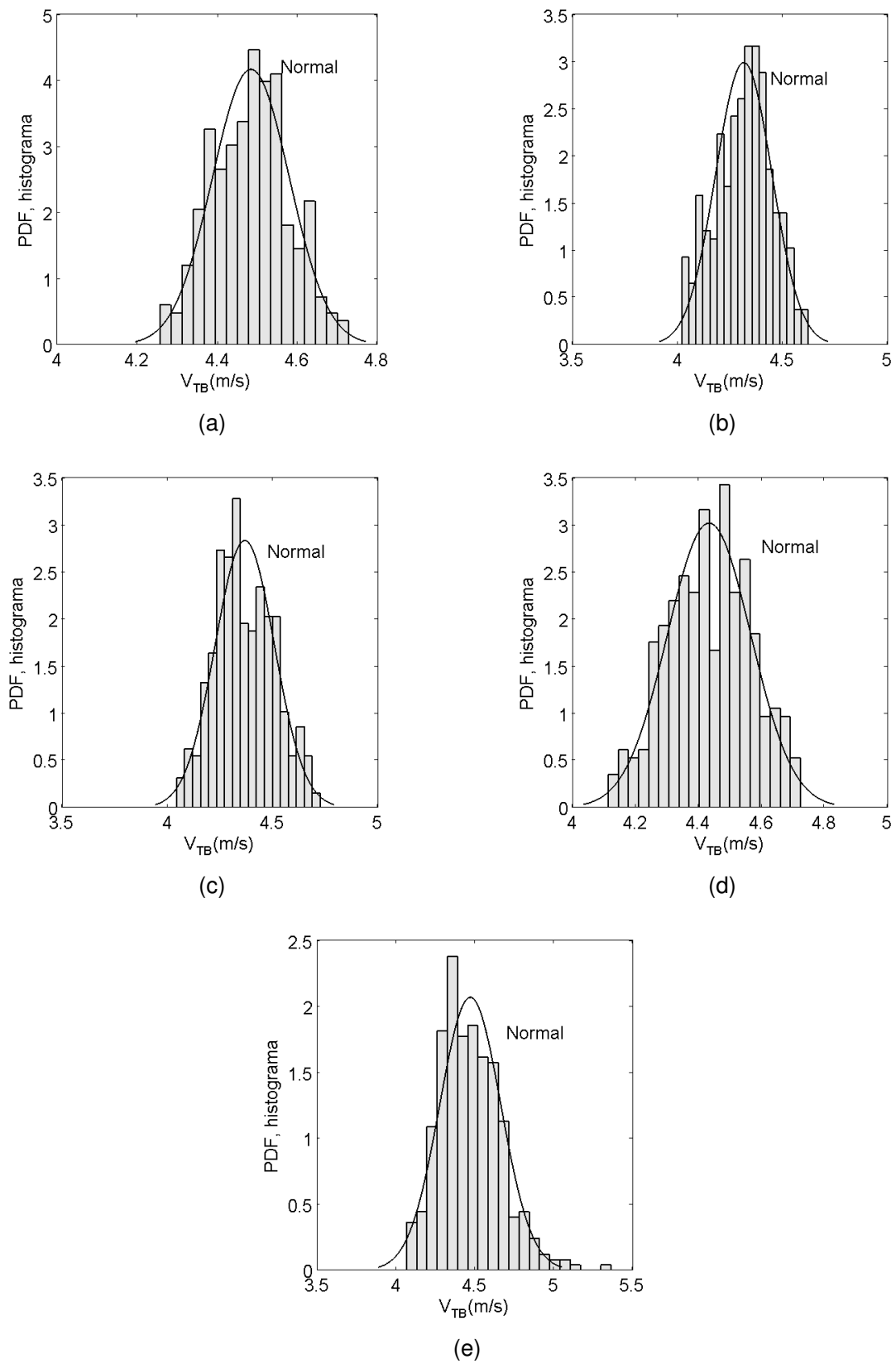


Figura 4.15 – Histogramas e distribuições da velocidade de translação da bolha alongada V_{TB} para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

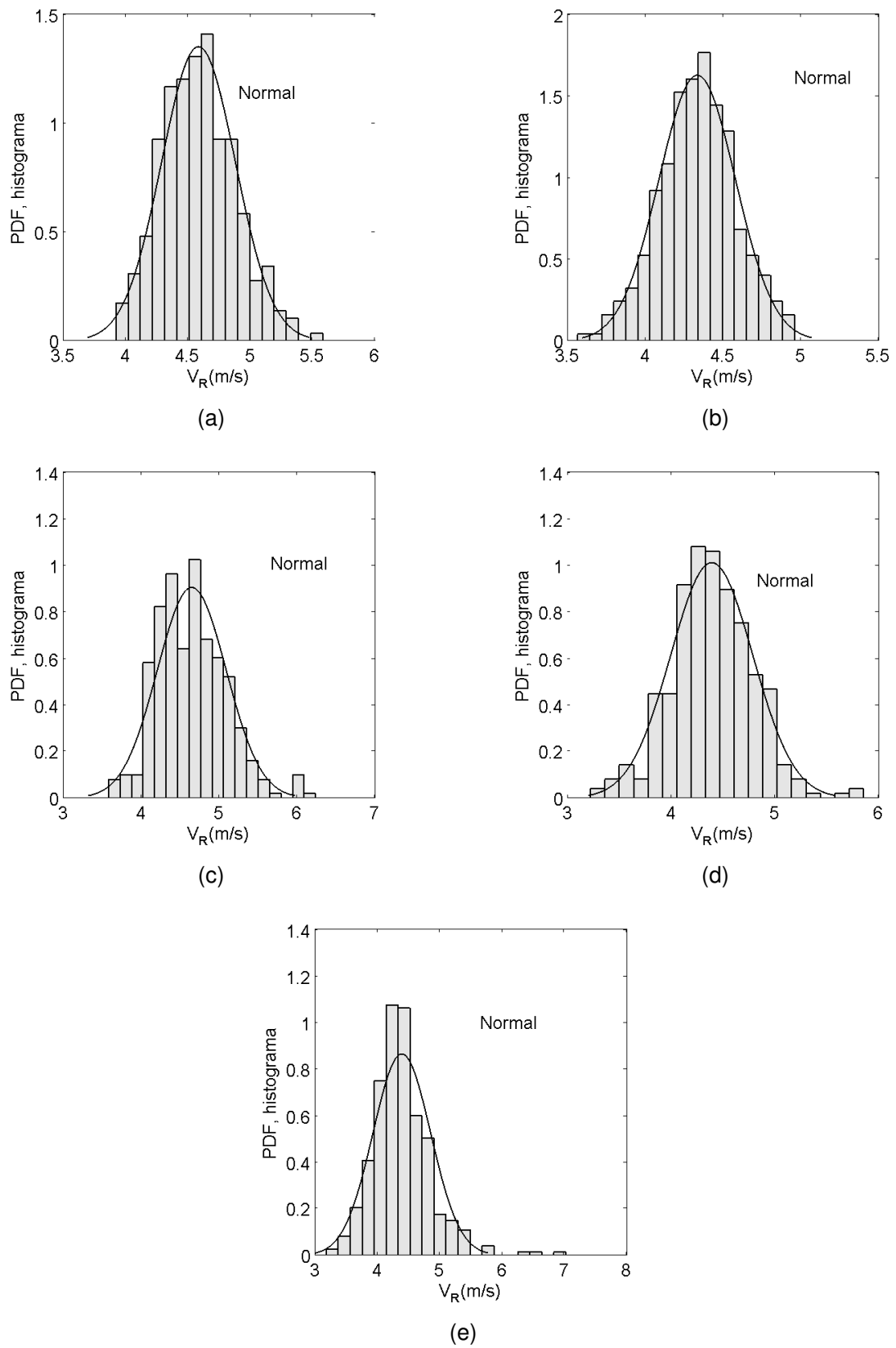


Figura 4.16 – Histogramas e distribuições da velocidade da traseira da bolha alongada V_R para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

Para a frequência uma distribuição do tipo normal não ajustou-se bem ao histograma dos dados experimentais. Então, conforme análise realizada por Hout, Shemer e Barnea (1992) e corroborada por Vicencio (2013) sugeriu-se um ajuste utilizando a distribuição lognormal. Na Figura 4.17, são apresentados os histogramas dos dados experimentais e seus respectivos ajustes seguindo a distribuição do tipo lognormal (linha contínua). Observa-se uma boa concordância entre os histogramas e o ajuste seguindo a distribuição lognormal.

Yu, Liu e Li (2005) relatam que, para o escoamento em golfadas em tubo vertical, o comprimento da bolha alongada segue uma distribuição normal. Recentemente, Vicencio (2013) observou o mesmo fato no escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas em tubos horizontais. Então, os histogramas da Figura 4.18 foram ajustados seguindo a distribuição do tipo normal. Observa-se, em todos os casos mostrados na Figura 4.18, que o ajuste representa de maneira satisfatória o histograma dos dados experimentais.

Os histogramas referentes ao comprimento do pistão (L_S) obtidos dos dados experimentais são apresentados na Figura 4.19. Os resultados estão de acordo com os observados anteriormente por Brill et al. (1981), Saether et al. (1990), Hout, Shemer e Barnea (2003) e Vicencio (2013) que sugerem o uso da distribuição lognormal para caracterizar o comprimento do pistão.

A distribuição da fração de vazio na região da bolha, apresentada na Figura 4.20, é caracterizada com a distribuição de Weibull. Segundo Devore (2011) “em algumas situações há justificativas teóricas para utilização da distribuição de Weibull, mas em muitas aplicações este ajuste fornece uma boa aproximação dos dados observados”. Para o caso da fração de vazio, foi verificado que para os histogramas resultantes dos dados experimentais, o ajuste de Weibull representado pelas linhas contínuas na Figura 4.20, reproduz com boa aproximação, o comportamento dos dados experimentais.

Os histogramas referentes à fração de vazio na região do pistão estão dispostos na Figura 4.21 juntamente com a PDF (curva contínua). Para estes histogramas foram ajustados distribuições do tipo lognormal seguindo a recomendação de Vicencio (2013).

4.8.2 PDFs comparativas da frequência, comprimentos e velocidade

Na Figura 4.22 são apresentados as PDFs para as frequências e comprimentos da bolha e do pistão referentes ao ponto 28 da grade de testes ($J_L=2$ m/s $J_G=2$ m/s). Nas tabelas Tabela 4.6, Tabela 4.7, Tabela 4.8 e Tabela 4.9 são apresentados os valores de assimetria (s), curtose (k) e desvio padrão (α) correspondentes às PDFs da Figura 4.22.

Na Tabela 4.6 os valores positivos de assimetria (s), segundo o critério de curtose (k) apresentado na Figura 3.10, resultam em uma distribuição com cauda à direita (distribuições leptocúrticas) como pode ser observado na Figura 4.22a.

Como a frequência da célula unitária foi ajustada com uma distribuição lognormal, esses resultados estão coerentes. Ainda, observa-se na Figura 4.22a, que os valores da frequência

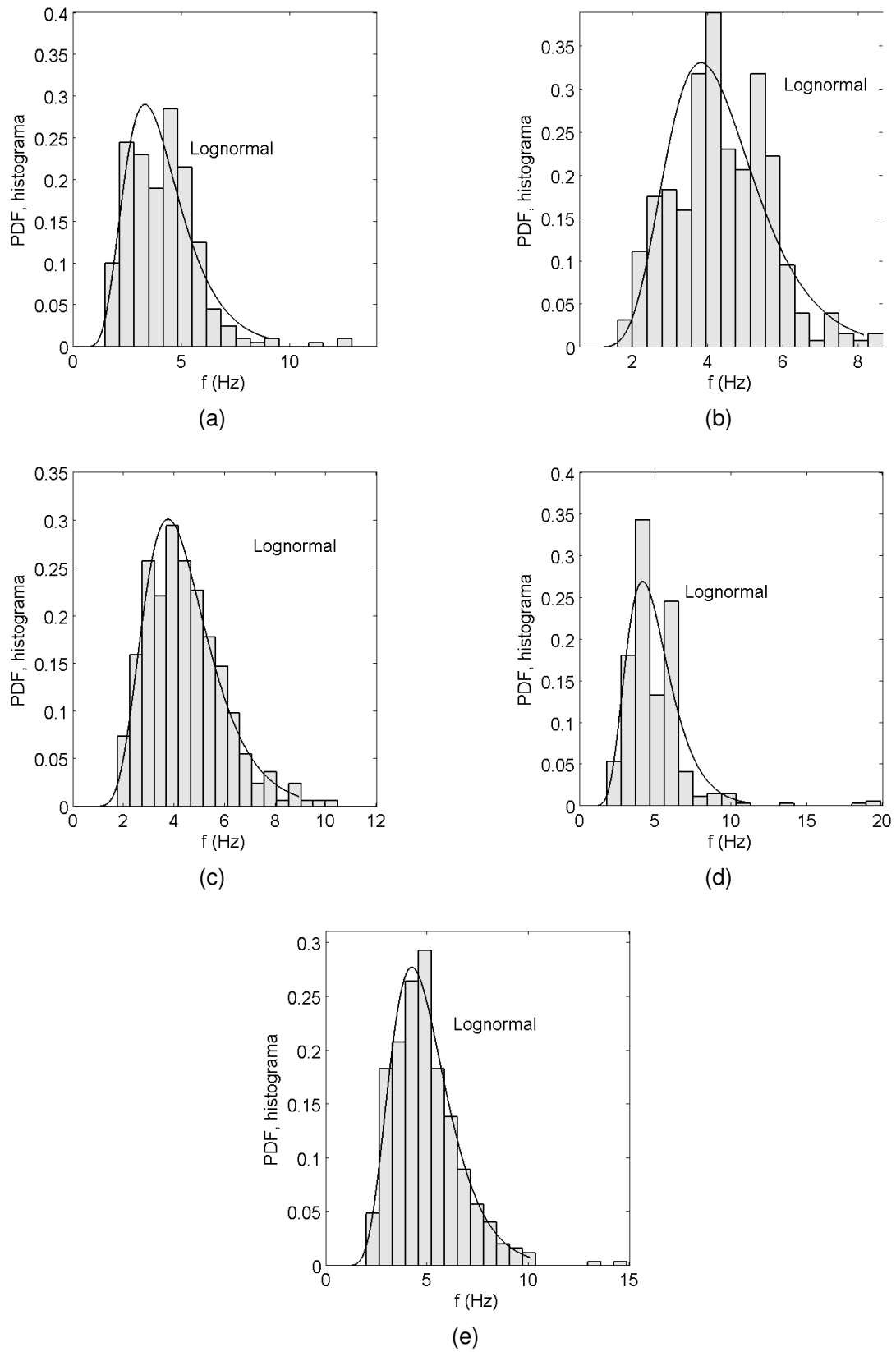


Figura 4.17 – Histogramas e distribuições da frequência f para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

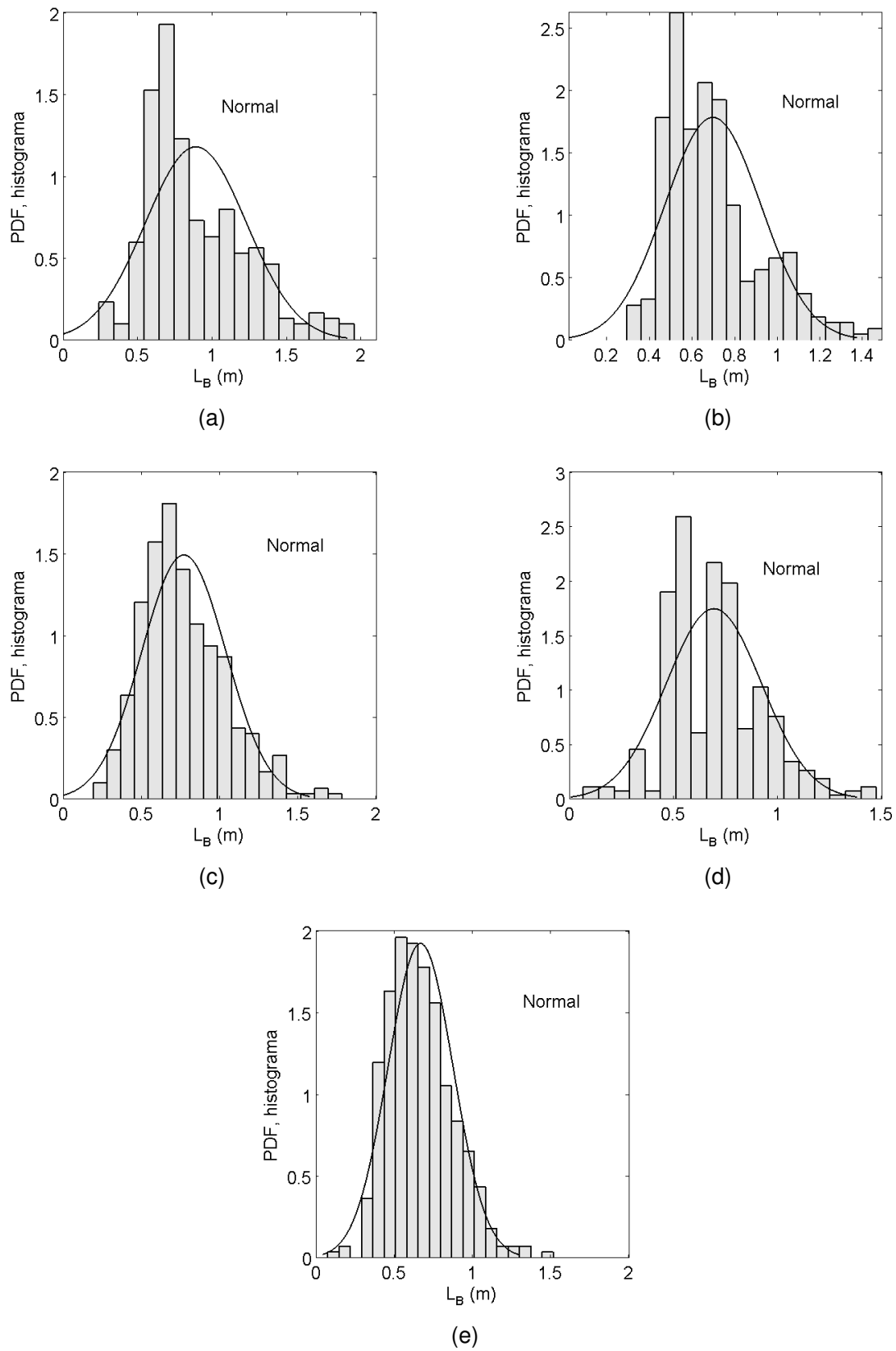


Figura 4.18 – Histogramas e distribuições do comprimento da bolha alongada L_B para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

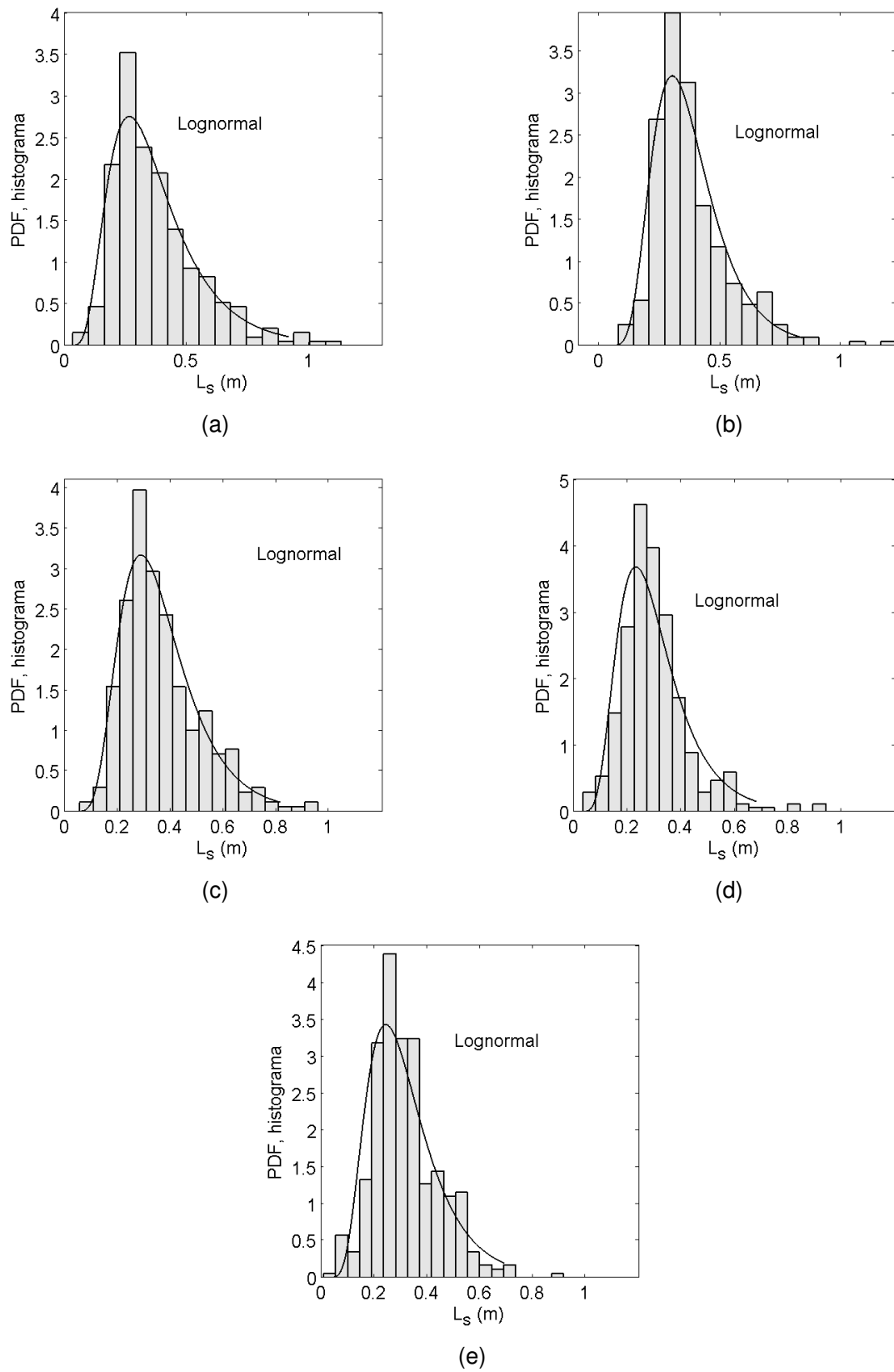


Figura 4.19 – Histogramas e distribuições do comprimento do pistão L_S para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

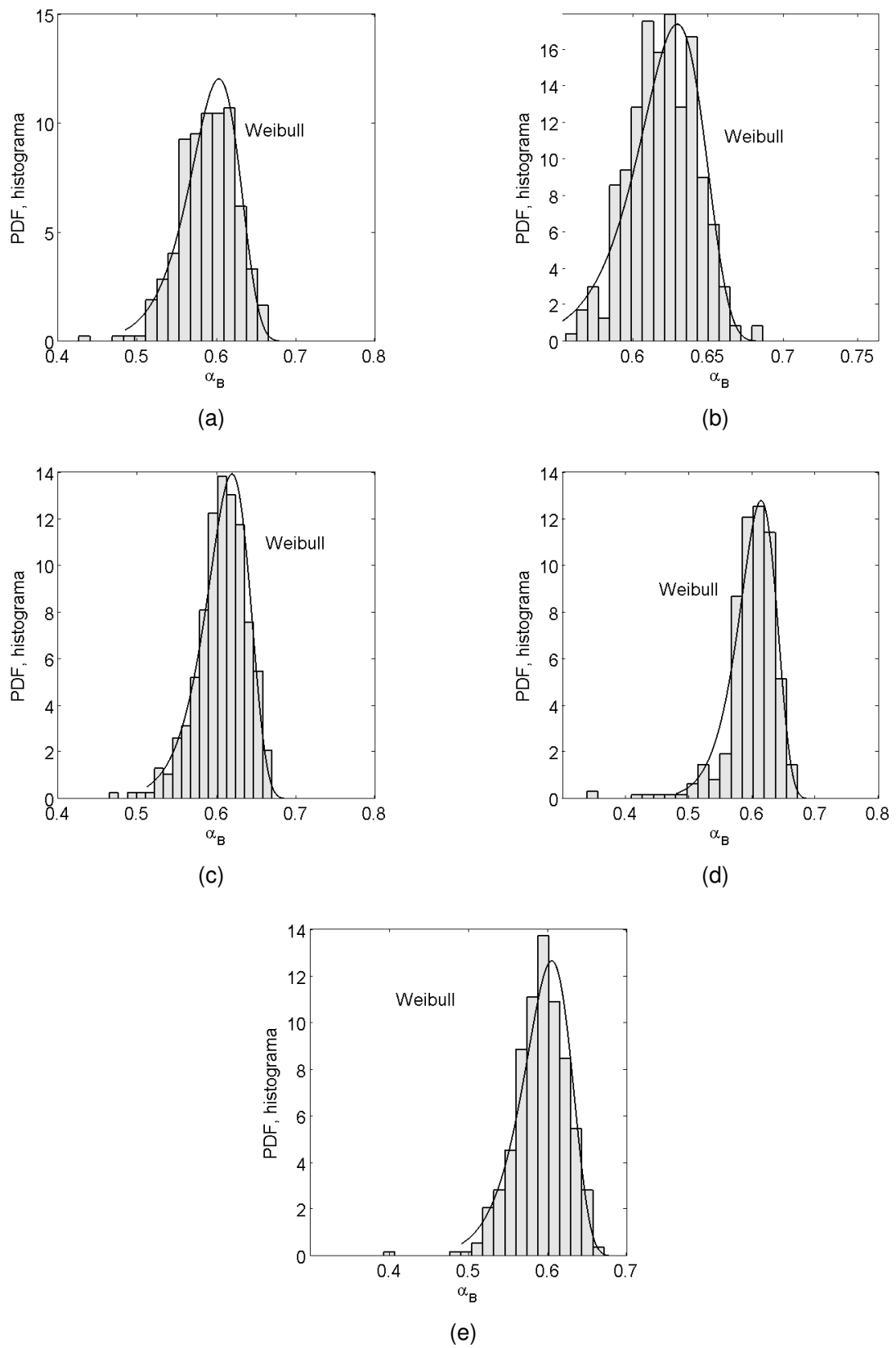


Figura 4.20 – Histogramas e distribuições da fração de vazio na região da bolha α_B para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

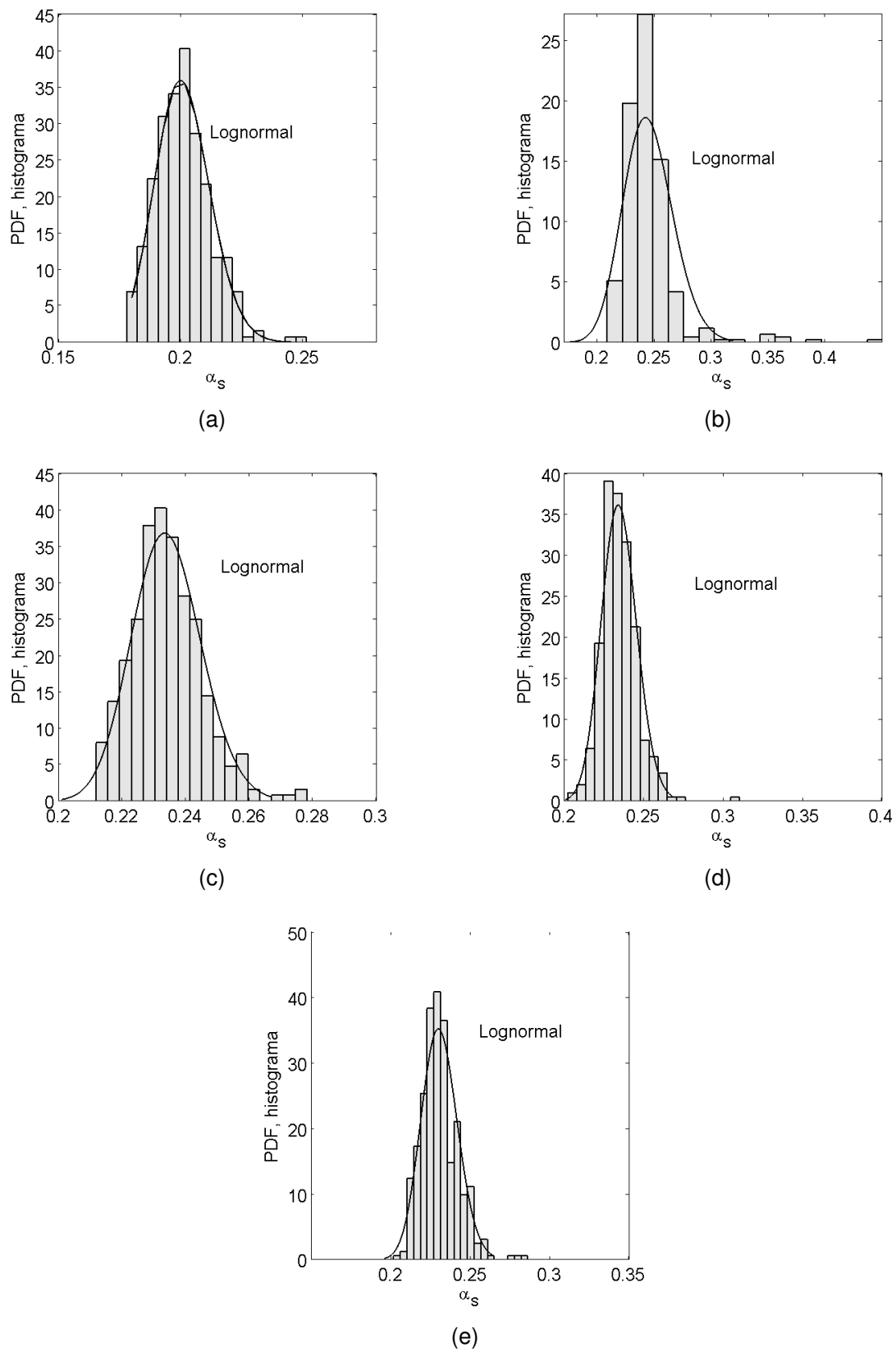


Figura 4.21 – Histogramas e distribuições da fração de vazio na região do pistão α_S para $J_L=1,75$ m/s e $J_G=1,75$ m/s. Legenda: a= -13° , b= -10° , c= -7° , d= -4° , e= 0° .

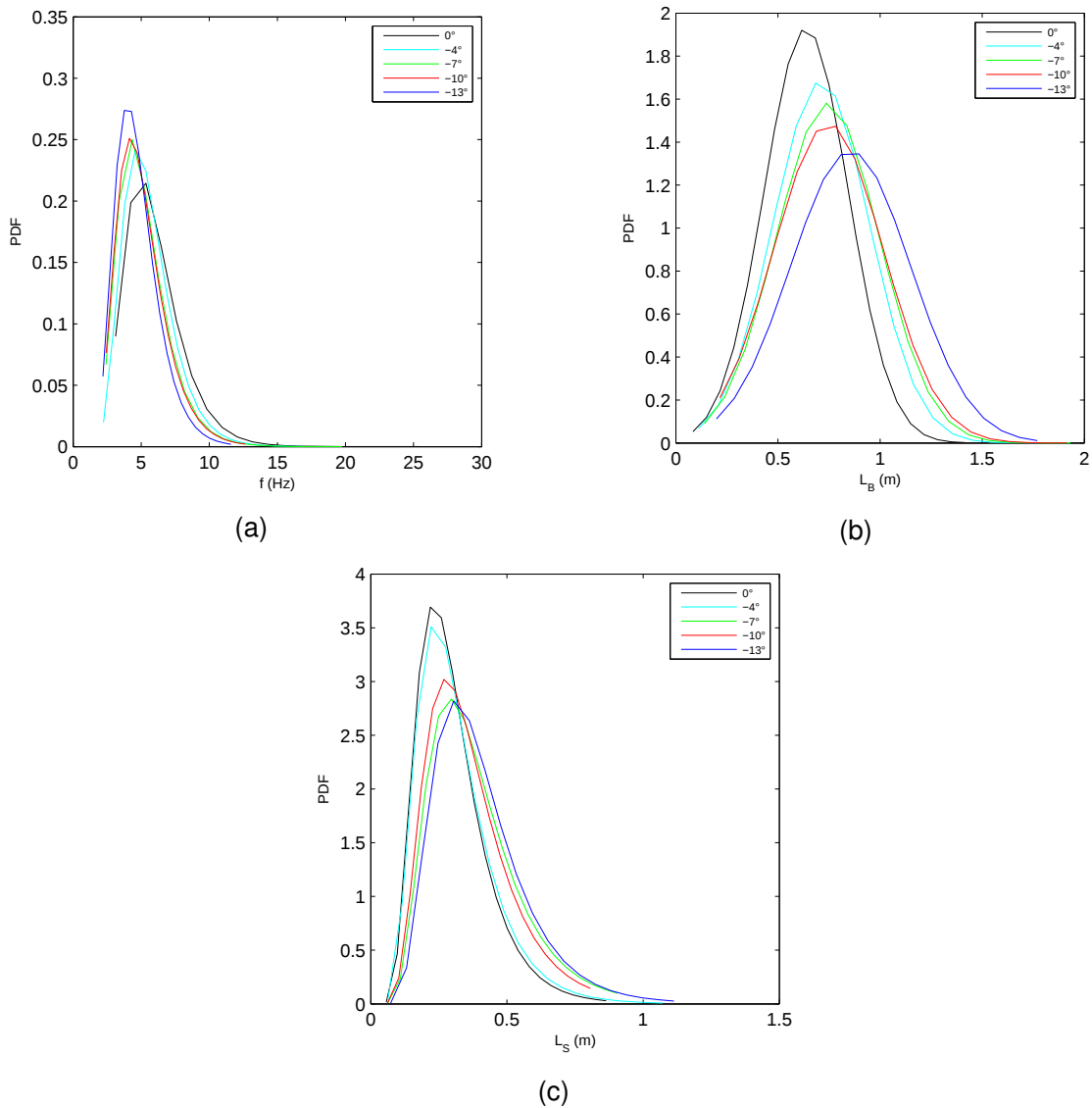


Figura 4.22 – PDFs comparativas da frequência, comprimento da bolha e do pistão com $J_L=2,00$ m/s e $J_G=2,00$ m/s. Legenda: a=frequência, b=comprimento da bolha, c=comprimento do pistão.

diminuem conforme o ângulo aumenta, o mesmo comportamento é observado para valores do desvio padrão (Tabela 4.6).

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores referentes ao comprimento do pistão para a PDF da Figura 4.22b. Os valores de assimetria também são positivos o que leva a uma distribuição leptocúrtica (cauda à direita), porém como os valores de curtose e desvio padrão são menores do que as distribuições da frequência, a curva é mais suave que as PDFs da frequência (Figura 4.22a). Com o aumento do ângulo de inclinação, os valores do desvio padrão aumentam (assim como ocorreu para os valores médios).

Na Tabela 4.8 os valores de assimetria (s) e curtose (k) relativos às PDFs do comprimento do pistão (Figura 4.22c) são apresentados. Assim como observado para o comprimento da bolha alongada, a PDF do comprimento do pistão é deslocada para a direita

Tabela 4.6 – Assimetria, curtose e desvio padrão da frequência.

Ângulo(°)	s	k	σf (Hz)
-13	0,94	4,02	1,82
-10	0,95	4,03	2,47
-7	2,27	12,0	2,66
-4	1,73	8,86	2,93
0	2,71	18,4	3,17

Tabela 4.7 – Assimetria, curtose e desvio padrão do comprimento da bolha.

Ângulo(°)	s	k	σL_S (m)
-13	0,40	2,87	0,29
-10	0,71	3,63	0,15
-7	0,46	3,88	0,10
-4	1,02	6,93	0,09
0	0,46	4,69	0,09

conforme há o aumento da inclinação. Isto indica que, para as mesmas condições de vazão de líquido e gás, há um aumento no comprimento do pistão com o aumento da inclinação.

Tabela 4.8 – Assimetria, curtose e desvio padrão do comprimento do pistão.

Ângulo(°)	s	k	σL_B (m)
-13	0,93	4,17	0,28
-10	0,87	3,63	0,13
-7	0,75	3,87	0,10
-4	1,48	6,93	0,10
0	1,00	4,69	0,10

O comportamento das PDFs, observado na Figura 4.22, da frequência e dos comprimentos da bolha e do pistão, leva a uma tendência peculiar no comportamento da velocidade da bolha alongada, caso este, que pode ser visualizado na Figura 4.23, onde não é possível identificar diretamente a influência do ângulo de inclinação na velocidade translacional da bolha.

Tabela 4.9 – Assimetria, curtose e desvio padrão da velocidade de translação.

Ângulo(°)	s	k	σV_{TB} (m/s)
-13	-0,10	2,53	0,28
-10	0,15	2,61	0,13
-7	-0,01	2,46	0,10
-4	0,20	3,69	0,10
0	0,66	4,07	0,10

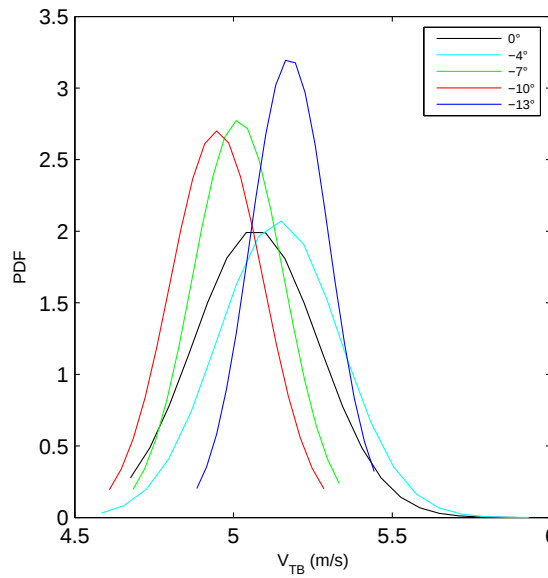


Figura 4.23 – Gráfico do comprimento do pistão adimensional em relação às velocidades superficiais e inclinação.

Na Tabela 4.9 são mostrados os valores alternados (positivo e negativo) da assimetria, que indicam o comportamento observado na Figura 4.23. Esse comportamento é devido à influência da frequência, comprimento da bolha e do pistão na velocidade da bolha alongada, uma vez que para calcular a velocidade da bolha, mostra-se que:

$$V_{TB} = f(L_B + L_S) \quad (4.10)$$

As PDFs da frequência são deslocadas para a esquerda, conforme há o aumento da inclinação (Figura 4.22a), e as PDFs dos comprimentos (L_S e L_B) são deslocadas para a direita (Figura 4.22b e Figura 4.22c). Então, valores da frequência diminuem e os valores dos comprimentos aumentam, e considerando a Equação (4.10), as PDF da velocidade da bolha alongada exibem a tendência observada na Figura 4.23.

4.9 Síntese do capítulo

Por fim, na Tabela 4.10 é apresentado um resumo dos parâmetros do escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas obtidos experimentalmente, e qual tipo de distribuição se adequou melhor para aproximar a velocidade de translação e da traseira da bolha alongada, frequência, comprimento da bolha e do pistão e fração de vazio.

Na sequência, as correlações propostas baseadas nos valores médios para os parâmetros, estão apresentadas na Tabela 4.11, onde todas as correlações apresentadas têm intervalo de confiança de 95% em relação aos dados obtidos experimentalmente.

Tabela 4.10 – Parâmetros do escoamento em golfadas e suas distribuições.

Parâmetro	Distribuição
Velocidade de translação da bolha	Normal
Velocidade da traseira da bolha	Normal
Frequência	Lognormal
Comprimento da bolha	Normal
Comprimento do pistão	Lognormal
Fração de vazio da bolha	Weibull
Fração de vazio do pistão	Lognormal

Tabela 4.11 – Correlações propostas para os parâmetros do escoamento bifásico de líquido e gás no escoamento descendente em golfadas.

Correlações	Ângulo(°)
$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,20Fr_J + 0,70$	-13
$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,30Fr_J - 0,52$	-10
$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,29Fr_J - 0,40$	-7
$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,38Fr_J - 0,79$	-4
$\frac{V_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,26Fr_J - 0,08$	0
$f = 0,0022 \left(\frac{J_G}{D} \right) \exp \left(6,18 \frac{J_L}{J} \right)$	-13
$f = 0,0075 \left(\frac{J_G}{D} \right) \exp \left(4,41 \frac{J_L}{J} \right)$	-10
$f = 0,0028 \left(\frac{J_G}{D} \right) \exp \left(6,16 \frac{J_L}{J} \right)$	-7
$f = 0,0028 \left(\frac{J_G}{D} \right) \exp \left(6,44 \frac{J_L}{J} \right)$	-4
$f = 0,0035 \left(\frac{J_G}{D} \right) \exp \left(6,01 \frac{J_L}{J} \right)$	0
$\frac{L_B}{D} = 3,05 \exp \left(4,71 \frac{J_G}{J} \cos \theta \right)$	todos
$\frac{L_S}{D} = 452,8 (Re_J St)^{-0,38}$	todos
$\alpha_B = 0,09 + 0,72 \left(\frac{J_G}{J} \right)^{0,5} (\cos \theta)^{0,2}$	todos
$H_{LS} = 1,64 \left(\frac{J_L}{J} \right) \cos \theta - 0,18$	todos

5 CONCLUSÃO

O escoamento descendente no padrão intermitente em golfadas foi caracterizado experimentalmente utilizando um sensor de malha de eletrodos. As inclinações em que o escoamento foi estudado foram de -13° , -10° , -7° , -4° e 0° tendo como fluidos utilizados água e ar.

Os testes experimentais foram realizados para 130 condições de vazão de líquido e de gás (130 pontos), condições estas que garantem a existência do escoamento no padrão em golfadas para todas as inclinações estudadas. Para confirmar a repetitividade dos dados experimentais, os experimentos foram realizados três vezes (três conjuntos) para cada condição de vazão de líquido e de gás, em datas diferentes.

Com os dados adquiridos pelo sensor de malha de eletrodos, foi realizado um processamento da série temporal obtendo-se os principais parâmetros do escoamento bifásico em golfadas. Parâmetros estes que, foram analisados a partir dos valores médios e distribuições estatísticas e comparados, sempre que possível, com correlações da literatura.

A velocidade de translação da bolha alongada foi comparada com as metodologias propostas por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) e Bendiksen (1984) encontrando-se para o coeficiente médio C_0 foi obtido valores entre 1,20 e 1,38. Ainda, propôs-se uma modificação para a correlação de Bendiksen (1984) considerando o termo de deslizamento de Weber (1981), fato que melhorou comparativamente a estimativa das velocidades experimentais obtidas.

Observou-se também que a velocidade da traseira da bolha alongada é superior à velocidade da frente em grande parte dos pontos experimentais medidos. A frequência de passagem da célula unitária ficou bem correlacionada em função do número de Strouhal conforme sugerido em Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003), Wang (2007) e Vicencio (2013).

As PDFs dos parâmetros do escoamento em golfadas foram avaliadas segundo as distribuições encontradas na literatura, como por exemplo: normal, lognormal e de Weibull. O conhecimento da evolução das distribuições estatísticas dos parâmetros do escoamento bifásico em golfadas é importante para avaliação dos modelos de início e evolução da golfada assim como os de captura e seguimento de pistões (Ujang et al, 2006).

Por fim, foram propostas correlações para os parâmetros do escoamento bifásico de líquido e gás no escoamento descendente em golfadas com intervalo de confiança do ajuste de 95%.

Em função aos resultados alcançados no desenvolvimento do presente trabalho, algumas recomendações e sugestões para trabalhos futuros são feitas:

- analisar o efeito de diferentes misturadores na entrada da seção de testes, visto que

o modo como isso é feito pode influenciar os padrões de escoamento em análise,

- avaliar o efeito de diferentes fluidos nos principais parâmetros do escoamento em golfadas, dado que as propriedades dos fluidos influenciam na transição para outros padrões,
- estudar o comportamento do escoamento em golfadas para inclinações maiores do que -13° , dada à limitação física da bancada
- avaliar o uso de outros métodos estatísticos que possam estimar e fornecer parâmetros do escoamento em golfadas a partir das velocidades superficiais de gás e de líquido.

REFERÊNCIAS

- AL-SAFRAN, E. Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 69, n. 12, p. 143 – 155, 2009. ISSN 0920-4105. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410509001788>>.
- ALVES, I. N.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Drift velocity of elongated bubbles in inclined pipes. *Chemical engineering science*, Elsevier, v. 48, n. 17, p. 3063–3070, 1993.
- AMARAL, C. D.; ALVES, R.; SILVA, M. D.; ARRUDA, L.; DORINI, L.; MORALES, R.; PIPA, D. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 33, p. 257–264, 2013.
- ANDREUSSI, P.; BENDIKSEN, K. An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 15, n. 6, p. 937 – 946, 1989. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932289900220>>.
- ANDREUSSI, P.; BENDIKSEN, K.; NYDAL, O. Void distribution in slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 19, n. 5, p. 817 – 828, 1993. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229390045V>>.
- ANTUNES, M. M.; COZIN, C.; BARBUTO, F. A.; MORALES, R. E.; RODRIGUES, H. T. Analysis of slug frequency correlations for two-phase gas-liquid horizontal slug flow. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. [S.l.], 2014.
- BAKER, R. *A Primer of Offshore Operations*. Petroleum Extension Service, Houston, Texas, 1998. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=l19QAQAAIAAJ>>.
- BARNEA, D.; BRAUNER, N. Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 11, n. 1, p. 43 – 49, 1985. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932285900047>>.
- BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Flow pattern transition for downward inclined two phase flow; horizontal to vertical. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 735–740, 1982.
- BARNEA, D.; TAITEL, Y. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Elsevier, v. 19, n. 5, p. 829–838, 1993.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 10, n. 4, p. 467 – 483, 1984. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932284900570>>.
- BENJAMIN, T. B. Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 31, n. 02, p. 209–248, 1968.

BERTOLA, V. Experimental characterization of gas–liquid intermittent subregimes by phase density function measurements. *Experiments in fluids*, Springer, v. 34, n. 1, p. 122–129, 2003.

BRILL, J. P.; SCHMIDT, Z.; COBERLY, W. A.; HERRING, J. D.; MOORE, D. W. et al. Analysis of two-phase tests in large diameter flow lines in prudhoe bay field. *Soc. Pet. Eng. J*, v. 270, p. 363–378, 1981.

CONTE, M. G. *Estudo numérico e experimental da geração de golfadas em um escoamento bifásico de gás-líquido*. Dissertação (Mestrado) — UTFPR, 2014.

CRAWFORD, T.; WEINBERGER, C.; WEISMAN, J. Two-phase flow patterns and void fractions in downward flow part i: Steady-state flow patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 11, n. 6, p. 761 – 782, 1985. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932285900230>>.

DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 1950. ISSN 0080-4630.

DEVORE, J. L. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. 6ª edição. *São Paulo, Cengage Learning*, 2011.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 14, n. 4, p. 337–347, 1975. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/i160056a011>>.

DUKLER, A. E.; MARON, D. M.; BRAUNER, N. A physical model for predicting the minimum stable slug length. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 40, n. 8, p. 1379–1385, 1985.

FABRE, J. *Gas-liquid slug flow*. [S.l.]: Springer, 2003.

FABRE, J.; LINÉ, A. Modeling of two-phase slug flow. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 24, n. 1, p. 21–46, 1992.

FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G.; MARCHITTO, A. Intermittent flow parameters from void fraction analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 14, n. 4, p. 161 – 168, 2003. ISSN 0955-5986. Multi Phase Flow Measurement. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598603000219>>.

GOPAL, M.; KAUL, A.; JEPSON, W. Mechanisms contributing to enhanced corrosion in three phase slug flow in horizontal pipes. In: *The NACE International Annual Conference and Corrosion Show*. [S.l.: s.n.], 1995.

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. *AIChE Journal*, American Institute of Chemical Engineers, v. 15, n. 6, p. 933–935, 1969. ISSN 1547-5905. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/aic.690150623>>.

GRESKOVICH, E. J.; SHRIER, A. L. Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, ACS Publications, v. 11, n. 2, p. 317–318, 1972.

- HEYWOOD, N.; RICHARDSON, J. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by gamma-ray absorption. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 17–30, 1979.
- HOAGLIN, D. C.; IGLEWICZ, B.; TUKEY, J. W. Performance of some resistant rules for outlier labeling. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis Group, v. 81, n. 396, p. 991–999, 1986.
- HOUT, R. V.; SHEMER, L.; BARNEA, D. Spatial distribution of void fraction within a liquid slug and some other related slug parameters. *International Journal of Multiphase Flow*, Elsevier, v. 18, n. 6, p. 831–845, 1992.
- HOUT, R. V.; SHEMER, L.; BARNEA, D. Evolution of hydrodynamic and statistical parameters of gas–liquid slug flow along inclined pipes. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 58, n. 1, p. 115–133, 2003.
- HUBERT, M.; VANDERVIEREN, E. An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational statistics & data analysis*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 5186–5201, 2008.
- JULIA, J. E.; LIU, Y.; HIBIKI, T.; ISHII, M. Local flow regime analysis in vertical co-current downward two-phase flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 44, n. 0, p. 345 – 355, 2013. ISSN 0894-1777. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177712001902>>.
- KOKAL, S.; STANISLAV, J. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes: I - flow patterns. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 665–679, 1989.
- KOKAL, S.; STANISLAV, J. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes: II - liquid holdup and pressure drop. *Chemical engineering science*, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 681–693, 1989.
- KU, H. Notes on the use of propagation of error formulas. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 70, n. 4, 1966.
- LIOUMBAS, J.; KOLIMENOS, C.; PARAS, S. Liquid layer characteristics in gas-liquid flow in slightly inclined pipes: Effect of non-ionic surfactant additives. *Chemical Engineering Science*, v. 64, n. 24, p. 5162 – 5172, 2009. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250909005715>>.
- LIOUMBAS, J.; MOUZA, A.; PARAS, S. Effect of surfactant additives on co-current gas-liquid downflow. *Chemical Engineering Science*, v. 61, n. 14, p. 4605 – 4616, 2006. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250906001539>>.
- MARON, D. M.; YACoub, N.; BRAUNER, N. New thoughts on the mechanics of gas-liquid slug flow. *Letters in Heat and Mass Transfer*, v. 9, n. 5, p. 333 – 342, 1982. ISSN 0094-4548. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0094454882900029>>.
- MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. [S.l.]: CRC Press, 1998.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two phase flow in horizontal pipes: Predictive models. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 56, n. 6, p. 653–663, 1978. ISSN 1939-019X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/cjce.5450560601>>.

NICKLIN, D.; WILKES, J.; DAVIDSON, J. Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, v. 40, n. 1, p. 61–68, 1962.

NYDAL, O.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 18, n. 3, p. 439 – 453, 1992. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229290027E>>.

OMGBA-ESSAMA, C. *Numerical Modelling of Transient Gas-liquid Flows (application to stratified & slug flow regimes)*. Cranfield University, 2004. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=JgTzGgAACAAJ>>.

PEREZ, V. H. *Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes*. Tese (Doutorado) — University of Nottingham, 2008. Disponível em: <<http://eprints.nottingham.ac.uk/11764/>>.

POTHOF, I.; CLEMENS, F. Experimental study of air–water flow in downward sloping pipes. *International journal of multiphase flow*, Elsevier, v. 37, n. 3, p. 278–292, 2011.

PRASSER, H.-M.; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 9, n. 2, p. 111 – 119, 1998. ISSN 0955-5986. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598698000156>>.

PRASSER, H.-M.; SCHOLZ, D.; ZIPPE, C. Bubble size measurement using wire-mesh sensors. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 12, n. 4, p. 299–312, ago. 2001. ISSN 0955-5986. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598600000467>>.

ROITBERG, E.; SHEMER, L.; BARNEA, D. Application of a borescope to studies of gas-liquid flow in downward inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 32, n. 4, p. 499 – 516, 2006. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932206000322>>.

ROITBERG, E.; SHEMER, L.; BARNEA, D. Hydrodynamic characteristics of gas-liquid slug flow in a downward inclined pipe. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 14, p. 3605 – 3613, 2008. ISSN 0009-2509. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908002182>>.

SAETHER, G.; BENDIKSEN, K.; MULLER, J.; FROLAND, E. The fractal statistics of liquid slug lengths. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 16, n. 6, p. 1117 – 1126, 1990. ISSN 0301-9322. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229090109V>>.

SANTOS, T. S. M. M. *Hydrodynamics of gas-liquid flows in slug flow regime*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2012.

SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational statistics & data analysis*, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 165–174, 2004.

SCHWERTMAN, N. C.; SILVA, R. de. Identifying outliers with sequential fences. *Computational statistics & data analysis*, Elsevier, v. 51, n. 8, p. 3800–3810, 2007.

SHEMER, L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 24, n. 3, p. 334 – 344, 2003. ISSN 0142-727X. Contains Selected Keynote Lectures from the 12th International Heat Transfer Conference. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X03000249>>.

SHOHAM, O. *Mechanistic Modeling of Gas-liquid Two-phase Flow in Pipes*. Society of Petroleum Engineers, 2006. ISBN 9781555631079. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=WfxwPgAACAAJ>>.

SILVA, M. J. D. Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging. 2008.

SPEDDING, P.; WATTERSON, J.; RAGHUNATHAN, S.; FERGUSON, M. Two-phase co-current flow in inclined pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 41, n. 24, p. 4205 – 4228, 1998. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931098001227>>.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Elsevier, v. 3, n. 6, p. 585–596, 1977.

TRONCONI, E. Prediction of slug frequency in horizontal two-phase slug flow. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 36, n. 5, p. 701–709, 1990.

TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. *Reading, Ma*, v. 231, p. 32, 1977.

TZOTZI, C.; BONTOZOGLOU, V.; ANDRITSOS, N.; VLACHOGIANNIS, M. Effect of fluid properties on flow patterns in two-phase gas- liquid flow in horizontal and downward pipes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 50, n. 2, p. 645–655, 2010.

VICENCIO, F. E. C. *Caracterização experimental do escoamento intermitente líquido-gás em tubulações horizontais*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR, 2013.

VUOLO, J. H. *Fundamentos da teoria dos erros*. [S.l.]: E. Blucher, 1996.

WALLIS, G. *One-dimensional two-phase flow*. McGraw-Hill, 1969. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=xvFQAAAAMAAJ>>.

WANG, X.; GUO, L.; ZHANG, X. An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 50, n. 11, p. 2439–2443, 2007.

WEBER, M. E. Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Wiley Online Library, v. 59, n. 3, p. 398–399, 1981.

WOODS, B. D.; HURLBURT, E. T.; HANRATTY, T. J. Mechanism of slug formation in downwardly inclined pipes. *International journal of multiphase flow*, Elsevier, v. 26, n. 6, p. 977–998, 2000.

YAMAZAKI, Y.; YAMAGUCHI, K. Characteristics of cocurrent two-phase downflow in tubes. *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 16, n. 4, p. 245–255, 1979. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1979.9730898>>.

YU, Z.; LIU, S.; LI, X. A study on un-fully developed slug flow in a vertical tube. *Heat Transfer – Asian Research*, Wiley Online Library, v. 34, n. 4, p. 235–242, 2005.

ZABARAS, G. Prediction of slug frequency for gas/liquid flows. *SPE Journal*, Society of Petroleum Engineers, v. 5, n. 03, p. 252–258, 2000.

ZUKOSKI, E. Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 25, n. 04, p. 821–837, 1966.

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS

Neste apêndice é descrito como foram obtidas as velocidades superficiais de líquido e de gás para a medição dos pontos experimentais do escoamento bifásico de líquido e gás em golfadas.

A.1 Velocidade superficial de líquido

Na Figura A.1 é apresentado um esboço das linhas de gás, de líquido e bifásica. Na determinação das velocidades superficiais de gás e de líquido, a premissa principal é que as vazões mássicas permanecem constantes ao longo das seções da tubulação.

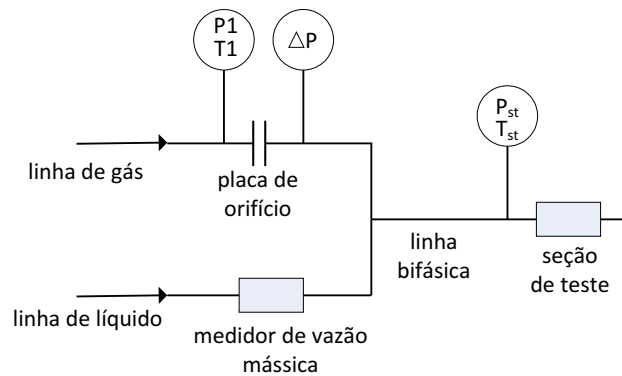


Figura A.1 – Esquema das linhas de líquido, gás e seção de teste.

Com a vazão mássica na entrada e a respectiva temperatura na seção de teste é possível calcular a velocidade superficial de líquido. Na linha de líquido, a vazão mássica no sensor é igual à vazão na seção de teste.

$$\dot{m}_{L,svm} = \dot{m}_{L,st} \quad (A.1)$$

A vazão mássica de líquido na seção de teste pode ser escrita em função da velocidade superficial de líquido:

$$\dot{m}_{L,st} = \rho_{L,st} J_L A \quad (A.2)$$

Reescrevendo a Equação (A.2) chega-se na seguinte expressão:

$$J_L = \frac{\dot{m}_{L,st}}{\rho_{L,st} A} \quad (A.3)$$

Uma correlação proposta por Martin e McCutcheon (1998), apresentada na Equação (A.4), permite determinar a massa específica do líquido em função da temperatura na seção de teste.

$$\rho_{L,st} = 1000 \left[1 - \frac{(T_{st} + 15,7914)(T_{st} - 277,1363)^2}{508929,2(T_{st} - 205,02037)} \right] \quad (A.4)$$

A.2 Velocidade superficial de gás

Para determinar a vazão na placa de orifício utilizam-se rotâmetros conforme foi mencionado no capítulo anterior. A vazão em cada rotâmetro pode ser calculada em função da posição do flutuador, em SKT, mediante uma correlação linear para cada um dos rotâmetros utilizados.

Essa vazão calculada, a partir das curvas de calibração do fabricante, é a vazão volumétrica correspondente à condição de pressão e temperatura com as quais os rotâmetros foram calibrados pelo fabricante e, portanto deve ser corrigida.

Aplicando um balanço de forças no flutuador do rotâmetro como mostrado na Figura A.2, é possível obter uma expressão para a vazão no rotâmetro nas condições de calibração e de medição conforme a Equação (A.5)

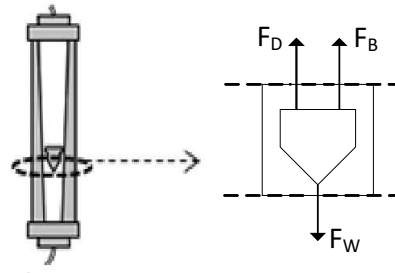


Figura A.2 – Esquema das linhas de líquido, gás e seção de teste.

$$Q_{G,rot} = Q_{G,cal} \sqrt{\frac{\rho_{G,cal}}{\rho_{G,rot}}} \quad (A.5)$$

A massa específica do gás é calculada aplicando a hipótese de gás ideal:

$$\rho_G = \frac{P_1}{RT_1} \quad (A.6)$$

onde P_1 e T_1 são a pressão e temperatura medidas pelo sensor e R é a constante do gás que no caso do ar é de 287 J/(kg.K) .

A determinação da vazão mássica de gás da placa de orifício é feita baseada na equação:

$$\dot{m}_{G,po} = C\gamma A_0 \sqrt{\frac{2}{1-\beta^4} \Delta P \rho_G} \quad (\text{A.7})$$

onde C é o coeficiente de descarga, γ é o coeficiente de expansão, A_0 é área do orifício, β é relação entre o diâmetro do furo e da placa à montante.

O produto entre os coeficientes de descarga e de expansão pode ser expresso como função do número de Reynolds e da relação entre a queda de pressão na placa e pressão do gás:

$$C\gamma = C\gamma(Re^{-0,5}, \Delta P/P_1) \quad (\text{A.8})$$

Para determinar o fator $C\gamma$ rearranja-se a Equação (A.7)

$$C\gamma = \frac{\dot{m}_{G,po}}{A_0} \sqrt{\frac{1-\beta^4}{2\Delta P \rho_G}} \quad (\text{A.9})$$

onde $\dot{m}_{G,po}$ é a vazão mássica de gás na placa de orifício. A vazão mássica de gás no rotâmetro é calculada pela expressão:

$$\dot{m}_{G,po} = \rho_G Q_{G,rot} \quad (\text{A.10})$$

A vazão mássica de gás na placa de orifício e na placa de orifício é constante pode-se escrever:

$$\dot{m}_{G,po} = \dot{m}_{G,rot} \quad (\text{A.11})$$

Em posse da vazão volumétrica de gás no rotâmetro, do número de Reynolds e da relação de pressão, os dados são processados no programa *Surfer 11*, cuja metodologia está baseada na análise de regressão. Então é proposta uma função polinomial de segundo grau para $Re^{-0,5}$ e de terceiro grau para $\Delta P/P_1$.

$$\begin{aligned} C\gamma(Re^{-0,5}, \Delta P/P_1) = & A_{00} + A_{01}(\Delta P/P_1) + A_{02}(\Delta P/P_1)^2 + A_{03}(\Delta P/P_1)^3 \\ & + A_{10}(Re^{-0,5}) + A_{11}(Re^{-0,5})(\Delta P/P_1) + A_{12}(Re^{-0,5})(\Delta P/P_1)^2 + A_{13}(Re^{-0,5})(\Delta P/P_1)^3 \\ & + A_{20}(Re^{-0,5})^2 + A_{21}(Re^{-0,5})^2(\Delta P/P_1) + A_{22}(Re^{-0,5})^2(\Delta P/P_1)^2 + A_{23}(Re^{-0,5})^2(\Delta P/P_1)^3 \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

É necessário fazer esta análise de regressão, pois não foi possível estabelecer de maneira direta uma expressão para os coeficientes de descarga e de expansão porque há dependência entre eles. Sabendo que a vazão mássica de gás na placa de orifício e na

seção de teste é constante pode-se escrever:

$$\dot{m}_{G,po} = \dot{m}_{G,st} \quad (\text{A.13})$$

A vazão mássica de gás na seção de teste pode ser escrita em função da velocidade superficial de gás:

$$\dot{m}_{G,st} = \rho_{G,st} J_G A \quad (\text{A.14})$$

Utilizando as equações Equação (A.10), Equação (A.11) e Equação (A.14) obtém-se uma expressão em função de J_G

$$J_G = \frac{\rho_G}{\rho_{G,st}} \frac{Q_{G,rot}}{A} \quad (\text{A.15})$$

Então, com as expressões Equação (A.3) e Equação (A.15) é possível determinar as velocidades superficiais de líquido e de gás respectivamente.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste apêndice é descrito como foram obtidas as incertezas para as medidas experimentais das velocidades superficiais do escoamento em golfadas. A metodologia aqui apresentada segue a metodologia de Vuolo (1996) e as abordagens de Vicencio (2013) e (CONTE, 2014).

Em medições experimentais sempre há alguma incerteza associada aos valores medidos. Então faz-se necessário avaliar a propagação dessas incertezas sobre as variáveis medidas.

Uma variável R pode ser expressa como $R = R(x_1, x_2, \dots, x_i)$ onde o efeito sobre a medição x_i é dado por

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (\text{B.1})$$

enquanto que a variação relativa de R é dada por

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (\text{B.2})$$

Introduzindo a notação de incerteza relativa na Equação (B.2), chega-se a

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (\text{B.3})$$

Para estimar a incerteza relativa em R decorrente dos efeitos combinados de todas as medições, pode-se utilizar a Equação (B.4) conforme Ku (1966).

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

Então, é necessário definir as incertezas relativas dos instrumentos de medição utilizados.

As incertezas referentes ao diâmetro, temperaturas e vazão do rotâmetro são estimadas como metade da menor escala do instrumento de medição. Os medidores de pressão foram calibrados por um calibrador de pressão da marca *Fluke* 718, modelo 100G que fornece um certificado garantindo precisão de 0,05%. Para a vazão de líquido Q_L , a incerteza também

Tabela B.1 – Incertezas relativas das variáveis da bancada experimental.

Variável	Incerteza relativa(%)
D	$\pm 0,10$
P_{rot}	$\pm 0,05$
P_{st}	$\pm 0,05$
T_{rot}	$\pm 0,25$
T_{st}	$\pm 0,25$
Q_L	$\pm 0,20$
$Q_{G,rot}$	$\pm 2,00$

é garantida pelo certificado de calibração do instrumento.

$$J_G = \frac{P_{rot}}{P_{st}} \frac{\left(Q_{G,rot} \sqrt{\frac{P_{cal}}{P_{tot}+P_{atm}} \frac{T_{st}+273,15}{T_{cal}+273,15}} \right)}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (B.5)$$

onde $P_{cal}=101325 \text{ Pa}$ e $T_{cal}=25^\circ \text{ C}$.

Por fim, as incertezas de medição das velocidades superficiais estão indicadas na tabela abaixo.

Tabela B.2 – Incertezas relativas das variáveis da bancada experimental.

Variável	Incerteza relativa(%)
J_L	$\pm 0,28$
J_G	$\pm 2,02$

APÊNDICE C – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS RESULTADOS

C.1 Valores médios dos parâmetros do escoamento em golfadas

Nas tabelas Tabela C.1, Tabela C.2, Tabela C.3, Tabela C.4 e Tabela C.5 estão respectivamente os parâmetros médios obtidos experimentalmente para as inclinações de -13° , -10° , -7° , -4° e 0° .

Tabela C.1 – Parâmetros médios para a inclinação de -13° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
3,89	3,95	1,67	2,70	0,78	0,62	0,15	1,25	1,75
4,08	5,35	0,59	12,90	2,17	0,50	0,14	1,50	1,50
4,49	4,60	2,35	1,65	0,58	0,63	0,20	1,50	2,00
4,11	4,24	1,55	1,71	2,41	0,59	0,19	1,75	1,25
4,48	4,58	4,14	0,89	0,38	0,59	0,20	1,75	1,75
3,91	3,88	3,77	0,63	0,62	0,54	0,15	2,00	1,00
4,51	4,63	5,41	0,60	0,34	0,56	0,21	2,00	1,50
5,18	5,49	4,75	0,86	0,40	0,60	0,25	2,00	2,00
3,88	3,86	6,17	0,33	0,38	0,46	0,14	2,25	0,75
4,49	4,60	6,98	0,41	0,31	0,52	0,20	2,25	1,25
5,20	5,43	6,11	0,61	0,34	0,57	0,25	2,25	1,75
4,48	4,60	8,44	0,29	0,30	0,48	0,20	2,50	1,00
5,20	5,39	7,79	0,43	0,32	0,55	0,25	2,50	1,50

C.2 Desvio padrão dos parâmetros do escoamento em golfadas

Nas tabelas Tabela C.6, Tabela C.7, Tabela C.8, Tabela C.9 e Tabela C.10 estão respectivamente os desvios padrão obtidos experimentalmente para as inclinações de -13° , -10° , -7° , -4° e 0° .

Tabela C.2 – Parâmetros médios para a inclinação de -10° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
3,62	3,70	2,37	1,50	0,58	0,65	0,18	1,25	1,75
3,67	3,64	1,72	1,98	1,33	0,65	0,16	1,50	1,50
4,23	4,36	2,88	1,25	0,48	0,64	0,22	1,50	2,00
4,86	5,11	2,94	1,60	0,43	0,65	0,26	1,50	2,50
3,00	4,36	2,56	1,39	0,80	0,38	0,07	1,75	0,75
3,62	3,64	4,36	0,62	0,42	0,56	0,17	1,75	1,25
4,31	4,33	4,37	0,70	0,38	0,62	0,25	1,75	1,75
4,86	5,01	3,81	1,07	0,44	0,64	0,26	1,75	2,24
2,96	3,00	3,83	0,29	0,62	0,44	0,10	2,00	0,50
3,61	3,65	6,32	0,35	0,30	0,51	0,16	2,00	1,00
4,29	4,36	5,87	0,51	0,32	0,57	0,22	2,00	1,51
4,95	5,05	5,08	0,75	0,36	0,61	0,27	2,00	2,00
3,59	3,66	7,88	0,23	0,27	0,46	0,16	2,25	0,75
4,27	4,50	7,40	0,36	0,30	0,53	0,21	2,25	1,26
4,97	4,98	6,56	0,52	0,32	0,58	0,26	2,25	1,75
4,25	4,52	9,00	0,26	0,30	0,49	0,20	2,50	1,00
4,97	5,14	7,88	0,39	0,33	0,56	0,26	2,50	1,51

Tabela C.3 – Parâmetros médios para a inclinação de -7° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
3,57	4,81	0,42	13,15	1,21	0,61	0,17	0,75	2,24
3,10	3,08	2,08	1,50	0,53	0,64	0,11	1,00	1,50
3,71	3,74	1,46	2,38	0,70	0,68	0,19	1,00	2,01
4,16	4,37	1,69	2,44	0,61	0,70	0,27	1,00	2,50
3,14	3,26	1,89	1,50	0,85	0,62	0,09	1,25	1,25
3,68	4,00	2,53	1,27	0,47	0,64	0,18	1,25	1,76
4,27	4,67	2,64	1,62	0,54	0,67	0,26	1,25	2,26
2,36	3,96	2,04	1,16	1,03	0,36	0,04	1,50	0,50
3,07	3,13	3,79	0,57	0,45	0,56	0,10	1,50	1,00
3,74	3,87	4,14	0,69	0,32	0,59	0,18	1,50	1,50
4,36	4,86	3,41	1,10	0,44	0,64	0,24	1,50	2,00
4,90	5,22	3,12	1,43	0,50	0,67	0,29	1,50	2,50
2,31	4,48	4,04	0,23	0,82	0,30	0,07	1,75	0,25
3,04	3,06	6,14	0,27	0,29	0,49	0,11	1,75	0,75
3,68	3,77	5,49	0,46	0,30	0,56	0,17	1,75	1,25
4,37	4,65	4,43	0,77	0,37	0,61	0,23	1,75	1,75
4,96	5,21	3,97	1,03	0,42	0,64	0,28	1,75	2,25
3,01	3,05	7,74	0,16	0,27	0,41	0,09	2,00	0,50
3,66	3,80	7,32	0,31	0,27	0,51	0,17	2,00	1,00
4,34	4,53	6,32	0,47	0,30	0,58	0,23	2,00	1,50
5,01	5,31	5,17	0,74	0,38	0,62	0,27	2,00	2,02
3,01	3,49	7,90	0,12	0,38	0,30	0,09	2,25	0,25
3,65	3,84	9,53	0,19	0,25	0,46	0,17	2,25	0,75
4,34	4,66	7,77	0,34	0,30	0,54	0,23	2,25	1,25
5,03	5,39	6,64	0,53	0,35	0,59	0,28	2,25	1,76
3,66	3,94	11,96	0,13	0,22	0,38	0,16	2,50	0,50
4,33	4,68	9,82	0,24	0,28	0,49	0,23	2,50	1,00
5,02	5,49	8,16	0,38	0,34	0,57	0,29	2,50	1,51

Tabela C.4 – Parâmetros médios para a inclinação de -4° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
3,22	3,14	0,90	3,70	0,94	0,72	0,14	0,75	1,76
3,65	3,77	1,40	2,95	0,52	0,70	0,21	0,75	2,26
3,95	4,19	1,30	3,21	0,63	0,74	0,35	0,75	2,76
3,09	3,10	1,92	1,41	0,53	0,66	0,13	1,00	1,50
3,69	3,81	2,11	1,75	0,44	0,67	0,20	1,00	2,00
4,38	4,32	1,99	2,14	0,46	0,68	0,25	1,00	2,50
4,99	5,25	1,78	2,76	0,67	0,72	0,34	1,00	3,02
2,42	2,39	4,04	0,40	0,33	0,53	0,05	1,25	0,75
3,11	3,12	3,59	0,69	0,30	0,59	0,12	1,25	1,25
3,71	4,01	3,16	1,14	0,33	0,62	0,18	1,25	1,76
4,46	4,46	2,79	1,50	0,38	0,65	0,24	1,25	2,25
4,92	4,90	2,75	1,76	0,47	0,69	0,30	1,25	2,75
2,39	2,36	6,07	0,19	0,25	0,44	0,04	1,50	0,50
3,12	3,11	5,18	0,43	0,26	0,53	0,11	1,50	1,00
3,74	3,76	3,86	0,76	0,34	0,60	0,18	1,50	1,50
4,38	4,46	3,55	1,07	0,37	0,63	0,24	1,50	2,00
5,02	4,89	3,41	1,35	0,40	0,66	0,29	1,50	2,52
6,46	5,20	3,09	1,67	0,48	0,69	0,34	1,50	3,01
2,38	2,48	6,11	0,13	0,32	0,31	0,03	1,75	0,25
3,09	3,12	7,58	0,24	0,22	0,46	0,10	1,75	0,75
3,72	3,81	5,85	0,41	0,30	0,58	0,20	1,75	1,25
4,43	4,39	4,96	0,69	0,30	0,60	0,23	1,75	1,75
5,08	5,50	4,40	1,04	0,34	0,62	0,26	1,75	2,25
5,89	5,34	3,93	1,29	0,38	0,66	0,31	1,75	2,76
3,05	3,15	9,94	0,14	0,21	0,39	0,09	2,00	0,50
3,74	3,80	7,82	0,31	0,23	0,50	0,17	2,00	1,00
4,42	4,45	6,34	0,49	0,29	0,57	0,23	2,00	1,50
5,14	5,02	5,54	0,71	0,31	0,61	0,27	2,00	2,00
3,10	3,38	9,63	0,10	0,28	0,29	0,08	2,25	0,25
3,72	3,92	10,56	0,19	0,21	0,44	0,16	2,25	0,75
4,43	4,76	8,31	0,36	0,24	0,51	0,21	2,25	1,25
5,11	5,21	6,95	0,53	0,29	0,58	0,27	2,25	1,75
3,70	3,91	13,59	0,11	0,20	0,38	0,15	2,50	0,50
4,40	4,59	10,74	0,22	0,24	0,49	0,22	2,50	1,00
5,11	5,25	8,80	0,38	0,27	0,54	0,27	2,50	1,50

Tabela C.5 – Parâmetros médios para a inclinação de 0°.

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
4,26	3,89	0,88	4,97	0,64	0,74	0,30	0,50	3,02
5,07	4,65	1,24	5,07	0,42	0,72	0,38	0,50	3,99
3,11	3,09	1,70	1,76	0,41	0,69	0,15	0,75	1,76
3,69	3,65	1,62	2,38	0,45	0,70	0,22	0,75	2,25
4,26	4,16	1,48	2,93	0,56	0,71	0,27	0,75	2,75
3,10	3,02	2,59	1,04	0,34	0,63	0,13	1,00	1,50
3,77	3,60	2,33	1,47	0,42	0,67	0,21	1,00	2,00
4,35	4,13	2,20	1,92	0,41	0,68	0,24	1,00	2,50
5,03	4,57	2,04	2,36	0,49	0,71	0,31	1,00	3,04
2,43	2,44	5,79	0,27	0,22	0,52	0,05	1,25	0,75
3,15	3,03	3,84	0,61	0,29	0,59	0,12	1,25	1,25
3,80	3,61	3,16	0,96	0,37	0,64	0,20	1,25	1,75
4,35	4,21	3,00	1,33	0,39	0,65	0,23	1,25	2,25
5,02	4,72	2,58	1,71	0,47	0,68	0,29	1,25	2,74
2,40	2,45	9,41	0,13	0,16	0,41	0,04	1,50	0,50
3,11	3,07	5,77	0,36	0,24	0,53	0,11	1,50	1,00
3,79	3,80	4,49	0,69	0,25	0,56	0,18	1,50	1,50
4,41	4,23	3,97	0,91	0,34	0,62	0,24	1,50	2,00
5,09	4,64	3,56	1,21	0,36	0,65	0,28	1,50	2,51
5,71	4,96	3,38	1,42	0,41	0,67	0,32	1,50	3,01
2,42	2,51	7,69	0,06	0,27	0,41	0,05	1,75	0,25
3,11	3,18	8,87	0,19	0,21	0,47	0,11	1,75	0,75
3,74	3,73	6,16	0,40	0,27	0,55	0,18	1,75	1,25
4,47	4,39	4,97	0,67	0,32	0,59	0,23	1,75	1,75
5,05	5,07	4,68	0,91	0,34	0,62	0,27	1,75	2,25
5,72	5,10	4,31	1,07	0,36	0,65	0,32	1,75	2,75
3,07	3,17	12,27	0,12	0,17	0,37	0,09	2,00	0,50
3,75	3,85	8,64	0,28	0,22	0,47	0,16	2,00	1,00
4,40	4,33	6,76	0,44	0,28	0,55	0,22	2,00	1,50
5,07	4,85	5,94	0,64	0,30	0,59	0,27	2,00	2,00
3,11	3,27	10,69	0,06	0,27	0,36	0,09	2,25	0,25
3,81	3,83	12,13	0,16	0,19	0,43	0,15	2,25	0,75
4,44	4,37	8,85	0,31	0,25	0,52	0,22	2,25	1,25
5,08	5,06	7,37	0,49	0,28	0,56	0,27	2,25	1,75
3,75	3,90	14,72	0,10	0,19	0,37	0,14	2,50	0,50
4,38	4,52	11,68	0,22	0,21	0,46	0,21	2,50	1,00
5,07	5,06	9,29	0,34	0,26	0,53	0,26	2,50	1,51

Tabela C.6 – Desvio padrão para a inclinação de -13° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
0,22	0,44	1,06	1,88	0,55	0,04	0,03	1,25	1,75
0,19	0,91	0,49	12,70	1,03	0,10	0,05	1,50	1,50
0,14	0,36	0,94	0,63	0,29	0,03	0,02	1,50	2,00
0,18	0,82	1,43	0,85	2,19	0,06	0,05	1,75	1,25
0,10	0,30	1,64	0,34	0,18	0,03	0,01	1,75	1,75
0,11	0,21	1,82	0,29	0,28	0,05	0,01	2,00	1,00
0,10	0,30	1,93	0,19	0,13	0,03	0,01	2,00	1,50
0,12	0,51	1,66	0,29	0,16	0,03	0,01	2,00	2,00
0,09	0,21	2,59	0,11	0,16	0,05	0,01	2,25	0,75
0,09	0,28	2,19	0,15	0,13	0,04	0,01	2,25	1,25
0,11	0,42	1,95	0,20	0,13	0,03	0,01	2,25	1,75
0,09	0,26	2,54	0,12	0,10	0,04	0,01	2,50	1,00
0,12	0,37	2,60	0,17	0,11	0,03	0,01	2,50	1,50

Tabela C.7 – Desvios padrão para a inclinação de -10° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
0,15	0,28	1,11	0,92	0,50	0,04	0,02	1,25	1,75
0,17	0,30	1,60	0,93	0,72	0,05	0,02	1,50	1,50
0,14	0,40	1,38	0,45	0,19	0,04	0,01	1,50	2,00
0,17	0,93	1,48	0,66	0,22	0,04	0,01	1,50	2,50
0,12	0,81	1,92	1,07	0,47	0,07	0,01	1,75	0,75
0,11	0,24	2,23	0,29	0,21	0,05	0,01	1,75	1,25
0,13	0,25	1,25	0,22	0,15	0,02	0,02	1,75	1,75
0,16	0,41	1,81	0,41	0,18	0,04	0,01	1,75	2,24
0,07	0,20	1,81	0,11	0,29	0,06	0,02	2,00	0,50
0,10	0,21	2,47	0,15	0,13	0,05	0,01	2,00	1,00
0,12	0,31	2,19	0,17	0,12	0,04	0,01	2,00	1,51
0,15	0,44	1,85	0,27	0,15	0,03	0,01	2,00	2,00
0,09	0,20	2,69	0,07	0,11	0,04	0,01	2,25	0,75
0,11	0,33	2,56	0,14	0,13	0,04	0,01	2,25	1,26
0,15	0,32	2,10	0,16	0,12	0,03	0,01	2,25	1,75
0,09	0,30	3,37	0,11	0,15	0,04	0,02	2,50	1,00
0,14	0,39	2,78	0,14	0,15	0,03	0,02	2,50	1,51

Tabela C.8 – Desvios padrão para a inclinação de -7° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
0,19	0,80	0,27	9,02	0,77	0,06	0,11	0,75	2,24
0,22	0,21	0,94	1,00	0,47	0,04	0,02	1,00	1,50
0,27	0,37	0,77	1,01	0,38	0,04	0,03	1,00	2,01
0,38	0,54	0,98	0,97	0,28	0,03	0,04	1,00	2,50
0,20	0,25	1,19	0,84	0,61	0,05	0,01	1,25	1,25
0,19	0,43	1,03	0,47	0,20	0,03	0,02	1,25	1,76
0,45	0,51	1,72	0,71	0,24	0,04	0,02	1,25	2,26
0,10	0,94	1,24	0,96	0,58	0,06	0,01	1,50	0,50
0,13	0,22	1,90	0,25	0,21	0,05	0,01	1,50	1,00
0,19	0,33	1,25	0,23	0,14	0,03	0,01	1,50	1,50
0,23	0,53	1,39	0,41	0,18	0,03	0,02	1,50	2,00
0,21	0,54	1,60	0,60	0,22	0,03	0,02	1,50	2,50
0,09	1,95	2,42	0,13	0,43	0,04	0,02	1,75	0,25
0,08	0,16	2,42	0,10	0,12	0,05	0,01	1,75	0,75
0,11	0,25	2,12	0,18	0,11	0,04	0,01	1,75	1,25
0,14	0,44	1,50	0,27	0,15	0,03	0,01	1,75	1,75
0,17	0,49	1,67	0,37	0,16	0,04	0,01	1,75	2,25
0,06	0,17	2,62	0,04	0,10	0,05	0,01	2,00	0,50
0,09	0,23	2,66	0,10	0,10	0,04	0,01	2,00	1,00
0,12	0,32	1,98	0,15	0,12	0,03	0,01	2,00	1,50
0,14	0,53	2,11	0,25	0,15	0,03	0,02	2,00	2,02
0,07	0,36	4,18	0,03	0,19	0,05	0,01	2,25	0,25
0,09	0,20	3,51	0,06	0,11	0,04	0,01	2,25	0,75
0,11	0,35	2,59	0,10	0,12	0,03	0,02	2,25	1,25
0,16	0,55	2,21	0,22	0,15	0,03	0,02	2,25	1,76
0,13	0,25	4,05	0,03	0,09	0,04	0,00	2,50	0,50
0,09	0,31	3,71	0,10	0,15	0,03	0,02	2,50	1,00
0,15	0,45	2,79	0,15	0,16	0,03	0,02	2,50	1,51

Tabela C.9 – Desvios padrão para a inclinação de -4° .

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
0,19	0,11	0,63	1,68	0,47	0,03	0,03	0,75	1,76
0,26	0,54	1,07	1,23	0,26	0,05	0,03	0,75	2,26
0,77	1,05	0,91	1,29	0,29	0,03	0,07	0,75	2,76
0,14	0,19	0,93	0,60	0,27	0,04	0,02	1,00	1,50
0,18	0,34	1,22	0,70	0,20	0,04	0,02	1,00	2,00
0,27	0,55	1,01	0,88	0,23	0,04	0,02	1,00	2,50
1,34	1,25	1,01	1,22	0,36	0,04	0,04	1,00	3,02
0,08	0,12	1,88	0,18	0,16	0,06	0,00	1,25	0,75
0,11	0,17	1,29	0,25	0,14	0,04	0,01	1,25	1,25
0,14	0,48	1,88	0,45	0,16	0,05	0,01	1,25	1,76
0,23	0,61	1,74	0,55	0,16	0,05	0,02	1,25	2,25
0,32	0,56	1,79	0,74	0,19	0,04	0,02	1,25	2,75
0,05	0,11	2,02	0,05	0,10	0,06	0,00	1,50	0,50
0,10	0,15	2,20	0,13	0,10	0,04	0,01	1,50	1,00
0,13	0,27	1,46	0,26	0,14	0,04	0,01	1,50	1,50
0,16	0,41	1,73	0,38	0,16	0,04	0,02	1,50	2,00
0,19	0,59	1,79	0,59	0,18	0,05	0,02	1,50	2,52
1,43	0,62	1,43	0,68	0,22	0,04	0,02	1,50	3,01
0,05	0,19	2,61	0,03	0,14	0,07	0,01	1,75	0,25
0,08	0,14	2,74	0,07	0,09	0,04	0,01	1,75	0,75
0,11	0,25	1,84	0,13	0,11	0,03	0,02	1,75	1,25
0,13	0,40	2,05	0,23	0,13	0,04	0,01	1,75	1,75
0,24	1,00	1,97	0,39	0,16	0,05	0,01	1,75	2,25
0,43	0,73	2,16	0,44	0,17	0,05	0,01	1,75	2,76
0,07	0,13	3,51	0,03	0,09	0,04	0,01	2,00	0,50
0,12	0,22	2,93	0,09	0,10	0,04	0,01	2,00	1,00
0,12	0,34	2,10	0,15	0,11	0,03	0,01	2,00	1,50
0,19	0,63	1,99	0,24	0,14	0,03	0,01	2,00	2,00
0,13	0,26	4,25	0,02	0,12	0,05	0,00	2,25	0,25
0,11	0,26	3,67	0,06	0,08	0,03	0,01	2,25	0,75
0,16	0,51	2,82	0,10	0,09	0,04	0,01	2,25	1,25
0,19	0,58	2,48	0,16	0,12	0,04	0,01	2,25	1,75
0,14	0,23	4,79	0,03	0,09	0,03	0,01	2,50	0,50
0,14	0,33	3,78	0,07	0,09	0,03	0,01	2,50	1,00
0,19	0,53	3,18	0,11	0,10	0,03	0,01	2,50	1,50

Tabela C.10 – Desvios padrão para a inclinação de 0°.

V_{TB}	V_R	$f(Hz)$	$L_B(m)$	$L_S(m)$	$\alpha_B(m)$	$\alpha_S(m)$	J_L	J_G
0,54	0,44	0,48	2,07	0,29	0,04	0,05	0,50	3,02
1,95	1,23	1,03	2,67	0,27	0,07	0,07	0,50	3,99
0,18	0,24	0,89	0,66	0,18	0,04	0,02	0,75	1,76
0,27	0,28	1,05	0,97	0,22	0,05	0,02	0,75	2,25
0,53	0,55	0,95	1,25	0,25	0,06	0,04	0,75	2,75
0,15	0,09	1,40	0,37	0,17	0,04	0,01	1,00	1,50
0,23	0,23	1,26	0,57	0,21	0,05	0,02	1,00	2,00
0,27	0,48	1,40	0,72	0,21	0,05	0,02	1,00	2,50
0,35	0,58	1,50	0,87	0,24	0,04	0,03	1,00	3,04
0,08	0,07	2,74	0,09	0,09	0,05	0,01	1,25	0,75
0,16	0,13	1,38	0,19	0,12	0,04	0,01	1,25	1,25
0,19	0,22	1,39	0,32	0,14	0,04	0,01	1,25	1,75
0,21	0,39	1,86	0,50	0,16	0,06	0,02	1,25	2,25
0,31	0,61	1,11	0,64	0,24	0,03	0,02	1,25	2,74
0,06	0,06	3,06	0,04	0,07	0,04	0,00	1,50	0,50
0,13	0,14	2,28	0,10	0,09	0,04	0,01	1,50	1,00
0,17	0,47	1,60	0,23	0,11	0,04	0,01	1,50	1,50
0,18	0,31	2,07	0,31	0,14	0,05	0,01	1,50	2,00
0,27	0,52	1,60	0,44	0,17	0,04	0,02	1,50	2,51
0,38	0,45	1,57	0,52	0,17	0,04	0,02	1,50	3,01
0,06	0,09	2,89	0,02	0,12	0,03	0,01	1,75	0,25
0,11	0,17	3,32	0,06	0,09	0,04	0,01	1,75	0,75
0,16	0,23	2,03	0,12	0,10	0,03	0,01	1,75	1,25
0,19	0,46	1,71	0,21	0,12	0,03	0,01	1,75	1,75
0,21	0,79	2,83	0,30	0,14	0,04	0,01	1,75	2,25
0,33	0,51	2,08	0,37	0,16	0,04	0,02	1,75	2,75
0,10	0,15	4,40	0,03	0,08	0,04	0,01	2,00	0,50
0,17	0,33	3,17	0,09	0,10	0,04	0,01	2,00	1,00
0,17	0,28	2,32	0,13	0,11	0,03	0,01	2,00	1,50
0,20	0,52	2,38	0,21	0,12	0,04	0,01	2,00	1,00
0,11	0,18	5,16	0,02	0,15	0,03	0,01	2,25	0,25
0,22	0,19	4,48	0,05	0,08	0,03	0,01	2,25	0,75
0,18	0,28	3,38	0,09	0,10	0,03	0,01	2,25	1,25
0,20	0,57	2,72	0,15	0,12	0,03	0,01	2,25	1,75
0,18	0,26	5,33	0,03	0,09	0,03	0,01	2,50	0,50
0,15	0,32	4,65	0,07	0,09	0,03	0,01	2,50	1,00
0,26	0,45	3,41	0,10	0,10	0,03	0,01	2,50	1,51